ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΑΡΓΙΛΙΚΩΝ ΕΔΑΦΩΝ ΒΕΛΤΙΩΜΕΝΩΝ ΜΕ ΙΠΤΑΜΕΝΗ ΤΕΦΡΑ

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΣΜΑΡΑΓΔΑ ΕΥΘΥΜΙΟΥ
Διπλ. Πολιτικός Μηχανικός

ΑΘΗΝΑ, 2019

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΑΡΓΙΛΙΚΩΝ ΕΔΑΦΩΝ ΒΕΛΤΙΩΜΕΝΩΝ ΜΕ ΙΠΤΑΜΕΝΗ ΤΕΦΡΑ

ΣΜΑΡΑΓΔΑ ΕΥΘΥΜΙΟΥ
ΔΙΠΛ. ΠΟΛΙΤΙΚΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΟΣ

Συμβουλευτική Επιτροπή:

ΜΙΧΑΛΗΣ ΚΑΒΒΑΔΑΣ, Καθηγητής Ε.Μ.Π. - Επιβλέπων

ΒΑΣΙΛΙΚΗ ΓΕΩΡΓΙΑΝΝΟΥ, Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

ΒΑΣΙΛΗΣ ΠΑΠΑΔΟΠΟΥΛΟΣ, Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π. (ε.σ.)

Υποβλήθηκε στη Σχολή Πολιτικών Μηχανικών σε επταμελή εξεταστική επιτροπή την οποία αποτελούν οι:

- **Μιχάλης Καββαδάς, Καθηγητης Ε.Μ.Π.**
- **Βασιλική Γεωργιάννου, Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.**
- **Βασίλης Παπαδόπουλος, Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π. (ε.σ.)**
- **Γεώργιος Μπουκοβάλας, Καθηγητης Ε.Μ.Π.**
- **Γεωργιος Τσιαμπάος, Καθηγητης Ε.Μ.Π.**
- **Μαρίνα Πανταζίδου, Αν. Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.**
- **Αχιλλέας Παπαδημητρίου, Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π.**

Αθήνα, 2019

Η παρούσα διδακτορική διατριβή χρηματοδοτήθηκε από το Νοέμβριο του 2012 έως το Νοέμβριο του 2016 μέσω υποτροφίας από το Ε.Λ.Κ.Ε. του Ε.Μ.Π.

.....

Η έγκριση της διδακτορικής διατριβής από την Ανώτατη Σχολή Πολιτικών Μηχανικών του Ε.Μ.Πολυτεχνείου, δεν υποδηλώνει αποδοχή των γνωμών του συγγραφέα (Ν. 5343/1932, Άρθρο 202).

…στον μέντορά μου, τον πατέρα μου

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

Πρόλογος 1
Περίληψη 2
Summary 37
Λίστα Συμβόλων 70
Κατάλογος Πινάκων 72
Κατάλογος Σχημάτων 73
1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ 87
1.1 Γενικό Υπόβαθρο 87
1.2 Τρέχοντα Θέματα Ερευνών 89
1.3 Έκταση και Στόχοι της Παρούσας Έρευνας 92
1.4 Οργάνωση της Διατριβής 95
2 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ 97
2.1 Εισαγωγή 97
2.2 Βασικές Έννοιες και Μηχανισμοί της Σταθεροποίησης με Ιπτάμενη Τέφρα 97
2.2.1 Χαρακτηρισμός Τέφρας 97
2.2.2 Τύποι και Ιδιότητες Τέφρας 99
2.2.2.1 Ορισμοί και Προδιαγραφές 99
2.2.2.2 Κατάταξη 99
2.2.2.3 Φυσικές Ιδιότητες της Τέφρας 100
2.2.2.4 Χημικές ΙδιότητεςτηςΤέφρας 100
2.2.3 Αντιδράσεις Τέφρας - Εδάφους 101
2.2.4 Δομή και Μικροδομή Βελτιωμένης Αργίλου 102
2.3 Τεχνητή Σιμέντωση για Βελτίωση Μαλακών Αργίλων 106
2.4 Επικρατέστεροι Παράγοντες Ελέγχου των Χαρακτηριστικών Σκλήρυνσης Αργίλου Βελτιωμένης με Ιπτάμενη Τέφρα 109
2.4.1 Χαρακτηριστικά Σταθεροποιητικών Υλικών 109
2.4.1.1 Γενικά 109
2.4.1.2 Τσιμέντο 112
2.4.1.3 Άσβεστος 112
2.4.1.4 Ιπτάμενη Τέφρα 113
2.4.2 Χαρακηριστικά του Εδάφους 114
2.4.3 Συνθήκες Ανάμιξης 116
2.4.4 Συνθήκες Ωρίμανσης 117
2.5 Εργαστηριακές Έρευνες Βελτιωμένων Εδαφών 119
2.5.1 Μεταβολές των Βασικών Ιδιοτήτων ενός Βελτιωμένου Εδάφους. 119

2.5.2 Φυσικά Χαρακτηριστικά του Βελτιωμένου Εδάφους....120
2.5.2.1 Μεταβολή της Υγρασίας....120
2.5.2.2 Πλαστικότητα....121
2.5.2.3 Κοκκομετρική Διαβάθμιση....122
2.5.3 Μηχανικά Χαρακτηριστικά Βελτιωμένου Εδάφους....123
2.5.3.1 Χαρακτηριστικά Διαπερατότητας....123
2.5.3.2 Χαρακτηριστικά Συμπιεστότητας....124
2.5.3.3 Σχέση Τάσεων Παραμορφώσεων....127
2.5.3.4 Πίεση Πόρων....129
2.5.3.5 Διατμητικές Παράμετροι (c΄ και φ΄) και Περιβάλλουσα Αστοχίας....130
2.5.4 Τριαξονικές Δοκιμές σε Συνθήκες Θλίψης και Εφελκυσμού....132
2.5.5 Ορισμός της Διαρροής και της Περιβάλλουσας Διαρροής για Σιμεντωμένα Εδάφη....134
2.5.6 Χαλάρωση και Συμπεριφορά μετά τη Μέγιστη Αντοχή Τεχνητά Σιμεντωμένων Εδαφών....147
2.6 Καταστατικά Προσομοιώματα σε Εδαφικά Υλικά με Δομή....152
2.7 Σημαντικά Θέματα Έρευνας....158
2.7.1 Παρουσίαση των Θεμάτων....158
2.7.2 Έκταση Εργασιών της Παρούσας Έρευνας....158
3 ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ & ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ....159
3.1 Εισαγωγή....159
3.2 Υλικά....160
3.2.1 Άργιλος Αγίου Στεφάνου....160
3.2.2 Ιδιότητες Τέφρας Πτολεμαίδας....161
3.3 Εξεταζόμενες Μεταβλητές....163
3.4 Παρασκευή Δοκιμίων και Διαδικασία Δοκιμής....165
3.4.1 Ανάμιξη και Παρασκευή Δοκιμίων Μίγματος Εδάφους και Τέφρας....165
3.4.2 Εξοπλισμός Εργαστηριακών Δοκιμών....168
3.4.2.1 Δοκιμές Στερεοποίησης σε Συμπιεσόμετρο....168
3.4.2.2 Τριαξονικές Δοκιμές....169
3.4.2.2.1 Τριαξονικές Κυψέλες....171
3.4.2.2.2 Βάθρο Βάσης Τριαξονικής Κυψέλης....174
3.4.2.2.3 Ρυθμιστές Πίεσης/Όγκου....174
3.4.2.2.4 Σύστηματα Ελέγχου....175
3.4.2.2.5 Απόκτηση Δεδομένων....176
3.4.2.2.6 Βαθμονόμηση....177
3.4.4 Πρόγραμμα Εργαστηριακών Δοκιμών....178
3.4.4.1 Διαδικασία δοκιμής και συσκευές....178

3.4.4.2 Προσδιορισμός Φυσικών Χαρακτηριστικών και Δεικτών....179
3.4.4.3 Προσδιορισμός Αντοχής και Συμπιεστότητας....180
3.4.4.3.1 Δοκιμή Στερεοποίησης σε Συμπιεσόμετρο....180
3.4.4.3.2 Δοκιμή Αστράγγιστης Ανεμπόδιστης Θλίψης....180
3.4.4.3.3 Δοκιμή Ισότροπης Στερεοποίησης....180
3.4.4.3.4 Δοκιμή τριαξονικής Θλίψης και Εφελκυσμού....181
3.4.4.4 Προσδιορισμός Χαρακτηριστικών Μικροδομής....181
3.4.4.4.1 Ανάλυση Κόνεως με Περίθλαση Ακτίνων Χ (XRPD)....181
3.4.4.4.2 Ανάλυση με Πολωτικό Μικροσκόπιο....182
4 ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑΣ ΔΟΜΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΑΠΟΔΟΜΗΣΗΣ ΤΗΣ ΒΕΛΤΙΩΜΕΝΗΣ ΑΡΓΙΛΟΥ....184
4.1 Εισαγωγή....184
4.2 Βασικά Φυσικά Χαρακτηριστικά....184
4.2.1 Υγρασία....184
4.2.2 Όρια Atterberg....188
4.2 Χαρακτηριστικά Συμπιεστότητας της Βελτιωμένης Αργίλου....193
4.2.1 Σχέση Τάσης – Λόγου Κενών....194
4.2.1.1 Επίδραση του Χρόνου Ωρίμανσης....194
4.2.1.2 Επίδραση Ποσοστού Τέφρας....198
4.2.2 Δείκτες Συμπίεσης και Φαινόμενος Δείκτης Συμπίεσης....203
4.2.3 Ορισμός Κριτηρίου Αναζύμωσης....213
4.3 Διατμητική Συμπεριφορά Βελτιωμένης Αργίλου....216
4.3.1 Χαρακτηριστικά αντοχής και Παραμόρφωσης σε Δοκιμή Ανεμπόδιστης Θλίψης....216
4.3.1.1 Επίδραση του Χρόνου Ωρίμανσης για Διάφορα Ποσοστά Τέφρας....219
4.3.1.2 Επίδραση του Ποσοστού Τέφρας σε Διάφορους Χρόνους Ωρίμανσης....224
4.4 Επιλογή Μιγμάτων Βελτιωμένης Αργίλου για το Τελικό Στάδιο Έρευνας και τη Διατύπωση Πλαισίου Συμπεριφοράς....232
5 ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΜΙΚΡΟΔΟΜΗΣ....234
5.1 Εισαγωγή....234
5.2 Σχεδιασμός Προγράμματος Δοκιμών....234
5.2.1 Ιδιότητες Υλικών....234
5.3 Αποτελέσματα και Ανάλυση....235
5.3.1 Ανάλυση με Περίθλαση Ακτίνων Χ (XRD)....235
5.3.2 Ανάλυση με Πολωτικό Μικροσκόπιο (PLM)....236
5.3.3 Η επίδραση της Αναπτυσσόμενης Μικροδομής στη Μηχανική Συμπεριφορά Αργίλων Βελτιωμένων με Τέφρα....240

6 ΠΛΑΙΣΙΟ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΣΤΗ ΔΙΑΡΡΟΗ ΚΑΙ ΣΧΕΣΗ ΤΑΣΕΩΝ-ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΓΙΑ ΑΡΓΙΛΟ ΒΕΛΤΙΩΜΕΝΗ ΜΕ ΤΕΦΡΑ 241
6.1 Εισαγωγή 241
6.2 Εκτελεσθείσες Δοκιμές 242
6.3 Διορθώσεις Μετρήσεων Τριαξονικής Δοκιμής 245
6.3.1 Διόρθωση Επιφάνειας 245
6.3.2 Διόρθωση Μεμβράνης 246
6.4 Τριαξονική Δοκιμή Ισότροπης Στερεοποίησης με η=0 248
6.5 Τριαξονική Δοκιμή Θλίψης και Εφελκυσμούμε η≠0 251
6.5.1 Πρόγραμμα και Διαδικασία Δοκιμών 251
6.5.2 Αποτελέσματα Δοκιμών 252
6.6 Συμπεριφορά Διαρροής και Αστοχίας του Εδαφικού Υλικού 254
6.6.1 Γραφικές Μέθοδοι Εκτίμησης Τάσεων Διαρροής και Αστοχίας 254
6.6.2 Διαγράμματα Τάσεων – Παραμορφώσεων 292
6.7 Μορφή Αστοχίας 297
6.7.1 Περιβάλλουσες Αστοχίας σε Δοκιμές Θλίψης και Εφελκυσμού 297
6.7.2 Μηχανισμός Αστοχίας σε Διάτμηση και Κινητοποίηση Συνοχής και Τριβής 299
6.8 Περιβάλλουσες Διαρροής : Προσδιορισμός και Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά 301
7 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ 307
7.1 Συμπεράσματα 307
7.1.1 Μικροδομική και Βασική Μηχανική Συμπεριφορά της Βελτιωμένης Αργίλου 307
7.1.2 Πλαίσιο Συμπεριφοράς Βελτιωμένης με Ιπτάμενη Τέφρα Αργίλου Υψηλής Πλαστικότητας 309
7.2 Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα 311
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 314

Πρόλογος

Η διδακτορική διατριβή με τίτλο «Εργαστηριακή Διερεύνηση της Μηχανικής Συμπεριφοράς Αργιλικών Εδαφών Βελτιωμένων με Ιπτάμενη Τέφρα» εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Θεμελιώσεων του Τομέα Γεωτεχνικής της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Η πραγματοποίησή της έγινε δυνατή με τη βοήθεια και τη συμβολή πολλών προσώπων.

Πρωτίστως, ευχαριστώ θερμά τον Καθηγητή Μιχάλη Καββαδά, που δέχτηκε να με αναλάβει για να πραγματοποιήσω μαζί του τη διδακτορική διατριβή μου και ο οποίος από την πρώτη στιγμή με «αγκάλιασε» και κατάλαβε το ενδιαφέρον μου για την πρακτική/πειραματική πλευρά της εδαφομηχανικής.

Στη συνέχεια, θα ήθελα να ευχαριστήσω την καθηγήτρια Βασιλική Γεωργιάννου για τις επιστημονικές παρατηρήσεις της που έθιξαν καίρια σημεία της εργασίας. Επιπρόσθετα, πέρα από τις ερευνητικές της συμβουλές, δε θα ξεχάσω και τις φιλικές συζητήσεις μαζί της.

Τον Αναπλ. Καθηγητή Βασίλη Παπαδόπουλο ο οποίος ήταν πάντα υποστηρικτικός στις διάφορες αποφάσεις που έπρεπε να παρθούν για την συνέχιση και ολοκλήρωση αυτής της έρευνας.

Ιδιαίτερα θέλω να ευχαριστήσω τον Επικ. Καθηγητή Εμμανουήλ Στειακάκη της Σχολής Μηχανικών Ορυκτών Πόρων στο Πολυτεχνείο Κρήτης για την προσωπική και επιστημονική βοήθεια που απλόχερα μου έδωσε καθώς και τις πολύτιμες συμβουλές και γνώσεις του σε σοβαρά εργαστηριακά ζητήματα.

Δεν θα μπορούσα να ξεχάσω και να υπερ-ευχαριστήσω τον κ. Γιώργο Πυργιώτη, τεχνικό και «μάγο» του Εργαστηρίου Θεμελιώσεων για την τεράστια στήριξη που μου προσέφερε όλα αυτά τα χρόνια, για τις επικοδομητικές συζητήσεις αλλα και αψιμαχίες μας. Σίγουρα, έμαθα πολλά κοντά του.

Τέλος, θέλω να πω ένα μέγαλο ευχαριστώ στον ομότιμο Καθηγητή Ανδρέα Αναγνωστόπουλο για την ισχυρή και πολύτιμη παρουσία του σε όλη την πορεία αυτής της έρευνας. Η συνεχής υποστήριξή του ήταν μια σταθερά που χρειαζόμουν.

Περίληψη

Σκοπός

Αντικείμενο της διδακτορικής διατριβής αποτελεί η διερεύνηση της επιρροής προσθήκης ιπτάμενης τέφρας (προϊόντος της καύσης λιγνίτη στις θερμικές μονάδες παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος της ΔΕΗ) σε αργιλικά υλικά, με έμφαση στην προσθήκη ιπτάμενης τέφρας σε μία άργιλο υψηλής πλαστικότητας. Εξετάζεται πειραματικά η επιρροή του ποσοστού της τέφρας που προστίθεται και του χρόνου ωρίμανσης μετά την προσθήκη της τέφρας στις μηχανικές ιδιότητες του υλικού.

Η ιπτάμενη τέφρα (Ι.Τ.) είναι υδραυλική κονία, δηλαδή λεπτομερές υλικό στο οποίο η προσθήκη νερού προκαλεί χημικές αντιδράσεις που έχουν ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη δεσμών σιμέντωσης (δέσης) μεταξύ των κόκκων της κονίας, ή μεταξύ των κόκκων της κονίας και κάποιου αδρανούς υλικού με το οποίο έχει αναμιχθεί η κονία (εν προκειμένω η άργιλος). Στην περίπτωση προσθήκης ιπτάμενης τέφρας στην άργιλο, λόγω της σιμέντωσης αλλάζουν τα φυσικά και μηχανικά χαρακτηριστικά της αργίλου, και συγκεκριμένα μειώνεται η πλαστικότητα, αυξάνει η αντοχή και μειώνεται η παραμορφωσιμότητα. Εν γένει, η μηχανική συμπεριφορά των γεωυλικών εξαρτάται από την τρέχουσα κατάσταση (ενεργές τάσεις και ειδικός όγκος) και από την δομή (*structure*). Η δομή του υλικού επηρεάζεται από την ιστορία της φόρτισης (*stress history*) και τη δέση (*bonding*). Ως δέση νοείται η τυχόν αυξημένη συνάφεια (*cohesion*) μεταξύ των κόκκων, πέραν αυτής που δικαιολογεί η τρέχουσα κατάσταση και η ιστορία φόρτισης του υλικού. Οι συνήθεις άργιλοι δεν έχουν δέση, καθώς η δομή τους οφείλεται αποκλειστικά στην ιστορία της φόρτισης (βαθμός προστερεοποίησης). Αντιθέτως, η σιμέντωση (*cementation*) που οφείλεται στην προσθήκη ιπτάμενης τέφρας συνεισφέρει σε αλλαγή (αύξηση) της δομής μέσω αύξησης της δέσης. Η επιρροή της δομής στις περισσότερες παραμέτρους της μηχανικής συμπεριφοράς των εδαφικών υλικών είναι ποιοτικώς παρόμοια, ανεξαρτήτως του αιτίου δημιουργίας της δομής (ιστορία φόρτισης ή δέσης). Για παράδειγμα, η αυξημένη αντοχή και μειωμένη παραμορφωσιμότητα αργίλων μπορεί να οφείλεται είτε στην ιστορία φόρτισης (προστερεοποίηση) είτε σε σιμέντωση (λόγω προσθήκης ιπτάμενης τέφρας).

Σε σχέση με τα ανωτέρω, στην παρούσα διατριβή εξετάζονται:

i. Πώς επιδρά το ποσοστό προσθήκης ιπτάμενης τέφρας στην φυσικοχημική συμπεριφορά, όπως η μικροδομή, τα όρια Atterberg, κλπ.

ii. Πώς επιδρά το ποσοστό προσθήκης ιπτάμενης τέφρας στην μηχανική συμπεριφορά, όπως αντοχή, συμπιεστότητα (εν γένει παραμορφωσιμότητα) και διαπερατότητα. Έμφαση δίνεται στην τάση που προκαλεί αλλαγή (μείωση) της παραμορφωσιμότητας (τάση αρχικής διαρροής) λόγω αποδόμησης των δεσμών σιμέντωσης του υλικού υπό διάφορες εντατικές καταστάσεις, με προσδιορισμό της περιβάλλουσας επιφάνειας των σημείων αρχικής διαρροής.

iii. Πώς επηρεάζει ο χρόνος ωρίμανσης των δεσμών σιμέντωσης την μηχανική συμπεριφορά του υλικού. Έμφαση δίνεται στην συμπεριφορά του υλικού μετά την πρακτικώς πλήρη ανάπτυξη των δεσμών σιμέντωσης, που για την ιπτάμενη τέφρα απαιτεί ωρίμανση μερικών μηνών.

Μέθοδος

Γενικά

Για την υλοποίηση των στόχων της διδακτορικής διατριβής αναμίχθηκε μια άργιλος υψηλής πλαστικότητας με διάφορα ποσοστά ιπτάμενης τέφρας. Τα μίγματα αφέθηκαν να ωριμάσουν επί διάφορες χρονικές περιόδους και στη συνέχεια εκτελέσθηκαν εργαστηριακές δοκιμές επί δοκιμίων εκ των δειγμάτων.

Επιλογή των υλικών

Άργιλος

Η άργιλος που επιλέχθηκε για αυτή την έρευνα ελήφθη από φρέατα και αποθέσεις υλικών από εκσκαφές στον Άγιο Στέφανο της ανατολικής Αττικής. Ειδικότερα, αυτή η άργιλος χρησιμοποιείται για την παραγωγή οπτόπλινθων της τοπικής κεραμοποιίας «Φλεσσιόπουλου». Συγκρίνοντας τα φυσικά χαρακτηριστικά και τις ιδιότητες διαφορετικών φυσικών αργίλων από την περιοχή της Χαλκίδας και της Αττικής, αποφασίσθηκε ότι η πλέον κατάλληλη για αυτή την έρευνα είναι η άργιλος του Αγίου Στεφάνου, καθώς είναι υψηλής πλαστικότητας, γεγονός το οποίο αποτελεί βασικό

στοιχείο για τον προσδιορισμό του πλαισίου συμπεριφοράς μίας ελαφρά σιμεντωμένης αργίλου.

Από αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν στο Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών (ΙΓΜΕ) υπό την εποπτεία του γενικού διευθυντή κ. Γ. Οικονόμου, η ορυκτολογική σύνθεση του αργιλικού δείγματος χαρακτηρίζεται από γενικά υψηλή περιεκτικότητα σε ιλλίτη (περίπου 20-30%) και χαμηλή περιεκτικότητα σε καολινίτη, χλωρίτη και μοντμοριλλονίτη. Επίσης βρέθηκε υψηλό ποσοστό ανθρακικών ορυκτών στα φρέατα από τα οποία είχαν ληφθεί τα δείγματα, με μέση περιεκτικότητα 17.1%. Αντίθετα, το ποσοστό των οργανικών είναι χαμηλό και κυμαίνεται μεταξύ 1.5% και 4%.

Οι βασικές ιδιότητες της αργίλου Αγίου Στεφάνου από δοκιμές που εκτελέστηκαν στο Εργαστήριο Θεμελιώσεων του ΕΜΠ, συνοψίζονται στον Πίνακα 1.

Ιδιότητα	**Τιμή**	**Ιδιότητα**	**Τιμή**
Όριο Υδαρότητας, LL (%)	72	Κοκκομετρική Διαβάθμιση:	
Όριο Πλαστικότητας, PL (%)	26	Άμμος (%)	8
Δείκτης Πλαστ/τητας, PI (%)	46	Ιλύς (%)	23
Επί τόπου Φυσ. Υγρ., w (%)	31	Άργιλος (%)	69
Δείκτης Υδαρότητας, I_L	0.11	Υγρ. Φαιν. Βάρος, γ_w (kN/m^3)	15.1
Αρχικός Λόγος Κενών, e_o	2.29	Ξηρ. Φαιν. Βάρος, γ_d (kN/m^3)	8.4
Ειδικό Βάρος Στερεών, Gs	2.78		

Πίνακας 1 – Βασικές ιδιότητες αργίλου Αγίου Στεφάνου

Ιπτάμενη τέφρα

Ο όρος "ιπτάμενη τέφρα" συχνά χρησιμοποιείται για να περιγράψει οποιοδήποτε υλικό από λεπτόκοκκα σωματίδια το οποίο κατακάθεται από τα αέρια καπνοδόχων βιομηχανικών καμίνων όπου καίονται στερεά καύσιμα. Ο χαρακτηρισμός της τέφρας με όρους σύνθεσης, ορυκτολογίας, χημείας επιφανειών και αντιδρασιμότητας είναι θεμελιώδους σημασίας για την ανάπτυξη διάφορων εφαρμογών της τέφρας. Οι ποζολάνες κατά ASTM-C618-93 είναι πυριτιούχα και αργιλιούχα υλικά (Si, Al), τα οποία αν και από μόνα τους διαθέτουν μικρή ή καθόλου συγκολλητική αξία (ικανότητα σιμέντωσης), ωστόσο σε πολύ λεπτόκοκκη μορφή και με παρουσία υγρασίας, αντιδρούν χημικά με το υδροξείδιο του ασβεστίου, σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, και σχηματίζουν ενώσεις με ιδιότητες σιμέντωσης (ASTM-C618-80). Σημειώνουμε εδώ ότι *ο όρος* ***σιμέντωση*** *χρησιμοποιείται για να αποδώσει τη φύση*

των συγκολλητικών ιδιοτήτων του τσιμέντου, ασθενέστερων ή ισχυρότερων, χωρίς να αναφέρεται αποκλειστικά στο τσιμέντο.

Οι ιπτάμενες τέφρες, οι οποίες έχουν την ικανότητα να αντιδρούν με το $Ca(OH)_2$ σε θερμοκρασίες δωματίου, δύνανται να δρούν ως ποζολανικά υλικά. Η ποζολανική τους δράση αποδίδεται στα οξείδια SiO_2 και Al_2O_3 σε άμορφη (μη κρυσταλλική) κατάσταση. Η Προδιαγραφή ASTM-C618-93 αναφέρεται σε ιπτάμενη τέφρα, ακατέργαστη φυσική ποζολάνη ή τεχνητά ασβεστούχα φυσική ποζολάνη, για χρήση ως ορυκτού πρόσμικτου σε σκυρόδεμα τσιμέντου Πόρτλαντ.

Το ASTM-C618-93 κατατάσσει τις ιπτάμενες τέφρες, από καύση άνθρακα, σε δύο κατηγορίες : Κατηγορία F και Κατηγορία C. Οι ιπτάμενες τέφρες Κατηγορίας F παράγονται κανονικά από καύση ανθρακίτη ή ασφαλτούχου γαιάνθρακα. Οι ιπτάμενες τέφρες Κατηγορίας C παράγονται από καύση λιγνίτη ή υπασφαλτούχου γαιάνθρακα. Κατά ASTM, οι ιπτάμενες τέφρες Κατηγορίας C (ιπτάμενες τέφρες υψηλής περιεκτικότητας σε άσβεστο) τυπικά περιέχουν CaO περισσότερο από 10% έως και 40%, και οι Κατηγορίας F (ιπτάμενες τέφρες χαμηλής περιεκτικότητας σε άσβεστο) γενικά περιέχουν λιγότερο από 10% CaO. Λόγω της υψηλής περιεκτικότητας σε CaO, οι ιπτάμενες τέφρες Κατηγορίας C συμμετέχουν τόσο σε αντιδράσεις σιμέντωσης όσο και σε ποζολανικές. Ενώ οι ιπτάμενες τέφρες Κατηγορίας F, στη διάρκεια της διαδικασίας ενυδάτωσης, συμμετέχουν κυρίως σε ποζολανική αντίδραση. Συνεπώς οι ιπτάμενες τέφρες Κατηγορίας C κατατάσσονται ως πρόσμικτα/πρόσθετα ποζολανικά και με ιδιότητες σιμέντωσης, και οι ιπτάμενες τέφρες Κατηγορίας F ως κανονικές ποζολάνες για χρήση στο σκυρόδεμα.

Τα περισσότερα λιγνιτικά κοιτάσματα της Ελλάδας συναντώνται στη λεκάνη Φλώρινας-Πτολεμαΐδας-Κοζάνης. Στη μεγάλη αυτή περιοχή της Βόρειας Ελλάδας, γίνεται εντατική εκμετάλλευση με τη μέθοδο ανοικτής εξόρυξης και τροφοδοτούνται οι γειτονικοί ατμοηλεκτρικοί σταθμοί (ΑΗΣ) παραγωγής ενέργειας.

Η ελληνική τέφρα, η οποία παράγεται στους ΑΗΣ της Πτολεμαΐδας και χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα έρευνα, είναι τύπου C. Αυτός ο συγκεκριμένος τύπος τέφρας περιέχει υλικό λεπτότερο από τα 45μm σε ποσοστό ≥55%, με το υπόλοιπο υλικό να έχει διαβάθμιση 45-90μm. Επίσης περιέχει ύαλο από την οποία αποτελείται το μεγαλύτερο μέρος της μάζας της, ενώ επικρατούν φαινοκρύσταλλοι ορυκτών όπως χαλαζίας, άστριοι, γκελενίτης, ανυδρίτης, οξείδιο ασβεστίου, πορτλανδίτης και χλωρίτης.

Η ιπτάμενη τέφρα Πτολεμαΐδας (ΙΤΠ) αποτελείται από λεπτά σωματίδια, σε μορφή κόνης, κυρίως σφαιρικού σχήματος, πλήρη ή κενά, και κατά πλειονότητα σε

υαλώδη (άμορφη) κατάσταση. Η κοκκομετρική διαβάθμιση της ΙΤΠ σύμφωνα με την πρότυπη μέθοδο ASTM E11 που ακολουθήθηκε στο Εργαστήριο Θεμελιώσεων είναι γενικά παρόμοια με της ιλύος (δηλ. υλικό διερχόμενο από το κόσκινο No. 200, 0.075 mm). Το ειδικό βάρος στερεών της ΙΤΠ που χρησιμοποιήθηκε είναι 2.3, ενώ η ειδική της επιφάνεια είναι 500-600 m^2/kg μετά από αναλύσεις που έγιναν στο ΙΓΜΕ υπό την εποπτεία του γενικού διευθυντή κ. Γ. Οικονόμου.

Ανάμιξη της αργίλου με τέφρα

Τα δοκίμια μη βελτιωμένης αργίλου του Αγίου Στεφάνου παρασκευάσθηκαν από τη φυσική υγρή τους κατάσταση χωρίς να προξηρανθούν. Οι Lee κ.ά. (2005) παρατήρησαν ότι η προξήρανση προκαλεί μεγάλες μη αναστρέψιμες μεταβολές στα όρια Atterberg της αργίλου, που υποδηλώνουν χημικές μεταβολές. Το επιλεγμένο συνδετικό υλικό, δηλαδή η τέφρα Πτολεμαΐδος, λειοτριβήθηκε σε λεπτή σκόνη. Το υλικό της λειοτρίβησης αποξηράνθηκε σε φούρνο και ελήφθη το διερχόμενο από το κόσκινο No. 40, ώστε να επιτευχθεί ομοιόμορφη σύνδεσή του με τη μάζα του εδάφους.

Για δεδομένη περιεκτικότητα συνδετικού υλικού, η διατμητική αντοχή του βελτιωμένου εδάφους εξαρτάται από τη συνολική υγρασία της αργίλου. Όμως, υφίσταται μία βέλτιστη υγρασία της αργίλου, στην οποία η διατμητική αντοχή είναι μέγιστη (Lorenzo κ.ά., 2006). Η βέλτιστη υγρασία της αργίλου είναι η συνολική υγρασία της αργίλου στην οποία επιτυγχάνεται η μέγιστη αντοχή. Η συνολική υγρασία της αργίλου (βελτιωμένης με τέφρα), περιλαμβάνει τη φυσική υγρασία της μη βελτιωμένης αργίλου, την υγρασία που προστίθεται κατά την αναζύμωση της αργίλου και την υγρασία που προστίθεται κατά την ανάμιξη της τέφρας. Αυτή η συνολική υγρασία του μίγματος αργίλου-ύδατος-τέφρας εκφράζεται ως ποσοστό επί του ξηρού βάρους της αργίλου. Αντίστοιχος ορισμός της συνολικής υγρασίας του μίγματος έχει χρησιμοποιηθεί και από τους Lorenzo και Bergado (2004). Η περιεκτικότητα σε τέφρα στην παρούσα έρευνα εκφράζεται ως λόγος του βάρους της ξηράς τέφρας προς το άθροισμα του συνολικού βάρους του υγρού εδάφους και του βάρους του συνολικά επιπλέον προστιθέμενου νερού στο μίγμα.

Για τον προσδιορισμό της βέλτιστης υγρασίας των βελτιωμένων με ιπάμενη τέφρα δειγμάτων, εκτελέστηκαν δοκιμές με υγρασία κυμαινόμενη μεταξύ 1.2 και 1.6 φορές το όριο υδαρότητας, ανάλογα με την ποσότητα της τέφρας που προστέθηκε στο μίγμα εδάφους-ύδατος.

Τα μίγματα εδάφους–τέφρας παρασκευάσθηκαν από τον πολτό της αναζυμωμένης αργίλου και την κονιοποιημένη τέφρα. Ένα ποσοστό της καθορισμένης ποσότητας ύδατος προστέθηκε καταρχάς στην άργιλο του Αγίου Στεφάνου και αναμίχθηκε επιμελώς στον αναδευτήρα του ΕΜΠ ώστε να ληφθεί ο πολτός αργίλου. Στη συνέχεια η επιλεγμένη ποσότητα τέφρας και η υπόλοιπη ποσότητα ύδατος προστέθηκαν στον πολτό της αργίλου ώστε να επιτευχθεί μία πλήρης και ομοιόμορφη ανάμιξη. Η όλη διαδικασία ανάμιξης διαρκούσε μόνον 15 λεπτά, ώστε να αποφευχθεί απώλεια της τελικής υγρασίας λόγω σκλήρυνσης του μίγματος αργίλου – τέφρας. Εργαστηριακές μελέτες που έχουν γίνει με Ι.Τ. έδειξαν ότι η διάρκεια ανάμιξης του συνολικού τελικού πολτού 10-15 λεπτών με κατάλληλες συνθήκες θερμοκρασίας και υγρασίας προλαμβάνουν την ανάπτυξη χημικής δραστικότητας που αποδίδεται στο φαινόμενο συσσωμάτωσης και καταστροφής της μακροσκοπικής δομής και της παραγωγής ένυδρων προϊόντων με υψηλότερες μηχανικές αντοχές.

Αρχική στερεοποίηση και παραγωγή δειγμάτων

Το κάθε βελτιωμένο μίγμα (πολτός) τοποθετήθηκε σε μήτρα τύπου Proctor ανοξείδωτου χάλυβα με άκαμπτα τοιχώματα, διαμέτρου 150mm και ύψους 120mm. Και στα δύο άκρα της μήτρας τοποθετήθηκαν χάρτινα φίλτρα σε επαφή με το δοκίμιο, τα οποία καλύφθηκαν με διάτρητη μεταλλική πλάκα για να επιτρέπεται η διαφυγή του παγιδευμένου αέρα και της περίσσειας ύδατος στη διάρκεια της προστερεοποίησης και της περιόδου ωρίμανσης.

Μετά την παρασκευή του μίγματος (πολτού) και την τοποθέτησή του στη μεταλλική μήτρα, εφαρμόστηκε σε αυτό σταθερή κατακόρυφη τάση 50 kPa ώστε να σταθεροποιηθεί το μίγμα, να εκδιωχθεί ο παγιδευμένος στη μάζα του μίγματος αέρας, και να αυξηθεί η ομογένεια του μίγματος. Όταν ολοκληρώθηκε το στάδιο της προστερεοποίησης, το οποίο χρονικά δεν είναι ίδιο για όλα τα μίγματα αλλά διαρκούσε περί τις 14 ημέρες, η βελτιωμένη άργιλος μαζί με τη μήτρα εμβαπτίστηκαν σε δεξαμενή γεμάτη με απεσταγμένο νερό, για μία περίοδο ωρίμανσης 28 ημερών. Στη συνέχεια η βελτιωμένη άργιλος αφαιρέθηκε από τη μήτρα, περιτυλίχθηκε προσεκτικά και τοποθετήθηκε σε θάλαμο σταθερής υγρασίας για περαιτέρω ωρίμανση και για να χρησιμοποιηθεί για τη μόρφωση δοκιμίων για μονοδιάστατη στερεοποίηση και τριαξονικές δοκιμές.

Ποσοστά ιπτάμενης τέφρας – υγρασίας και χρόνος ωρίμανσης των δειγμάτων

Σκοπός αυτής της έρευνας δεν ήταν να προσδιορίσει τη φυσικοχημική και μικροδομική συμπεριφορά των ελαφρά σιμεντωμένων αργίλων, αλλά να ερευνήσει, αξιολογήσει και επεξηγήσει την μηχανική συμπεριφορά αυτών με την εκτέλεση εργαστηριακών δοκιμών. Συνεπώς, ο κύριος στόχος των δοκιμών ήταν να διερευνήσει την μηχανική συμπεριφορά αργίλου βελτιωμένης με τέφρα υπό διάφορες συνθήκες τριαξονικής φόρτισης, ώστε να προκύψει η βάση για το πλαίσιο συμπεριφοράς των ελαφρά σιμεντωμένων αργίλων. Για το λόγο αυτό στο πρόγραμμα των δοκιμών χρησιμοποιήθηκαν διάφορες τιμές περιεκτικότητας σε τέφρα - υγρασία και χρόνου ωρίμανσης των μιγμάτων ώστε να βρεθεί και μελετηθεί εκτενέστερα η βέλτιστη αναλογία υγρασίας – ιπτάμενης τέφρας στον βέλτιστο χρόνο ωρίμανσης. Αυτός ο περιορισμός για τεχνητά υλικά βελτιωμένα με ιπτάμενη τέφρα οφείλεται κυρίως στο γεγονός ότι η Ι.Τ. ως συνδετικό υλικό είναι σχετικά μικρής αποτελεσματικότητας, καθώς επίσης είναι καλά γνωστή για τον αργό ρυθμό σκλήρυνσης μετά την αρχική πήξη και την εργασιμότητα του μίγματος που προκύπτει ανάλογα με την ποσότητα που προστίθεται στο εδαφικό υλικό. Οι αντιδράσεις ενυδάτωσης επιτελούνται με ταχύτερο ρυθμό από τις ποζολανικές αντιδράσεις της Ι.Τ. και συμβαίνουν κυρίως στο χώρο μεταξύ των συμπλεγμάτων των σωματιδίων της αργίλου σχηματίζοντας συσσωματώματα περικλεισμένα από πολτό τέφρας (Croft, 1967, Bergado κ.ά., 1996). Η προστιθέμενη ποσότητα ύδατος σκοπό είχε τη δημιουργία ομοιόμορφου σχετικά υδαρούς πολτού του μίγματος αργίλου και τέφρας. Η επιλογή διάφορων αναλογιών μίξης αργίλου και τέφρας σκοπό είχε να διερευνηθεί η συμπεριφορά του μίγματος της υψηλής πλαστικότητας αργίλου με την τέφρα όσον αφορά την δημιουργία δομής. Μετά την παρασκευή τους και την φόρτιση των δειγμάτων με κατακόρυφη τάση 50 kPa, η περίοδος ωρίμανσης έφθασε μέχρι και τις 730 ημέρες.

Για να διερευνηθεί η συσχέτιση χρόνου ωρίμανσης, σταθεροποίησης της αντοχής, συμπιεστότητας και σχέσης τάσεων-παραμορφώσεων της βελτιωμένης με τέφρα αργίλου του Αγίου Στεφάνου, πραγματοποιήθηκε ένας πρώτος κύκλος εργαστηριακών δοκιμών όπου χρησιμοποιήθηκαν 7 διαφορετικά μίγματα με περιεκτικότητες 4% έως 25% σε τέφρα και 82% έως 115% σε συνολική υγρασία. Η συνολική αυτή υγρασία, για λόγους ονοματοδοσίας των μιγμάτων, είναι εκφρασμένη επί του ξηρού βάρους της αργίλου μόνον, ενώ η περιεκτικότητα σε ξηρά τέφρα είναι εκφρασμένη ως ποσοστό επί του βάρους του πολτού της αργίλου (ξηρό βάρος αργίλου + συνολικό βάρος ύδατος του τελικού μίγματος). Οι αναλογίες εδάφους-

ύδατος-τέφρας, όπως επεξηγήθηκαν προηγουμένως, για τα διάφορα μίγματα συνοψίζονται στον Πίνακα 2, καθώς επίσης και το είδος των δοκιμών που εκτελέστηκαν σε αυτή την έρευνα. Η εκτίμηση της αντοχής, της συμπιεστότητας και των βασικών ιδιοτήτων των 7 διαφορετικών μιγμάτων έγινε σε διάφορες περιόδους ωρίμανσης (14, 28, 56, 84, 112, 168, 224, 365 και 730 ημέρες)

Μίγμα (ε:υ:τ)	**Συνολική Υγρασία (%)**	**Τέφρα (%)**	**Χρόνος Ωρίμανσης (ημέρες)**	**Δοκιμές που εκτελέσθηκαν στην παρούσα έρευνα για κάθε μίγμα**
ΑΑΣ-80-00	80	0	14~365	Φυσικά Χαρακτηριστικά, 1DCT, UU, ICT, CIDC, PLM
ΑΑΣ-82-04	82	4	14~365	Φυσικά Χαρακτηριστικά, 1DCT, UU
ΑΑΣ-85-06	85	6	14~365	Φυσικά Χαρακτηριστικά, 1DCT, UU
ΑΑΣ-87-08	87	8	14~365	Φυσικά Χαρακτηριστικά, 1DCT, UU
ΑΑΣ-90-10	90	10	14~730	Φυσικά Χαρακτηριστικά, 1DCT, UU, ICT, CIDC, CIDE, PLM, XRD
ΑΑΣ-95-15	95	15	14~730	Φυσικά Χαρακτηριστικά, 1DCT, UU, ICT, CIDC, CIDE, PLM, XRD
ΑΑΣ-115-25	115	25	14~730	Φυσικά Χαρακτηριστικά, 1DCT, UU
Παρατηρήσεις	1. Δοκιμές προσδιορισμού φυσικών χαρακτηριστικών μετά την ανάμιξη και κατά τη διάρκεια της περιόδου ωρίμανσης. 2. 1DCT: Δοκιμή Στερεοποίησης σε Συμπιεσόμετρο (3 δοκιμές/ ανά μείγμα & χρόνο ωρίμανσης). 3. ICT: Δοκιμή Ισότροπης Θλίψης (2 δοκιμές/ ανά μείγμα & χρόνο ωρίμανσης). 4. CIDC/CIDE: Δοκιμή Ισότροπα Στερεοποιημένης Στραγγιζόμενης Θλίψης/Εφελκυσμού (2 δοκιμές/ ανά μείγμα & χρόνο ωρίμανσης). 5. PLM: Ανάλυση με Πολωτικό Μικροσκόπιο. 6. XRD: Ανάλυση με Περίθλαση Ακτίνων Χ.			

Πίνακας 2 – Αναλογίες μιγμάτων και εργαστηριακές δοκιμές της παρούσας έρευνας

Χρησιμοποιηθείσες εργαστηριακές συσκευές για την εκτέλεση τριαξονικών δοκιμών

Σημαντικό βήμα για την πραγματοποίηση των εργαστηριακών δοκιμών είναι η ορθή χρήση των εργαστηριακών μηχανημάτων που διαθέτει το Εργαστήριο Θεμελιώσεων του Τομέα Γεωτεχνικής.

Σε αυτή την έρευνα, χρησιμοποιήθηκαν συμπιεσόμετρα σταθερού δακτυλίου και εμπρόσθιας, χειροκίνητης φόρτισης (BS1377- μέρος, 1990) για την εκτέλεση των

δοκιμών στερεοποίησης στα διάφορα μίγματα αργίλου – τέφρας. Οι συσκευές είναι κατασκευής της Wykeham Farrance. Το προστερεοποιημένο δοκίμιο εδάφους τοποθετήθηκε σε τυποποιημένο μεταλλικό δακτύλιο διαμέτρου 70mm και ύψους 19mm.

Οι δύο διατάξεις τριαξονικών δοκιμών που χρησιμοποιήθηκαν για δείγματα διαμέτρου 38mm και ύψους 76mm είναι:

(α) το Συμβατικό Σύστημα Τριαξονικής Δοκιμής της Wykeham Farrance (WF) σχεδιασμένο κυρίως για δοκιμές διαδρομών τάσεων και ικανότητας μέγιστου φορτίου 2000 kN. Η κυψέλη έχει αφαιρούμενη πλάκα βάσης, η οποία ορισμένες φορές αναφέρεται και ως έδρανο. Η πλάκα βάσης της κυψέλης, πάνω στην οποία κοχλιώνεται σταθερά ο θάλαμος έχει τέσσερις βαλβίδες απαέρωσης με ψηφιακούς μετατροπείς εγκατεστημένους στους τέσσερις σωλήνες πίεσης που εξέρχονται από την πλάκα βάσης. Από αυτούς, δύο σωλήνες χρησιμοποιούνται για την πλήρωση της κυψέλης με νερό και συνεπώς οι μετατροπείς τους μετρούν την πίεση της κυψέλης στη διάρκεια της τριαξονικής δοκιμής. Ενώ οι δύο άλλοι μετατροπείς χρησιμεύουν για τη μέτρηση της πίεσης πόρων. Ο κύριος σκοπός των βαλβίδων ενεργοποίησης/απενεργοποίησης είναι να απομονώνουν, να εφαρμόζουν και να μετρούν τις αντίστοιχες πιέσεις (κυψέλης, αντιπίεσης και πίεσης πόρων). Η αξονική παραμόρφωση μετριέται εξωτερικά με χρήση μετατροπέα μετακίνησης και η ογκομετρική παραμόρφωση μετριέται μέσω μετατροπέα μετακίνησης τοποθετημένου στη σωλήνωση αντιπίεσης.

Με αυτό το σύστημα εκτελέστηκαν τριαξονικές δοκιμές προσδιορισμού αστράγγιστης διατμητικής αντοχής (UU), δοκιμές ισότροπης θλίψης (ICT) καθώς και δοκιμές ισότροπα στερεοποιημένης στραγγιζόμενης θλίψης (CIDC)

και,

(β) το Σύστημα Τριαξονικής Δοκιμής με χρήση κυψέλης τύπου Bishop & Wesley (BW) της εταιρείας GDS (GDSTTS), ένα πλήρως αυτοματοποιημένο σύστημα, το οποίο εκτελεί μεγάλη ποικιλία ειδικών δοκιμών τριαξονικής φόρτισης, δηλ. δοκιμή με πολλά στάδια φόρτισης, ημιστατικές δοκιμές (χαμηλής ταχύτητας – ερπυσμού), και αναβαθμισμένες επιλογές όπως μετρήσεις μικρών τοπικών αξονικών και πλευρικών παραμορφώσεων (με τη βοήθεια του φαινομένου Hall), μετρήσεις με πιεζοηλεκτιρκά στοιχεία (bender element) καθώς και δοκιμές σε ακόρεστα δοκίμια.

Αυτή η υψηλής ποιότητας τριαξονική διάταξη διαδρομής τάσεων GDS αποτελείται βασικά από κυψέλη Bishop και Wesley, τρεις ρυθμιστές πίεσης/όγκου, εσωτερική εμβαπτιζόμενη δυναμοκυψέλη (load cell) για τη μέτρηση του αξονικού φορτίου, μετατροπέα πίεσης για τη μέτρηση της πίεσης πόρων και μετατροπείς γραμμικής μετακίνησης για τη μέτρηση της κατακόρυφης μετακίνησης. Η κυψέλη διαδρομής τάσεων χρησιμοποιεί τη διαφορά μεταξύ πίεσης κυψέλης και πίεσης του κάτω θαλάμου (ram pressure chamber) για να εφαρμόσει φορτίο στο δοκίμιο. Επίσης μπορούν να εφαρμοστούν συγκεκριμένες μετακινήσεις εισπιέζοντας στον κάτω θάλαμο συγκεκριμένη ποσότητα νερού μέσω ρυθμιστή πίεσης της GDS. Καθώς είναι γνωστή η οριζόντια επιφάνεια του εμβόλου του κάτω θαλάμου, η μετακίνηση υπολογίζεται από το αντίστοιχο λογισμικό. Η κυψέλη έχει αφαιρούμενη κεφαλή, με τους κοχλίες στερέωσης της κυψέλης να προσδίδουν πρόσθετη δυσκαμψία.

Μεταξύ της δυναμοκυψέλης (load cell) και της πλάκας στην κεφαλή του δοκιμίου (top cap) παρεμβάλλεται ειδική χωνοειδής θήκη (suction cap) με την οποία επιβάλλεται αρνητικό αποκλίνον φορτίο στο δοκίμιο, καθιστώντας δυνατή την εκτέλεση δοκιμών εφελκυσμού.

Για την επίτευξη της απαιτούμενης πίεσης κυψέλης και αντιπίεσης, χρησιμοποιήθηκαν δύο ρυθμιστές πίεσης όγκου (PVC, Pressure/Volume Controllers). Για τη διάταξη των Bishop & Wesley ήταν απαραίτητος και τρίτος ρυθμιστής PVC για να κινήσει το υδραυλικό πλαίσιο φόρτισης (στον κάτω θάλαμο). Στη διάρκεια του προγράμματος δοκιμών χρησιμοποιήθηκαν δύο τύποι PVC, τυπικός (STDDPC Standard Pressure/Volume Controller) και προηγμένος (ADVDPC, Advanced Pressure/Volume Controller).

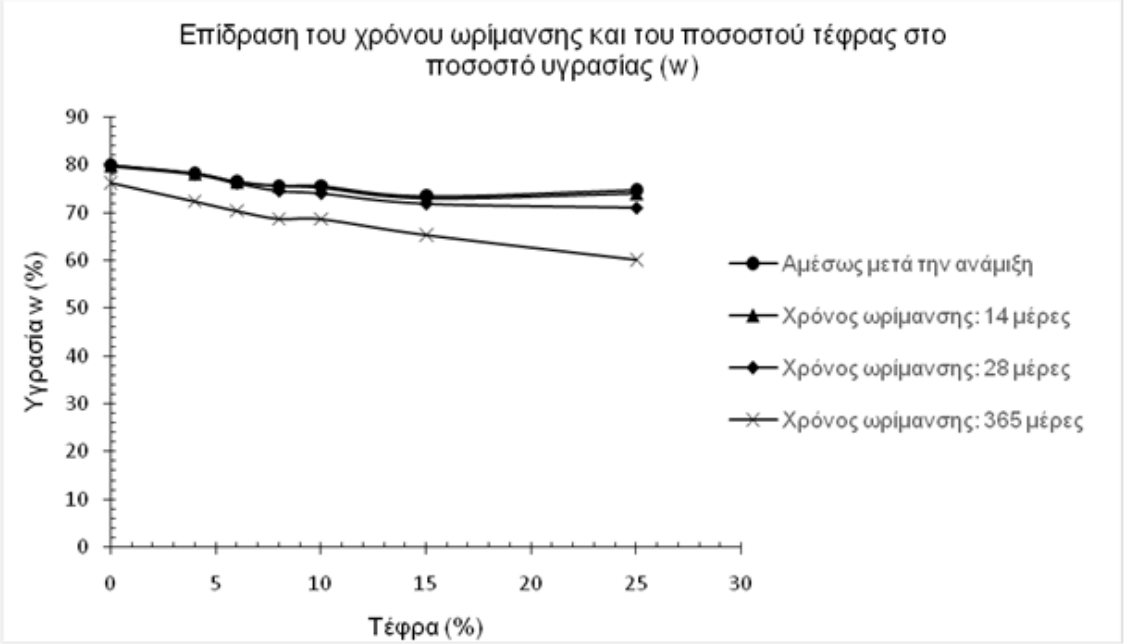
Με αυτό το σύστημα εκτελέστηκαν τριαξονικές δοκιμές ισότροπης θλίψης (ICT) καθώς και δοκιμές ισότροπα στερεοποιημένης στραγγιζόμενου εφελκυσμού (CIDE)

Διερεύνηση της δημιουργίας δομής και αποδόμησης της βελτιωμένης αργίλου με επτά (7) διαφορετικές αναλογίες υγρασίας – ιπτάμενης τέφρας

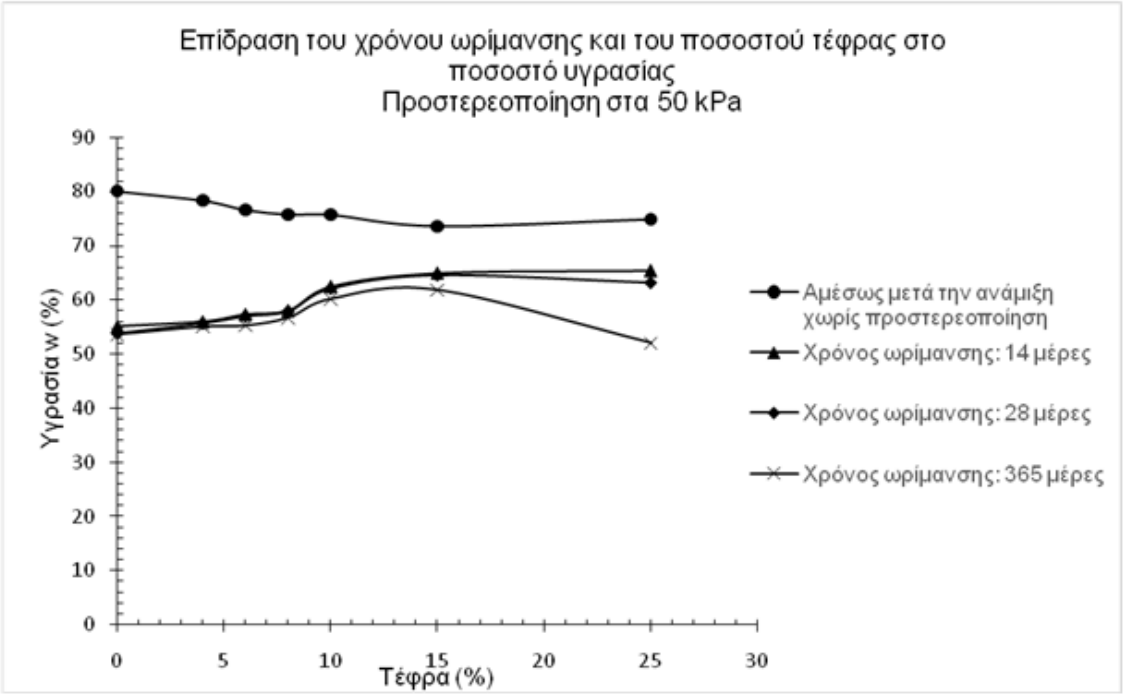
Δοκιμές βασικών φυσικών χαρακτηριστικών

Τα Σχήματα 1 και 2 δείχνουν τη μεταβολή της τελικής υγρασίας της βελτιωμένης με τέφρα αργίλου μετά από διαφορετικούς χρόνους ωρίμανσης χωρίς και με προστερεοποίηση του δείγματος στα 50 kPa, αντίστοιχα.

Όπως περιγράφηκε παραπάνω, για την ονοματοδοσία των μιγμάτων, η συνολική υγρασία του αρχικού μίγματος ορίζεται ως ο λόγος του βάρους του συνολικού ύδατος προς το βάρος των στερεών μόνον της αργίλου. Οι υπόλοιποι υπολογισμοί υγρασίας έγιναν σε σχέση με το ξηρό βάρος αργίλου και τέφρας με ξήρανση σε κλίβανο επί 24 ώρες και θερμοκρασία 105^{o}C.



Σχήμα 1 – Επίδραση στην υγρασία του χρόνου ωρίμανσης και ποσοστού τέφρας χωρίς προστερεοποίηση των δειγμάτων.



Σχήμα 2 – Επίδραση στην υγρασία του χρόνου ωρίμανσης και ποσοστού τέφρας με προστερεοποίηση των δειγμάτων στα 50 kPa

Και στα δύο Σχήματα 1 και 2 παρατηρείται ότι το μεγαλύτερο μέρος της μείωσης στην υγρασία λαμβάνει χώρα μέσα στις πρώτες 28 ημέρες ωρίμανσης, και ότι το μέγεθος της μείωσης αυξάνει με την αύξηση του ποσοστού της τέφρας. Επισημαίνεται ότι δεν υφίσταται σημαντική μείωση υγρασίας ακόμη και σε χρόνο ωρίμανσης 365 ημερών (1 έτος) και αυτό οφείλεται στην επίπτωση της τέφρας ως συνδετικού υλικού.

Παρόμοια μείωση της υγρασίας σε αργίλους παρατηρήθηκε και από τους Thenoux κ.ά. (2009), Das (2009), Ahmaruzzaman (2010), και Saraswat κ.ά. (2014). Αυτό δεν εκπλήσσει καθώς η τέφρα δεν είναι τόσο ισχυρό συνδετικό υλικό ώστε να αυξήσει την αντοχή του εδάφους. Τα φυσικά και μηχανικά χαρακτηριστικά βελτιώθηκαν σε κάποιο βαθμό με την προσθήκη της τέφρας, αλλά για ποσοστά τέφρας πάνω από κάποιο όριο. Όπως φαίνεται στα Σχήματα 1 και 2 εμφανίζεται μία σημαντική αλλαγή στην υγρασία για ποσοστά τέφρας 15% και πάνω.

Αυτό ερμηνεύεται με το ό,τι το νερό απορροφάται και μετατρέπεται σε ένυδρο CASH (Calcium Alumino-Silicate Hydrate) στη διάρκεια της ποζολανικής αντίδρασης και της ενυδάτωσης, και δεν αποβάλλεται με την επαναθέρμανση των προϊόντων σιμέντωσης στους 105°C. Αυτή η άποψη επαληθεύτηκε με την εκτέλεση μίας απλής δοκιμής με ισοδύναμη ποσότητα CaO αντί της τέφρας. Καθώς και οι δύο αντιδράσεις, ποζολανική και ενυδάτωσης, εμπεριέχουν ασβέστιο, η συνολική

ποσότητα ύδατος που θα χρησιμοποιηθεί πρέπει να είναι ανάλογη με την ποσότητα του διαθέσιμου ασβέστιου.

Επιπλέον, τα ποσοστά υγρασίας 14 και 28 ημερών δεν έδειξαν κάποια σημαντική μείωση, για ποσοστά τέφρας μικρότερα από 15%. Για υψηλότερα ποσοστά τέφρας υπήρξε μία ελαφρά μεγαλύτερη μείωση της υγρασίας με την αύξηση του χρόνου ωρίμανσης. Επιπλέον, η κατακόρυφη μετατόπιση μεταξύ των καμπυλών άμεσης μέτρησης και 28 ημερών, αυξανόταν σημαντικά καθώς αυξανόταν το ποσοστό της τέφρας, αλλά σχεδόν σταθεροποιήθηκε για ποσοστό τέφρας περίπου 15%. Αυτό υποδηλώνει ότι η αντίδραση μπορεί να επιβραδύνεται για μεγαλύτερα ποσοστά τέφρας.

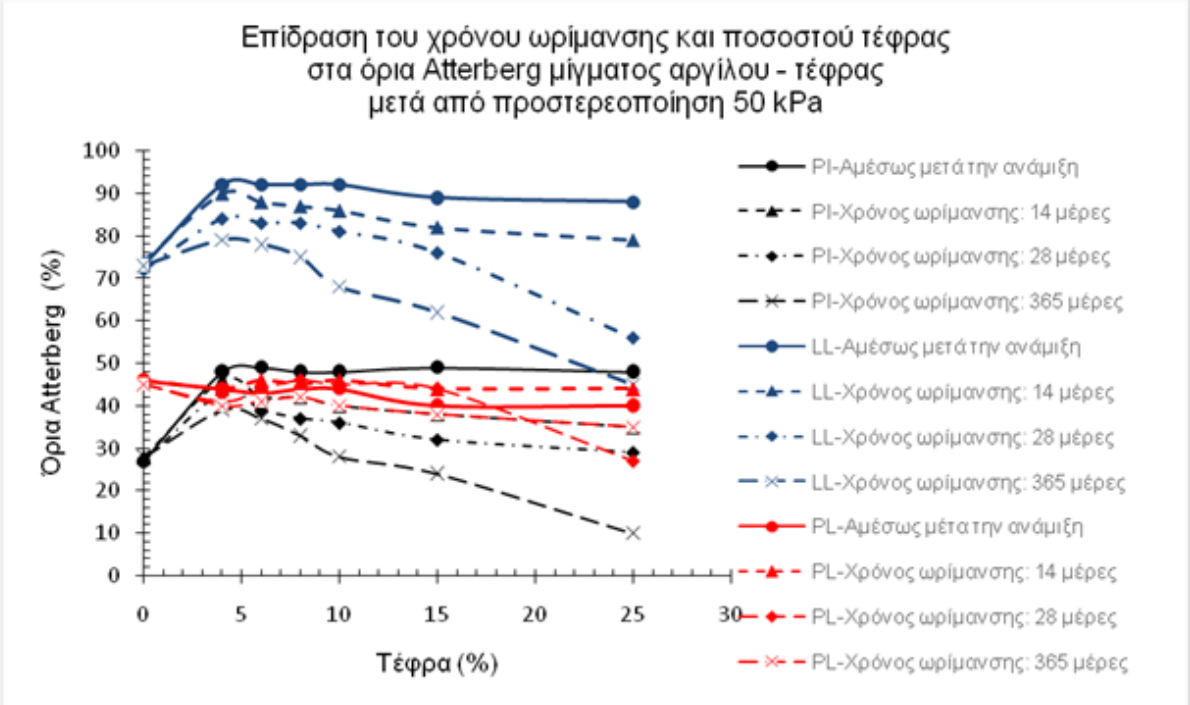
Για λόγους σύγκρισης, οι δοκιμές των ορίων Atterberg σε αυτή την έρευνα έγιναν μετά τη φόρτιση των δειγμάτων με κατακόρυφη τάση 50 kPa ώστε να σταθεροποιηθεί το μίγμα, να επιτραπεί η διαφυγή του παγιδευμένου αέρα από τη μάζα του μίγματος αργίλου – τέφρας, και να αυξηθεί η ομογένεια του μίγματος.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3, ο δείκτης πλαστικότητας (PI) μειώνεται ελαφρά στα χαμηλά ποσοστά τέφρας μέχρι 6%, και στη συνέχεια ακολουθεί μία σταθερή μείωση καθώς αυξάνεται το ποσοστό της τέφρας. Αυτό αποδίδεται στην σχεδόν παράλληλη πορεία των διαγραμμάτων του ορίου πλαστικότητας και υδαρότητας, για χρόνους ωρίμανσης έως 28 ημέρες. Δηλαδή οι μεταβολές και για τα δύο όρια είναι περίπου ίσες. Η ποσότητα νερού που παγιδεύεται μέσα στα συσσωματώματα, και δεν συμμετέχει στη μεταβολή της συνεκτικότητας του μίγματος, προστίθεται και στα δύο όρια (πλαστικότητας και υδαρότητας) και στη συνέχεια απαλείφεται αριθμητικά με την αφαίρεση του ορίου πλαστικότητας από το όριο υδαρότητας, για να προκύψει ο δείκτης πλαστικότητας. Ειδικότερα, το όριο πλαστικότητας αυξάνει μονοτονικά με το αυξανόμενο ποσοστό της τέφρας, μετά χρόνο ωρίμανσης 14 ημερών, με μεγαλύτερο ρυθμό αύξησης στις μικρότερες περιεκτικότητες σε τέφρα. Παρόμοιες τάσεις μεταβολής παρατηρήθηκαν σε άλλες αργίλους βελτιωμένες με τέφρα (π.χ. Thenoux κ.ά., 2009) καθώς και σε αργιλώδη εδάφη σταθεροποιημένα με άσβεστο και τσιμέντο τα οποία περιείχαν σημαντικό ποσοστό αργιλικών ορυκτών (π.χ. Brandl κ.ά., 1981; Local κ.ά., 1996; Uddin κ.ά., 1997, Kamruzzaman, 2002). Όπως έχουν προτείνει οι Local κ.ά. (1996), η παρουσία του ύδατος στο εσωτερικό των συσσωματωμάτων αυξάνει τη φαινόμενη υγρασία χωρίς ουσιαστικά να επηρεάζει την αλληλεπίδραση μεταξύ συσσωματωμάτων.

Το όριο υδαρότητας μειώθηκε σημαντικά στις υψηλές περιεκτικότητες σε τέφρα (≥15%) και σε χρόνους ωρίμανσης μεγαλύτερους των 28 ημερών. Αυτό είναι

συμβατό με την παραδοχή ότι υπάρχει νερό παγιδευμένο στους εσωτερικούς πόρους των συσσωματωμάτων. Ωστόσο οι ρυθμοί μεταβολής αυτών των δύο ορίων Atterberg σε υψηλότερες περιεκτικότητες σε τέφρα δεν είναι ίδιοι. Αυτό υποδηλώνει ότι η παραδοχή του παγιδευμένου ύδατος εξηγεί πολλές αλλά όχι όλες τις μεταβολές που παρατηρούνται στα όρια πλαστικότητας και υδαρότητας.

Θα πρέπει να επισημανθεί ότι η τάση μεταβολής του ορίου υδαρότητας σε σχέση με την περιεκτικότητα σε τέφρα φαίνεται να εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τον τύπο του εδάφους. Η γενική τάση φαίνεται να είναι η μείωση του ορίου υδαρότητας σε υψηλής πλαστικότητας έδαφος και η αύξησή του σε χαμηλής πλαστικότητας έδαφος. Οι προηγούμενες διαπιστώσεις υποδηλώνουν ότι, σε εδάφη υψηλής πλαστικότητας η ενθυλάκωση των συσσωματωμάτων αργίλου από τα υλικά σιμέντωσης (συγκόλλησης) έχει επικρατέστερη επίδραση, οδηγώντας σε μείωση του ορίου υδαρότητας. Επιπλέον, σε εδάφη χαμηλής πλαστικότητας, η παρουσία παγιδευμένου ύδατος στο εσωτερικό των συσσωματωμάτων έχει την επικρατέστερη επίδραση, οδηγώντας σε αύξηση του ορίου υδαρότητας.



Σχήμα 3 – Επίδραση χρόνου ωρίμανσης και ποσοστού τέφρας στα όρια Atterberg της βελτιωμένης αργίλου μετά από προστερεοποίηση των δειγμάτων στα 50 kPa

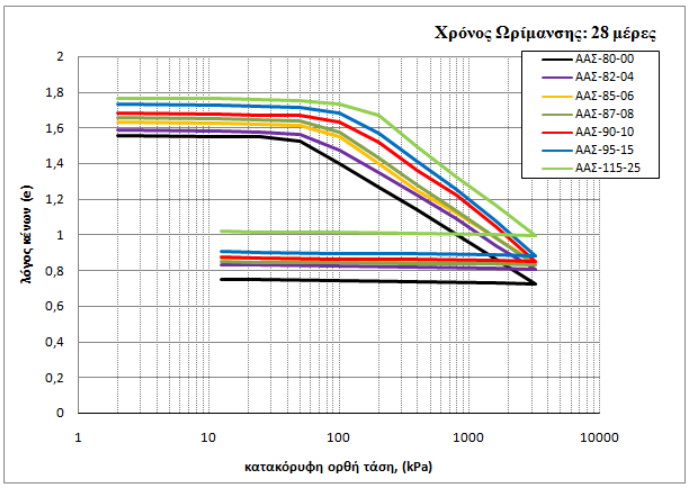
Δοκιμές μονοδιάστατης στερεοποίησης σε συμπιεσόμετρο

Το προστερεοποιημένο δοκίμιο εδάφους τοποθετήθηκε σε τυποιημένο μεταλλικό δακτύλιο διαμέτρου 70mm και ύψους 19mm, με δύο πορόλιθους στα άκρα του και εφαρμοσθείσα μέγιστη τάση στερεοποίησης 3200 kPa. Μετά την επιβολή του φορτίου μετρήθηκε η συμπίεση του δοκιμίου από ενσωματωμένο σύστημα ελέγχου. Στη διάρκεια της δοκιμής, το δοκίμιο παρέμεινε εμβαπτισμένο σε απιονισμένο νερό. Κάθε αύξηση φορτίου διατηρήθηκε σταθερή για 24 ώρες ώστε να θεωρηθεί ολοκληρωμένη η πρωτογενής στερεοποίηση, και στη συνέχεια γινόταν χειροκίνητη επιβολή του επόμενου φορτίου. Ακολουθήθηκε ρυθμός φόρτισης $\Delta p/p_1=1.0$.

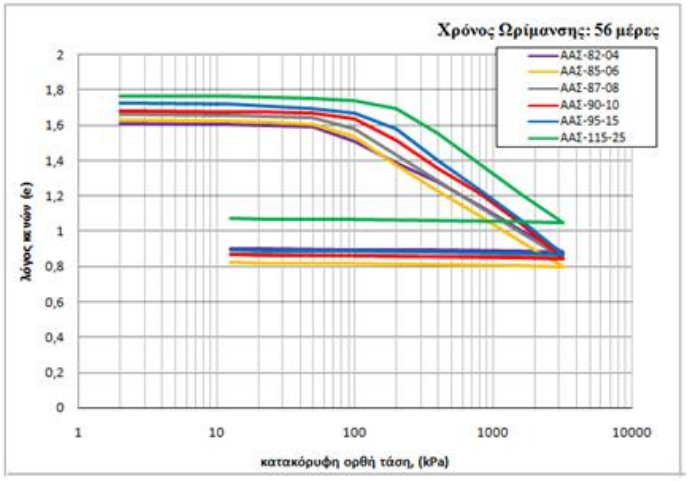
Η παρουσίαση των αποτελεσμάτων των δοκιμών μονοδιάστατης στερεοποίησης περιλαμβάνει δύο σκέλη (α) την επίδραση του ποσοστού της τέφρας στις μηχανικές ιδιότητες της βελτιωμένης αργίλου του Αγίου Στεφάνου και (β) την επίδραση του χρόνου ωρίμανσης σε αυτές τις ιδιότητες.

(α) <u>Επίδραση του ποσοστού Ι.Τ.</u>

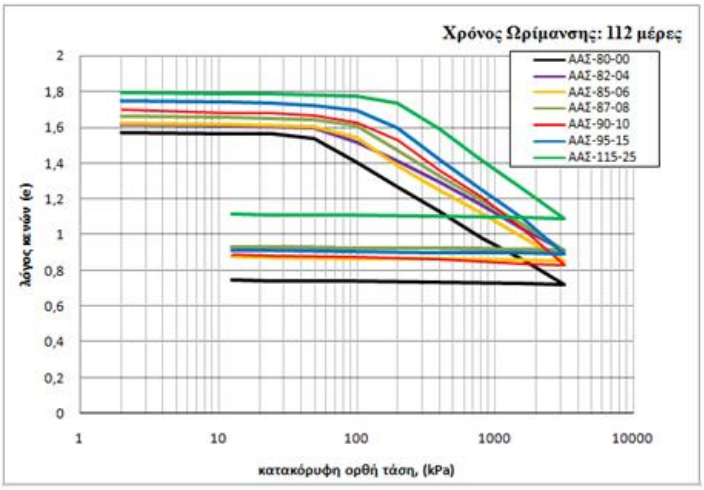
Τα Σχήματα 4 (α – ε) εμφανίζουν τη σχέση $e\text{-}log\sigma'_v$ στα δείγματα μη βελτιωμένης (0% Ι.Τ.) και βελτιωμένης (4% - 25% Ι.Τ.) αργίλου.



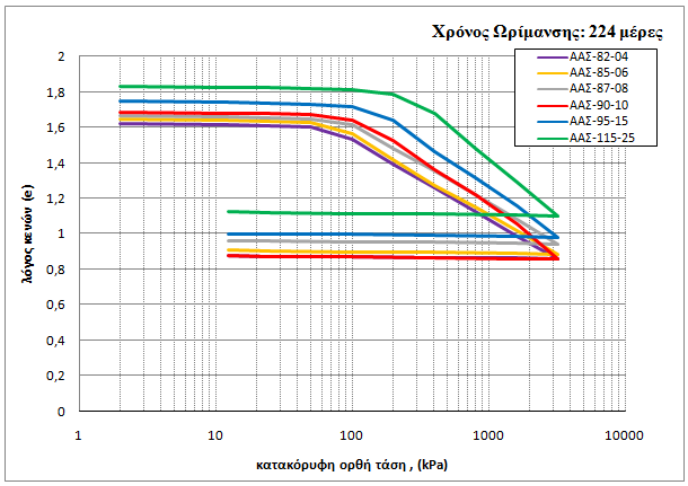
(α)



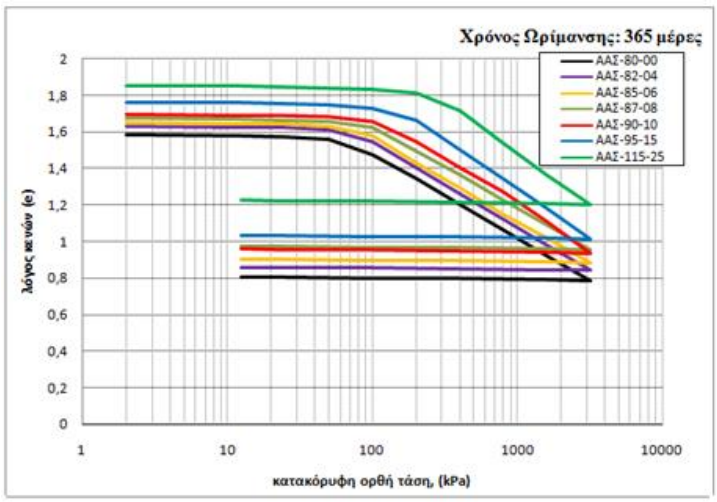
(β)



(γ)



(δ)



(ε)

Σχήμα 4 (α-ε) - Επίδραση ποσοστού τέφρας στη σχέση e-logσ'$_v$ σε μονοδιάστατη στερεοποίηση για ωρίμανση 28, 56, 112, 224, 365 ημερών.

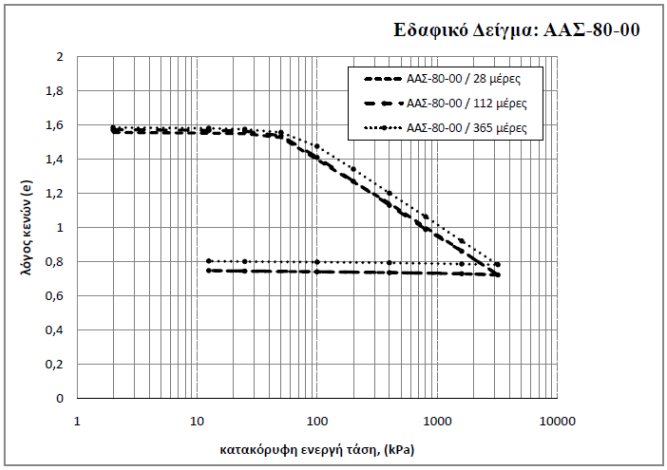
Παρατηρείται ότι η φαινόμενη τάση προστερεοποίησης (τάση διαρροής) αυξάνει σημαντικά σε σχέση με την εφαρμοσθείσα στα μίγματα αρχική τάση προστερεοποίησης των 50 kPa, όταν το ποσοστό της τέφρας είναι ≥10%, όμως έχοντας πάντα υπόψη ότι η τέφρα δεν είναι τόσο ισχυρό συνδετικό υλικό όσο το τσιμέντο ή η άσβεστος. Τα αποτελέσματα των δοκιμών δείχνουν επίσης ότι, για χαμηλό ποσοστό τέφρας στο μίγμα (π.χ. 4% ή 6%), υπήρχε ελάχιστο αποτέλεσμα σιμέντωσης στη μάζα της βελτιωμένης αργίλου. Αυτό υποδηλώνει ότι απαιτείται συγκεκριμένη ποσότητα τέφρας, για να ολοκληρωθεί η αλληλεπίδραση τέφρας και αργίλου, ώστε να σχηματισθούν τα υλικά σύνδεσης. Η αύξηση της φαινόμενης τάσης

προστερεοποίησης οφείλεται στην επίδραση της δημιουργίας δομής (δηλαδή στη δημιουργία δεσμών σιμέντωσης) στα πλακίδια της βελτιωμένης αργίλου.

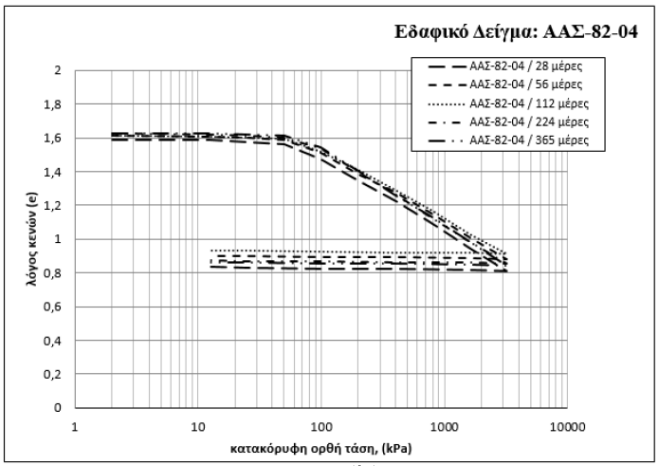
Σε τάση στερεοποίησης μικρότερη από την αντίστοιχη τάση προστερεοποίησης, ο αρχικός λόγος κενών των δειγμάτων βελτιωμένης αργίλου αυξάνεται με την αύξηση του ποσοστού της τέφρας (Πίνακας 2). Επίσης παρατηρήθηκε ότι η μεταβολή του λόγου κενών ήταν πολύ μικρή για την περιοχή τάσεων πριν από την αντίστοιχη εφαρμοζόμενη τάση προστερεοποίησης των 50 kPa. Αυτό συνεπάγεται ότι υπάρχει επίδραση της δημιουργίας δομής στην περιοχή τάσεων μετά την εφαρμοσθείσα τάση προστερεοποίησης, και συνεπώς η συμπεριφορά του δείγματος είναι σχετικά όλκιμη. Επιπλέον, πέραν της εφαρμοζόμενης τάσης προστερεοποίησης των 50 kPa, η μείωση του λόγου κενών με την αύξηση της στερεοποίησης είναι αξιοσημείωτη για όλο το εύρος περιεκτικότητας σε τέφρα. Αυτό αποδίδεται στην εμφανή κατάρρευση της δομής (δηλαδή τη θραύση των δεσμών σιμέντωσης) της μάζας της βελτιωμένης αργίλου, όταν φορτίζεται πέραν της τάσης προστερεοποίησης. Σε αυτό το στάδιο, η επίδραση των δεσμών σιμέντωσης είναι ελάχιστη και η υφή της βελτιωμένης αργίλου παίζει τον κυρίαρχο ρόλο στα χαρακτηριστικά συμπιεστότητας. Τα αποτελέσματα έδειξαν επίσης ότι για πιέσεις πέραν της εφαρμοζόμενης τάσης προστερεοποίησης οι καμπύλες για τη βελτιωμένη άργιλο μετατοπίζονται παράλληλα, με αντίστοιχη αύξηση του λόγου κενών για αύξηση του ποσοστού της τέφρας. Αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η επιφάνεια διαρροής και η περιβάλλουσα θραύσης της βελτιωμένης αργίλου αυξάνουν με την αύξηση του ποσοστού συνδετικού υλικού.

(β) <u>Επίδραση του χρόνου ωρίμανσης</u>

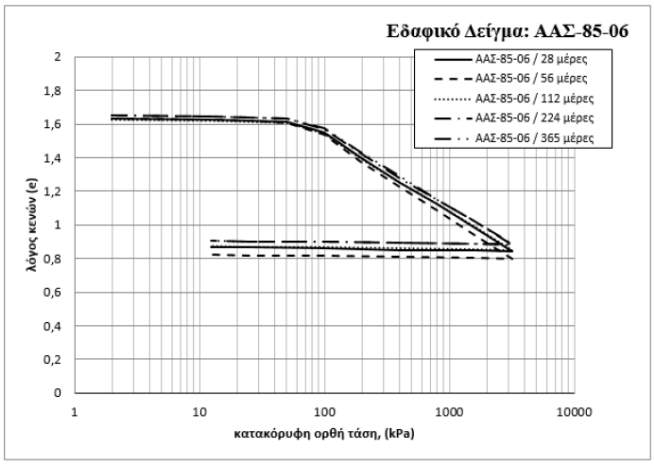
Τα Σχήματα 5 (α – ζ) εμφανίζουν τη σχέση $e\text{-}log\sigma'_v$ στα δείγματα μη βελτιωμένης (0% Ι.Τ.) και βελτιωμένης (4% - 25% Ι.Τ.) αργίλου.


Εδαφικό Δείγμα: ΑΑΣ-80-00
ΑΑΣ-80-00 / 28 μέρες
ΑΑΣ-80-00 / 112 μέρες
ΑΑΣ-80-00 / 365 μέρες
λόγος κενών (e)
κατακόρυφη ενεργή τάση, (kPa)

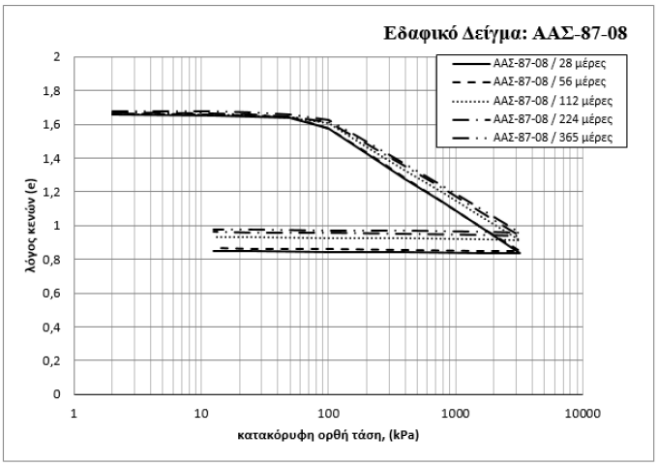
(α)


Εδαφικό Δείγμα: ΑΑΣ-82-04
ΑΑΣ-82-04 / 28 μέρες
ΑΑΣ-82-04 / 56 μέρες
ΑΑΣ-82-04 / 112 μέρες
ΑΑΣ-82-04 / 224 μέρες
ΑΑΣ-82-04 / 365 μέρες
λόγος κενών (e)
κατακόρυφη ορθή τάση, (kPa)

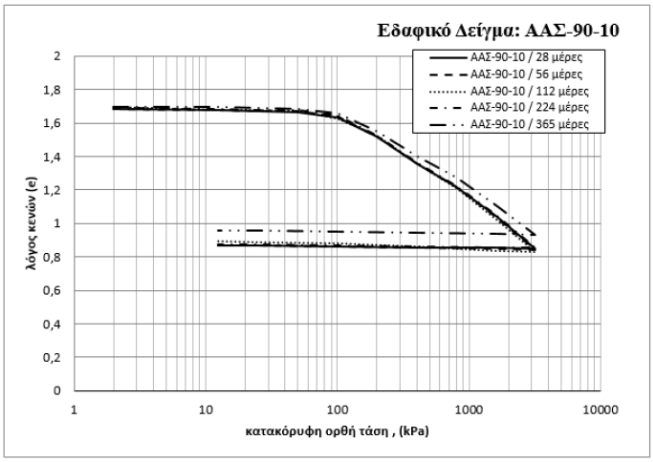
(β)


Εδαφικό Δείγμα: ΑΑΣ-85-06
ΑΑΣ-85-06 / 28 μέρες
ΑΑΣ-85-06 / 56 μέρες
ΑΑΣ-85-06 / 112 μέρες
ΑΑΣ-85-06 / 224 μέρες
ΑΑΣ-85-06 / 365 μέρες
λόγος κενών (e)
κατακόρυφη ορθή τάση, (kPa)

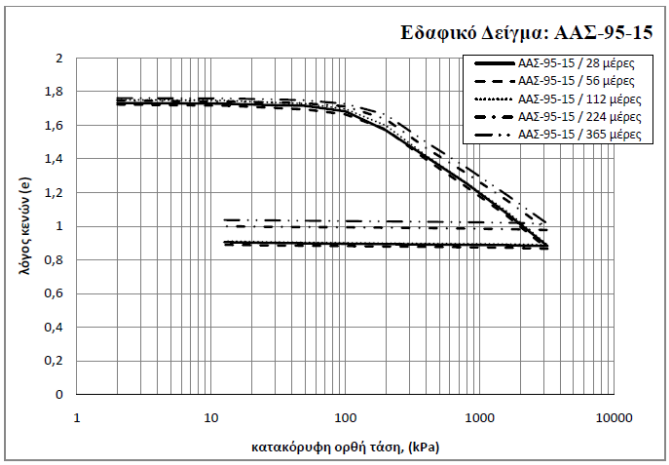
(γ)


Εδαφικό Δείγμα: ΑΑΣ-87-08
ΑΑΣ-87-08 / 28 μέρες
ΑΑΣ-87-08 / 56 μέρες
ΑΑΣ-87-08 / 112 μέρες
ΑΑΣ-87-08 / 224 μέρες
ΑΑΣ-87-08 / 365 μέρες
λόγος κενών (e)
κατακόρυφη ορθή τάση, (kPa)

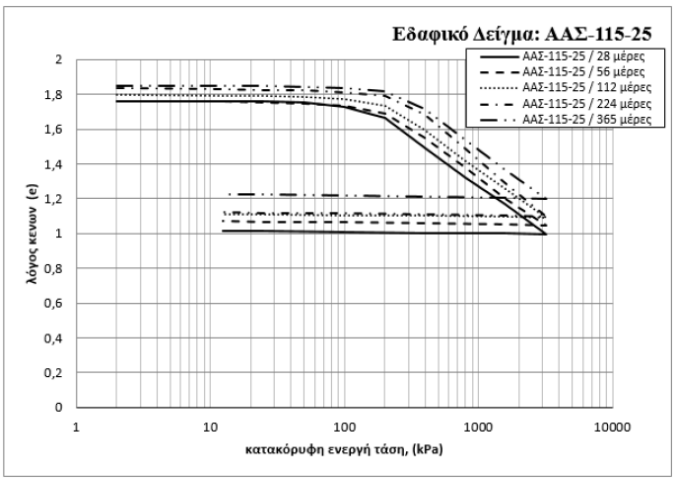
(δ)


Εδαφικό Δείγμα: ΑΑΣ-90-10
ΑΑΣ-90-10 / 28 μέρες
ΑΑΣ-90-10 / 56 μέρες
ΑΑΣ-90-10 / 112 μέρες
ΑΑΣ-90-10 / 224 μέρες
ΑΑΣ-90-10 / 365 μέρες
λόγος κενών (e)
κατακόρυφη ορθή τάση , (kPa)

(ε)


Εδαφικό Δείγμα: ΑΑΣ-95-15
ΑΑΣ-95-15 / 28 μέρες
ΑΑΣ-95-15 / 56 μέρες
ΑΑΣ-95-15 / 112 μέρες
ΑΑΣ-95-15 / 224 μέρες
ΑΑΣ-95-15 / 365 μέρες
λόγος κενών (e)
κατακόρυφη ορθή τάση, (kPa)

(στ)



(ζ)

Σχήμα 5 (α-ζ) - Επίδραση ωρίμανσης στη σχέση e-logσ'$_v$ μη (0% τέφρα) και βελτιωμένης αργίλου (4% - 25% τέφρα) σε μονοδιάστατη στερεοποίηση

Η επίδραση του χρόνου ωρίμανσης στη σχέση *e-logσ'$_v$* της βελτιωμένης αργίλου φαίνεται στα Σχήματα 5 (α-ζ). Στο Σχήμα 5 (α) δεν παρατηρείται σημαντική μεταβολή στη συμπιεστότητα του εδάφους, καθώς δεν έχουν σχηματισθεί δεσμοί στη μάζα του εδάφους σε σύντομες περιόδους ωρίμανσης μέχρι το ένα έτος. Τα βελτιωμένα δείγματα εμφανίζουν υψηλότερη τάση προστερεοποίησης για μεγαλύτερους χρόνους ωρίμανσης. Αυτά τα αποτελέσματα δείχνουν μία συνεπή τάση μεταβολής συγκρινόμενα με εκείνα άλλων ερευνητών για διάφορες σιμεντωμένες βελτιωμένες αργίλους (π.χ. Uddin κ.ά., 1997, Miura κ.ά., 2001). Στα Σχήματα 5 (β-ζ), το δείγμα με παρατεταμένο χρόνο ωρίμανσης (365 ημερών) εμφανίζει υψηλότερη φαινόμενη τάση προστερεοποίησης από εκείνη των δειγμάτων με ωρίμανσης 28 ημερών. Επιπλέον, η ογκομετρική συμπιεστότητα της βελτιωμένης αργίλου εμφανίζεται να είναι πολύ μικρή για τάσεις μικρότερες από την αρχικά εφαρμοζόμενη τάση προστερεοποίησης 50 kPa για ποσοστό τέφρας μικρότερο από 10% (≤10%). Αυτό υποδηλώνει ότι η ποζολανική αντίδραση συνεχίζεται και πέραν της περιόδου ωρίμανσης των 365 ημερών, και συνεπώς η διαδικασία δημιουργίας δομής (δεσμών σιμέντωσης) δεν είναι πολύ σημαντική.

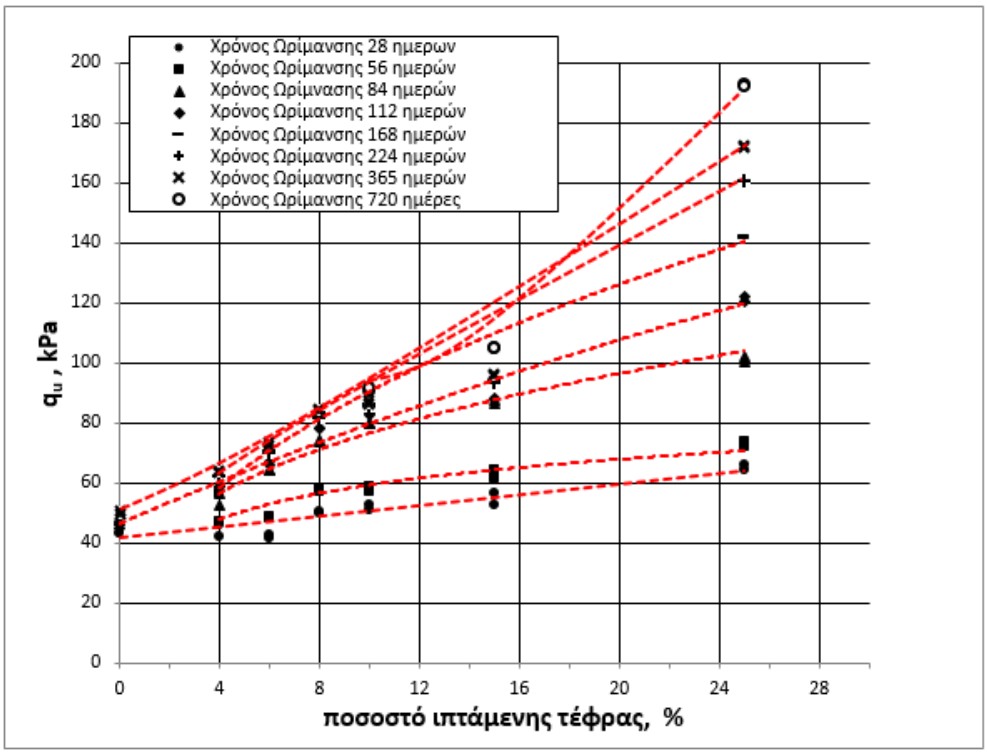
Τριαξονικές δοκιμές προσδιορισμού αστράγγιστης διατμητικής αντοχής

Η προσθήκη ιπτάμενης τέφρας σε μία μαλακή άργιλο, έχει ως αποτέλεσμα την μετατροπή της σε ψαθυρό υλικό με καλά καθορισμένο σημείο διαρροής στο

διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων σε δοκιμή διάτμησης. Στη σειρά τριαξονικών δοκιμών που πραγματοποιήθηκε για τον προσδιορισμό της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής εξετάστηκε ευρύ φάσμα τιμών ποσοστού τέφρας και διάφοροι χρόνοι ωρίμανσης. Το ποσοστό τέφρας κυμαινόταν από 4% έως 25%, ενώ οι περίοδοι ωρίμανσης από 28 έως 730 ημέρες.

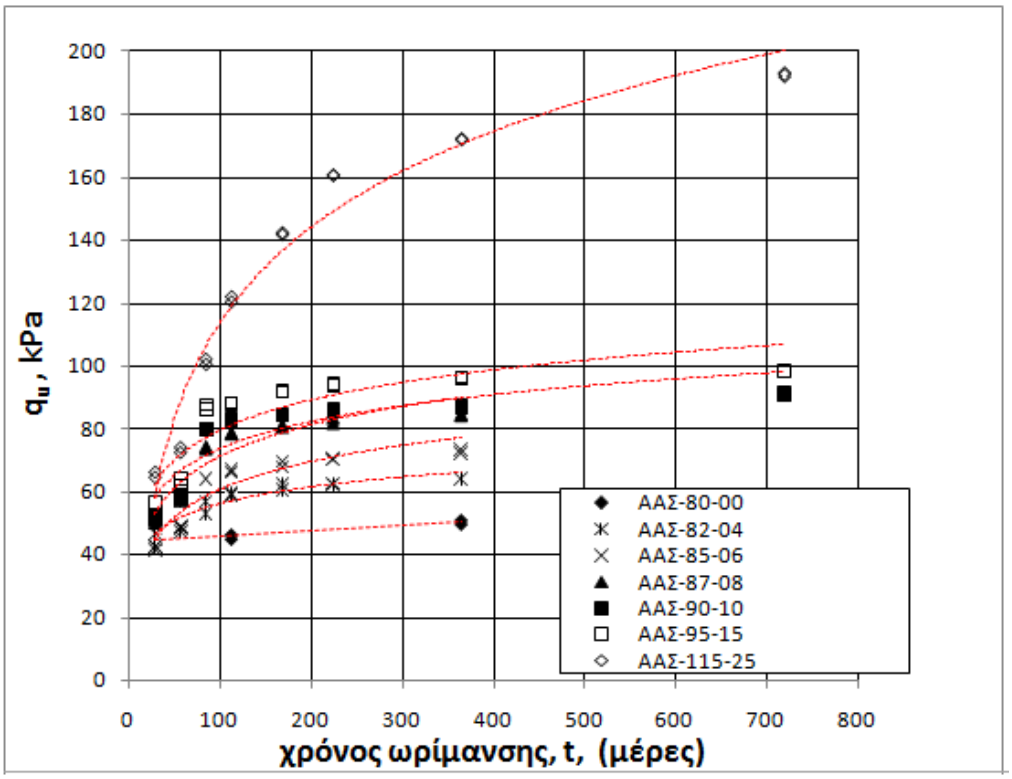
Η παρουσίαση των αποτελεσμάτων των δοκιμών προσδιορισμού της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής των υλικών περιλαμβάνει δύο σκέλη (α) την επίδραση του ποσοστού της τέφρας στις μηχανικές ιδιότητες της βελτιωμένης αργίλου του Αγίου Στεφάνου και (β) την επίδραση του χρόνου ωρίμανσης σε αυτές τις ιδιότητες όπως παρουσιάζονται στα Σχήματα 6 και 7 αντίστοιχα.

(α) Επίδραση του ποσοστού Ι.Τ.



Σχήμα 6 - Επίδραση του ποσοστού τέφρας στην αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη της αργίλου για διαφορετικούς χρόνους ωρίμανσης

(β) Επίδραση του χρόνου ωρίμανσης



Σχήμα 7 - Επίδραση του χρόνου ωρίμανσης στην αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη βελτιωμένης αργίλου για όλα τα μίγματα.

Τα αποτελέσματα των δοκιμών έδειξαν ότι το αυξημένο ποσοστό τέφρας έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της μέγιστης αντοχής των δειγμάτων. Βρέθηκε ότι σε μίγματα με περιεκτικότητα ιπτάμενης τέφρας 10% και 15% και χρόνο ωρίμανσης έως και 2 έτη, ο βέλτιστος χρόνος ωρίμανσης για την αύξηση της αντοχής ήταν 3 μήνες και στη συνέχεια, η αύξηση της αντοχής ήταν ελάχιστη. Τα δείγματα αυτά ήταν συνεπώς κατάλληλα να χρησιμοποιηθούν σε δοκιμές μετά το πέρας των τριων μηνών, και συνεπώς όλες οι δοκιμές που έγιναν με χρόνους ωρίμανσης άνω των τριών μηνών θεωρείται ότι εκτελέστηκαν επί του ίδιου πρακτικώς υλικού. Με ποσοστά τέφρας 10% και 15% προέκυπταν όλκιμα δοκίμια, σε αντίθεση με το ποσοστό 25% τέφρας, όπου οι ποζολανικές αντιδράσεις ήταν πολύ ισχυρές, με αποτέλεσμα να δημιουργούνται ψαθυρά υλικά με ισχυρή δομή από τα οποία δεν ήταν εύκολη η μόρφωση δοκιμίων.

Επιλογή μιγμάτων βελτιωμένης αργίλου για το τελικό στάδιο της έρευνας και τη διατύπωση πλαισίου συμπεριφοράς τεχνητών υλικών με ελαφρά σιμέντωση

Συγκρίνοντας τα μηχανικά χαρακτηριστικά των δειγμάτων τα οποία παρουσιάστηκαν παραπάνω, τα δύο μίγματα αργίλου τα οποία επέδειξαν πρακτικά σταθερή αύξηση αντοχής μετά περίοδο ωρίμανσης 112 ημερών (λόγω ισορρόπησης της ποζολανικής αντίδρασης μέσα στη μάζα του εδάφους) και όλκιμη συμπεριφορά, ήταν βελτιωμένης αργίλου με ποσοστά τέφρας 10% και 15%. Συνεπώς όλες οι περαιτέρω δοκιμές έγιναν μετά από περίοδο ωρίμανσης 112 ημερών και μόνο στα 2 αυτά δείγματα.

Επιπλέον έγινε σύγκριση της εξέλιξης της επιφάνειας διαρροής στη διάρκεια της φάσης κράτυνσης (hardening) της διάτμησης, ο τρόπος μεταβολής του σχήματος και του μεγέθους της επιφάνειας διαρροής μετά την αρχική διαρροή των δειγμάτων βελτιωμένης αργίλου τα οποία επέδειξαν όλκιμη συμπεριφορά με εκείνα της φυσικής αργίλου του Αγίου Στεφάνου, χωρίς την επίδραση του χρησιμοποιούμενου συνδετικού υλικού (δηλ. την τέφρα Πτολεμαΐδας).

Η ανάλυση με Πολωτικό Μικροσκόπιο (PLM, Polarising Light Microscope) η οποία πραγματοποιήθηκε στο Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών (ΙΓΜΕ), έγινε σε μίγματα χωρίς και με προσθήκη 10%, 15% και 25% τέφρας τύπου C έδειξε ότι οι σχετικές ποσότητες των προϊόντων σιμέντωσης (CSH και CASH) αυξάνονταν με την αύξηση του ποσοστού τέφρας. Ωστόσο, η ενδιαφέρουσα παρατήρηση αυτής της ανάλυσης, ήταν η ανάπτυξη συσσωματωμάτων αργίλου-τέφρας, όχι σε όλη τη μάζα της αργίλου, αλλά διεσπαρμένα μέσα στη μάζα του μίγματος, με αποτέλεσμα μία μικρή αύξηση στα όρια υδαρότητας και πλαστικότητας, όταν η προσθήκη τέφρας περιοριζόταν στο 15% ή λιγότερο.

Πλαίσιο συμπεριφοράς στη διαρροή και σχέση τάσεων-παραμορφώσεων

Βάσει των ανωτέρω, μετά την επιλογή των υλικών, πραγματοποιήθηκαν τριαξονικές δοκιμές, σε στραγγιζόμενες συνθήκες θλίψης και εφελκυσμού με OCR>1.0, που σκοπό είχαν τον προσδιορισμό της μηχανικής συμπεριφοράς τεχνητά σιμεντωμένων γεωυλικών και του ορισμού της περιβάλλουσας διαρροής για τα υλικά αυτά, την επίδραση της δέσης στην αντοχή και διαστολικότητα, καθώς και την απομείωση της δέσης αυξανόμενης της ανελαστικής παραμόρφωσης και το πρόγραμμα αυτών των δοκιμών παρουσιάζεται στον Πίνακα 3.

Ποσοστό Τέφρας (%)	Αριθμός Δοκιμής	Τριαξονική Διάταξη[1]	Τύπος Δοκιμής[2]	Ονομασία Μίγματος	OCR	Περιγραφή μεταβολής τάσεων
0	TX1	WF	I-C	ΑΑΣ-80-00	-	Ισότροπη αύξηση τάσης (πλευρ. & αξονικ.)
	TX2	BW	I-C	ΑΑΣ-80-00	-	Ισότροπη αύξηση τάσης (πλευρ. & αξονικ.)
	TX3	WF	CD	ΑΑΣ-80-00	5.0	Πλευρ.τάση σταθερή, Αύξηση κατακ. τάσης
	TX4	WF	CD	ΑΑΣ-80-00	2.5	Πλευρ.τάση σταθερή, Αύξηση κατακ. τάσης
	TX5	WF	CD	ΑΑΣ-80-00	1.7	Πλευρ.τάση σταθερή, Αύξηση κατακ. τάσης
	TX6	WF	CD	ΑΑΣ-80-00	1.3	Πλευρ.τάση σταθερή, Αύξηση κατακ. τάσης
10	TX7	WF	I-C	ΑΑΣ-90-10	-	Ισότροπη αύξηση τάσης (πλευρ. & αξονικ.)
	TX8	BW	I-C	ΑΑΣ-90-10	-	Ισότροπη αύξηση τάσης (πλευρ. & αξονικ.)
	TX9	WF	CD	ΑΑΣ-90-10	9.0	Πλευρ.τάση σταθερή, Αύξηση κατακ. τάσης
	TX10	WF	CD	ΑΑΣ-90-10	3.0	Πλευρ.τάση σταθερή, Αύξηση κατακ. τάσης
	TX11	WF	CD	ΑΑΣ-90-10	1.8	Πλευρ.τάση σταθερή, Αύξηση κατακ. τάσης
	TX12	WF	CD	ΑΑΣ-90-10	1.3	Πλευρ.τάση σταθερή, Αύξηση κατακ. τάσης
	TX13	BW	CD	ΑΑΣ-90-10	1.0	Πλευρ.τάση σταθερή, Αύξηση κατακ. τάσης
	TX14	BW	ED	ΑΑΣ-90-10	9.0	Πλευρ.τάση σταθερή, Μείωση κατακ. τάσης
	TX15	BW	ED	ΑΑΣ-90-10	1.8	Πλευρ.τάση σταθερή, Μείωση κατακ. τάσης
	TX16	BW	ED	ΑΑΣ-90-10	1.3	Πλευρ.τάση σταθερή, Μείωση κατακ. τάσης
	TX17	BW	ED	ΑΑΣ-90-10	1.0	Πλευρ.τάση σταθερή, Μείωση κατακ. τάσης
15	TX18	WF	I-C	ΑΑΣ-95-15	-	Ισότροπη αύξηση τάσης (πλευρ. & αξονικ.)
	TX19	BW	I-C	ΑΑΣ-95-15	-	Ισότροπη αύξηση τάσης (πλευρ. & αξονικ.)
	TX20	WF	CD	ΑΑΣ-95-15	11.0	Πλευρ.τάση σταθερή, Αύξηση κατακ. τάσης
	TX21	WF	CD	ΑΑΣ-95-15	3.7	Πλευρ.τάση σταθερή, Αύξηση κατακ. τάσης
	TX22	WF	CD	ΑΑΣ-95-15	2.2	Πλευρ.τάση σταθερή, Αύξηση κατακ. τάσης
	TX23	WF	CD	ΑΑΣ-95-15	1.2	Πλευρ.τάση σταθερή, Αύξηση κατακ. τάσης
	TX24	BW	CD	ΑΑΣ-95-15	1.0	Πλευρ.τάση σταθερή, Αύξηση κατακ. τάσης
	TX25	BW	ED	ΑΑΣ-95-15	11.0	Πλευρ.τάση σταθερή, Μείωση κατακ. τάσης
	TX26	BW	ED	ΑΑΣ-95-15	3.7	Πλευρ.τάση σταθερή, Μείωση κατακ. τάσης
	TX27	BW	ED	ΑΑΣ-95-15	2.2	Πλευρ.τάση σταθερή, Μείωση κατακ. τάσης
	TX28	BW	ED	ΑΑΣ-95-15	1.2	Πλευρ.τάση σταθερή, Μείωση κατακ. τάσης
	TX29	BW	ED	ΑΑΣ-95-15	1.0	Πλευρ.τάση σταθερή, Μείωση κατακ. τάσης

[1]WF- Wykeham Farrance, BW-Bishop & Wesley

[2]I-C-Ισότροπη Στερεοποίηση, CD-Στραγγιζόμενη Θλίψη, ED-Στραγγιζόμενος Εφελκυσμός

Πίνακας 3 –Εκτελεσθείσες τριαξονικές δοκιμές για τον ορισμό της περιβάλλουσας διαρροής, την επίδραση της δέσης στην αντοχή και τη διαστολικότητα στα μίγματα με προσθήκη ιπτάμενης τέφρας 0%, 10% και 15%.

Μηχανισμός Αστοχίας σε διάτμηση και κινητοποίηση συνοχής και τριβής

Για ασθενώς σιμεντωμένο έδαφος, η διατμητική αντίσταση σε συνθήκες εφελκυσμού αποτελείται από δύο συνιστώσες. Η μία είναι η συνοχή ψαθυρού τύπου (λόγω σιμέντωσης) και η άλλη είναι ιξώδους τύπου (εξαρτώμενη από την ενεργή ορθή τάση). Η εικόνα του μηχανισμού κινητοποίησης των συνιστωσών της διατμητικής αντίστασης, μπορεί να περιγραφεί με όρους των εννοιών που διατυπώθηκαν από τον Bjerrum (1971). Σύμφωνα με αυτή την άποψη, όλες οι επαφές σωματιδίων της αργίλου μπορούν να διαχωριστούν σε επαφές τριβής και επαφές συνοχής. Η αντίσταση τριβής στην πρώτη κατηγορία προέρχεται από την ολίσθηση μεταξύ σωματιδίων στα σημεία επαφής τους. Ο Calladine (1971) εξέτασε με λεπτομέρεια το μηχανισμό αστοχίας σε τέτοιες επαφές (ονομαζόμενες επαφές τραχύτητας) για κανονικά στερεοποιημένες και υπερστερεοποιημένες αργίλους. Όπως αναφέρει ο Iyer (1974), η συνοχή προέρχεται από τη διάρρηξη των επαφών στο προσροφημένο ύδωρ. Όταν σε ένα αργιλικό σωματίδιο επιβληθεί κάποια τάση για ορισμένο χρόνο, οι ενεργές τάσεις θα μεταβιβαστούν βαθμιαία από τις επαφές συνοχής στις επαφές τριβής, στις οποίες θα αποθηκευτεί και το ανακτήσιμο έργο παραμόρφωσης (recoverable strain energy) (Iyer, 1974).

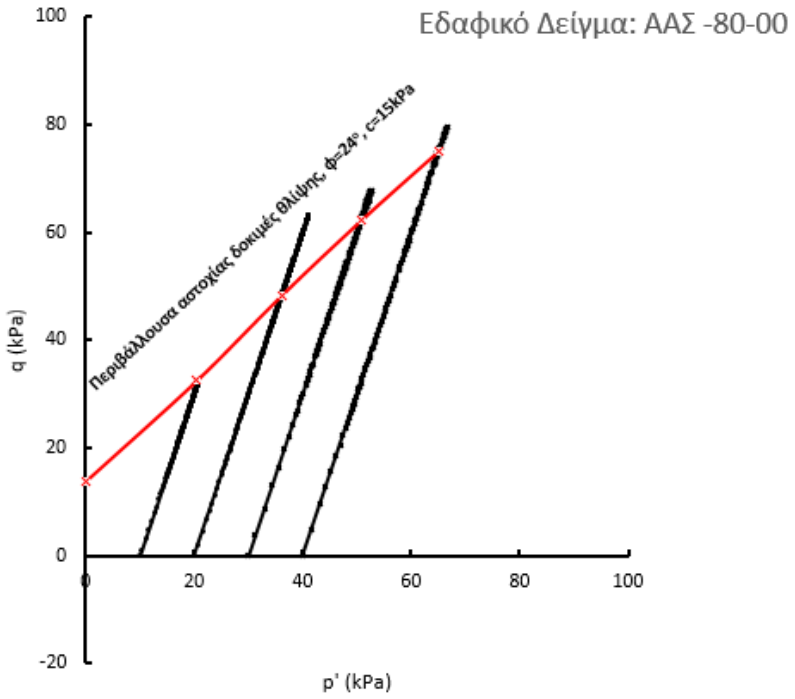
Όταν σε αυτό το σύστημα επιβληθεί μείωση της ενεργής ορθής τάσης, προκαλούμενη από τη δειγματοληψία και την εν συνεχεία διόγκωση, το περίπλοκο δίκτυο δομής φορτίζεται λόγω εσωτερικών τάσεων. Με την επιβολή διατμητικής τάσης, η τριβή δεν μπορεί να κινητοποιηθεί, μέχρι να διαρραγούν οι επαφές συνοχής, και να επιβληθούν μεταβολές της ενεργής ορθής τάσης στις επαφές τριβής. Στην περίπτωση των συνθηκών στράγγισης, η μεταβίβαση τάσεων είναι απότομη, λόγω της ψαθυρής φύσης των δεσμών. Επίσης καμία μεταβίβαση ορθής τάσης δεν λαμβάνει χώρα μέσω των επαφών τριβής, μέχρι να έχει κινητοποιηθεί πλήρως η συνοχή (Bjerrum and Kenney, 1976).

Κατά την εκτέλεση όλων των δοκιμών της παρούσας έρευνας, το πρώτο μέρος της διατμητικής αντίστασης εμφανίστηκε σαν απότμηση συνοχής στον άξονα των αποκλινουσών τάσεων και το δεύτερο μέρος εμφανίστηκε με χαρακτήρα τριβής. Σε ισχυρά σιμεντωμένα εδάφη, όπως ο σιμεντωμένος σχιστόλιθος, οι λατερίτες, κλπ., επικρατεί η συνοχή ψαθυρής φύσης. Για αναζυμωμένες αργίλους, η διατμητική αντοχή σε θλίψη εξαρτάται από την ενεργή ορθή τάση, και η συμπεριφορά είναι βασικά τριβής (ιξώδους τύπου συνοχή) με ελαφρά συνοχή.

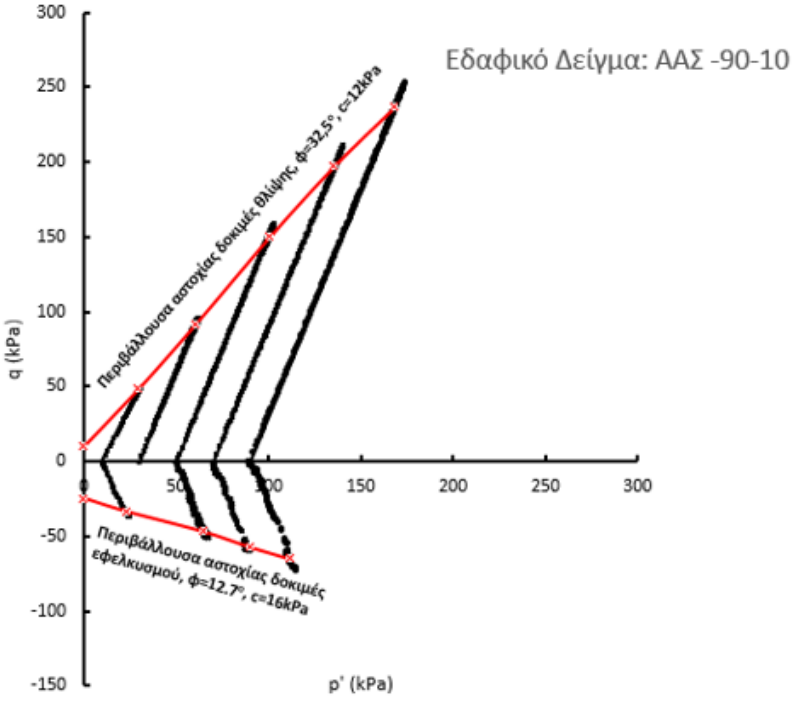
Έτσι η σιμέντωση είναι η κυρίαρχη αιτία της διατμητικής αντίστασης σε σιμεντωμένα εδάφη. Ενώ στις αναζυμωμένες αργίλους, όπως τα δείγματα της

παρούσας έρευνας, η τάση στερεοποίησης έχει σχετικά μεγαλύτερη σπουδαιότητα στην ανάπτυξη συνοχής ιξώδους τύπου.

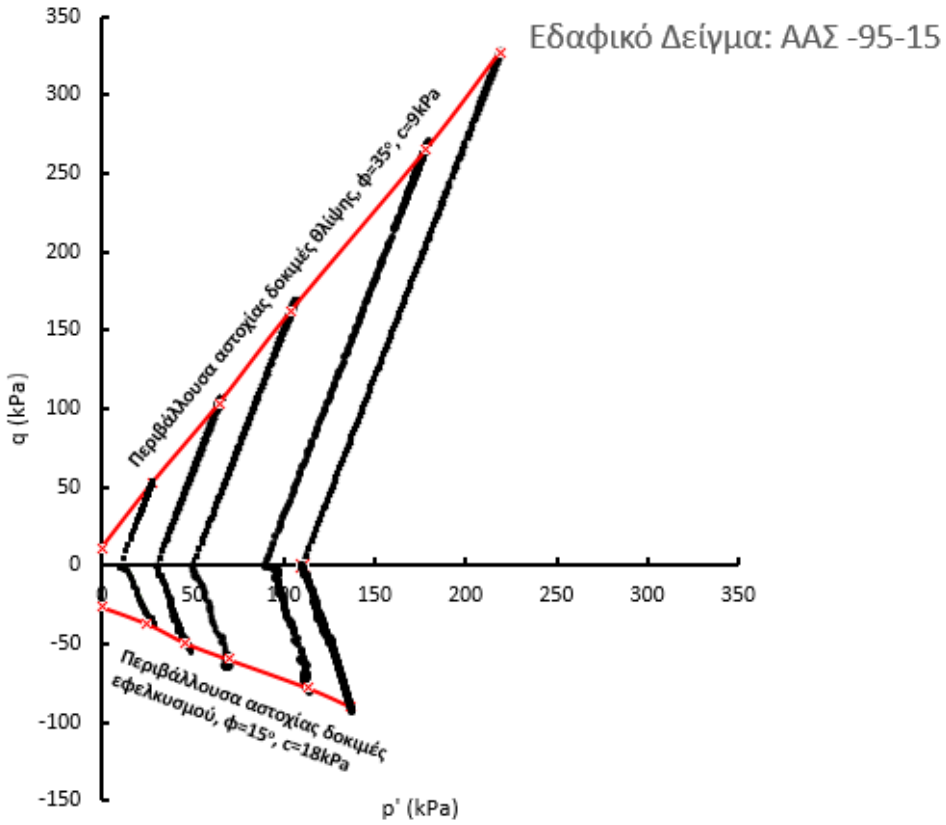
Αυτός ο μηχανισμός εξηγεί την ανάπτυξη τριβής στην περίπτωση των δοκιμών θλίψης. Η διατμητική αντίσταση, των βελτιωμένων με τέφρα αργίλων, βρέθηκε να εξαρτάται από την ενεργή ορθή τάση, και οι περιβάλλουσες αστοχίας των τριών δειγμάτων (Σχήματα 8 έως 10) φαίνεται να είναι κεκλιμένες για την περιοχή τάσεων που εξετάζεται στην έρευνα, επιδεικνύοντας συμπεριφορά συνοχής-τριβής. Αντίστροφα, η διατμητική αντίσταση σε δοκιμές εφελκυσμού εξαρτάται λιγότερο από την ενεργή ορθή τάση (δηλ. εμφανίζεται σχεδόν οριζόντια περιβάλλουσα αστοχίας) επιδεικνύοντας συνεκτική συμπεριφορά με ελαφρό χαρακτήρα τριβής.



Σχήμα 8 - ΑΑΣ-80-00 Περιβάλλουσα αστοχίας &διαδρομές τάσεων σε δοκιμές θλίψης(0% προσθήκη τέφρας)



Σχήμα 9 - ΑΑΣ-90-10 – Περιβάλλουσες αστοχίας και διαδρομές τάσεων σε δοκιμές θλίψης και εφελκυσμού (10% προσθήκη τέφρας)

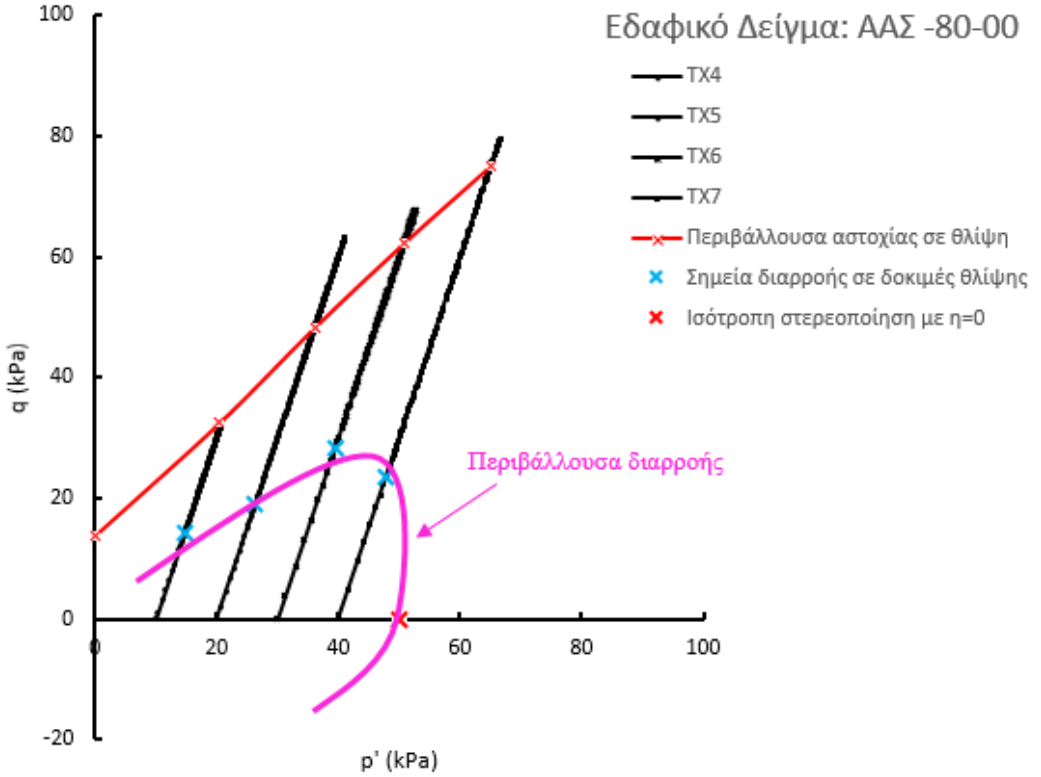


Σχήμα 10 - ΑΑΣ-95-15 – Περιβάλλουσες αστοχίας και διαδρομές τάσεων σε δοκιμές θλίψης και εφελκυσμού (15% προσθήκη τέφρας)

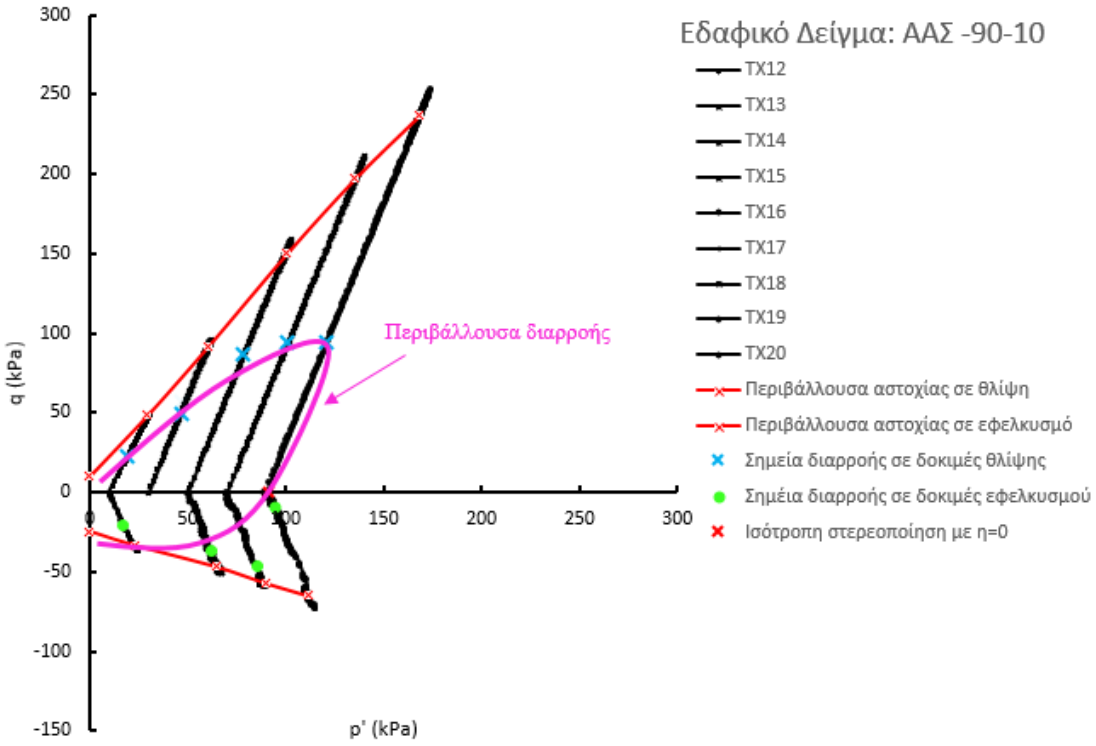
Περιβάλλουσες διαρροής: προσδιορισμός και γεωμετρικά χαρακτηριστικά

Η περιβάλλουσα διαρροής είναι ο γεωμετρικός τόπος των εντατικών καταστάσεων που διαχωρίζει την «ελαστική» συμπεριφορά πριν τη διαρροή, από τη «πλαστική» συμπεριφορά μετά τη διαρροή. Οι περιβάλλουσες διαρροής δεν είναι μοναδικές για δεδομένη τάση προστερεοποίησης, αλλά εξαρτώνται από την ταχύτητα φόρτισης ή τη διάρκεια της (Tavenas και Leroueil, 1981; Graham κ.ά., 1983). Σε αυτήν την έρευνα χρησιμοποιήθηκε σταθερή ταχύτητα παραμόρφωσης για όλες τις στραγγιζόμενες δοκιμές θλίψης και εφελκυσμού, διαφορετική βέβαια για κάθε μίγμα. Η έννοια της διαρροής έχει αποδειχθεί χρήσιμη για την κατανόηση της συμπεριφοράς μαλακών αργίλων κάτω από επιχώματα και πρανή (Kenney και Folkes, 1979; Wroth και Houlsby, 1980; Tavenas και Leroueil, 1981). Όπως αναφέρουν οι Graham κ.ά. (1983) έχει γενικώς εκτιμηθεί ότι ενώ τα αναζυμωμένα δείγματα επιτρέπουν σαφέστερη κατανόηση πολλών αλλά όχι όλων των πλευρών της συμπεριφοράς της αργίλου υπό ελεγχόμενες συνθήκες, ωστόσο και για τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά συμπεριφοράς, όπως η σιμέντωση και η γήρανση, δίνουν μία ενδιαφέρουσα βάση δεδομένων για περαιτέρω έρευνα.

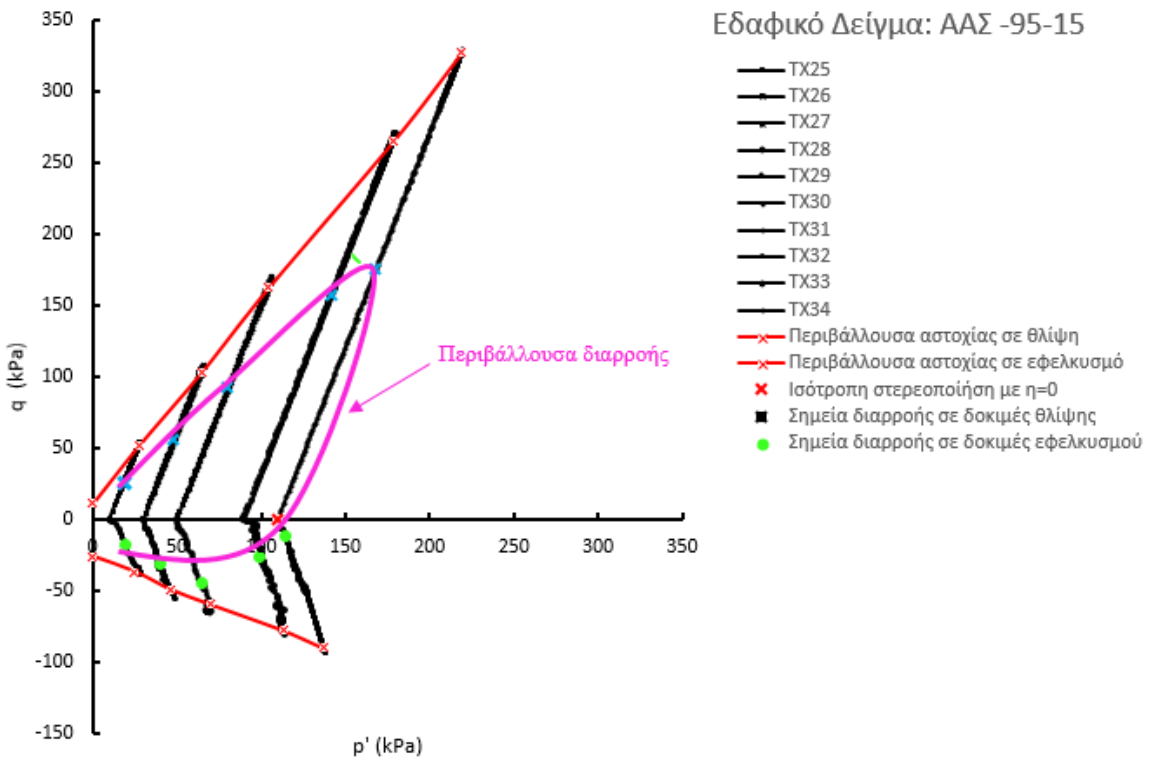
Όλες οι δοκιμές της παρούσας έρευνας έδωσαν καλά προσδιορισμένες περιβάλλουσες διαρροής σε διαγράμματα q-p’, χωρίς κανονικοποίηση (Σχήματα 11 - 13).



Σχήμα 11 - ΑΑΣ-80-00 Περιβάλλουσες διαρροής και αστοχίας(0% προσθήκη τέφρας)



Σχήμα 12 - ΑΑΣ-90-10 Περιβάλλουσες διαρροής και αστοχίας(10% προσθήκη τέφρας)



Σχήμα 13 - ΑΑΣ-95-15 Περιβάλλουσες διαρροής και αστοχίας (15% προσθήκη τέφρας)

Οι τιμές της αντοχής που προέκυψαν, από τις δοκιμές τριαξονικής θλίψης και εφελκυσμού μετά από ισότροπη στερεοποίηση απέδειξαν την επίδραση του ποσοστού τέφρας στην αντοχή της τεχνητά σιμεντωμένης αργίλου. Οι δοκιμές θλίψης, οι οποίες βασικά ενείχαν υψηλότερες ενεργές τάσεις στην αστοχία, απαιτούσαν μεγαλύτερης έκτασης προεκβολή για τον καθορισμό της συνοχής, από ό,τι οι δοκιμές εφελκυσμού. Οι δοκιμές εφελκυσμού έδιναν καλύτερο μέτρο της συνοχής λόγω της ύπαρξης δομής (δηλαδή των δεσμών σιμέντωσης, και της προκύπτουσας κράτυνσης, reserve resistance). Από την άλλη πλευρά, η συμπεριφορά της γωνίας τριβής ήταν σημαντικά διαφορετική. Οι χαμηλότερες τιμές γωνίας τριβής στον εφελκυσμό ήταν αναμενόμενες, λόγω του διαφορετικού μηχανισμού αστοχίας σε σχέση με τη θλίψη.

Τα αποτελέσματα των τριαξονικών δοκιμών έδειξαν ότι το μέγεθος και η θέση των περιβαλλουσών διαρροής, εξαρτάται από την παρουσία και το ποσοστό τέφρας στη μάζα της αργίλου και ότι είναι δυνατός ο καθορισμός μίας εύλογα αξιόπιστης επιφάνειας αρχικής διαρροής για κάθε ποσοστό ανάμιξης με τέφρα. Από την άλλη πλευρά, η διαφορά μεταξύ των δύο καταστάσεων της δοκιμαζόμενης αργίλου, με ή χωρίς την προσθήκη τέφρας, εντοπίστηκε στο σχήμα της επιφάνειας διαρροής. Παρατηρήθηκε ότι η προσθήκη τέφρας έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της καμπυλότητας της επιφάνειας αρχικής διαρροής, σε σύγκριση με του μη βελτιωμένου

δείγματος. Τα αποτελέσματα των δοκιμών, έδειξαν επίσης ότι η επιφάνεια διαρροής διαστέλλεται με την παρουσία και την αύξηση του ποσοστού τέφρας. Αυτό οφείλεται στην κινηματική χαλάρωση την οποία επιφέρει η θραύση δεσμών μεταξύ συμπλεγμάτων (δηλαδή η καταστροφή της δομής).

Κύρια Συμπεράσματα

Μικροδομική και Βασική Μηχανική Συμπεριφορά της Βελτιωμένης Αργίλου

- Η ανάμιξη τέφρας με τον πολτό της αργίλου οδήγησε σε ταχεία αντίδραση ενυδάτωσης, η οποία προκάλεσε μείωση της υγρασίας και την παραγωγή πρωτογενών προϊόντων σιμέντωσης. Η αντίδραση ενυδάτωσης συνοδευόταν από την πιο αργή ποζολανική αντίδραση, η οποία εξελισσόταν με την πάροδο του χρόνου.
- Ο δείκτης πλαστικότητας βρέθηκε να έχει ισχυρή συσχέτιση με το ποσοστό τέφρας ενώ είναι ανεξάρτητος από το χρόνο ωρίμανσης. Συνεπώς, αυτή η συμπεριφορά δύναται να χρησιμοποιηθεί για την ποσοτικοποίηση των μηχανικών χαρακτηριστικών αργίλων υψηλής πλαστικότητας βελτιωμένων με τέφρα.
- Η αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη της βελτιωμένης με ιπτάμενη τέφρα αργίλου αυξάνει με την αύξηση του ποσοστού της τέφρας και του χρόνου ωρίμανσης. Η ποζολανική αντίδραση, βρέθηκε ότι σε σύντομο χρονικό διάστημα παύει να συμβάλει στην αύξηση της αντοχής, όταν τα ποσοστό τέφρας δεν υπερβαίνει το 15%. Αποδείχθηκε ότι η συμβολή της αντίδρασης, παρέμενε σημαντική για παρατεταμένους χρόνους ωρίμανσης έως και 2 έτη, όταν το ποσοστό τέφρας είναι μεγαλύτερο από 15%. Σε τόσο μεγάλες περιόδους ωρίμανσης, σημαντικό μέρος των ιόντων Ca^{2+} διαχέεται στη μάζα της βελτιωμένης αργίλου προωθώντας την ποζολανική αντίδραση. Από την άλλη πλευρά, σε δείγματα με προσθήκη τέφρας σε ποσοστό χαμηλότερο από 15% και χρόνο ωρίμανσης τριών (3) μηνών – 112 ημερών , μόνο μικρό μέρος του Ca^{2+} αναλώθηκε από το έδαφος, οδηγώντας σε δείγμα πιο εύχρηστο κατά τη μορφοποίηση δοκιμίων.
- Με βάση τις παρατηρήσεις, η σχέση αντοχής σε ανεμπόδιστη θλίψη και ποσοστού τέφρας, μπορεί να χωρισθεί σε δύο ζώνες : Ανενεργή Ζώνη και Ενεργή Ζώνη. Τα δείγματα βελτιωμένης αργίλου με ποσοστό τέφρας μέχρι 8% και για όλο το φάσμα χρόνων ωρίμανσης, έδειξαν μόνο μία οριακή βελτίωση της αντοχής σε ανεμπόδιστη θλίψη, αυτή ορίζεται ως Ανενεργή Ζώνη. Αυτό φαίνεται να υποδηλώνει ότι απαιτείται ορισμένο ποσοστό τέφρας (μεγαλύτερο από 8%) για να ολοκληρωθεί η ποζολανική αντίδραση μεταξύ τέφρας και σωματιδίων αργίλου. Το τελικό αποτέλεσμα της πλήρους σιμέντωσης είναι η αύξηση της διατμητικής αντοχής, και αυτή η ζώνη ορίζεται ως

Ενεργή Ζώνη. Το άνω όριο αυτής της ζώνης πρέπει να είναι σε ποσοστό τέφρας σχετικά μεγαλύτερο από 15% και στους 3 μήνες χρόνου ωρίμανσης. Σε αυτή τη ζώνη η ταχεία απόκτηση αντοχής αποδίδεται στο γεγονός ότι η ποζολανική αντίδραση προωθεί την ταχεία διάχυση των ιόντων Ca^{2+} στη μάζα της αργίλου.

- Στις δοκιμές στερεοποίησης σε συμπιεσόμετρο, παρατηρήθηκε σημαντική αύξηση της φαινόμενης τάσης προστερεοποίησης και μείωση του φαινόμενου δείκτη συμπίεσης με την αύξηση του ποσοστού τέφρας και του χρόνου ωρίμανσης. Αυτό οφείλεται στη δημιουργία δομής στα σωματίδια της βελτιωμένης αργίλου (μέσω των δεσμών σιμέντωσης). Η βελτιωμένη άργιλος επιδεικνύει δυσκαμψία στη διόγκωση με αποτέλεσμα χαμηλό δείκτη διόγκωσης.
- Σε υψηλότερη τάση πέραν της φαινόμενης τάσης προστερεοποίησης οι καμπύλες e-logσ'_v της βελτιωμένης αργίλου μεταθέτονται σε υψηλότερο λόγο κενών από της μη βελτιωμένης αργίλου για την ίδια επιβληθείσα τάση προστερεοποίησης (50 kPa). Αυτή η μετάθεση είναι σχεδόν παράλληλη με τη γραμμή πρωτογενούς στερεοποίησης, ενώ είναι σημαντικότερη για μεγαλύτερα ποσοστά τέφρας και μεγαλύτερους χρόνους ωρίμανσης.
- Η ανάλυση μη βελτιωμένης αργίλου με Πολωτικό Μικροσκόπιο έδειξε ότι τα σωματίδια της αργίλου είναι σε διεσπαρμένη διάταξη. Στην βελτιωμένη άργιλο όμως, λόγω απελευθέρωσης ιόντων ασβεστίου από την αντίδραση ενυδάτωσης, η υφή μετατρέπεται σε κροκιδωμένη, σχηματίζοντας συσσωματώματα αργίλου-τέφρας διεσπαρμένα στη μάζα του δείγματος, εμποδίζοντας το σχηματισμό μίας ισχυρής και ομοιόμορφης δομής.

Πλαίσιο Συμπεριφοράς Βελτιωμένης με Ιπτάμενη Τέφρα Αργίλου Υψηλής Πλαστικότητας

- Η δοκιμή ισότροπης στερεοποίησης σε άργιλο βελτιωμένη με ιπτάμενη τέφρα, ανέδειξε τη συσχέτιση του ποσοστού τέφρας με τη φαινόμενη τάση προστερεοποίησης, η οποία αναπτύσσεται στη διάρκεια της ωρίμανσης λόγω της ποζολανικής ιδιότητας της τέφρας. Ωστόσο, η δοκιμή αυτή, δίνει πολύ χαμηλότερη τάση φαινόμενης προστερεοποίησης λόγω ωρίμανσης, από εκείνην που δίνουν τα αποτελέσματα της μονοδιάστατης στερεοποίησης από δοκιμή συμπιεσομέτρου. Συνεπώς συμπεραίνεται ότι, για εδάφη βελτιωμένα με την προσθήκη παράγοντα σιμέντωσης, η μονοδιάσατη ανισότροπη στερεοποίηση μπορεί ορισμένες φορές να δώσει παραπλανητικές ενδείξεις για την ανάπτυξη αντοχής στη διάρκεια του χρόνου ωρίμανσης.
- Η ύπαρξη δομής είναι συνήθως γνωστή για ευρύ φάσμα φυσικών εδαφών. Όμως για τεχνητά παρασκευασμένα εδάφη, δεν είναι πλήρως γνωστή. Η συμπεριφορά αυτών των

εδαφών στο εργαστήριο, δεν μπορεί να γίνει κατανοητή, εκτός αν ληφθεί υπόψη η επίδραση της δομής, καθώς η δομή είναι εξίσου σημαντική με τον αρχικό λόγο κενών και την ιστορία τάσεων κατά τον καθορισμό αυτής της συμπεριφοράς. Αν και η δομή μπορεί να προκύψει από διαφορετικές αιτίες, η επίδραση της στη συμπεριφορά παραμένει παρόμοια. Η δομή αυξάνει την αντοχή και διευρύνει την ελαστική περιοχή, όταν το δείγμα είναι σε συνθήκες θλίψης. Ενώ σε συνθήκες εφελκυσμού, το δείγμα φαίνεται να χάνει τη συνεκτικότητά του ταχύτερα, ελαχιστοποιώντας την ελαστική συμπεριφορά του εδάφους. Η έννοια της διαρροής, η οποία αναπτύχθηκε για να περιγράψει την επίδραση αυτών των συνθηκών, είναι εξίσου εφαρμόσιμη στην επίδραση της δομής όσο και της ιστορίας τάσεων. Ωστόσο, για να αποφευχθεί η σύγχυση, απαιτείται χωριστό πλαίσιο συμπεριφοράς για να περιγράψει αυτές τις επιδράσεις για ένα τεχνητά και ελαφρά σιμεντωμένο έδαφος με ασθενή δομή.

- Η εργαστηριακή έρευνα που πραγματοποιήθηκε, έθεσε θέματα για την επιρροή που έχει ιπτάμενη τέφρα στη δομή αλλά και στο σχήμα της επιφάνειας διαρροής. Και οι δύο τύποι βελτιωμένης αργίλου δεν σχημάτισαν ισχυρή δομή στη μάζα των δειγμάτων, και κατά μεγάλο βαθμό συμπεριφέρθηκαν ως μία αναζυμωμένη άργιλος. Όμως το γεγονός αυτό δεν εμπόδισε το σχηματισμό μίας σαφούς επιφάνειας διαρροής, η οποία δείχνει την επίδραση της σιμέντωσης.
- Οι δοκιμές θλίψης, οι οποίες ουσιαστικά συνεπάγονται υψηλότερη ενεργή τάση στην αστοχία, απαιτούσαν μεγαλύτερου μεγέθους προεκβολή για να προκύψει η συνοχή, σε σχέση με τις δοκιμές εφελκυσμού. Συνεπώς, οι δοκιμές εφελκυσμού, με χαμηλότερες ενεργές τάσεις, δίνουν καλύτερη εκτίμηση της συνοχής η οποία αποδίδεται στην επίδραση της δομής (π.χ. δεσμούς σιμέντωσης, κράτυνση). Ωστόσο η γωνία τριβής παρουσίαζε σημαντική διαφορά. Η χαμηλότερη τιμή γωνίας τριβής σε δοκιμές εφελκυσμού ήταν αναμενόμενη, λόγω του διαφορετικού μηχανισμού αστοχίας.
- Τα εργαστηριακά αποτελέσματα έδειξαν ότι η επιφάνεια αρχικής διαρροής διαστέλλεται με μικρή αύξηση του ποσοστού της τέφρας, καθώς και με τη μείωση της συνολικής υγρασίας. Η περιβάλλουσα διαρροής δύναται να συσχετισθεί με την αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη, το ποσοστό τέφρας και τη συνολική υγρασία. Η παρουσία τέφρας στη μάζα της αργίλου, προκαλεί μείωση της καμπυλότητας της επιφάνειας αρχικής διαρροής. Αυτό συμβαίνει διότι, όταν η ενεργή πλευρική τάση είναι υψηλότερη από εκείνη στην οποία στερεοποιήθηκε το δείγμα, και επίσης πλησιάζει την τάση αρχικής διαρροής, παρατηρείται μείωση της διαρροής σε σύγκριση με εκείνη που αντιστοιχεί σε χαμηλότερες πλευρικές τάσεις.

- Η διατμητική αντίσταση στην αστοχία βρέθηκε να εξαρτάται από το μέγεθος της ενεργής τάσης στην αστοχία, τη φύση των δεσμών και τη διατάραξη της δομής της αργίλου. Η δευτερεύουσα στερεοποίηση αποδείχθηκε ότι προκαλεί αλλαγές στη φύση των δεσμών, με αποτέλεσμα σε δοκιμές εφλκυσμού, η άργιλος να επιδεικνύει συμπεριφορά περίπου συνεκτικού υλικού.
- Τα αποτελέσματα δοκιμών ισότροπης θλίψης και εφελκυσμού έδειξαν ότι η τάση αρχικής διαρροής αυξάνει με το ποσοστό τέφρας καθώς και με τη μείωση της συνολικής υγρασίας.
- Όλα τα δείγματα, σε ισότροπα στερεοποιημένες στραγγιζόμενες δοκιμές (CIDC) θλίψης, επέδειξαν έντονη ελαστική συμπεριφορά πριν τη μέγιστη αντοχή. Ενώ τα δείγματα βελτιωμένης με τέφρα αργίλου, σε δοκιμές εφελκυσμού (CIDE) είχαν μικρή ογκομετρική μεταβολή μέχρι τη μέγιστη αντοχή, αποδεικνύοντας έτσι την ύπαρξη ασθενών δεσμών στην εδαφική μάζα, όταν αυτή υποβάλλεται σε εφελκυστικές τάσεις. Η μεταβίβαση της αντίστασης από συνεκτικές σε επαφές τριβής, είναι πολύ πιο αργή στις συνθήκες εφελκυσμού, καθώς το έδαφος επιχειρεί να διατηρήσει την αρχική του κατάσταση.
- Η κύρια επίδραση της προσθήκης τέφρας στη μαλακή άργιλο είναι η αύξηση του αρχικού λόγου κενών και η εμφάνιση καλά καθορισμένου σημείου διαρροής στα διαγράμματα τάσεων-παραμορφώσεων σε θλίψη και εφελκυσμό. Η διαρροή σχετίζεται με τη θραύση δεσμών σιμέντωσης. Ειδικότερα σε υψηλότερη πλευρική τάση, η οποία είναι πέραν της τάσης διαρροής, η δομή προφανώς έχει καταστραφεί στη διάρκεια της φάσης στερεοποίησης, ωστόσο συνεχίζει ακόμη να εμφανίζεται κάποια επίδραση της σιμέντωσης κατά τη διάρκεια της διάτμησης. Αυτό ήταν προφανές σε συνθήκες εφελκυσμού. Η υφή της βελτιωμένης αργίλου έπαιξε σημαντικό ρόλο στη διάρκεια της διάτμησης, και τα δείγματά της επέδειξαν πιο όλκιμη συμπεριφορά. Σε χαμηλή πλευρική τάση, η οποία είναι χαμηλότερη από την τάση διαρροής, η καταστροφή της δομής της βελτιωμένης αργίλου, συμβαίνει μόνο στη φάση της διάτμησης, ακολουθούμενη από χαλάρωση οφειλόμενη στην παραμόρφωση. Όσο μεγαλύτερο είναι το ποσοστό της τέφρας, τόσο υψηλότερα μεταθέτονται η επιφάνεια και η περιβάλλουσα διαρροής.

Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

- Το πλαίσιο συμπεριφοράς, το οποίο διατυπώθηκε στην παρούσα έρευνα για άργιλο βελτιωμένη με ιπτάμενη τέφρα, βασίστηκε σε περιεκτικότητες 10% και 15% σε τέφρα (εκφρασμένες με βάση το ξηρό βάρος αργίλου συν το βάρος του συνολικού ύδατος στο τελικό μίγμα) και σε χρόνο ωρίμανσης τριών (3) μηνών (112 ημερών). Καθώς η αντοχή της βελτιωμένης αργίλου εξαρτάται από την περιεκτικότητα σε τέφρα και το χρόνο ωρίμανσης, είναι αβέβαιο αν το πλαίσιο συμπεριφοράς δύναται επίσης να εφαρμοστεί σε άλλες περιπτώσεις αργίλων βελτιωμένων με διαφορετικά ποσοστά τέφρας και διαφορετικούς χρόνους ωρίμανσης. Συνεπώς αυτό το θέμα είναι αναγκαίο να διερευνηθεί περαιτέρω.
- Ο σχηματισμός δομής στη μάζα του εδάφους, δεν οφείλεται μόνο στο συνδετικό υλικό, αλλά σε αυτό συμβάλλει και το ίδιο το έδαφος ανάλογα με τον τύπο του. Μία άργιλος υψηλής πλαστικότητας, έχει τα δικά της μηχανικά χαρακτηριστικά τα οποία δύνανται να βελτιωθούν. Συνεπώς θα παρουσιάζει ενδιαφέρον μία έρευνα με διαφορετικά εδάφη, αλλά με προσθήκη ίδιου ποσοστού τέφρας και ίδιους χρόνους ωρίμανσης.
- Σε αυτήν την έρευνα, δεν καλύφθηκε το θέμα της συμπεριφοράς πριν τη διαρροή της βελτιωμένης με ιπτάμενη τέφρα αργίλου, καθώς και της μη γραμμικής συμπεριφοράς σε μικρές παραμορφώσεις. Η δυσκαμψία της υψηλής πλαστικότητας αργίλου βελτιωμένης με ιπτάμενη τέφρα και η εξάρτησή της από διάφορους παράγοντες, όπως το ποσοστό τέφρας, η συνολική υγρασία, και ο χρόνος ωρίμανσης με την προκύπτουσα λόγω ωρίμανσης φαινόμενη τάση προστερεοποίησης, πρέπει να ερευνηθούν περαιτέρω σε συνθήκες τριαξονικής φόρτισης και σε δοκίμια μεγαλύτερων διαστάσεων. Η μεταβολή της δυσκαμψίας στη διάρκεια καταστροφής της δομής, πρέπει επίσης να μελετηθεί. Η ενσωμάτωση μετρητών τοπικής παραμόρφωσης στη συνήθη διάταξη τριαξονικής δοκιμής, δύναται να ικανοποιήσει τις περισσότερες από αυτές τις απαιτήσεις. Οι γνώσεις σχετικά με τη δυσκαμψία της βελτιωμένης με ιπτάμενη τέφρα αργίλου, θα είναι χρήσιμες στην αριθμητική ανάλυση προβλημάτων και στην γεωτεχνική πρακτική.
- Η βασική παραδοχή αυτής της έρευνας είναι ότι όλα τα δείγματα είναι ισότροπα. Τα δείγματα, πριν τη διάτμηση, στερεοποιήθηκαν ισότροπα σε καθορισμένη πίεση. Αν και αυτές οι συνθήκες είναι κατάλληλες και επαρκείς για εργαστηριακή έρευνα, ωστόσο είναι διαφορετικές από εκείνες για εδάφη βελτιωμένα με ιπτάμενη τέφρα επί τόπου, όπου η ωρίμανση και η φόρτιση

συμβαίνουν σε ανισότροπες συνθήκες. Η επίδραση της ανισοτροπίας θα μπορούσε να ερευνηθεί με τα δείγματα να ωριμάζουν και να δοκιμάζονται σε ανισότροπες συνθήκες θλίψης και εφελκυσμού, με την προϋπόθεση το πρόγραμμα ωρίμανσης και δοκιμών να έχει σχεδιαστεί κατάλληλα.

- Με βάση το πλαίσιο συμπεριφοράς το οποίο παρουσιάζει η παρούσα έρευνα, θα μπορούσε να διατυπωθεί ένα καταστατικό προσομοίωμα αργίλου βελτιωμένης με ιπτάμενη τέφρα σε τριαξονικές φορτίσεις θλίψης και εφελκυσμού. Αυτό είναι απαραίτητο ώστε το βελτιωμένο έδαφος να μπορεί να ενσωματωθεί επιτυχώς σε μία ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων.

Summary

Scope

Artificial cementation of clays has been studied and applied in soil improvement using various methods and techniques for several years. Although considerable work has been done to develop advanced machinery and techniques for the implementation of artificial cementation, less knowledge is available on the mechanisms involving the formation of the artificial structure and the resulting mechanical behaviour.

The term ‘fly ash’ is often used to describe any fine particulate material precipitated from the stack gases of industrial furnaces burning solid fuels. The amount of fly ash collected from furnaces on a single site can vary from less than one ton per day to several tons per minute. The characteristics and properties of different fly ashes depend on the nature of the fuel and the size of furnace used. Pulverization of solid fuels for the large furnaces used in power stations, creates an immediate, urgent problem; dry ash has to be collected from the stack gases and disposed of, quickly and safely.

Artificial cementation is used in civil engineering practice as an effective method for the stabilization of soft ground. Several researchers have experimentally studied the yielding behavior of natural structured soft clays, and a number of models have been developed for predicting the shearing and compression behavior of such material (e.g. Mitchell, 1970; Wong and Mitchell, 1975; Graham et al., 1983; Clausen et al., 1984; Folks and Crookes, 1985). Natural sensitive cemented clays tend to exist in a meta-stable state; once the apparent “preconsolidation pressure” caused by the natural cementation is exceeded, rupture of the particle bonds results in an abrupt increase in compressibility (e.g. Mitchell, 1970). Since the material forms an anisotropic structure prior to cementation, evidence of this fabric is apparent in the mechanical response of the soil (e.g. Lo and Morin, 1972; Tavenas and Leroueil, 1977). In contrast, many artificial techniques involve significant remoulding of the in-situ material, replacing the meta-stable fabric of the soil with an almost uniform isotropic matrix of bonded particles and aggregates (Nagaraj and Miura, 2001).

Although this material has been previously described as “structured” (e.g. Horpibulsukk et al. 2010), the yielding and plastic flow of artificially cemented clays appears to be fundamentally different from that of naturally cemented clayey soil. Thus far, not major implementation of these forms of constitutive model into finite

element software has occurred (e.g. Helinski et al. 2007), but it is important that suitable approaches are developed for accurate prediction of complex boundary value problems. In the discussion which follows, the term “artificial soil structure” will be used to define the soil structure resulting from the mixing of fly ash (typically into slurry) into a soil matrix.

Therefore, the primary objectives of this research are:

i. The formation of microstructure in artificially cemented clay materials of high plasticity, by using as binding agent Ptolemais type C fly ash, and the carrying out of a large number of laboratory soil tests on samples with varying ash content and curing time in order to investigate the physical and mechanical properties of the fly ash treated clay.

ii. The strength values obtained from triaxial compression and extension tests carried out on isotropically consolidated samples and especially the evolution of yield locus during the hardening phase.

iii. The development of a framework for the mechanical behaviour of fly ash-treated high plasticity clays, emphasizing on the destructuration conditions, i.e. on the destruction of the structure created due to the presence of the binding agent (fly ash).

Method

Generally

A wide range of mix proportions, different curing conditions and curing times were used for this study to provide extensive information on the behavior of a high plasticity clay with the addition of fly ash as the cement binding for the structuration of the clay. This is achieved through a program of various sets of fly ash and water content proportions. Fly-ash clay mixtures were preconsolidated under a constant load in a rigid-walled cylindrical container referred to as a conslidometer.

Choice of materials used

Clay

The untreated clay used for this study was collected from clay pits and piled excavated clay in AgiosStefanos, an area on the east side of Attiki. More specifically this clay is used for brick production for the local ceramic facility “Flessiopoulos”.

On the basis of its mineralogical composition, the clay sample was characterized by a generally high content in illite (approximately 20%-30%) and by low content in kaolinite, chlorite and montorillonite. High contents in carbonate minerals were also found in the pits where the clay sample was collected with a mean value of 17.1%. The content in organics lied between 1.5% to 4% (e.g. Perraki, 1987). By comparing the characteristics and properties of different natural clays from the regions of Chalkida and Attiki, it was decided that the more suitable clay for this study was the Agios Stefanos clay as it is a high plasticity clay, key element for the determination of behavioral framework of a lightly cemented clay.

The basic properties of the Agios Stefanos clay are summarized in Table 1.

Properties	Value	Properties	Value
Liquid Limit, LL (%)	72	Grain Size Distribution:	
Plastic Limit, PL (%)	26	Sand (%)	8
Plasticity Index, PI (%)	46	Silt (%)	23
In-situ Moisture Content., w (%)	31	Clay (%)	69
Liquidity Index, I_L	0.11	Wet Unit Weight, γ_w (kN/m^3)	15.1
Initial Void Ratio, e_o	2.29	Dry Unit Weight, γ_d (kN/m^3)	8.4
Specific Gravity, Gs	2.78		

Table 1 – Basic properties of Agios Stefanos clay

Fly ash

The term ‘fly ash’ is often used to describe any fine particulate material precipitated from the stack gases of industrial furnaces burning solid fuels. Characterization of fly ash in terms of composition, mineralogy,surface chemistry and reactivity is of fundamental importance inthe development of various applications of fly ash. Pozzolans are siliceous and aluminuous materials which, through themselves possessing little or no cementitious value, in finely divided form

and in the presence of moisture, will chemically react with calcium hydroxide at ambient temperature to form compounds with cementitious properties (ASTM Standard C618-80). Fly ashes capable of reacting with $Ca(OH)_2$ at room temperature can act as pozzolanic materials. Their pozzolanic activity is attributable to the presence of SiO_2 and Al_2O_3 in amporhous form. According to ASTM C618-93 Specification for fly ash and raw or calcined natural pozzolan, for use as mineral admixture in Portland cement concrete, pozzolans are defined as siliceous and aluminous materials which have little or no cementitious value. In a finely divided form and in the presence of moisture, fly ash will chemically react with calcium hydroxide at ordinary temperatures to form compounds which have cementitious properties.

ASTM C-618 categorizes coal combustion fly ash into two classes: Class F and Class C. The Class F fly ashes are normally generated due to combustion of anthracite or bituminous coal. The Class C fly ashes are produced due to burning of lignite or subbutiminous coal. Most fly ashes are rich in SiO2, Al2O3, and Fe2O3, and contain significant amounts of CaO, MgO, MnO, TiO2, Na2O, K2O, SO3, etc. ASTM Class C fly ashes (high-lime fly ashes) typically contain CaO in excess of 10% up to 40%, and Class F fly ashes (low-lime fly ashes) generally contain less than 10% CaO. Due to high CaO content, Class C fly ashes participate in both cementitious and pozzolanic reactions whereas Class F fly ashes predominately participate in pozzolanic reaction during the hydration process. Therefore, Class C fly ashes are classified as cementitious and pozzolanic admixtures/additives and Class F fly ashes as normal pozzolans for use in concrete.

In Greece, most lignite deposits are located in the Florina – Ptolemais – Kozani basin, a large intensively exploited area, in northern Greece. This area is exploited by open-cast mining mining and feeds nearby lignite – fired power stations.

The Greek fly ash which is produced at the electrical power stations of Ptolemaida belongs to type C fly ash. The type C fly ash which, as mentioned in previous Chapter, has high lime content (10%-35%), it is both pozzolanic and cementitious and presents hydraulic attributes.

The fly ash of Ptolemais is a fine divided material with granulometric composition. According to Koukouzas et al. (2005), this specific type of fly ash contains material with granulometry below 45μm (≥55% of its composition) in contrast with the rest of material which has granulometry 45-90μm. It also contains glass by which is consisted the majority of its matrix, while there are dominant

phenocrystals of minerals such as quartz, feldspars, gelenite, anhydrite, lime, portlandite and chlorite.

Fly ash consists of fine, powdery particles predominantly spherical in shape, either solid or hollow, and mostly glassy (amorphous) in nature. The carbonaceous material in the fly ash is composed of angular particles. The particle size distribution of most bituminous coal fly ash is generally similar to that of silt (less than a 0.075 mm or No. 200 sieve). Although sub-bituminous coal fly as his also silt-sized, it is generally slightly coarser than bituminous coal fly ash. The specific gravity of fly ash is 2.3, while its specific surface area may vary from 170 to 1000 m^2/kg. The colour of fly ash can vary from tan to gray to black, depending on the amount of unburned carbon in the ash.

Mixing of soil – fly ash samples

Untreated clay of Agios Stefanos area was prepared from its natural wet state without pre-dying. Lee et al. (2005) noted that the pre-drying causes largely irreversible changes to the Atterberg's Limits of the clay, which are indicated of chemical changes. The selected binding agent, i.e. fly ash of Ptolemais, was finely pulverized into a powder (oven drying and passing Sieve No. 40), in order to create a uniform bond with the soil matrix.

For a given binding agent content, the shear strength of the treated soil depends on the total clay water content. There exists an optimum clay water content at which the shear strength is the maximum (Lorenzo et al., 2006). The optimum clay water content is the total clay water content present in the soil including water from the fly ash slurry at which maximum strength is achieved. The overall water content of the clay-water-fly ash paste just at the time of mixing will be the total remoulding water plus the water in the fly ash slurry.

In order to determine the optimum clay water content for the fly ash treated samples, experiments were conducted for water contents ranging from 1.1 to 1.6 times the liquid limit water content depending on the fly ash amount added to the soil-water mixture.

Soil-fly ash mixtures were prepared from the slurry clay and powdered fly ash. A percentage of the prescribed amount of water was first added to the Agios Stefanos clay and mixed thoroughly by the NTUA mixing machine to obtain a clay-slurry with desired water content. The selected amount of fly ash for each sample and the remaining amount of water were then added to the clay-slurry to achieve a thorough

and uniform mixing. The whole mixing process was done in 30 minutes, to avoid loss of the final water content through the hardening process of the clay-fly ash mixture.

Initial consolidation and sample production

The treated mix was then placed in a stainless steel type rigid walled mould measuring 150mm diameter and 120mm height. The bottom end of the mould was covered by a metallic perforated plate to allow the trapped air and excessive water to escape during the pre-consolidation stage and curing period. Filter papers were placed on both ends of the mould.

After the mixture preparation and its placement on the metallic prefabricated mold, a 50kPa constant vertical load was applied on the mixture in order to stabilize the mixture, allow the trapped air in the soil-fly ash matrix to escape and enhance the homogeneity of the mixture. When the pre-consolidation stage was over, the treated clay with the metallic mold were placed in a bath tab full of distilled water for curing, for a 3 month period. Then, the treated clay was extracted from the metallic mould, carefully wrapped and placed in a constant humidity chamber ready to be used for oedometer and triaxial specimen formation.

Clay-Fly ash content and curing time of samples

The aim of this study was not to synthesize the physico-chemical as well as the microstructural behavior of lightly cemented clays in addition to the engineering behavior, but to investigate, evaluate and explain the constitutive behavior of lightly cemented clays by conducting laboratory tests. The main objective of the experiments in this study was, therefore, to investigate the constitutive behavior of fly ash- treated clay under various triaxial loading conditions, which would provide the basis for the constitutive framework of lightly cemented clays.

For this reason, various fly ash contents, water contents, and curing time were used during the test program. The key element for creating the various mix proportions was to form mixtures with the same initial basic properties, i.e. bulk unit weight and on this basis, investigate the structuration behavior of high plasticity clay mixed with fly ash. A vertical stress of 50kPa was also applied on top of the stabilized sample after preparation. The curing period was up to 720 days.

In order to investigate the curing time and strength stabilization, the compressibility and stress-strain behavior for fly ash – treated clay of Agios Stefanos, 4% to 25% fly ash content and 82% to 115% total water contents were used. The soil-fly ash-water proportions of the different composition sets used are summarized in Table 2. Strength, compressibility and basic properties assessments were made in various curing periods (14, 28, 56, 84, 112, 168, 224, 365 and 730 days).

Sample (s:w:fa)	**Total Water Content (%)**	**Fly ash Content (%)**	**Curing Time (days)**	**Conducted tests for each sample**
ΑΑΣ-80-00	80	0	14~365	Index Properties, 1DCT, UU, ICT, CIDC, PLM
ΑΑΣ-82-04	82	4	14~365	Index Properties, 1DCT, UU
ΑΑΣ-85-06	85	6	14~365	Index Properties, 1DCT, UU
ΑΑΣ-87-08	87	8	14~365	Index Properties, 1DCT, UU
ΑΑΣ-90-10	90	10	14~730	Index Properties, 1DCT, UU, ICT, CIDC, CIDE, PLM, XRD
ΑΑΣ-95-15	95	15	14~730	Index Properties, 1DCT, UU, ICT, CIDC, CIDE, PLM, XRD
ΑΑΣ-115-25	115	25	14~730	Index Properties, 1DCT, UU
Remarks	1. Basic property tests after mixture stage and during curing period; 2. 1DCT: Oedometer Consolidation Test; 3. ICT: Isotropic Compression test; 4. CIDC/CIDE:isotropic consolidated drained compression/extension test; 5. K_0C/ K_0E: k_0 consolidation test in compression/extension 6. PLM: Polarising Light Microscope analysis; 7. XRay: X-Ray diffraction analysis			

Table 2 – Mixture proportions and experiments of this study

Laboratory testing equipments used for this study

In this study, a set of three manual oedometers was used to run the consolidation tests for the various mix proportions of fly-ash treated clay. The manufactured name

of each equipment is Wykeham Farrance. The pre-consolidated soil specimen was placed inside a mental ring with two porous stones, one at the top of the specimen and another at the bottom. The specimens were 70mm in diameter and 19mm thick. The load of the specimen was applied and compression was measured by the imbedded control system. The specimen was kept under water during the test. Every load increment was kept constant for 24 hours and was manually go to the next load, when each load had reached its secondary compression. The next load was doubled of the previous load, thus doubling the pressure on the specimen and the compression measurement was continued ($\Delta p/p_1=1.0$).

The two triaxial apparatuses used for this study were for samples of 38mm and height of 76mm and they are described as follows:

(α) the standard Wykeham Farrance triaxial cell used for this study has a maximum pressure rating of 1000kN and is manufactured from a light alloy material of a non-corrosive specification. The cell has a detachable base platen which is sometimes referred to as pedestals or pressure pads. The base plate of the triaxial cell on which the chamber is firmly screwed on has four (4) de-airing blocks with digital transducers which are installed in the four pressure lines coming out of the base plate. Two of them are used to fill the cell with water and thus measure the cell pressure during a triaxial test and the other two are installed in the pore pressure line. The main purpose of the on-off valves in these pressure lines is to be able to isolate, apply and measure the respective pressures (cell, back and pore). Axial strain is measured externally by means of a displacement transducer and volume strain is measured by means of a displacement transducer located on the back pressure line.

and,

(b) a high quality stress/path triaxial system is consisting basically of the Bishop and Wesley cell as shown in figure 6.4, three pressure/volume controllers, internal submersible load cell to measure axial load, a pressure transducer to measure pore water pressure and a linear displacement transducer to measure vertical displacement.

The stress path cell is of the Bishop and Wesley type which utilises the pressure differential between the cell pressure and the lower chamber to apply load to the

sample. Known displacements may be applied by pumping a known volume of water from a GDS pressure controller into the lower chamber, as the seal area of the piston is known the displacement is calculated by the software. The cell has a lift off type cell top where the cell closure bolt also provide structural stiffness.
The cell possesses electrical feed through connections located at the top that allows for the use of an internal load cell. A suction cap located between the load cell and top cap allows a negative deviator load to be applied to the specimen, thereby making it possible to perform extension tests.

The cell is self-contained, portable, and requires no loading frame. The axial load is applied to the sample by pressurizing the lower chamber at the bottom of the cell. The piston pushes up a loading ram, at the top end of which is the pedestal on which the soil sample is mounted. Thus, in the conventional triaxial apparatus the loading ram is pushed downward against the top of the sample. In the stress path cell, however, it is the sample that is pushed upward against a stationary submersible load cell. This is a salient feature of the stress path cell that makes it possible to measure not only the vertical swell of the tested sample but also its total volume change. In the conventional triaxial apparatus it has been possible to monitor only the total volume change of the tested specimens.

Structuration and destructuration behaviour of the treated clay with seven (7) different clay-fly ash mix proportions.

Basic physical and index properties

Figures 1 and 2 show the variation of final water content of the fly ash treated clay after different curing periods without and with pre-consolidation of 50kPa of the sample respectively. In this study, the water content is defined as the ratio of weight of water to the weight of total solids, which consists of soil and fly ash solids, and it is determined by heating the fly ash aggregates in an oven at a temperature of 105^{o}C for 24 hours and using the untreated AgiosStefanos clay from its natural wet state without pre-drying.

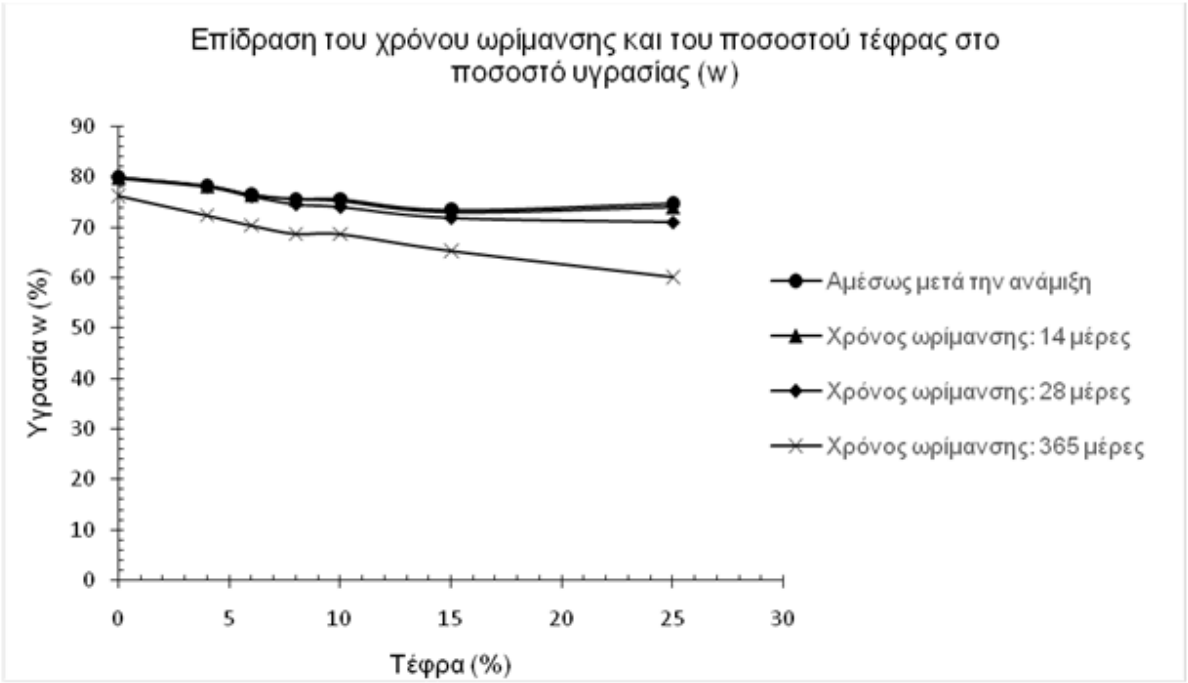


Figure 1 – Effect of curing time and fly ash contents on water content without sample preconsolidation.

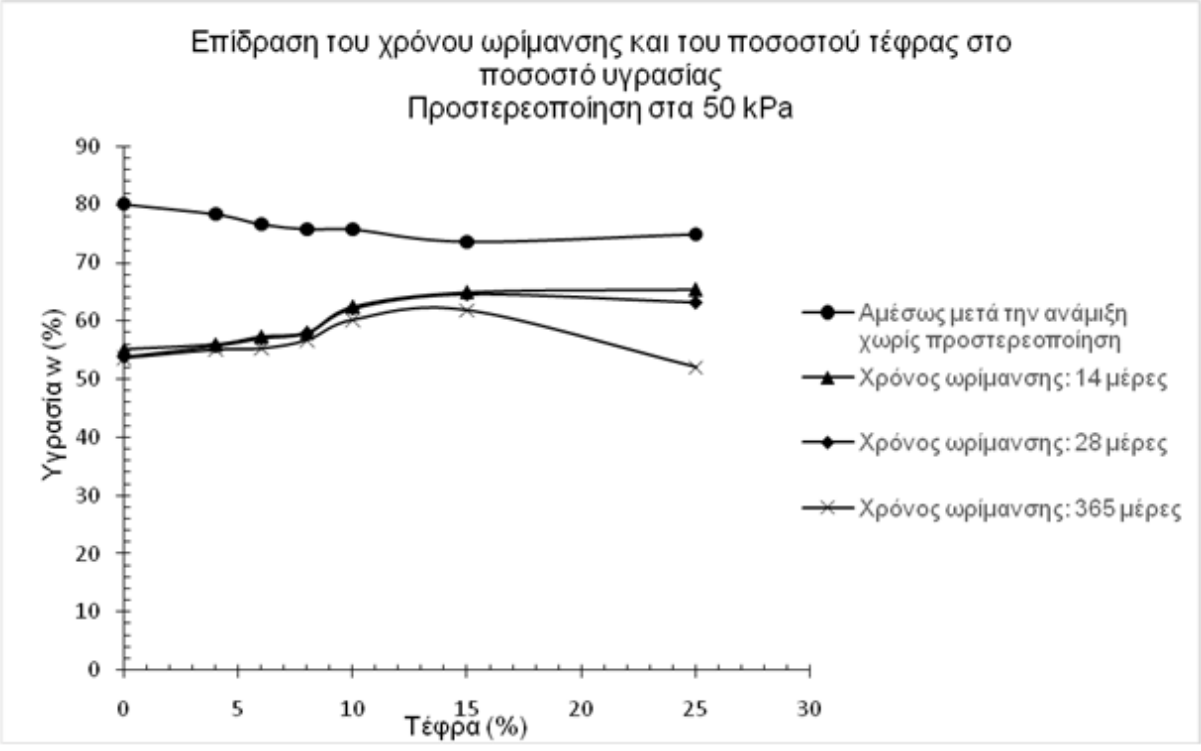


Figure 2 – Effect of curing time and fly ash contents on water content with sample preconsolidation of 50kPa.

In Fig. 2, the immediate reduction of water content from that of the slurry treated clay is due to the applied vertical load of 50kPa on the mixture. In both Figs. 1 and 2 show, much of the decrease in water content takes place within the first 28 days of curing, and the magnitude of reduction increases with fly ash content. As it can be pointed there is not a significant water content reduction even within a curing time of 365 days (1 year) and this is due to the impact of fly ash as a binding agent.

Similar reduction was also observed by Thenoux et al. (2009), Das (2009), Ahmaruzzaman (2010), and Saraswat et al. (2014) for clays. This is not surprising since fly ash is not a very strong binder for increasing the strength of a soil. The physical and mechanical properties were improved to a certain extent with the addition of fly ash, but above an 'x' percentage of fly ash addition. As can be seen in figures 1 and 2 after a percentage of 15% of fly ash addition there was a significant change in the water content.

This is not surprising since water is absorbed and transformed into hydrated CASH during the hydration and pozzolanic reactions, and will not be expelled by re-heating the cementitious products to 105^{o}C. This notion can be readily verified by conducting a simple experiment with an equivalent amount of pure C_aO in-place of the fly ash. Since both the hydration and pozzolanic reactions involve calcium, the total amount of water used should be proportional to the amount of available calcium. The comparative results of two marine clay samples treated by 5% pure C_aO and 7.38% OPC, respectively. The proportions are chosen so that the amounts of calcium in both samples are equal. The amount of OPC was also sufficiently small to ensure the pozzolanic reactions terminate due to complete utilization of calcium. Dry C_aO or OPC powder was mixed with clay slurry with initial water content of 80%, the water content after 28 days was nearly equal for both samples, thereby verifying the notion.

Referring to Figs 1 and 2 again both the 14- and 28- day water content did not show any significant decrease at fly ash content of less than 15%, which then moderated substantially at higher fly ash contents. Furthermore, the vertical offset between the immediate and 28-day curves increased as the fly ash content increased, but stabilized to a roughly constant value at about 15% fly ash content. This indicates that the reaction may be retarded at higher fly ash contents.

For comparison purposes, the index tests in this study were conducted after specimens have been subjected to a vertical load of 50kPa in order to stabilize the

mixture, allow the trapped air in the soil-fly ash matrix to escape and enhance the homogeneity of the mixture.

As shown in Figure 3, the plasticity index decreases slightly in low fly ash contents of 6% or less, followed by a steady decrease as fly ash content increases. This can be attributed directly to the different trends of behavior manifested by the plastic and liquid limits. The plastic limit increased monotonically with increasing fly ash content, after a curing time of 14 days, with larger rate of increase at low fly ash content. It is significant to notice that the 28-day plastic limit decreasedas the fly ash content increased and stabilized at the 365-day curing time. Similar trends have been observed on other fly ash treated clay (e.g. Thenoux et al., 2009) as well as lime and cement stabilized soils containing significant amount of clay minerals (e.g. Brandl et al., 1981; Local et al., 1996; Uddin et al., 1997, Kamruzzaman, 2002). Local et al. (1990) suggested that one possible reason for this decrease is the aggregation and cementation of particles into larger sized cluasters. Another possible reason is the entrapped water within the intra-aggregate pores. As suggested Local et al. (1996), the presence of this intra-aggregate water increases the apparent water content without really affecting the interaction between aggregates.

The liquid limit decreased significantly at high fly ash content (≥15%) and at curing time larger than 28 days. This is consistent with the notion of entrapped water with the intra-aggregate pores. However, the rates of change of these two Atterberg's limits at higher fly ash content are not the same. This suggests that the entrapped water hypothesis explains much, but not all, of the observed changes in the plastic and liquid limits.

It should be noted that the trend of change in the liquid limit with fly ash content seems to depend heavily on the soil type. Sivapullaiah et al. (2000) reported a similar decreasing trend on lime-treated black cotton soil after 7 days of curing. Kinuthia et al. (1999) also reported a similar trend for lime-treated kaolinite, measured at few hours after mixing. On the other hand, Local et al.'s data (1996) on lime-treated Louiseville clay after 100 days of curing suggest a general increase in liquid limit with lime content. Brandl (1981) reported divergent trends for two soils, with the more plastic soil (containing montmorillonite) showing a significant decrease in liquid limit after 7-day and 270-day curing and a less plastic soil showing a corresponding increase. The general trend appears to be one of decreased liquid limit is highly plastic and increased liquid limit in soil of low plasticity. Taken in the light of mechanisms postulated above, this suggests that, in soils of high plasticity, the

encapsulation of the clay clusters by deposited cementitious products has a dominant effect, leading to a lowering of the liquid limit. Additionally, in soils of low plasticity, the presence of entrapped water has a dominant effect, leading to a rise in the liquid limit.

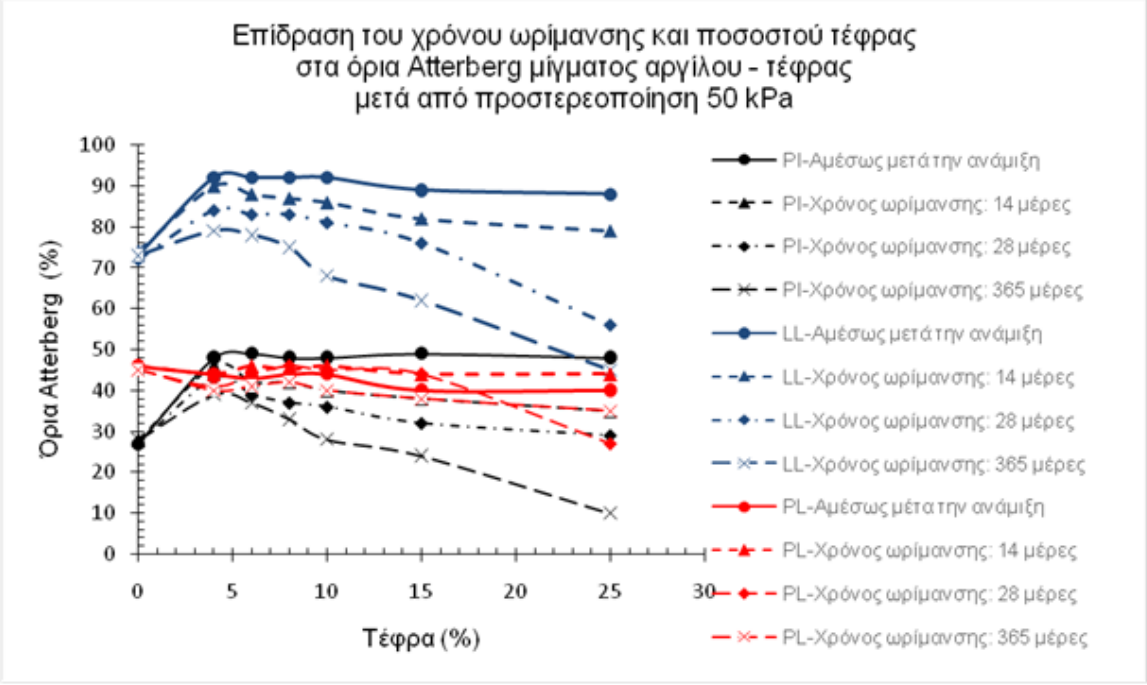


Figure 3 – Effect of curing time and fly ash content on Atterberg's limits with sample pre-consolidation of 50kPa

One dimensional consolidation tests

The pre-consolidated soil specimen was placed inside a mental ring with two porous stones, one at the top of the specimen and another at the bottom. The specimens were 70mm in diameter and 19mm thick. The load of the specimen was applied and compression was measured by the imbedded control system. The specimen was kept under water during the test. Every load increment was kept constant for 24 hours and was manually go to the next load, when each load had reached its secondary compression. The next load was doubled of the previous load, thus doubling the pressure on the specimen and the compression measurement was continued ($\Delta p/p_1=1.0$).

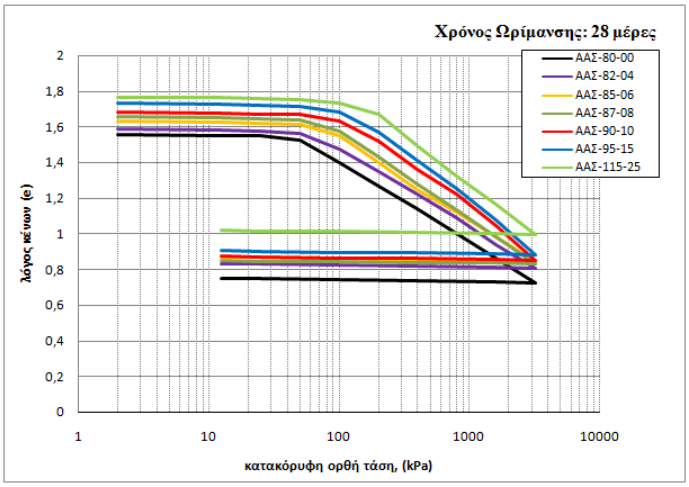
Compressibility properties of seven mix proportions from no fly ash addition (untreated clay) to 25% addition of fly ash, at various curing times from 28 days to 365 days were determined by the incremental loading of one dimensional

consolidation test. The vertical stresses applied during the consolidation were 12.5kPa, 25kPa, 50kPa, 100kPa, 200kPa, 400kPa, 800kPa, 1600kPa, 3200kPa, unloading of the specimen was also performed. During all these tests, drainage was permitted from top and bottom of the specimen.

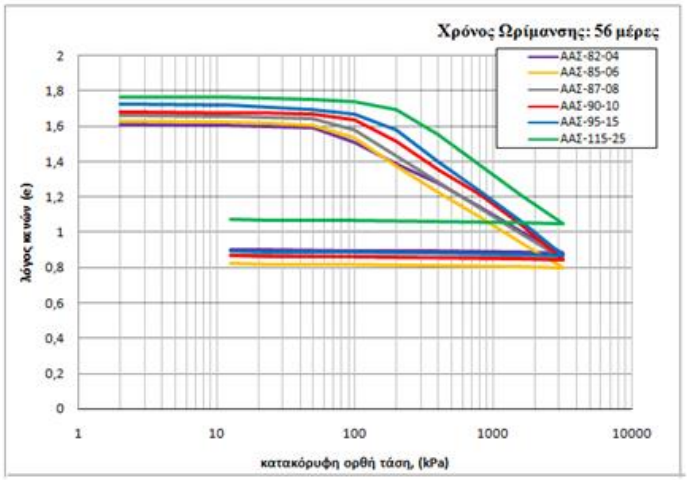
The results of the 1-D consolidation tests were divided in two categories (α) fly ash content effect and (β) curing time effect.

(a) <u>Fly ash content effect</u>

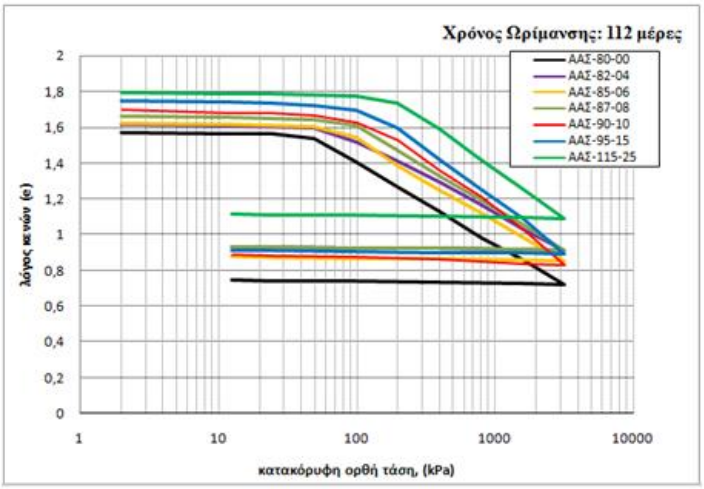
Figures 4 (a – e) present the relationship of *e-logσ'$_v$* in untreated clay samples (0% fly ash) and treated clay (4% - 25% fly ash).



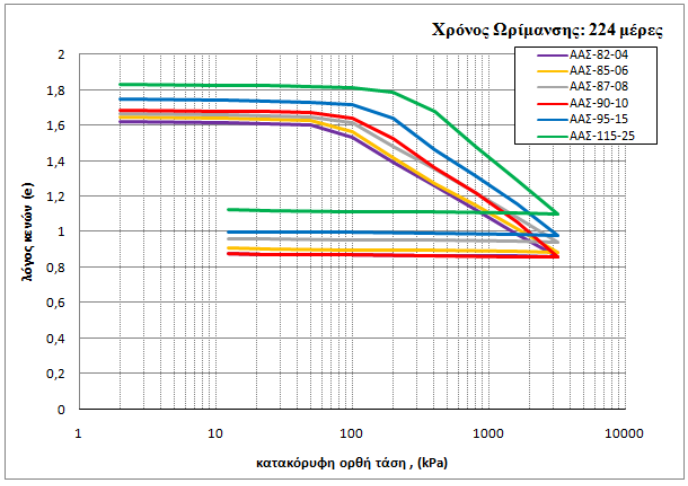
(a)



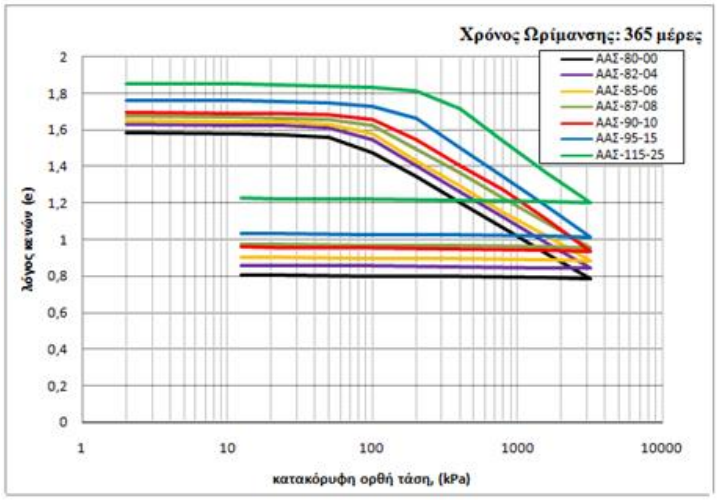
(b)



(c)



(d)



(e)

Figure 4 (a-e) – Fly ash content effect in e-logσ'_v relationship with 1D consolidation tests with curing time of 28, 56, 112, 224, 365 days.

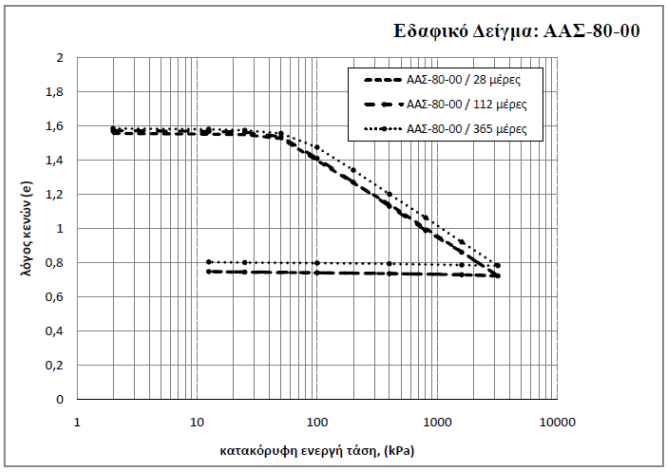
Oedometer consolidation tests were performed for both untreated and treated clay samples. Figure 4 (a-e) show the *e-logσ'_v* relationship of untreated and treated clay samples. Test results show that the applied pre-consolidation pressure (yield stress) increases significantly when the fly ash content is ≤10% but always taking under consideration that fly ash is not a cement binder as strong as cement or lime, therefore to significantly improve soil's properties for practical reasons a great amount of fly ash must be added to the soil or perhaps choose another cement binder. The aim of the study was to investigate the light improvement on mechanical properties of a high plasticity clay by adding a cement agent with low strength properties, like fly ash. The increase in yield stress of the untreated clay owing to the inclusion of fly ash were also observed by other researchers (e.g. Uddin et al., 1997, Tremblay et al., 2001, Miura et al., 2001). Test results also suggested that at low percentage of fly ash content (i.e. 4%, 6%), there was minimal cementation effect in the treated clay matrix. It seems to suggest that a certain amount of fly ash is required to complete the interaction between fly ash and clay in order to form the primary and secondary cementitious materials. The increase of apparent pre-consolidation pressure is due to the effect of structuration (i.e. creation of cementation bond) of treated clay particles.

At consolidation pressure less that the respective applied pre-consolidation pressure, the initial void ratio of the treated samples increases with the increase of fly ash content. It is also found that the change of void-ratio is very small for the

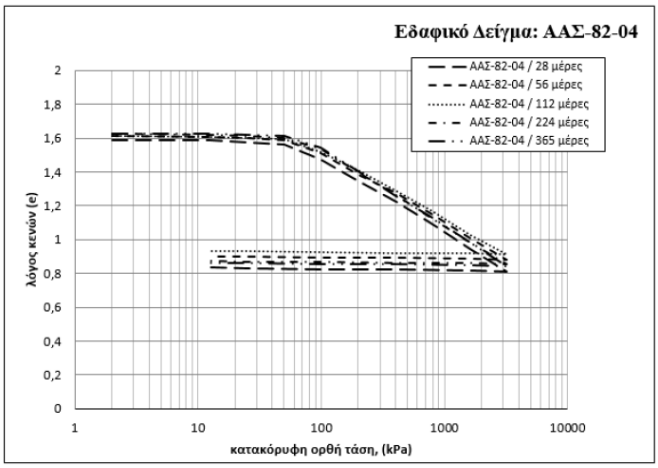
pressure range before the respective applied pre-consolidation pressure of 50kPa. This implies that there is an effect of structuration within the pressure range after the applied pre-consolidation pressure and hence the behavior of the sample is found to be relatively ductile. Furthermore, beyond the applied pre-consolidation pressure of 50kPa, the reduction of void ratio with the increase in consolidation pressure is noticeable for all ranges of fly ash content. This is because of the apparent destructuration (i.e. breaking of cementation bond) of the treated clay matrix, when it is stressed beyond the pre-consolidation pressure. At this stage the effect of cementation bond is minimum and the fabric is of the treated clay plays a dominant role on the compressibility characteristics. Results also show that beyond the applied pre-consolidation the treated curves shifted parallel with the increase of fly ash content having higher void ratios. This leads to the conclusion that the yield surface and failure envelope of the treated clay increases with the increase of a cement binder content.

(b) Curing time effect

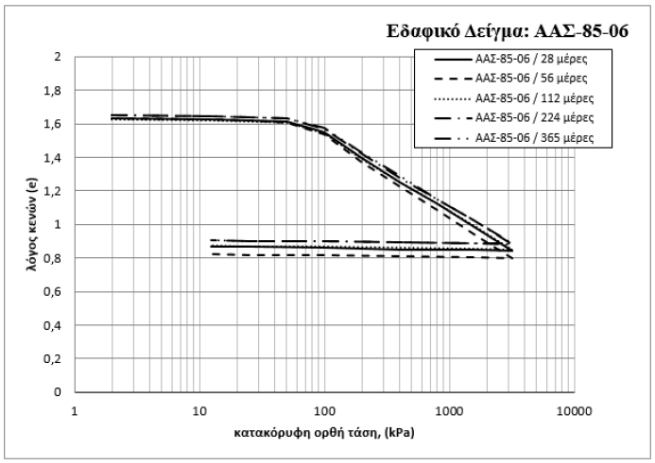
Figures 5 (a – g) present the relationship of *e-logσ'$_v$* in untreated clay samples (0% fly ash) and treated clay (4% - 25% fly ash).



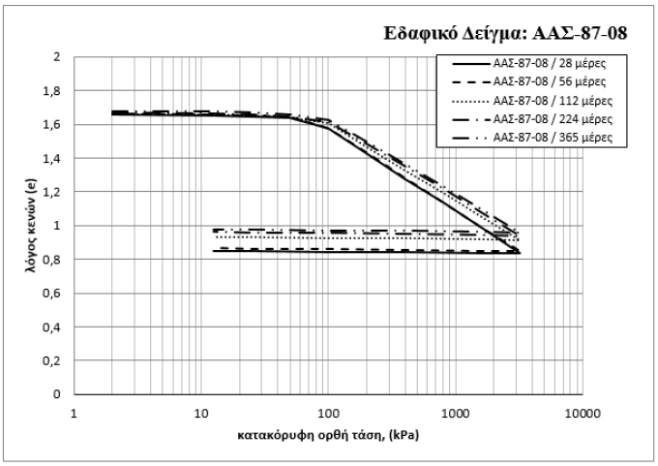
(a)



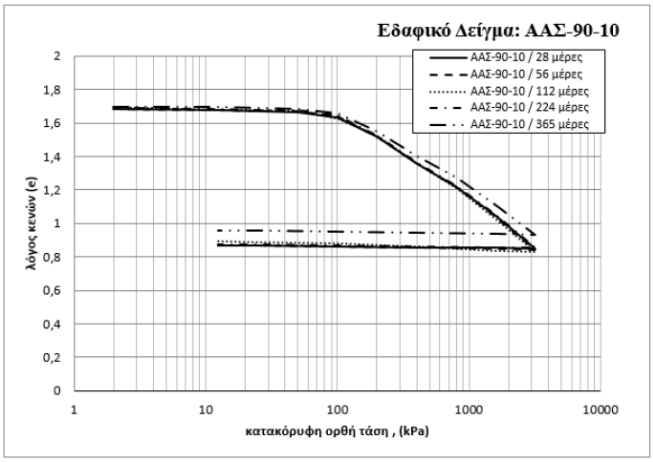
(b)



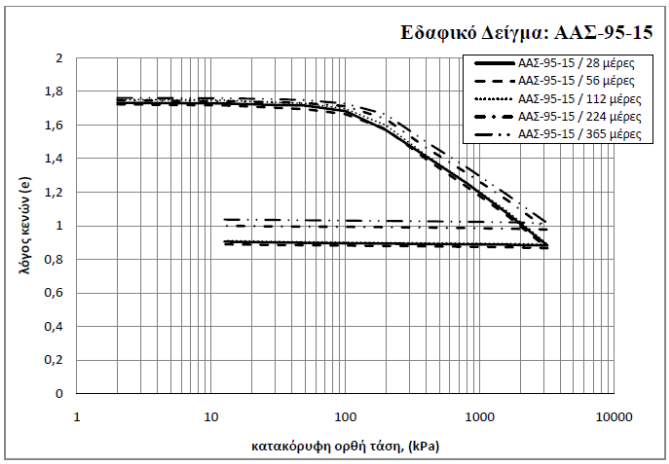
(c)



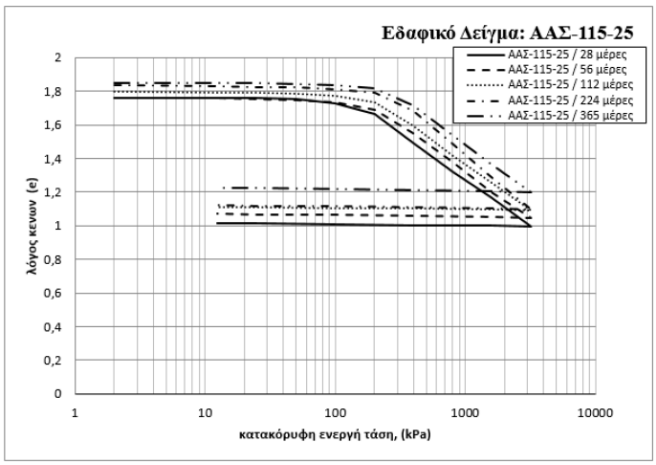
(d)



(e)



(f)



(g)

Figure 5 (a-g) – Curing time effect in e-logσ'_v relationship with 1D consolidation tests with curing time of 28, 56, 112, 224, 365 days.

The effect of curing time on $e\text{-}log\sigma'_v$ relationship of treated clays is shown in Figure 5(a-g). As shown, there is not any significant change in the compressibility behavior of the soil as no bonds are formed within the soil matrix as quickly as a maximum of a year curing period. The treated sample show higher pre-consolidation pressure for the cases of longer curing periods. This result shows a consistent trend compared with the other researchers' findings on different cement treated clays (e.g. Uddin et al., 1997, Miura et al., 2001). The prolonged cured treated sample (365 days sample) shows much higher apparent pre-consolidation pressure than that of 28 days cured ones. Additionally, the volumetric compressibility of the treated clay is found to be very small for the pressure less than the initially applied pre-consolidation pressure of 50kPa for treated clay with fly ash percentage less than 10% (≥10%). This indicates that the pozzolanic reaction continues beyond the 365 days of curing period, and thus the effect of structuration (cementation bond) is not very significant. The resulting effect of the prolonged curing is to increase the yield surface and failure envelope at some extent.

Similar to the increase of fly ash content and curing time, the initial water content of the clay slurry is greatly influenced by the initial pre-consolidation pressure (yield stress) of the treated clays. As the initial water content increases with the increase of fly ash content, it decreases with the increase of curing time of the treated clays.

Unconfined compression triaxial tests and strength characteristics

The unconfined compressive strength behavior of cement treated clay has been extensively studied. In these series of experiments wide range of fly ash content and prolonged curing periods are considered. The fly ash content varies from 4%-25%, while the curing periods vary from 28 days to 730 days.

The results of the unconfined triaxial tests were divided in two categories (α) fly ash content effect and (β) curing time effect presented in figures 6 and 7 respectively.

(a) Fly ash content effect

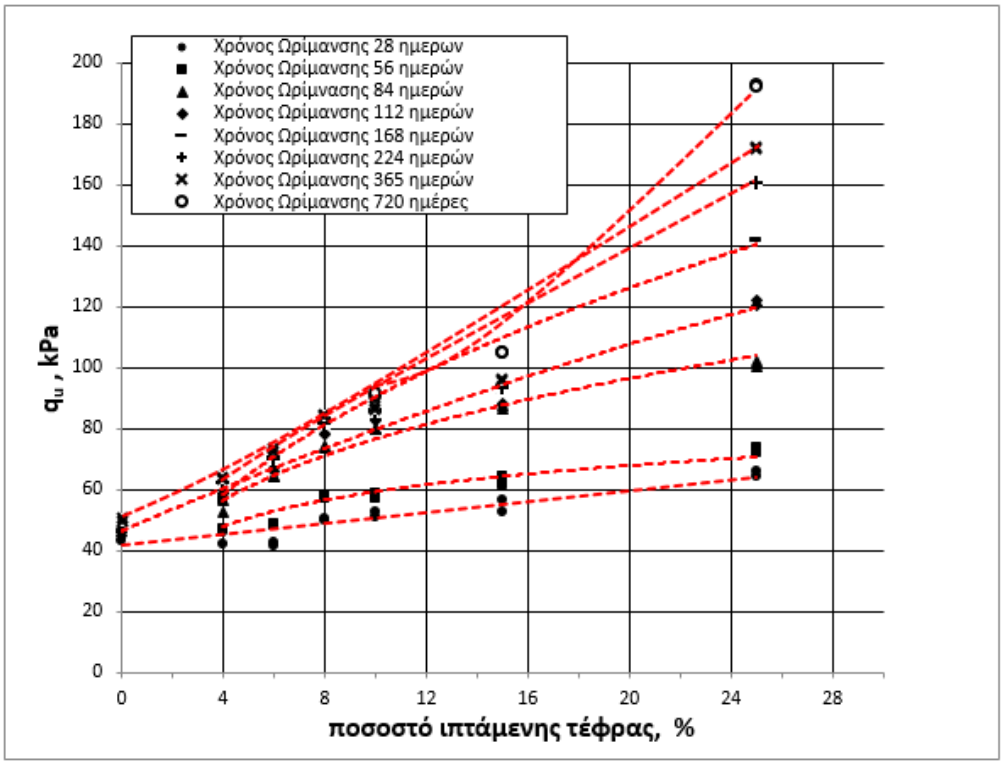


Figure 6 - Curing time effect on unconfined compression strength of treated clay for different curing time periods and fly ash contents.

(b) Curing time content

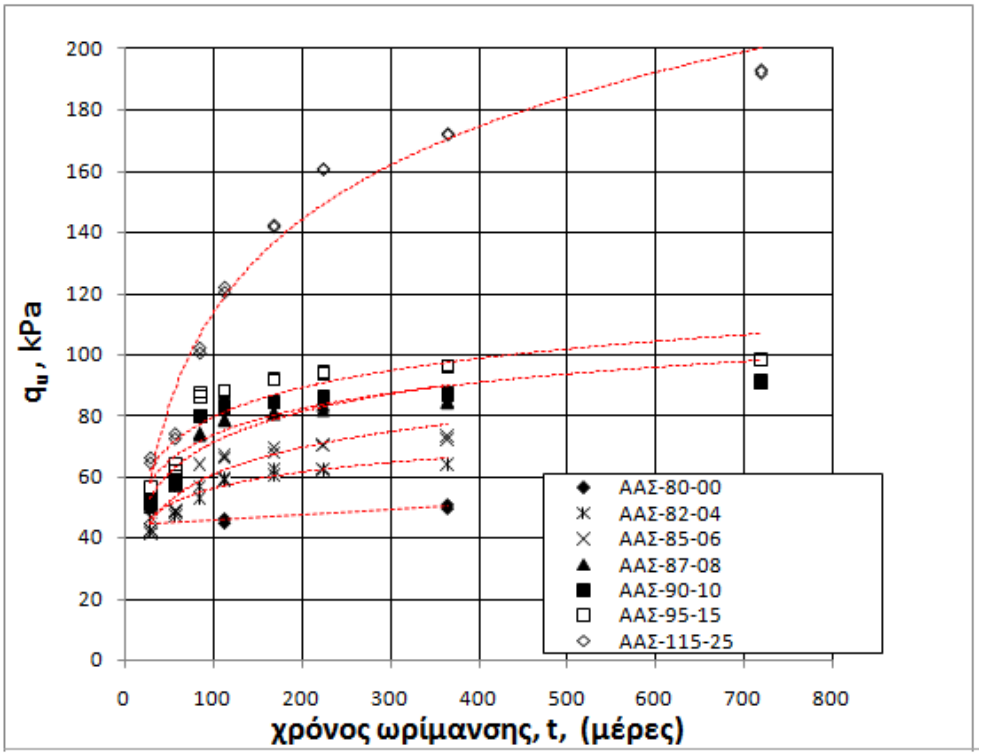


Figure 7 - Effect of fly ash content and curing time on unconfined compressive strength of untreated and treated clay at different curing periods.

As figure 7 show, even at very low fly ash content there is a level of increase in strength and stiffness which is evident. At low fly ash content, (i.e. ≥15%), ductile behavior is manifested, with the post-peak stress decreasing gradually with stain in the same manner similar to that exhibited by untreated clay. At higher fly ash content (i.e. 25%), the treated specimen becomes more brittle, with abrupt drops in the post-peak stress; which is more akin to that of highly structured or sensitive natural soils (Leroueil and Vaughan, 1990). This behavior is more consistent with the findings of many other researchers on different cement treated clays (e.g. Uddin et al., 1997; Miura et al., 2001, Kamruzzaman, 2002).

The shear behavior of the treated soil in unconfined compression test up to the peak failure state depends on the cementation bond, and thus the shear behavior of pre-failure state is predominantly elastic in nature. The ductility is much more pronounced for mixtures with low fly ash contents at can been seen in Fig 2.7. It is interesting to note that the behavior of fly ash treated clay at conventional 28 days curing periods and at prolonged curing periods (i.e. 365 days) is very similar to clay mixtures with fly ash not greater than 10% and quite different for clay mixture with fly ash content of 15%.

As shown in Fig. 6, at higher fly ash content (e.g. 25%), the unconfined compression strength continuously increases associated with a low strain followed by a sudden reduction of post-peak stress. The behavior of this treated sample at higher fly ash content seems to be similar to that of a brittle material, while at low fly ash content the behavior is basically consistent with a lightly structure natural soil. It is also important to notice that clay mixture with 15% fly ash content there is a diversion of the stress-strain curve after a curing time of 112 days. It can been seen that the failure strain is generally higher for 28 days cured samples than that of 365 days cured samples even at higher fly ash content, and the post-peak reduction is much more gradual.

Choice of treated clay for the final state of behavioural framework

The main objective of the current study is to produce sufficiently detailed quantitative information for the development of a framework for primary yielding and early post-yield behavior of lightly cemented high plasticity clays. In pursuance of this objective and thoroughly examined the results of one dimensional

consolidation compression tests and undrained unconfined compression tests for various mix proportions of fly ash-clay; as presented in previous sections of this chapter, the present study will be limited to only two mix proportions for the investigation of the constitutive behavior of lightly cemented clays.

Based on the mechanical characteristics of the samples presented previously, the two clay mixtures which showed a relative stable increase in strength after a curing period of 112 days, due to the pozzolanic reaction balance occurred within the soil matrix, a ductile behavior and a balanced compressible nature, are the treated clays with 10% and 15% fly ash content. All further testing will be performed after a curing period of 112 days.

For these chosen fly ash contents and curing periods, the basic properties, strength and compressibility behavior of treated specimens that were cured under homogeneous curing conditions will be further investigated for the definition of initial or primary yield locus and its dependence on various factors. The primary yield locus will be determined and its possible relationship with other engineering properties, such as the unconfined compressive strength.

Furthermore, it will be investigated the evolution of the yield locus during the hardening phase (if this exists) of the shearing, and how the shape and size of the yield locus changes after initial yield of treated clays that show a ductile behavior instead of a brittle that most cemented soils present. Furthermore a comparison of these samples will be made with the mechanical characteristics and primary yield envelope of the natural AgiosStefanos clay without the influence of the used binding agent (i.e. fly ash of Ptolemais).

Behavioural framework for yielding and stress strain bahaviour for fly ash treated clay

The strength values obtained from triaxial compression and extension tests carried out on isotropically consolidated samples, proved once again the influence of fly ash content on the strength of artificially cemented clay. In addition to the unconfined compression tests, a series of drained triaxial compression tests (by increasing vertical stress) and drained triaxial extension tests (by increasing the horizontal stress), were also performed, on samples isotropically consolidated under various stresses, generally smaller than the apparent “preconsolidation stress” due to the development of cementation bonds in the samples (that is with varying apparent OCR values larger than unity, OCR>1) as shown in Table 3.

Test No.	Triaxial System[1]	Type of test[2]	Name of sample	Initial water content, w_i(%)	OCR	Stress change description
0	TX1	WF	I-C	AAΣ-80-00	-	Radial stress increased, axial stress=0
	TX2	BW	I-C	AAΣ-80-00	-	Radial stress increased, axial stress=0
	TX3	WF	CD	AAΣ-80-00	5.0	Radial stress increased, axial stress increased
	TX4	WF	CD	AAΣ-80-00	2.5	Radial stress constant, axial stress increased
	TX5	WF	CD	AAΣ-80-00	1.7	Radial stress constant, axial stress increased
	TX6	WF	CD	AAΣ-80-00	1.3	Radial stress constant, axial stress increased
10	TX7	WF	I-C	AAΣ-90-10	-	Radial stress increased, axial stress=0
	TX8	BW	I-C	AAΣ-90-10	-	Radial stress increased, axial stress=0
	TX9	WF	CD	AAΣ-90-10	9.0	Radial stress increased, axial stress increased
	TX10	WF	CD	AAΣ-90-10	3.0	Radial stress increased, axial stress increased
	TX11	WF	CD	AAΣ-90-10	1.8	Radial stress increased, axial stress increased
	TX12	WF	CD	AAΣ-90-10	1.3	Radial stress constant, axial stress increased
	TX13	BW	CD	AAΣ-90-10	1.0	Radial stress constant, axial stress increased
	TX14	BW	ED	AAΣ-90-10	9.0	Radial stress constant, axial stress decreased
	TX15	BW	ED	AAΣ-90-10	1.8	Radial stress constant, axial stress decreased
	TX16	BW	ED	AAΣ-90-10	1.3	Radial stress constant, axial stress decreased
	TX17	BW	ED	AAΣ-90-10	1.0	Radial stress constant, axial stress decreased
15	TX18	WF	I-C	AAΣ-95-15	-	Radial stress increased, axial stress=0
	TX19	BW	I-C	AAΣ-95-15	-	Radial stress increased, axial stress=0
	TX20	WF	CD	AAΣ-95-15	11.0	Radial stress increased, axial stress increased
	TX21	WF	CD	AAΣ-95-15	3.7	Radial stress increased, axial stress increased
	TX22	WF	CD	AAΣ-95-15	2.2	Radial stress increased, axial stress increased
	TX23	WF	CD	AAΣ-95-15	1.2	Radial stress increased, axial stress increased
	TX24	BW	CD	AAΣ-95-15	1.0	Radial stress increased, axial stress increased
	TX25	BW	ED	AAΣ-95-15	11.0	Radial stress constant, axial stress decreased
	TX26	BW	ED	AAΣ-95-15	3.7	Radial stress constant, axial stress decreased
	TX27	BW	ED	AAΣ-95-15	2.2	Radial stress constant, axial stress decreased
	TX28	BW	ED	AAΣ-95-15	1.2	Radial stress constant, axial stress decreased
	TX29	BW	ED	AAΣ-95-15	1.0	Radial stress constant, axial stress decreased

[1]WF- Wykeham Farrance, BW-Bishop & Wesley

[2]I-C –Isotropic Consolidation test, CD-Compression Drained test, ED-Extension Drained test

Table 3 – Details of the test program and samples

Mechanism of shear failure and mobilization of cohesion and friction

For low-cemented soil, the shear resistance in extension consists of two parts; one part is brittle type cohesion (due to cementation) and the other is viscous type

cohesion (dependent on effective normal stress). A mechanism picture of mobilization of the components of shear resistance can be described in terms of the concepts enunciated by Bjerrum (1971). According to this view, all contact in clays can be divided into frictional and cohesional contacts. Frictional resistance at the former contacts is derived by sliding between grains at junctions. Calladine (1971) has discussed in detail the mechanism of failure in such junctions (called asperities) for normally and overconsolidated clays. On the other hand, cohesion is derived through the rupture of contacts at the absorbed water phase. When a clay sample is subjected to a certain pressure for a period of time, the effective stresses will be transferred gradually from cohesional contacts to frictional and recoverable strain energy will be stored in the latter (Iyer, 1974).

When this system is subjected to low effective normal stress caused by sampling and swelling, the complex network is loaded due to internal stresses. On the application of shear stress no friction can be mobilized until the cohesive contacts have been broken and changes in the effective normal stress are imposed on the frictional contacts. In the case of drained conditions, the transfer is sudden because of brittle nature of bonds and until the full cohesion is mobilized, no transfer of normal stress takes place through the fictional contacts. (Bjerrum and Kenney, 1976).

During all extension tests conducted in this research, the first part appeared as cohesion intercepts and the second appeared as frictional in character. In highly cemented soils such as cemented shale,laterite, etc., the type of cohesion which is brittle in nature would be very significant. For remolded clays, shear resistance in extension depends on effective normal stress andthe behavior is essentially frictional (viscous type cohesion) with slight cohesion.

Thus the cementation is the predominant cause of shear resistance in cemented soil. While in remolded clays, like the behaviour of the under investigation fly ash treated clays in this study, the consolidation pressure has relatively higher importance in the development of viscous type cohesion.

The mechanism can also be invoked to explain the development of full friction in the case of compression tests. Shear resistance of fly ash treated clays in compression was found to be dependent on the effective normal stress and the failure envelopes of the three samples (figs 8-10) are seen to be inclined for the stress range considered in the study, showing cohesive-frictional character. Conversely, shear resistance in extension was found to be less dependent on the effective normal stress

(i.e., nearly horizontal failure envelope) showing a cohesive behavior with slight frictional character

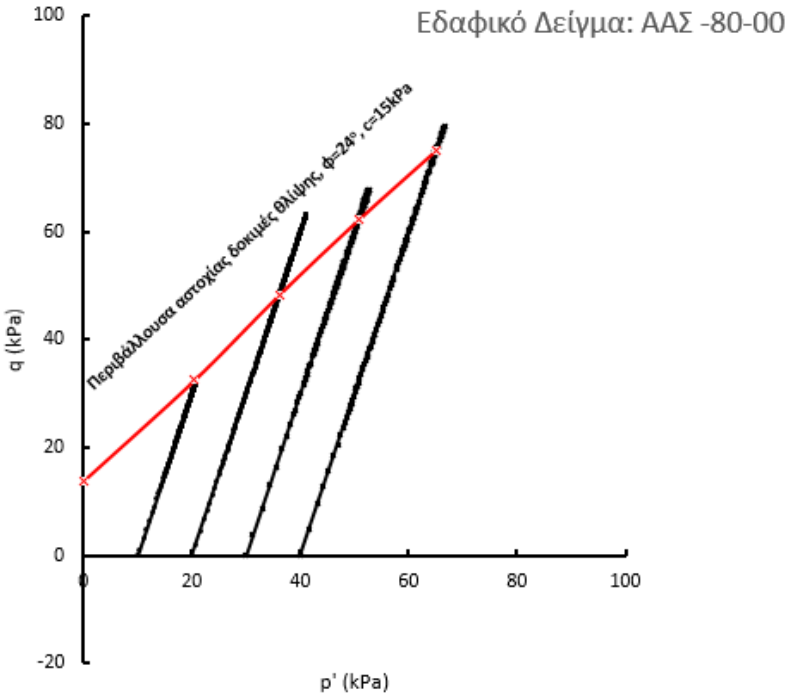


Figure 8 - ΑΑΣ-80-00 Failure envelopes and stress paths in compression tests

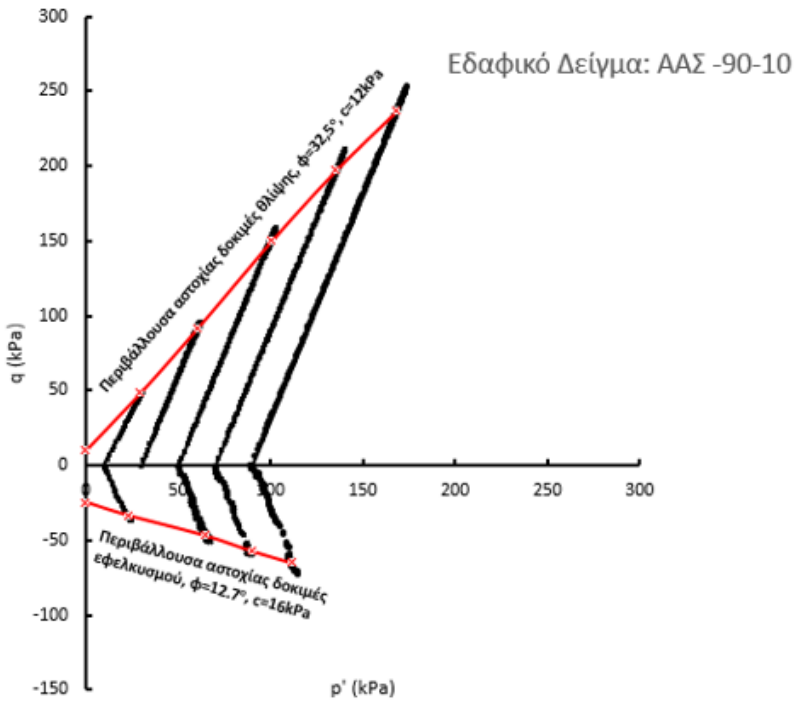


Figure 9 - ΑΑΣ-90-10 – Failure envelopes and stress paths in compression and extension tests.

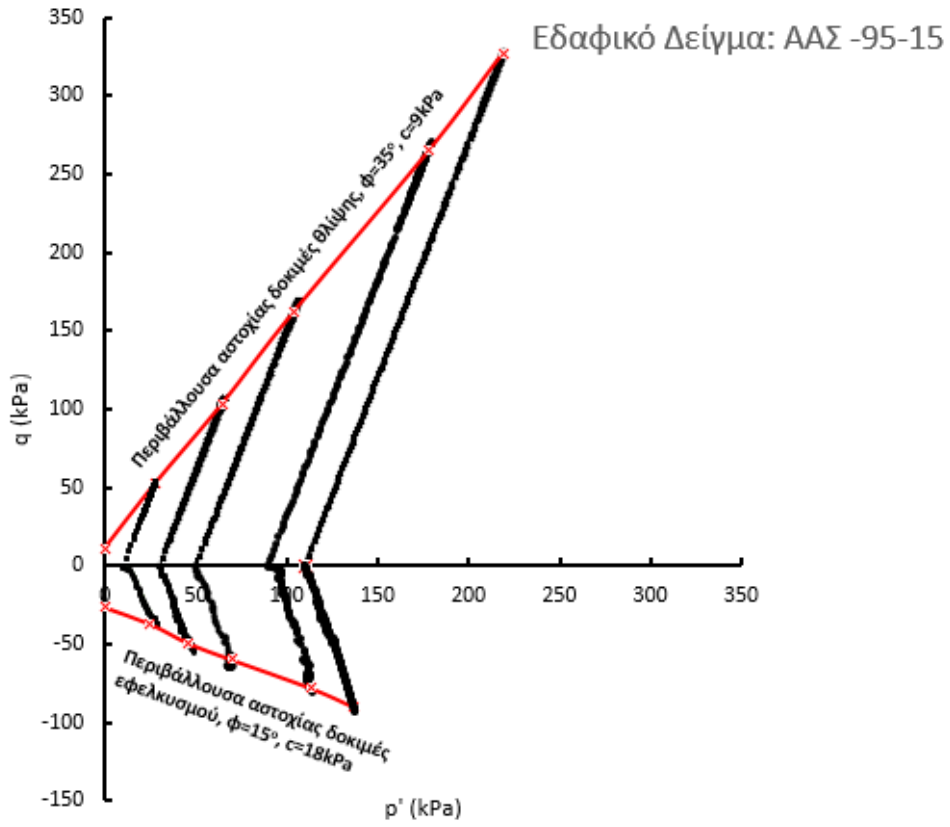


Figure 10 - ΑΑΣ-90-10 – Failure envelopes and stress paths in compression and extension tests.

Yield envelopes: Identification and Geometric properties

A yield envelope is a locus of stress states which separates “elastic” pre-yield behaviour from “plastic” post-yield behaviour. Yield envelopes are not unique for a given pre-consolidation pressure, but depend on testing rate or test duration (Tavenas and Leroueil, 1981; Graham et al., 1983); for this study a standard rate of strain was used for all the drained tests in compression and extension, different of course for each mixture as mentioned in previous sections of this chapter. The concept of yielding has proved useful in understanding soft clay behaviour beneath embankments and slopes (Kenney and Folkes, 1979; Wroth and Houlsby, 1980; Tavenas et Leroueil, 1981). As Graham et al. (1983) stated it is commonly appreciated that while remoulded samples permit a clearer understanding of many aspects of clay behaviour under controlled conditions, other features such as cementation and ageing would give an interesting data base for further investigation.

All tests in this study produced well defined yield envelopes in q-p΄ plots. Although, it is common to present normalised yield envelopes as a normalized

relationship between mean stresses and deviatoric stresses in a form like in Figure 6.43 after Graham et al. (1988). The positive use of these envelopes in geotechnical practice has been well demonstrated by many researchers (i.e. Wood, 1980; Crooks, 1985). The results are shown in Figures 2.11-2.13.

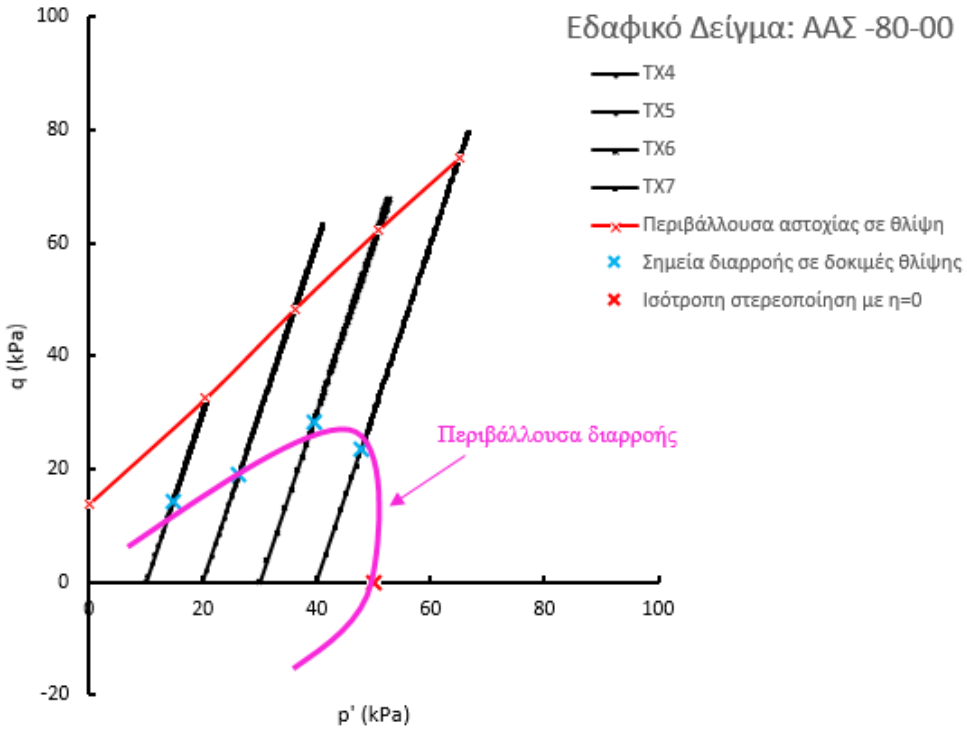


Figure 11 - ΑΑΣ-80-00 Failure and Yield Envelopes

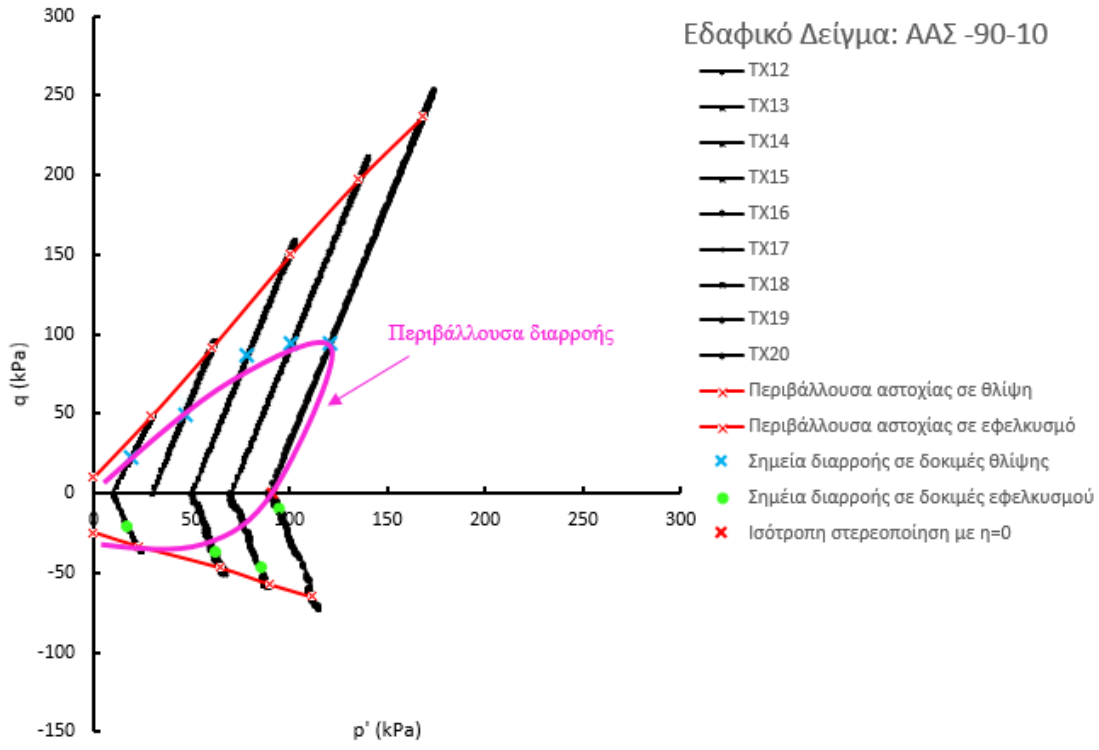


Figure 12 - ΑΑΣ-90-10 Failure and Yield Envelopes

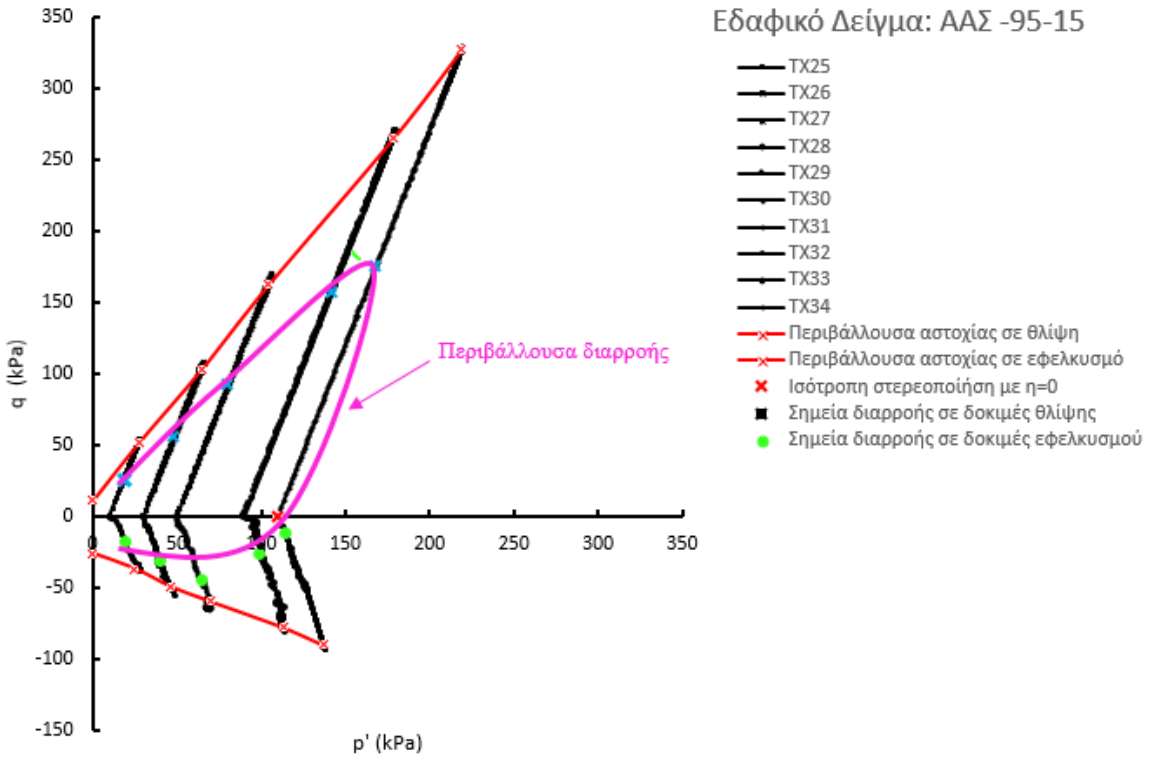


Figure 13 - ΑΑΣ-95-15 Failure and Yield Envelopes

Compression and extension tests were been performed as shown in figures 11-13 and it is worth to notice that the direction of the yield envelope seems to be shifted on the left of the p΄ axis, with quick loss of structure when a tensile stress is applied to the sample.As mentioned earlier, the difference in behavior of cemented soil in compression and extension is attributed to the difference in mechanism of failure. The most important factor governing the shear resistance on a cohesive soil like the clay, is the nature of the contacts and their behaviour under the imposed stresses. The cohesional contacts may be harden as a result of sustained stress during consolidation. When the effective stresses are lowered, the frictional contacts are subjected to a state of tensile stress, but they are held from responding to this change by the cohesive contacts. If such a junction is subjected to increase in normal stress, these cohesive contacts can yield and flow (similar to melting of ice under pressure). Such a flow enables transfer of compressive stress to new frictional contacts even while the old frictional contacts are in tension. A gradual cohesion to friction

transfer of shear resistance thus takes place even before the cohesional contacts fail completely (Bjerrum 1971, Calladine 1971, Iyer 1975).

On the application of increased normal stress on a cemented soil as in compression test, the cohesional contacts first yield and flow; this allows a gradual transfer of the applied normal stress from cohesional contacts to the frictional contacts. The applied normal stress will be fully transferred to frictional contacts, before the complete failure of cohesional contacts. This smoothcohesion to friction transfer of shear resistance results in inclined failure envelope in compression, showing cohesive - frictional ($c - \phi$) behavior. When a cemented soil is subjected to decreasing effective normal stress as in extension tests, the rigid and brittle cohesional contacts mobilize first and changes in normal stress is not transferred to frictional contacts until the full mobilization of cohesion. When the cohesional contacts fail by rupture, the whole normal stress is suddenly imposed on frictional contacts because of the brittle nature of the bonds. This quick cohesion to friction transfer causes low strain failure by the detachment of bonds (brittle failure) with very small friction mobilization (i.e., essentially a cohesive behavior). It is evident from the shear test results that failure strain in extension was relatively less compared to that in compression.

The fly ash treated mixtures used for this research were subjected to decreasing effective stress where the role of normal stress was insignificant as the resistance was mostly due to bonds formed by chemical action. This resulted in higher cohesion and lower friction. Due to the poor cementation, there was a break down, which resulted in decrease of cohesion and consequent development of friction during extension. This is the case in remolded clay in which shear resistance is proportional to effective normal stress at failure. It may be possible in case of very small effective stress that the sample disintegrates (lose cohesion) and the failure surface through them may be serrated and sliding may take place with a higher friction, applicable to disintegrated soil as observed in Leda clay (Jarrett 1971) and Drammen plastic clay (Iyer 1975).

Conclusions

Microstructural and basic engineering behaviour of treated clay

- The mixing of fly ash into the clay-slurry leaded to the rapid hydration reaction, which caused a decrease in water content and the production of primary cementitious products. The hydration reaction was accompanied by the much slower pozzolanic reaction with time.

- The plasticity index can be normalised by the final water on the fly ash treated clay. The plasticity index was found to have a strong correlation with fly ash content and it is independent of curing time. Hence, this behaviour can be used to quantify the engineering properties of fly ash treated high plasticity clays.
- The unconfined compressive strength of fly ash treated clay increased with the increase of fly ash content and curing time. The pozzolanic reaction was found to equalize within a short period of time for an addition of fly ash lower than 20%. It was shown that the reaction was still very significant at prolonged curing time up to two (2) years. In such long curing periods, significant portion of Ca^{2+} ions diffuses within the treated clay matrix to promote pozzolanic reaction. On the other hand, three (3) month curing period for treated clay with the addition of lower than 20% fly ash only a small portion of Ca^{2+} ions was used up by the soil leading to a more usable for further testing sample,
- Based on the observation, the unconfined compressive strength versus fly ash cement content relationship can be divided into 3 zones: Inactive Zone, Active Zone and Inert Zone. The treated clay with fly ash content up to 8% and at all ranges of curing periods, showed only a very marginal improvement of unconfined compressive strength and is termed as Inactive Zone. It seems to suggest that a certain percetange of fly ash (more than 8%) is required to complete pozzolanic reaction between fly ash and clay particles. The end result of the complete cementation is to increase the shear strength and this zone is termed as active zone. The upper limit of this zone is about 20% and about 3 months curing period. In this zone the rapid gain in strength is attributable to the fact that the pozzolanic reactions promote the efficient diffusion of Ca^{2+} ions within the clay matrix. Beyond the active zone, the rate of increase in strength increases and it seems to be asymptotic. Such region is referred to as inert zone. The possible reason for this zone lies on that the reactions are still continued but with greater rate for calcium ions to evolve all their properties within the treated clay matrix.
- The significant increase in apparent pre-consolidation pressure and reduction in apparent compression index were observed from the oedometer consolidation tests as the fly ash content and curing time increases. This was due to structuration (existing cementation bond) of treated clay particles. The

swelling behaviour of treated clay is found to be stiff resulting in low swelling index.

- At higher stress beyond the apparent pre-consolidation pressure the e-logσ'_v curves of the treated clay shifted at higher void ratio than the untreated clay with the same pre-consolidation pressure. This sifting was almost parallel with the virgin consolidation line of the untreated clay and was more significant with higher fly ash content and longer curing periods.
- Polarising Light Microscope analysis on treated clay showed a dispersed placement of clay particles in untreated clay. However, due to liberation of calcium ions from the hydration reaction, the fabric of treated clay changed to flocculated type, forming clay-fly ash clusters scattered within the matrix of sample by preventing the formation of a strong and uniform structure.

Behavioural framework of fly ash treated high plasticity clay

- Isotropic consolidation test of fly ash treated clay also proved the correlation of fly ash content to curing stress due to pozzolanic properties of fly ash but gave a curing stress value much lower than the results obtained from 1-D oedometer testing, concluding that sometimes 1-D anisotropic consolidation can mislead the strength development of a soil with the addition of a cemented agent during curing period.
- Structure is common in a wide range of the natural materials but not fully known for artificial soils. The behaviour of these materials in the laboratory cannot be understood unless the effects of structure are taken into account and structure is important as initial void ratio and stress history in determining this behaviour. Although structure may arise from different causes, its effect in behaviour is similar. It increases strength and enlarges the elastic domain when the sample is under compression conditions while in extension the structure seems to lose its consistency in a quicker way, minimising the elastic behaviour of soil. The concept of yielding developed to describe the effects of these conditions is equally applicable to the effects of structure and stress history. However, to avoid confusion, a separate framework is required to describe the effects of an artificial lightly structured soil.
- The laboratory investigation in this study raised questions about the influence of fly ash on the structure and shape of the yield surface. Both treated clays did not form a strong structure within the sample's matrix and mostly behaved

as a remoulded clay but this fact did not prevent the formation of a clear yield locus showing the effect on cementation.

- Compression tests, which essentially involved higher effective stress at failure, required greater extent of extrapolation to obtain cohesion compared to extension tests.Therefore, the extension tests under low effective stresses gave a better measure of thecohesion due to structural effect (e.g., cementation bonding, reserve resistance). However, the friction angle was significantly different. Lower value of friction angle in extension tests was to be expected due tothe difference in the failure mechanism.
- The experimental results showed that the primary yield locus expands with a small increase in fly ash content as well as a decrease in total water content and the yield envelope can be correlated to the unconfined compressive strength, cement content and total water content and the existence of fly ash in the clay matrix resulted to “flattening” of the primary yield locus as in higher effective confining stress higher where the sample has been consolidated close to the isotropic primary yield stress, there was a decrease in yield stress value compare to lower effective stresses.
- The shear resistance at failure was found to be dependent on the magnitude of the effective stress at failure, the nature of bonds and disturbance to clay structure. Delayed compression was shown to cause change in the nature of bonding resulting in the behaviour of clay as a purely cohesive material under extension tests.
- The results of isotropic compression and extension tests showed that the primary yielding stress increased with the increase in cement content as well as decrease in total water content.
- All ICD samples tested in compression conditions showed highly elastic behaviour before peak strength while the ICD samples of treated clay tested in extension conditions showed a small volumetric change up to the peak strength proving the existence of weak bonds within the soil matrix when the sample was subjected to tensile stresses. The transfer of cohesional to frictional contacts is much slower when it comes to extension conditions as the soil tries to maintain its structure in a more persistent way.
- The principal effect on inclusion of fly ash into the soft clay was to increase the initial void ratio and to introduce a well-defined yield point into the stress-strain responses under compression and extension. Yielding is associated with

the breaking of cementation bond. At higher confining stress, which is beyond the yield stress, the sample had apparently destructed during consolidation stage but still appeared to have some cementation effect during shearing. This was more obvious in extension condition. The fabric of the treated played a dominant role during the shearing and the behavior of this type of sample behaves in a more ductile way in nature. At low confining stress, which is lower that the yield stress, the destructuration of treated clay only took place during shearing followed by strain softening behaviour. The higher the fly ash content, the yield envelope as well as yield surface would shift further upward.

Recommendation for future study

- The behavioural framework postulated for fly ash treated clay in this study was based on 10% and 15% fly ash content and 3 month curing period. Since the strength property of the treated soil is dependent on both fly ash content and curing period, it is uncertain whether the framework could also be applied to various configurations of fly ash treated soils. This issue is therefore necessary for further investigation.
- Another point which raised from this study and literature review investigation is not only the binding agent that forms or not forms a structure within the soil matrix, it is even the chosen soil which attributes to this matter. A high plasticity clay has its own mechanical characteristics that can benefit or not by the existence of fly ash. A different selection of soil samples with the same amounts of fly ash contents and curing periods would be interested to be investigated.
- The pre-yield behavior of the fly ash treated clay including small-strain nonlinear behavior was not covered in this study. The stiffness of fly ash treated high plasticity clay and its dependence on various factors such as fly ash content, total water content, curing stress and curing period should be further investigated under triaxial loading condition. The change in the stiffness during destructuration should also be studied. The incorporation of local strain measurement in conventional triaxial test system would be able to meet with these requirements. The knowledge about stiffness of fly ash treated clay would be useful to practical engineering and numerical analysis.

- The basic assumption in this study was that all specimens are isotropic. The specimens were isotropically consolidated under specified pressure before shearing. Although this is suitable for laboratory study, it is different from the field situation of fly ash treated soil, which is cured and loaded under anistropic condition. The effect of anisotropy on behaviour of fly-ash treated clay could investigated by curing and testing specimens under anisotropic compression and extension conditions, provided that the curing and testing system can be designed properly.
- A constitutive model for fly ash treated clay under compression and extension triaxial loadings could be formulated based on the behavioural framework presented in this study. This is necessary such that the improved ground could be reasonably incorporated into finite element analysis.

Λίστα Συμβόλων

A	Επιφάνεια διατομής δοκιμίου
ADVDPC	Ρυθμιστής μεγάλης πίεσης
A_o	Αρχική επιφάνεια διατομής δοκιμίου
BW	Bishop & Wesley τύπου τριαξονική κυψέλη
c'	Συνοχή
C_2SH_x	Ένυδρο πυριτικό ασβέστιο
C_3AH_x	Ένυδρο αργιλικό ασβέστιο
C_{ac}	Φαινόμενος δείκτης συμπίεσης
CASH	Ένυδρο αργιλοπυριτικό ασβέστιο
C_c	Δείκτης συμπίεσης
CD	Στραγγιζόμενη δοκιμή θλίψης
CIDC	Ισότροπα στερεοποιημένη στραγγιζόμενη δοκίμη σε θλίψη
CIDE	Ισότροπα στερεοποιημένη στραγγιζόμενη δοκίμη σε εφελκυσμό
CIU	Ισότροπη αστράγγιστη δοκιμή
C_r	Δείκτης διόγκωσης
CSH	Ένυδρο πυριτικό ασβέστιο
CSL	Γραμμή κρίσιμης κατάστασης
e	Λόγος κενών
ED	Στραγγιζόμενη δοκιμή εφελκυσμού
E_m	Μέτρο ελαστικότητας
e_o	Αρχικός λόγος κενών
E_s	Μέτρο μονοδιάστατης συμπίεσης
G_s	Ειδικό βάρος
IC	Τάση ισότροπης στερεοποίησης δοκιμίου πριν τη διάτμηση
ICT	Δοκιμή ισότροπης συμπίεσης
IDCT	Δοκιμή στερεοποίησης σε συμπιεσόμετρο
LL	Όριο υδαρότητας
LSSV	Μήκος διανύσματος τάσης
LVDT	Μετατροπέας γραμμικής μεταβλητής μετακίνησης
NCL	Γραμμή κανονικής στερεοποίησης
OCR	Συντελεστής υπερ-στερεοποίησης
p'	Ενεργή τάση
p'_{cur}	Φαινόμενη τάση προστερεοποίησης λόγω ωρίμανσης
p'_f	Ενεργή τάση στην αστοχία
PI	Δείκτης πλαστικότητας
PLM	Ανάλυση με πολωτικό μικροσκόπιο
p'_{pcro}	Αρχικά επιβληθείσα τάση προστερεοποίησης
PVC	Ρυθμιστής μεταβολής όγκου

p'_y	Ενεργή τάση στη διαρροή
q	Αποκλίνουσα τάση
q_f	Αποκλίνουσα τάση στην αστοχία
q_u	Αστράγγιστη διατμητική αντοχή
q_y	Αποκλίνουσα τάση στη διαρροή
S_{ro}	Αρχικός βαθμός κορεσμού
STDDPC	Ρυθμιστής πίεσης
UU	Δοκιμή αστράγγιστης ανεμπόδιστης θλίψης
V_o	Αρχικός όγκος δοκιμίου
w	Φυσική υγρασία
w_o	Αρχική φυσική υγρασία
WF	Wykeham Farrance τριαξονική κυψέλη
XRD	Ανάλυση με περίθλαση αντίνων Χ
α_v	Συντελεστής συμπιεστότητας
γ_{dry}	Ξηρό φαινόμενο βάρος
γ_{wet}	Υγρό φαινόμενο βάρος
$\Delta p/p'$	Λόγος φόρτισης
ΔV	Μεταβολή όγκου δοκιμίου
ε_a	Αξονική παραμόρφωση δοκιμίου
ε_{vol}	Ογκομετρική παραμόρφωση δοκιμίου
η	Λόγος τάσεων, q/p'
λ	Κλίση γραμμής ισότροπης θλίψης
ν	Ειδικός όγκος (=1+e)
σ'_{1f}	Κατακόρυφη ενεργή τάση στην αστοχία
σ'_{1y}	Κατακόρυφη ενεργή τάση στην διαρροή
σ'_3	Πλευρική ενεργή τάση
σ'_{3f}	Πλευρική ενεργή τάση στην αστοχία
σ'_{3y}	Πλευρική ενεργή τάση στη διαρροή
σ'_v, σ'_1	Κατακόρυφη ενεργή τάση
σ'_y, σ'_{vc}	Τάση προστερεοποίησης
φ'	Γωνία εσωτερικής τριβής

Κατάλογος Πινάκων

3.1 Βασικές ιδιότητες αργίλου Αγίου Στεφάνου

3.2 Κοκκομετρική σύνθεση κατά βάρος (%) της τέφρας Πτολεμαΐδας (Koukouzas κ.ά., 2005)

3.3 Ορυκτολογική σύνθεση της τέφρας Πτολεμαΐδας προσδιορισμένη με περιθλασιμετρία ακτίνων Χ (Koukouzas κ.ά., 2005)

3.4 Χημική σύνθεση τέφρας Πτολεμαΐδας (Koukouzas κ.ά., 2005)

3.5 Αναλογίες μιγμάτων και δοκιμές της παρούσας έρευνας

4.1 Τιμές φυσικών χαρακτηριστικών των μιγμάτων

4.2 Χαρακτηριστικά μη βελτιωμένης και βελτιωμένης αργίλου σε δοκιμή μονοδιάστατης στερεοποίησης

4.3 Δείκτες συμπίεσης δοκιμής μονοδιάστατης στερεοποίησης μη βελτιωμένων και βελτιωμένων δειγμάτων αργίλου

4.4 Φυσικά και μηχανικά χαρακτηριστικά μη βελτιωμένης και βελτιωμένης αργίλου από δοκιμές ανεμπόδιστης θλίψης

5.1 Χαρακτηριστικά μιγμάτων αργίλου και τέφρας που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα έρευνα

6.1 Λεπτομέρειες προγράμματος δοκιμών και δειγμάτων

6.2 Βασικά φυσικά και μηχανικά χαρακτηριστικά από δοκιμή ισότροπης στερεοποίησης (η=0)

6.3 Σύνοψη δεδομένων από τριαξονικές δοκιμές στο στάδιο διαρροής.

6.4 Σύνοψη δεδομένων από τριαξονικές δοκιμές στο στάδιο θραύσης.

6.5 Χαρακτηριστικά περιβάλλουσας αστοχίας δοκιμών θλίψης και εφελκυσμού

Κατάλογος Σχημάτων

1.1 Σχηματικό διάγραμμα της έκτασης και των στόχων της έρευνας

2.1 Σχηματική διάταξη καμίνου

2.2 Μικροφωτογραφίες από Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης (SEM) εδάφους βελτιωμένου με άσβεστο (Local κ.ά., 1990)

2.3 Παράγοντες οι οποίοι ελέγχουν τις ιδότητες εδάφους βελτιωμένου με τσιμέντο (Kezdi, 1979)

2.4 Επίδραση του τύπου τσιμέντου (Πόρτλαντ ή σκωρίας καμίνου) στη θλιπτική αντοχή τουμίγματος εδάφους-τσιμέντου για τα εδάφη : (a) Kanagawa, και (b) Saga (Kawasaki κ.ά., 1981)

2.5 Επίδραση διαφορετικών υλικών σύνδεσης (σταθεροποίησης) στη θλιπτική αντοχή διάφορων εδαφών στη Σουηδία (Ahnberg κ.ά., 1995)

2.6 Επίδραση της κοκκομετρικής διαβάθμισης στη βελτίωση με τσιμέντο (Niima κ.ά., 1977)

2.7 Επίδραση του ποσοστού οργανικών στην αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη τυρφώδους εδάφους (Huat, 2006)

2.8 Επίδραση του χρόνου ανάμιξης στη βελτίωση με τσιμέντο (Nakamura κ.ά., 1982)

2.9 Επίδραση του χρόνου ωρίμανσης στην αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη (Kawasaki κ.ά., 1981)

2.10 Επίδραση του χρόνου ωρίμανσης στην αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη (Enami κ.ά., 1985)

2.11 Αποτελέσματα αντοχής σε ανεμπόδιστη θλίψη για βελτιωμένα δείγματα ωριμασμένα υπό ισότροπη τάση, σε συνθήκες στράγγισης (Chin, 2006)

2.12 Επίδραση του ποσοστού τσιμέντου και του χρόνου ωρίμανσης στην τελική υγρασία της βελτιωμένης αργίλου (Uddin κ.ά., 1997)

2.13A Επίδραση του ποσοστού τσιμέντου στα όρια Atterberg βελτιωμένης αργίλου (Uddin κ.ά., 1997)

2.13B Επίδραση του χρόνου ωρίμανσης στα όρια Atterberg βελτιωμένης αργίλου (Uddin κ.ά., 1997)

2.14 Επίδραση του ποσοστού ασβέστου στα όρια Atterberg της

βελτιωμένης αργίλου Black Cotton (Sivapullaiah κ.ά., 2000)

2.15 Επίδραση της αρχικής υγρασίας και του ποσοστού τσιμέντου στη σχέση e-logσ΄v (Kamruzzaman, 2002)

2.16 Συμπεριφορά σε ισότροπη συμπίεση αργίλου βελτιωμένης με τσιμέντο υπό διάφορες εντατικές καταστάσεις κατά την περίοδο ωρίμανσης (Chin, 2006)

2.17 Επίδραση συνδετικού μέσου στη σχέση e-logσ'$_v$ σε βελτιωμένη ή μη άργιλο (Balasubramanian, 1998)

2.18 Σχέση αποκλίνουσας τάσης και διατμητικής παραμόρφωσης αργίλου βελτιωμένης με τσιμέντο (Uddin κ.ά., 1997)

2.19 Σχέση αποκλίνουσας τάσης και διατμητικής παραμόρφωσης αργίλου βελτιωμένης με τσιμέντο σε συνθήκες (a) CID και (b) CIU (Porbaha κ.ά., 2000)

2.20 Σχέση πίεσης πόρων και διατμητικής παραμόρφωσης για άργιλο βελτιωμένη με τσιμέντο (Uddin κ.ά., 1997)

2.21 Περιβάλλουσα μέγιστης αντοχής για βελτιωμένα δείγματα με OCR = 1 στο επίπεδο τάσεων p΄-q (Chin, 2006)

2.22 Προσδιορισμός περιβαλλουσών διαρροής κατά Smith κ.ά. (1992)

2.23a Προσδιορισμός σημείου διαρροής κατά Rotta (2003)

2.23b Προσδιορισμός σημείου διαρροής κατά Mitchell (1970)

2.23c Προσδιορισμός σημείου διαρροής κατά Wong&Mitchell (1975)

2.23d Προσδιορισμός σημείου διαρροής κατά Coop&Atkinson (1996)

2.23e Προσδιορισμός σημείου διαρροής κατά Cotechia&Chandler (2000)

2.23f Προσδιορισμός σημείου διαρροής κατά Bressani (1990)

2.23g Προσδιορισμός σημείου διαρροής κατά Malandraki (1996)

2.23h Προσδιορισμός σημείου διαρροής κατά Cuccovillo&Coop (1997)

2.23i Προσδιορισμός σημείου διαρροής κατά Bergado κ.ά. (2006)

2.23j Προσδιορισμός σημείου διαρροής κατά Airey (1993)

2.24 Μεταβολή της τάσης διαρροής σε σχέση με το λόγο κενών μετά την ωρίμανση και το ποσοστό τσιμέντου (Rotta κ.ά., 2003).

2.25 Σχέση μεταξύ αρχικού λόγου κενών μετά την ωρίμανση, αντοχής σε ανεμπόδιστη θλίψη, τάσης διαρροής και μέτρου ογκομετρικής παραμόρφωσης (Consoli κ.ά., 2006)

2.26 Αστράγγιστη τριαξονική θλίψη αργίλου Todi: σχέση τάσεων-παραμορφώσεων, διαφοράς πίεσης πόρων και δεικτών

ομοιογένειας της παραμόρφωσης (Viggiani κ.ά., 2003)

2.27 Επίδραση του μεγέθους δοκιμίου, για λόγο ύψους προς διάμετρο 1:1, στην συμπεριφορά σε τριαξονική καταπόνηση (Abdulha & Panos, 1997)

2.28 Επίδραση της λεπτότητας του δοκιμίου στα αποτελέσματα τριαξονικής δοκιμής με σταθερή p' (Callisto & Calabresi, 1998)

2.29 Περιβάλλουσα αντοχής μετά τη θραύση για δείγματα με αναλογίες εδάφους:τσιμέντου:ύδατος 5:1:6 (Chin, 2006)

2.30 Διαδοχικές επιφάνειες διαρροής για αυξανόμενο βαθμό σύνδεσης(Gens & Nova, 1993)

2.31 Επιφάνεια αναφοράς, επιφάνεια δομής, και επιφάνεια διαρροής μορφής φούσκας για το προσομοίωμα καταστροφής της δομής (Rouaina και Wood, 2000)

2.32 Επιφάνεια διαρροής για άργιλο βελτιωμένη με τσιμέντο (Lee κ.ά., 2004)

3.1 Αποτελέσματα περιθλασιμετρίας ακτίνων Χ τέφρας Πτολεμαΐδας. (Koukouzas κ.ά., 2005)

3.2 Εικόνες τέφρας από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM): τυπικό σχήμα κενόσφαιρας στην τέφρα Πτολεμαΐδας (Koukouzas κ.ά., 2005)

3.3 Αναμικτήρας ΕΜΠ για παρασκευή μιγμάτων εδάφους-τέφρας

3.4A Μήτρα ανοξείδωτου χάλυβα άκαμπτων τοιχωμάτων για την ωρίμανση των μιγμάτων

3.4B Εργαστηριακή διάταξη για την προστερεοποίηση του μίγματος

3.5 Συμπιεσόμετρο χειροκίνητης φόρτισης που χρησιμοποιήθηκε για τη δοκιμή στερεοποίησης

3.6 Διάταξη τριαξονικής δοκιμής της WykehamFarrance

3.7 Διάταξη τριαξονικής δοκιμής Bishop & Wesley της GDS

3.8 Τριαξονική κυψέλη 35mm της Wykeham Farrance

3.9 Τριαξονική κυψέλη 35/50mm Bishop & Wesley της GDS

3.10 Συσκευή μόρφωσης δοκιμίων

3.11 Δείγματα έτοιμα για ανάλυση XRD στο εργαστήριο ορυκτολογίας του ΕΜΠ

3.12 Πολωτικό Μικροσκόπιο ZEISS (PLM) των εργαστηρίων του ΙΓΜΕ

4.1 Επίδραση στην υγρασία του χρόνου ωρίμανσης και ποσοστού τέφρας χωρίς προστερεοποίηση του δοκιμίου.

4.2 Επίδραση στην υγρασία του χρόνου ωρίμανσης και ποσοστού τέφρας με προστερεοποίηση του δοκιμίου στα 50 kPa

4.3 Επίδραση ποσοστού κοινού τσιμέντου και CaO (οξειδίου ασβεστίου) στα χαρακτηριστικά των βελτιωμένων αργίλων (αρχική υγρασία 80%, ξηρά ανάμιξη και ωρίμανση 28 ημέρες) (Kamruzzaman, 2002)

4.4 Επίδραση ωρίμανσης και ποσοστού τέφρας στα όρια Atterberg της βελτιωμένης αργίλου μετά προστερεοποίηση των δειγμάτων στα 50 kPa

4.5 Επίδραση ωρίμανσης και ποσοστού τέφρας στο όριο υδαρότητας (LL) της βελτιωμένης αργίλου μετά προστερεο-ποίηση των δειγμάτων στα 50 kPa

4.6 Επίδραση ωρίμανσης στο δείκτη πλαστικότητας (PI)της βελτιωμένης αργίλου μετά προστερεοποίηση των δειγμάτων στα 50 kPa

4.7 Επίδραση ωρίμανσης στη φυσική υγρασία (w)της βελτιωμένης αργίλου μετά προστερεοποίηση των δειγμάτων στα 50 kPa

4.8 Επίδραση ωρίμανσης στο όριο υδαρότητας (LL) της βελτιωμένης αργίλου μετά προστερεοποίηση των δειγμάτων στα 50 kPa

4.9 Επίδραση ωρίμανσης στο δείκτη πλαστικότητας (PI) της βελτιωμένης αργίλου μετά προστερεοποίηση των δειγμάτων στα 50 kPa

4.10 Επίδραση ωρίμανσης στη σχέση e-logσ'_v μη βελτιωμένης αργίλου (0% τέφρα) σε μονοδιάστατη στερεοποίηση

4.11 Επίδραση ωρίμανσης στη σχέση e-logσ'_vβελτιωμένης αργίλου (4% τέφρα) σε μονοδιάστατη στερεοποίηση

4.12 Επίδραση ωρίμανσης στη σχέση e-logσ'_vβελτιωμένης αργίλου (6% τέφρα) σε μονοδιάστατη στερεοποίηση

4.13 Επίδραση ωρίμανσης στη σχέση e-logσ'_vβελτιωμένης αργίλου (8% τέφρα) σε μονοδιάστατη στερεοποίηση

4.14 Επίδραση ωρίμανσης στη σχέση e-logσ'_vβελτιωμένης αργίλου (10% τέφρα) σε μονοδιάστατη στερεοποίηση

4.15 Επίδραση ωρίμανσης στη σχέση e-logσ'_vβελτιωμένης αργίλου

(15% τέφρα) σε μονοδιάστατη στερεοποίηση

4.16 Επίδραση ωρίμανσης στη σχέση e-logσ΄$_v$βελτιωμένης αργίλου (25% τέφρα) σε μονοδιάστατη στερεοποίηση

4.17 Επίδραση ποσοστού τέφρας στη σχέση e-logσ΄$_v$σε μονοδιάστατη στερεοποίηση, για ωρίμανση 28 ημερών.

4.18 Επίδραση ποσοστού τέφρας στη σχέση e-logσ΄$_v$σε μονοδιάστατη στερεοποίηση, για ωρίμανση 56 ημερών.

4.19 Επίδραση ποσοστού τέφρας στη σχέση e-logσ΄$_v$σε μονοδιάστατη στερεοποίηση, για ωρίμανση 112 ημερών.

4.20 Επίδραση ποσοστού τέφρας στη σχέση e-logσ΄$_v$σε μονοδιάστατη στερεοποίηση, για ωρίμανση 224 ημερών.

4.21 Επίδραση ποσοστού τέφρας στη σχέση e-logσ΄$_v$σε μονοδιάστατη στερεοποίηση, για ωρίμανση 365 ημερών.

4.22 Επίδραση χρόνου ωρίμανσης και ποσοστού τέφρας στο δείκτη συμπίεσης C_c δοκιμής μονοδιάστατης στερεοποίησης

4.23 Επίδραση χρόνου ωρίμανσης και ποσοστού τέφρας στο δείκτη διόγκωσης C_r δοκιμής μονοδιάστατης στερεοποίησης

4.24 Επίδραση χρόνου ωρίμανσης και ποσοστού τέφρας στο μέτρο συμπίεσης E_s δοκιμής μονοδιάστατης στερεοποίησης

4.25 Σχηματικό διάγραμμα της σχέσης e-logσ΄$_v$μονοδιάστατης στερεοποίησης για βελτιωμένες αργίλους

4.26Α Επίδραση ποσοστού τέφρας στη σχέση C_{ac}-logσ΄$_v$ μονοδιάστατης στερεοποίησης βελτιωμένων αργίλων για ωρίμανση 28 ημερών

4.26Β Επίδραση ποσοστού τέφρας στη σχέση C_{ac}-logσ΄$_v$ μονοδιάστατης στερεοποίησης βελτιωμένων αργίλων για ωρίμανση 112 ημερών

4.26Γ Επίδραση ποσοστού τέφρας στη σχέση C_{ac}-logσ΄$_v$ μονοδιάστατης στερεοποίησης βελτιωμένων αργίλων για ωρίμανση 365 ημερών

4.27Α Επίδραση χρόνου ωρίμανσης στη σχέση C_{ac}-logσ΄$_v$μονοδιάστατης στερεοποίησης μη βελτιωμένης αργίλου

4.27Β Επίδραση χρόνου ωρίμανσης στη σχέση C_{ac}-logσ΄$_v$μονοδιάστατης στερεοποίησης βελτιωμένης αργίλου (4% τέφρα)

4.27Γ Επίδραση χρόνου ωρίμανσης στη σχέση C_{ac}-logσ΄$_v$μονοδιάστατης

στερεοποίησης βελτιωμένης αργίλου (6% τέφρα)

4.27Δ Επίδραση χρόνου ωρίμανσης στη σχέση C_{ac}-logσ΄$_v$μονοδιάστατης στερεοποίησης βελτιωμένης αργίλου (8% τέφρα)

4.27Ε Επίδραση χρόνου ωρίμανσης στη σχέση C_{ac}-logσ΄$_v$μονοδιάστατης στερεοποίησης βελτιωμένης αργίλου (10% τέφρα)

4.27ΣΤ Επίδραση χρόνου ωρίμανσης στη σχέση C_{ac}-logσ΄$_v$μονοδιάστατης στερεοποίησης βελτιωμένης αργίλου (15% τέφρα)

4.27Ζ Επίδραση χρόνου ωρίμανσης στη σχέση C_{ac}-logσ΄$_v$μονοδιάστατης στερεοποίησης βελτιωμένης αργίλου (25% τέφρα)

4.28 Κριτήριο αναζύμωσης δοκιμίων στερεοποίησης με χρήση της καμπύλης συμπίεσης (a) άθικτο δείγμα (b) αναζυμωμένο δείγμα (Ducasse κ.ά. 1986)

4.29 Καμπύλη συμπίεσης δοκιμής συμπιεσομέτρου (Ducasse κ.ά. 1986)

4.30 ΑΑΣ-80-00 Καμπύλη συμπίεσης για κυκλική φόρτιση σε δοκιμή μονοδιάστατης στερεοποίησης

4.31 ΑΑΣ-90-10 Καμπύλη συμπίεσης για κυκλική φόρτιση σε δοκιμή μονοδιάστατης στερεοποίησης

4.32 ΑΑΣ-95-15 Καμπύλη συμπίεσης για κυκλική φόρτιση σε δοκιμή μονοδιάστατης στερεοποίησης

4.33 Επίδραση ωρίμανσης στην αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη μη βελτιωμένης αργίλου

4.34 Επίδραση ωρίμανσης στην αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη βελτιωμένης αργίλου (4% τέφρα)

4.35 Επίδραση ωρίμανσης στην αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη βελτιωμένης αργίλου (6% τέφρα)

4.36 Επίδραση ωρίμανσης στην αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη βελτιωμένης αργίλου (8% τέφρα)

4.37 Επίδραση ωρίμανσης στην αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη βελτιωμένης αργίλου (10% τέφρα)

4.38 Επίδραση ωρίμανσης στην αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη βελτιωμένης αργίλου (15% τέφρα)

4.39 Επίδραση ωρίμανσης στην αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη βελτιωμένης αργίλου (25% τέφρα)

4.40 Επίδραση του ωρίμανσης στην αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη βελτιωμένης αργίλου για όλα τα μίγματα.

4.41 Επίδραση ποσοστού τέφρας στη σχέση τάσεων παραμορφώσεων μη βελτιωμένης και βελτιωμένης αργίλου για ωρίμανση 28 ημερών.

4.42 Επίδραση ποσοστού τέφρας στη σχέση τάσεων παραμορφώσεων μη βελτιωμένης και βελτιωμένης αργίλου για ωρίμανση 112 ημερών.

4.43 Επίδραση ποσοστού τέφρας στη σχέση τάσεων παραμορφώσεων μη βελτιωμένης και βελτιωμένης αργίλου για ωρίμανση 365 ημερών.

4.44 Επίδραση ποσοστού τέφρας στην αντοχή ανεμπόδιστης θλίψης μη βελτιωμένης και βελτιωμένης αργίλου για ωρίμανση 28 ημερών.

4.45 Επίδραση ποσοστού τέφρας στην αντοχή ανεμπόδιστης θλίψης μη βελτιωμένης και βελτιωμένης αργίλου για ωρίμανση 56 ημερών.

4.46 Επίδραση ποσοστού τέφρας στην αντοχή ανεμπόδιστης θλίψης μη βελτιωμένης και βελτιωμένης αργίλου για ωρίμανση 84 ημερών.

4.47 Επίδραση ποσοστού τέφρας στην αντοχή ανεμπόδιστης θλίψης μη βελτιωμένης και βελτιωμένης αργίλου για ωρίμανση 112 ημερών.

4.48 Επίδραση ποσοστού τέφρας στην αντοχή ανεμπόδιστης θλίψης μη βελτιωμένης και βελτιωμένης αργίλου για ωρίμανση 168 ημερών.

4.49 Επίδραση ποσοστού τέφρας στην αντοχή ανεμπόδιστης θλίψης μη βελτιωμένης και βελτιωμένης αργίλου για ωρίμανση 224 ημερών.

4.50 Επίδραση ποσοστού τέφρας στην αντοχή ανεμπόδιστης θλίψης μη βελτιωμένης και βελτιωμένης αργίλου για ωρίμανση 365 ημερών.

4.51 Επίδραση ποσοστού τέφρας στην αντοχή ανεμπόδιστης θλίψης μη βελτιωμένης και βελτιωμένης αργίλου για ωρίμανση 730 ημερών.

4.52 Επίδραση ποσοστού τέφρας στην αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη της αργίλου για διαφορετικούς χρόνους ωρίμανσης

5.1 Διαγράμματα ανάλυσης με περίθλαση ακτίνων Χ (a) ΑΑΣ-90-10, (b) ΑΑΣ-95-15

5.2 Εικόνες PLM μη βελτιωμένης αργίλου (ΑΑΣ-80-00)

5.3 Εικόνες PLM βελτιωμένης αργίλου με 10 τέφρα (ΑΑΣ-90-10)

5.4 Εικόνες PLM βελτιωμένης αργίλου με 15% τέφρα (ΑΑΣ-95-15)

5.5 Εικόνες PLM βελτιωμένης αργίλου με 25% τέφρα (ΑΑΣ-115-25)

6.1 Επίδραση της αντίστασης μεμβράνης στη σχέση τάσεων-παραμορφώσεων δοκιμίου (35 mm) αργίλου βελτιωμένης με τέφρα 10%, κατά τη δοκιμή στραγγιζόμενης τριαξονικής θλίψης.

6.2 Δοκιμή ισότροπης στερεοποίησης (η=0) σε δείγμα ΑΑΣ-80-00

6.3 Δοκιμή ισότροπης στερεοποίησης (η=0) σε δείγμα ΑΑΣ-90-10

6.4 Δοκιμή ισότροπης στερεοποίησης (η=0) σε δείγμα ΑΑΣ-95-15

6.5 ΑΑΣ-80-00 Προσδιορισμός σημείων διαρροής και αστοχίας σε διάγραμμα q-ε_αστραγγιζόμενης τριαξονικής δοκιμής θλίψης με IC=10 kPa

6.6 ΑΑΣ-80-00 Καμπύλες ΔV- ε_α στραγγιζόμενης τριαξονικής δοκιμής θλίψης με IC=10 kPa

6.7 ΑΑΣ-80-00 Προσδιορισμός σημείου διαρροής σε διάγραμμα v-logp΄ στραγγιζόμενης τριαξονικής δοκιμής θλίψης με IC=10 kPa

6.8 ΑΑΣ-80-00 Προσδιορισμός σημείων διαρροής και αστοχίας σε διάγραμμα q-ε_αστραγγιζόμενης τριαξονικής δοκιμής θλίψης με IC=20 kPa

6.9 ΑΑΣ-80-00 Καμπύλες ΔV- ε_α στραγγιζόμενης τριαξονικής δοκιμής θλίψης με IC=20 kPa

6.10 ΑΑΣ-80-00 Προσδιορισμός σημείου διαρροής σε διάγραμμα v-logp΄ στραγγιζόμενης τριαξονικής δοκιμής θλίψης με IC=20 kPa

6.11 ΑΑΣ-80-00 Προσδιορισμός σημείων διαρροής και αστοχίας σε διάγραμμα q-ε_αστραγγιζόμενης τριαξονικής δοκιμής θλίψης με IC=30 kPa

6.12 ΑΑΣ-80-00 Καμπύλες ΔV- ε_α στραγγιζόμενης τριαξονικής δοκιμής θλίψης με IC=30 kPa

6.13 ΑΑΣ-80-00 Προσδιορισμός σημείου διαρροής σε διάγραμμα v-

logp΄ στραγγιζόμενης τριαξονικής δοκιμής θλίψης με IC=30 kPa

6.14 ΑΑΣ-80-00 Προσδιορισμός σημείων διαρροής και αστοχίας σε διάγραμμα q-ε_αστραγγιζόμενης τριαξονικής δοκιμής θλίψης με IC=40 kPa

6.15 ΑΑΣ-80-00 Καμπύλες ΔV-ε_α στραγγιζόμενης τριαξονικής δοκιμής θλίψης με IC=40 kPa

6.16 ΑΑΣ-80-00 Προσδιορισμός σημείου διαρροής σε διάγραμμα v-logp΄ στραγγιζόμενης τριαξονικής δοκιμής θλίψης με IC=40 kPa

6.17 ΑΑΣ-90-10 Προσδιορισμός σημείων διαρροής και αστοχίας σε διάγραμμα q-ε_αστραγγιζόμενης τριαξονικής δοκιμής θλίψης με IC=10 kPa

6.18 ΑΑΣ-90-10 Καμπύλες ΔV-ε_α στραγγιζόμενης τριαξονικής δοκιμής θλίψης με IC=10 kPa

6.19 ΑΑΣ-90-10 Προσδιορισμός σημείου διαρροής σε διάγραμμα v-logp΄στραγγιζόμενης τριαξονικής δοκιμής θλίψης με IC=10 kPa

6.20 ΑΑΣ-90-10 Προσδιορισμός σημείων διαρροής και αστοχίας σε διάγραμμα q-ε_αστραγγιζόμενης τριαξονικής δοκιμής θλίψης με IC=30 kPa

6.21 ΑΑΣ-90-10 Καμπύλες ΔV-ε_α στραγγιζόμενης τριαξονικής δοκιμής θλίψης με IC=30 kPa

6.22 ΑΑΣ-90-10 Προσδιορισμός σημείου διαρροής σε διάγραμμα v-logp΄στραγγιζόμενης τριαξονικής δοκιμής θλίψης με IC=30 kPa

6.23 ΑΑΣ-90-10 Προσδιορισμός σημείων διαρροής και αστοχίας σε διάγραμμα q-ε_αστραγγιζόμενης τριαξονικής δοκιμής θλίψης με IC=50 kPa

6.24 ΑΑΣ-90-10 Καμπύλες ΔV-ε_α στραγγιζόμενης τριαξονικής δοκιμής θλίψης με IC=50 kPa

6.25 ΑΑΣ-90-10 Προσδιορισμός σημείου διαρροής σε διάγραμμα v-logp΄στραγγιζόμενης τριαξονικής δοκιμής θλίψης με IC=50 kPa

6.26 ΑΑΣ-90-10 Προσδιορισμός σημείων διαρροής και αστοχίας σε

διάγραμμα q-ε_αστραγγιζόμενης τριαξονικής δοκιμής θλίψης με IC=70 kPa

6.27 ΑΑΣ-90-10 Καμπύλες ΔV-ε_α στραγγιζόμενης τριαξονικής δοκιμής θλίψης με IC=70 kPa

6.28 ΑΑΣ-90-10 Προσδιορισμός σημείου διαρροής σε διάγραμμα v-logp΄στραγγιζόμενης τριαξονικής δοκιμής θλίψης με IC=70 kPa

6.29 ΑΑΣ-90-10 Προσδιορισμός σημείων διαρροής και αστοχίας σε διάγραμμα q-ε_αστραγγιζόμενης τριαξονικής δοκιμής θλίψης με IC=90 kPa

6.30 ΑΑΣ-90-10Καμπύλες ΔV-ε_α στραγγιζόμενης τριαξονικής δοκιμής θλίψης με IC=90 kPa

6.31 ΑΑΣ-90-10 Προσδιορισμός σημείου διαρροής σε διάγραμμα v-logp΄στραγγιζόμενης τριαξονικής δοκιμής θλίψης με IC=90 kPa

6.32 ΑΑΣ-90-10 Προσδιορισμός σημείων διαρροής και αστοχίας σε διάγραμμα q-ε_αστραγγιζόμενης τριαξονικής δοκιμής εφελκυσμού με IC=10 kPa

6.33 ΑΑΣ-90-10 Καμπύλες ΔV-ε_αστραγγιζόμενης τριαξονικής δοκιμής εφελκυσμού με IC=10 kPa

6.34 ΑΑΣ-90-10 Προσδιορισμός σημείου διαρροής σε διάγραμμα v-logp΄ στραγγιζόμενης τριαξονικής δοκιμής εφελκυσμού με IC=10 kPa

6.35 ΑΑΣ-90-10 Προσδιορισμός σημείων διαρροής και αστοχίας σε διάγραμμα q-ε_αστραγγιζόμενης τριαξονικής δοκιμής εφελκυσμού με IC=50 kPa

6.36 ΑΑΣ-90-10 Καμπύλες ΔV- ε_αστραγγιζόμενης τριαξονικής δοκιμής εφελκυσμού με IC=50 kPa

6.37 ΑΑΣ-90-10 Προσδιορισμός σημείου διαρροής σε διάγραμμα v-logp΄ στραγγιζόμενης τριαξονικής δοκιμής εφελκυσμού με IC=50 kPa

6.38 ΑΑΣ-90-10 Προσδιορισμός σημείων διαρροής και αστοχίας σε διάγραμμα q-ε_αστραγγιζόμενης τριαξονικής δοκιμής εφελκυσμού με IC=70 kPa

6.39 ΑΑΣ-90-10 Καμπύλες ΔV-ε_αστραγγιζόμενης τριαξονικής δοκιμής

εφελκυσμού με IC=70 kPa

6.40 ΑΑΣ-90-10 Προσδιορισμός σημείου διαρροής σε διάγραμμα v-logp΄ στραγγιζόμενης τριαξονικής δοκιμής εφελκυσμού με IC=70 kPa

6.41 ΑΑΣ-90-10 Προσδιορισμός σημείων διαρροής και αστοχίας σε διάγραμμα q-ε_αστραγγιζόμενης τριαξονικής δοκιμής εφελκυσμού με IC=90 kPa

6.42 ΑΑΣ-90-10 Καμπύλες ΔV-ε_αστραγγιζόμενης τριαξονικής δοκιμής εφελκυσμού με IC=90 kPa

6.43 ΑΑΣ-90-10 Προσδιορισμός σημείου διαρροής σε διάγραμμα v-logp΄ στραγγιζόμενης τριαξονικής δοκιμής εφελκυσμού με IC=90 kPa

6.44 ΑΑΣ-95-15 Προσδιορισμός σημείων διαρροής και αστοχίας σε διάγραμμα q-ε_αστραγγιζόμενης τριαξονικής δοκιμής θλίψης με IC=10 kPa

6.45 ΑΑΣ-95-15 Καμπύλες ΔV-ε_α στραγγιζόμενης τριαξονικής δοκιμής θλίψης με IC=10 kPa

6.46 ΑΑΣ-95-15Προσδιορισμός σημείου διαρροής σε διάγραμμα v-logp΄ στραγγιζόμενης τριαξονικής δοκιμής θλίψης με IC=10 kPa

6.47 ΑΑΣ-95-15 Προσδιορισμός σημείων διαρροής και αστοχίας σε διάγραμμα q-ε_αστραγγιζόμενης τριαξονικής δοκιμής θλίψης με IC=30 kPa

6.48 ΑΑΣ-95-15 Καμπύλες ΔV-ε_α στραγγιζόμενης τριαξονικής δοκιμής θλίψης με IC=30 kPa

6.49 ΑΑΣ-95-15 Προσδιορισμός σημείου διαρροής σε διάγραμμα v-logp΄ στραγγιζόμενης τριαξονικής δοκιμής θλίψης με IC=30 kPa

6.50 ΑΑΣ-95-15 Προσδιορισμός σημείων διαρροής και αστοχίας σε διάγραμμα q-ε_αστραγγιζόμενης τριαξονικής δοκιμής θλίψης με IC=50 kPa

6.51 ΑΑΣ-95-15 Καμπύλες ΔV-ε_α στραγγιζόμενης τριαξονικής δοκιμής θλίψης με IC=50 kPa

6.52 ΑΑΣ-95-15 Προσδιορισμός σημείου διαρροής σε διάγραμμα v-logp΄ στραγγιζόμενης τριαξονικής δοκιμής θλίψης με

IC=50kPa

6.53 ΑΑΣ-95-15 Προσδιορισμός σημείων διαρροής και αστοχίας σε διάγραμμα q-ε_αστραγγιζόμενης τριαξονικής δοκιμής θλίψης με IC=90 kPa

6.54 ΑΑΣ-95-15 Καμπύλες ΔV-ε_α στραγγιζόμενης τριαξονικής δοκιμής θλίψης με IC=90 kPa

6.55 ΑΑΣ-95-15 Προσδιορισμός σημείου διαρροής σε διάγραμμα v-logp΄ στραγγιζόμενης τριαξονικής δοκιμής θλίψης με IC=90 kPa

6.56 ΑΑΣ-95-15 Προσδιορισμός σημείων διαρροής και αστοχίας σε διάγραμμα q-ε_αστραγγιζόμενης τριαξονικής δοκιμής θλίψης με IC=110 kPa

6.57 ΑΑΣ-95-15 – Καμπύλες ΔV-ε_α στραγγιζόμενης τριαξονικής δοκιμής θλίψης με IC=110 kPa

6.58 ΑΑΣ-95-15 Προσδιορισμός σημείου διαρροής σε διάγραμμα v-logp΄ στραγγιζόμενης τριαξονικής δοκιμής θλίψης με IC=110 kPa

6.59 ΑΑΣ-95-15 Προσδιορισμός σημείων διαρροής και αστοχίας σε διάγραμμα q-ε_αστραγγιζόμενης τριαξονικής δοκιμής εφελκυσμού με IC=10 kPa

6.60 ΑΑΣ-95-15 Καμπύλες ΔV-εα στραγγιζόμενης τριαξονικής δοκιμής εφελκυσμού με IC=10 kPa

6.61 ΑΑΣ-95-15 Προσδιορισμός σημείου διαρροής σε διάγραμμα v-logp΄ στραγγιζόμενης τριαξονικής δοκιμής εφελκυσμού με IC=10 kPa

6.62 ΑΑΣ-95-15 Προσδιορισμός σημείων διαρροής και αστοχίας σε διάγραμμα q-ε_αστραγγιζόμενης τριαξονικής δοκιμής εφελκυσμού με IC=30 kPa

6.63 ΑΑΣ-95-15 Καμπύλες ΔV-ε_αστραγγιζόμενης τριαξονικής δοκιμής εφελκυσμού με IC=30 kPa

6.64 ΑΑΣ-95-15 Προσδιορισμός σημείου διαρροής σε διάγραμμα v-logp΄στραγγιζόμενης τριαξονικής δοκιμής εφελκυσμού με IC=30 kPa

6.65 ΑΑΣ-95-15 Προσδιορισμός σημείων διαρροής και αστοχίας σε διάγραμμα q-ε_αστραγγιζόμενης τριαξονικής δοκιμής

εφελκυσμού με IC=70 kPa

6.66 ΑΑΣ-95-15 Καμπύλες ΔV-ε_αστραγγιζόμενης τριαξονικής δοκιμής εφελκυσμού με IC=70 kPa

6.67 ΑΑΣ-95-15 Προσδιορισμός σημείου διαρροής σε διάγραμμα v-logp΄στραγγιζόμενης τριαξονικής δοκιμής εφελκυσμού με IC=70 kPa

6.68 ΑΑΣ-95-15 Προσδιορισμός σημείων διαρροής και αστοχίας σε διάγραμμα q-ε_αστραγγιζόμενης τριαξονικής δοκιμής εφελκυσμού με IC=90 kPa

6.69 ΑΑΣ-95-15 Καμπύλες ΔV-ε_αστραγγιζόμενης τριαξονικής δοκιμής εφελκυσμού με IC=90 kPa

6.70 ΑΑΣ-95-15 Προσδιορισμός σημείου διαρροής σε διάγραμμα v-logp΄στραγγιζόμενης τριαξονικής δοκιμής εφελκυσμού με IC=90 kPa

6.71 ΑΑΣ-95-15 Προσδιορισμός σημείων διαρροής και αστοχίας σε διάγραμμα q-ε_αστραγγιζόμενης τριαξονικής δοκιμής εφελκυσμού με IC=110 kPa

6.72 ΑΑΣ-95-15 Καμπύλες ΔV-ε_αστραγγιζόμενης τριαξονικής δοκιμής εφελκυσμού με IC=110 kPa

6.73 ΑΑΣ-95-15 Προσδιορισμός σημείου διαρροής σε διάγραμμα v-logp΄στραγγιζόμενης τριαξονικής δοκιμής εφελκυσμού με IC=110 kPa

6.74 ΑΑΣ-80-00 Τιμές της σταθεράς η (=q_y/p'_y) για στραγγιζόμενες δοκιμές θλίψης και εφελκυσμού

6.75 ΑΑΣ-90-10 Τιμές της σταθεράς η (=q_y/p'_y) για στραγγιζόμενες δοκιμές θλίψης και εφελκυσμού

6.76 ΑΑΣ-95-15 Τιμές της σταθεράς η (=q_y/p'_y) για στραγγιζόμενες δοκιμές θλίψης και εφελκυσμού

6.77 ΑΑΣ-80-00Καμπύλη q-ε_ασε στραγγιζόμενες δοκιμές θλίψης

6.78 ΑΑΣ-90-10 Καμπύλες q-ε_ασε στραγγιζόμενες δοκιμές θλίψης και εφελκυσμού

6.79 ΑΑΣ-95-15 Καμπύλες q-ε_ασε στραγγιζόμενες δοκιμές θλίψης και εφελκυσμού

6.80(α) Τυπικές μορφές θραύσης σε δοκιμές εφελκυσμού

6.80(β) Τυπικές μορφές θραύσης σε δοκιμές θλίψης δειγμάτων με και

χωρίς τέφρα

6.81 ΑΑΣ-80-00 Περιβάλλουσα αστοχίας και διαδρομές τάσεων σε δοκιμές θλίψης

6.82 ΑΑΣ-90-10 Περιβάλλουσες αστοχίας και διαδρομές τάσεων σε δοκιμές θλίψης και εφελκυσμού

6.83 ΑΑΣ-95-15 Περιβάλλουσες αστοχίας και διαδρομές τάσεων σε δοκιμές θλίψης και εφελκυσμού

6.84 ΑΑΣ-80-00 Περιβάλλουσες διαρροής και αστοχίας (0% προσθήκη τέφρας)

6.85 ΑΑΣ-90-10 Περιβάλλουσες διαρροής και αστοχίας (10% προσθήκη τέφρας)

6.86 ΑΑΣ-95-15 Περιβάλλουσες διαρροής και αστοχίας (15% προσθήκη τέφρας)

6.87 Παραδείγματα κανονικοποιημένων περιβαλλουσών διαρροής από διαφορετικές περιοχές (Graham κ.ά., 1988)

6.88 Περιβάλλουσα διαρροής για φυσική πλαστική άργιλο Winnipeg, χωρίς κανονικοποίηση τάσεων, με τα ίχνη σταθερού ν και την επιφάνεια οριακών καταστάσεων (Graham κ.ά., 1988)

6.89 Εξέλιξη περιβαλλουσών πρωτεύουσας διαρροής για τα δείγματα με τέφρα 0%, 10% και 15% από στραγγιζόμενες τριαξονικές δοκιμές θλίψης και εφελκυσμού.

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Γενικό Υπόβαθρο

Οι μαλακές άργιλοι καλύπτουν μεγάλες εδαφικές εκτάσεις σε πολλές παράκτιες περιοχές και σε πεδιάδες, όπου έχουν χωροθετηθεί αστικές και βιομηχανικές κατασκευές, και γενικά συναντώνται συχνά στα έργα Πολιτικού Μηχανικού. Η παρουσία μαλακών εδαφών είναι προβληματική λόγω του υψηλού δείκτη υδαρότητας με αποτέλεσμα υψηλή συμπιεστότητα και χαμηλή διατμητική αντοχή. Συνεπώς, αν δεν ληφθούν κατάλληλα μέτρα, τότε μία κατασκευή που εδράζεται σε μαλακή άργιλο μπορεί να υποστεί μεγάλες καθιζήσεις ή ακόμη και να αστοχήσει (π.χ. Eden και Bozozuk, 1962; Crawford κ.ά., 1995). Σε τέτοιες περιπτώσεις, μία αποτελεσματική προσέγγιση είναι η προστερεοποίηση της αργίλου με τη χρήση προφόρτισης, συχνά σε συνδυασμό με κατακόρυφα στραγγιστήρια, ώστε να μειωθεί η υγρασία της και να βελτιωθούν οι μηχανικές της ιδιότητες. Ως εναλλακτική λύση, οι μαλακές άργιλοι μπορούν να ενισχυθούν με την τεχνητή δημιουργία συγκολλητικής σύνδεσης των αργιλικών πλακιδίων μέσα στη μάζα του υλικού μέσω της προσθήκης συνδετικών υλικών όπως η άσβεστος, το τσιμέντο Portland, ο γύψος, ή η ιπτάμενη τέφρα (π.χ. Nagaraj και Miura, 2001; Croft, 1967; Bergado κ.ά., 1996; Graham κ.ά., 2005). Τα συνδετικά υλικά αντιδρούν σταδιακά με το ύδωρ και τα αργιλικά ορυκτά σχηματίζοντας δεσμούς μεταξύ και εντός των συμπλεγμάτων των αργιλικών πλακιδίων (Bergado κ.ά., 1996). Το παραγόμενο σιμεντωμένο υλικό θα έχει σημαντικά υψηλότερη αντοχή και δυσκαμψία από την αρχικήάργιλο.

Λόγω της αυξημένης γνώσης τεχνικών τεχνητής συγκόλλησης/σιμέντωσης, το φάσμα των εφαρμογών διευρύνθηκε και οδήγησε στην ανάπτυξη νέων μεθόδων οι οποίες εφαρμόζονται για τη σταθεροποίηση μαλακών υλικών (Bergado κ.ά., 1996). Για παράδειγμα, με τις αυξανόμενες περιβαλλοντικές ανησυχίες, η τεχνητή σιμέντωση έχει εφαρμοσθεί για τη στερεοποίηση και απομόνωση ρυπασμένων ιζημάτων. Πολλές εργασίες αναφέρουν επιτυχημένη σταθεροποίηση αστικών απορριμμάτων, απορριμμάτων μεταλλείων, εδαφικών υλικών βυθοκόρησης και ιλύος αστικών λυμάτων με συνδετικά υλικά (π.χ. Adaska κ.ά., 1992; Bodine και Trevino, 1996; Loest και Wilk, 1998; Wareham και Mackechnie, 2006; Nehdi και Tariq, 2007; Wilk, 2007; Beeghly και Schrock, 2010).

Υπάρχουν δύο βασικές μέθοδοι προσθήκης τσιμέντου στην εδαφική μάζα. Αυτές είναι η βαθειά ανάμιξη τσιμέντου (CDM, Cement Deep Mixing) και οι πάσσαλοι με εκτόξευση τσιμεντενέματος (JGP, Jet Grouting Pile). Η πρώτη εισάγει και αναμιγνύει στη μάζα του εδάφους, τσιμεντοπολτό ή ξηρό τσιμέντο, με τη χρήση περιστρεφόμενου στελέχους ανάμιξης (π.χ. Babasaki κ.ά. 1991; Bruce κ.ά. 1998) ενώ η δεύτερη εισάγει το ένεμα στη μάζα του εδάφους είτε με υψηλής ταχύτητας εκτόξευση ενέματος ή με υψηλής ταχύτητας εκτόξευση ύδατος με παράλληλη εισαγωγή τσιμεντενέματος (π.χ. Gallavresi 1992; Chia και Tan 1993; Yong κ.ά. 1996).

Η αύξηση της αντοχής της μαλακής αργίλου είναι το αποτέλεσμα των δεσμών που δημιουργεί το συνδετικό υλικό, και έχει πλέον μελετηθεί από πολλούς ερευνητές (Mitchell, 1981; Kamon και Bergado, 1991; Ubbin κ.ά., 1997). Αυτή η αύξηση αντοχής έρχεται παράλληλα με μία μείωση της ολκιμότητας του εδάφους (Ubinetal, 1997; Balasubramaniam κ.ά., 1999). Η αύξηση της αντοχής σε σύντομο χρόνο, είναι αποτέλεσμα της αντίδρασης ενυδάτωσης, στη διάρκεια της οποίας μειώνεται και η υγρασία. Η αύξηση αντοχής σε μεγαλύτερο χρόνο, είναι κυρίως αποτέλεσμα της δευτερεύουσας ποζολανικής αντίδρασης μεταξύ των αργιλικών ορυκτών και του τσιμέντου, της ασβέστου ή της τέφρας (Kezdi, 1979; Bergado κ.ά., 1996). Εκτός της αύξησης της αντοχής, η σταθεροποίηση με συνδετικό υλικό σιμέντωσης προκαλεί επίσης σημαντική βελτίωση σε άλλα μηχανικά χαρακτηριστικά, όπως η συμπιεστότητα, δυσκαμψία, διαπερατότητα και σχέση τάσεων-παραμορφώσεων, λόγω της δημιουργίας δομής μέσα στο συνάθροισμα των κόκκων/πλακιδίων του εδάφους, η οποία οφείλεται στη σιμέντωση (συγκόλληση).

Η βελτίωση των χαρακτηριστικών ενός τεχνητά βελτιωμένου εδάφους με τη χρήση συνδετικού υλικού, οφείλεται στην αντίδραση μεταξύ εδάφους και συνδετικού μέσου (Mitchell, 1981), η οποία παράγει πρωτεύοντα και δευτερεύοντα προϊόντα σιμέντωσης (συγκόλλησης) στη μάζα του μίγματος εδάφους και συνδετικού υλικού (Kezdi, 1979; Schaefer κ.ά., 1997; Cocka, 2001). Τα πρωτεύοντα υλικά σιμέντωσης σχηματίζονται από την αντίδραση ενυδάτωσης και περιλαμβάνουν διάφορες μορφές ένυδρου πυριτικού ασβεστίου (C_2SH_x, $C_3S_2H_x$), ένυδρου αργιλικού ασβεστίου (C_3AH_x, C_4AH_x) και υδροξείδιο ασβεστίου $Ca(OH)_2$. Η δευτερεύουσα ποζολανική αντίδραση μεταξύ ένυδρης ασβέστου και των οξειδίων πυριτίου και αργιλίου από τα αργιλικά ορυκτά σχηματίζει περισσότερο ένυδρο πυριτικό ασβέστιο (CSH) και ένυδρο αργιλικό ασβέστιο (CAH), (Kamruzzaman, 2002).

1.2 Τρέχοντα Θέματα Ερευνών

Ο όρος «δομή» χρησιμοποιείται συνήθως, για φυσικά αλλά και για τεχνητά σιμεντωμένες αργίλους, για να περιγράψει το συνδυασμένο αποτέλεσμα της υφής και της σύνδεσης των σωματιδίων της αργίλου (Mitchell και Soga, 2005). Η παρουσία δομής σε αργίλους, στη φυσική τους κατάσταση, έχει έλξει το ενδιαφέρον των ερευνητών για πολλές δεκαετίες. Δεδομένης της σχετικά μεγάλης έκτασης της έρευνας η οποία έχει γίνει σε αυτόν τον τομέα, υπάρχουν διαφορετικές απόψεις για την ερμηνεία της προέλευσης αυτής της φυσικής συγκόλλησης (π.χ. Sangrey, 1972b; Bentley και Smalley, 1978; Yong κ.ά., 1979; Quigley, 1980; Torrance, 1995; Boone και Lutenegger, 1997).

Παρόμοια με τις ευαίσθητες αργίλους που έχουν τη φυσική τους δομή, η τεχνητά σιμεντωμένη άργιλος μπορεί ακόμη να υποστεί μεγάλες παραμορφώσεις λόγω της υψηλής της υγρασίας. Ωστόσο υπάρχει ένα πλήθος παραμέτρων, όπως το συνδετικό υλικό, ο χρόνος ωρίμανσης, ο λόγος μεταξύ συνδετικού υλικού και υγρασίας, η θερμοκρασία, η ορυκτολογική σύνθεση του εδάφους και η δραστικότητα της αργίλου, που επιδρούν σε αυτές τις αντιδράσεις και συνεπώς ελέγχουν την ανάπτυξη της αντοχής και δυσκαμψίας σε μία τεχνητά σιμεντωμένη άργιλο (Bergado κ.ά., 1996). Η διαφορετική φύση της διαδικασίας συγκόλλησης (σιμέντωσης) και των συγκολλητικών δεσμών στις τεχνητά σιμεντωμένες μαλακές αργίλους, τους επιτρέπουν να αντέξουν υψηλότερες τάσεις χωρίς να υποστούν υπερβολικές καθιζήσεις (Nagaraj και Miura, 2001).

Η επιλογή συνδετικού υλικού για συγκεκριμένο σκοπό, εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, που περιλαμβάνουν την απαιτούμενη αύξηση στην αντοχή και τη δυσκαμψία, τη διαθεσιμότητα του συνδετικού υλικού, την εργασιμότητα, την ανθεκτικότητα, τον κλιματικό παράγοντα, και τέλος το κόστος (Ismail κ.ά., 2002). Μεταξύ των συνδετικών υλικών που χρησιμοποιούνται συνήθως για τεχνητή σιμέντωση, το τσιμέντο Πόρτλαντ είναι το συνηθέστερο, λόγω της ευρείας διαθεσιμότητας, καλύτερης αποτελεσματικότητας, χαμηλού κόστους και ευκολότερης αποθήκευσής του (Bergado κ.ά., 1996). Ωστόσο, στην παρούσα έρευνα, επελέγη η ιπτάμενη τέφρα ως συνδετικό μέσο λόγω της ευρείας διαθεσιμότητας της στην Ελλάδα από τους υφιστάμενους μεγάλους ατμοηλεκτρικούς σταθμούς (ΑΗΣ) της Βόρειας και Νότιας Ελλάδας, καθώς και της μη διαδεδομένης χρήσης της ως

συνδετικού υλικού. Επίσης δεν υπάρχει εκτεταμένη έρευνα για την επίδραση αυτού του υλικού στα μηχανικά χαρακτηριστικά ενός εδάφους γενικά, αλλά ούτε ειδικότερα της αργίλου.

Τα τελευταία 30 έτη έχουν διεξαχθεί πολλές έρευνες για τη μηχανική συμπεριφορά φυσικά σιμεντωμένων εδαφών (π.χ. Wong κ.ά., 1975; Oka κ.ά., 1985; Leroueil κ.ά., 1990; Airey, 1993; Coop και Atkinson,1993; Cuccovillos και Coop, 1999; Callisto κ.ά. 2004). Με βάση τη συμπεριφορά τάσεων-παραμορφώσεων σε τριαξονικές συνθήκες φόρτισης, αναπτύχθηκαν πολλά καταστατικά προσομοιώματα για τη συμπεριφορά φυσικά σιμεντωμένων, τα οποία λαμβάνουν υπόψη την απόκριση «μικρών παραμορφώσεων», τη μνήμη του υλικού, σχετικά με την ιστορία τάσεων, και την επίδραση της δομής του εδάφους (π.χ. Jardineetal, 1986; Gens και Nova, 1993; Matsuoka και Sun, 1993; Kavvadas, 1995; MuirWood, 1995b; Liu κ.ά., 1997).

Για σιμεντωμένα εδάφη, οι Leroueil και Vaughan (1990) παρατήρησαν ότι τα πρότυπα συμπεριφοράς τα οποία παρατηρούνται σε όλα τα σιμεντωμένα εδάφη είναι παρόμοια ακόμη και αν η σιμέντωση προέρχεται από διαφορετικές αιτίες. Πιο πρόσφατα, κάποιοι ερευνητές χρησιμοποίησαν τεχνητά παρασκευασμένα ελαφρά σιμεντωμένα εδάφη για να μελετήσουν τα φυσικά σιμεντωμένα εδάφη, αναπαράγοντας τη σιμέντωση υπό ελεγχόμενες συνθήκες (π.χ Abdulla&Panos, 1997; Malandraki και Toll, 2000; Consolietal, 2000; Kasama κ.ά., 2000; Rottaetal, 2003; Consolietal, 2006). Ωστόσο το συνδετικό υλικό το οποίο χρησιμοποιήθηκε σε αυτές τις έρευνες ήταν κυρίως τσιμέντο Πόρτλαντ, το οποίο ακόμη και σε μικρές ποσότητες προκαλεί θεαματική αλλαγή στην αντοχή του βελτιωμένου εδάφους. Για παράδειγμα, στα πειράματα των Rotta κ.ά. (2003), το ποσοστό τσιμέντου κυμαινόταν μεταξύ 1 και 3%, το οποίο ήταν πολύ μικρότερο από το χρησιμοποιούμενο ποσοστό για τη βελτίωση μαλακών αργίλων με τσιμέντο. Σε αυτές τις έρευνες, η επίδραση της σιμέντωσης συνήθως προσομοιωνόταν με μεγεθυμένη επιφάνεια διαρροής, ίδιου σχήματος με του αναζυμωμένου εδάφους (π.χ. Gens και Nova, 1993; Rouainia & Wood, 2000). Στην αστράγγιστη φόρτιση, η απώλεια διατμητικής αντοχής συχνά σχετίζεται με μείωση της ενεργής τάσης λόγω ογκομετρικής κατάρρευσης, παρά με άμεση απώλεια της σύνδεσης του υλικού. Σε στραγγιζόμενες συνθήκες, η απώλεια αντοχής συνήθως δεν προσομοιώνεται, καθώς η ογκομετρική συμπίεση εξισορροπεί την απώλεια σύνδεσης του υλικού. Ο Chin (2006) παρατήρησε ότι, σε θαλάσσια άργιλο βελτιωμένη με τσιμέντο, δύναται να συμβεί χαλάρωση λόγω παραμόρφωσης, μετά από ογκομετρική συμπίεση και εργοκράτυνση. Επιπλέον, στη διάρκεια της χαλάρωσης λόγω παραμόρφωσης, παρατηρείται σημαντική μείωση του λόγου

τάσεων, η οποία υποδηλώνει "ισοπέδωση" (δηλαδή μείωση της καμπυλότητας) της επιφάνειας διαρροής.

Γενικώς, η συμπεριφορά εδάφους βελτιωμένου με συνδετικό υλικό, είναι πολύ διαφορετική από εκείνην του μη βελτιωμένου, λόγω της επίδρασης της δομής. Όσον αφορά αυτό, η σημασία της δομής για σιμεντωμένα εδάφη είναι προφανής. Η δομή και η επίδραση της στη συμπεριφορά εδαφών βελτιωμένων με συνδετικό υλικό, έχει προοσελκύσει σε μεγάλο βαθμό το ενδιαφέρον των ερευνητών (π.χ. Kezdi, 1979; Saitoh κ.ά., 1985; Chew κ.ά., 2004; Chin, 2006).

Οι αλλαγές στα φυσικά χαρακτηριστικά, όπως η υγρασία και τα όρια υδαρότητας και πλαστικότητας, οι οποίες προκαλούνται ανάλογα με το ποσοστό συνδετικού υλικού, το χρόνο ωρίμανσης, και την τάση ωρίμανσης, έχουν ερευνηθεί εκτενώς (π.χ. Locat, 1990; Uddin κ.ά., 1997; Petchgate κ.ά., 2001; Chew κ.ά., 2004; Lee κ.ά., 2005; και Chin, 2006). Η αλλαγή του μεγέθους σωματιδίων (λόγω συσσωμάτωσης), η αλλαγή της κοκκομετρικής διαβάθμισης και ορισμένα θέματα μικροδομής λόγω σιμέντωσης έχουν επίσης ερευνηθεί (π.χ. Suzuki κ.ά. 1981, Shen 1998, Chew κ.ά., 2004; Chin 2006). Οι πρώτες ερευνητικές εργασίες οι οποίες αποσκοπούσαν στην κατανόηση της επίδρασης των διάφορων παραγόντων στην αντοχή εδάφους βελτιωμένου με συνδετικό υλικό, βασίζονταν στην αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη, η οποία χρησιμοποιείται ευρέως ως το μηχανικό χαρακτηριστικό το οποίο αντιπροσωπεύει την αποτελεσματικότητα της μεθόδου σταθεροποίησης. Οι παράγοντες, οι οποίοι βρέθηκαν ότι επηρεάζουν την αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη, περιλαμβάνουν το συνδετικό υλικό, τα χαρακτηριστικά του εδάφους, οι συνθήκες ανάμιξης, και οι συνθήκες ωρίμανσης (π.χ. Niina κ.ά., 1977; Enami κ.ά., 1980; Kawasaki κ.ά., 1981; Nakamura κ.ά., 1982; Terashi, 1997).

Τα μηχανικά χαρακτηριστικά εδαφών βελτιωμένων με συνδετικό υλικό, όπως η διαπερατότητα, συμπιεστότητα, δυσκαμψία, διατμητική αντοχή, και σχέση τάσεων-παραμορφώσεων σε θλιπτική φόρτιση, έχουν επίσης ερευνηθεί εκτενώς. Γενικώς, τα αποτελέσματα από διαφορετικούς ερευνητές, έδειξαν τις ίδιες τάσεις συμπεριφοράς στη συμπιεστότητα και τη σχέση τάσεων-παραμορφώσεων (π.χ. Endo, 1976; Tatsuoka και Kobayashi, 1983; Shibuya κ.ά., 1992; Uddin κ.ά., 1997; Balasubramanian κ.ά., 1998; Miura κ.ά., 2001; Chin, 2006). Αντίθετα τα αποτελέσματα από διαφορετικούς ερευνητές για τη διαπερατότητα και τη διατμητική αντοχή παρουσιάζουν μεγαλύτερη διαφοροποίηση (π.χ. Suzuki κ.ά.,1981; Kauschinger κ.ά., 1992; Uddin κ.ά., 1997;Yin & Lai, 1998). Ωστόσο μέχρι σήμερα, η μηχανική συμπεριφορά, σε συνθήκες θλίψης και εφελκυσμού, μίας τεχνητά

σιμεντωμένης μαλακής αργίλου, δεν έχει ερευνηθεί επαρκώς ώστε να επιτρέπει την ανάπτυξη καταστατικών προσομοιωμάτων. Μόνο λίγα από τα υπάρχοντα καταστατικά προσομοιώματα έχουν προταθεί για εδάφη βελτιωμένα με συνδετικά υλικά και αυτά αφορούν κυρίως άμμους ή αμμώδη εδάφη βελτιωμένα με τσιμέντο (π.χ. Hirai κ.ά., 1989; Yu κ.ά., 1998; Namikawa κ.ά., 2007).

1.3 Έκταση και Στόχοι της Παρούσας Έρευνας

Η πλειονότητα των εργαστηριακών και καταστατικών εργασιών σε τεχνητά σιμεντωμένες αργίλους ασχολείται κυρίως μόνο με την προσθήκη τσιμέντου, το οποίο δημιουργεί μια ισχυρή δομή στην υπό μελέτη τεχνητή άργιλο. Έτσι, μέχρι τώρα, δεν έχει εκπονηθεί καμία σημαντική έρευνα για τη διερεύνηση των ιδιοτήτων βελτιωμένων εδαφικών υλικών με προσθήκη μόνο ιπτάμενης τέφρας η οποία προσδίδει μία ελαφριά σιμέντωση, συνεπώς και ασθενή δομή σε ένα πολύ συνεκτικό υλικό όπως η άργιλος. Για το λόγο αυτό, η παρούσα έρευνα ασχολείται με ένα πρόσθετο υλικό διαφορετικό από το συνήθως χρησιμοποιούμενο τσιμέντο και επίσης τη μηχανική απόκριση της τεχνητής (βελτιωμένης) και φυσικής (ανασυνεστημένης) αργίλου, όταν υποβάλλεται σε δοκιμές διαφορετικών συνθηκών (θλίψης και εφελκυσμού).

Επιπλέον, γίνεται η σύγκριση της συμπεριφοράς των δύο τύπων δομών (φυσικής χωρίς προσθήκη τέφρας και τεχνητής με ποσοστά τέφρας 10% και 15%) και παρουσιάζεται ένα νέο πλαίσιο για τη συμπεριφορά των ανωτέρω βελτιωμένων υλικών.

Η παρούσα έρευνα εστιάζεται στη μηχανική συμπεριφορά μιας ελαφρά σιμεντωμένης, με προσθήκη ιπτάμενης τέφρας, αργίλου υψηλής πλαστικότητας. Η συμπεριφορά αυτή προσδιορίζεται με εργαστηριακές δοκιμές για τη διευρεύνηση της διαρροής της βελτιωμένης αργίλου και της προοδευτικής καταστροφής της δομής της, ώστε να δοθεί σημείο αναφοράς για χρήση σε αναλυτικά γεωμηχανικά προσομοιώματα.

Η έρευνα υποδιαιρείται σε τρία μέρη :

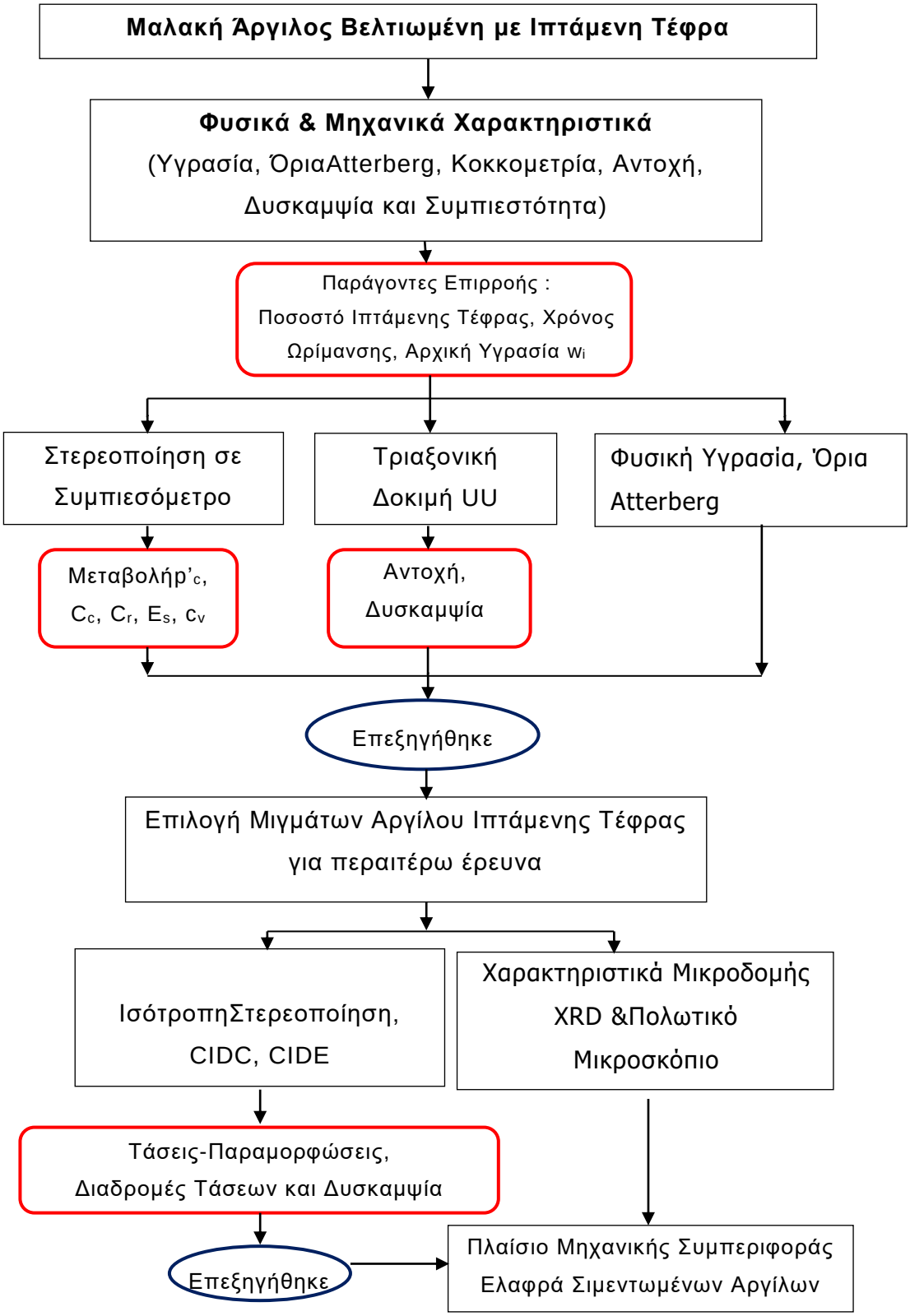
i. Δοκιμές σε δείγματα για ευρύ φάσμα αναλογιών μίξης και διαφορετικούς χρόνους και συνθήκες ωρίμανσης, ώστε να προκύψουν εκτενείς πληροφορίες για τη συμπεριφορά μία μαλακής αργίλου βελτιωμένης με προσθήκη τέφρας ως συνδετικού υλικού, με σκοπό τη δημιουργία δομής στην άργιλο. Αυτό επιτεύχθηκε με δοκιμές προσδιορισμού βασικών χαρακτηριστικών (υγρασίας και ορίων

Atterberg), δοκιμές μονοδιάστατης στερεοποίησης και τριαξονικές δοκιμές για τον προσδιορισμό της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής για διαφορετικές αναλογίες τέφρας και ύδατος. Τα μίγματα τέφρας-αργίλου προστερεοποιήθηκαν υπό σταθερό φορτίο σε κυλινδρική μήτρα ανυποχώρητων τοιχωμάτων (η οποία χρησιμοποιείται για τις δοκιμές συμπύκνωσης κατά Proctor).

ii. Για την κατανόηση της φυσικοχημικής και μικροδομικής συμπεριφοράς των αργιλικών δειγμάτων, βελτιωμένων και μη, εκτελέστηκαν επίσης αναλύσεις περίθλασης ακτίνων Χ και Πολωτικού Μικροσκοπίου.

iii. Με βάση τα παραπάνω αποτελέσματα εργαστηριακών δοκιμών, έγινε επιλογή δύο μιγμάτων αργίλου-τέφρας με περιεκτικότητα σε τέφρα 10% και 15%, ώστε να μελετηθεί πιο αναλυτικά η μηχανική συμπεριφορά μίας τεχνητά σιμεντωμένης αργίλου υψηλής πλαστικότητας σε μακροσκοπικό επίπεδο, και στη συνέχεια, να συσχετιστεί αυτή η συμπεριφορά με τις μικροδομικές μεταβολές στη διάρκεια της διάτμησης. Εκτελέστηκαν τριαξονικές δοκιμές, σε στραγγιζόμενες συνθήκες θλίψης και εφελκυσμού, ώστε να διερευνηθεί η συμπεριφορά αρχικής διαρροής αργίλου υψηλής πλαστικότητας και ειδικότερα η εξέλιξη της επιφάνειας διαρροής στη διάρκεια της κράτυνσης. Η παραπάνω συμπεριφορά συγκρίθηκε με εκείνην της ίδιας αργίλου υψηλής πλαστικότητας χωρίς προσθήκη συνδετικού υλικού, αλλά με τις ίδιες συνθήκες παρασκευής και προστερεοποίησης δειγμάτων.

Στο Σχήμα 1.1 δίνονται σχηματικά η έκταση και οι στόχοι της παρούσας έρευνας.



Σχήμα 1.1 - Σχηματικό διάγραμμα της έκτασης και των στόχων της έρευνας.

1.4 Οργάνωση της Διατριβής

Η παρούσα έρευνα παρουσιάζεται σε επτά κεφάλαια, καθένα από τα οποία έχει διαφορετικό και διακριτό σκοπό, όπως αναφέρεται στα επόμενα.

Το Κεφάλαιο 2 παρέχει μία περιεκτική ανασκόπηση της βιβλιογραφίας σχετικά με το υπόβαθρο θεωρητικών και εργαστηριακών ερευνών, καθώς και τα σημαντικότερα θέματα για σιμεντωμένη μαλακή άργιλο. Συνεπώς σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται, για όλες τις προηγούμενες έρευνες, κριτική ανασκόπηση των βασικών εννοιών, μηχανισμών, ιδιοτήτων, κρίσιμων παραμετρικών συμπεριφορών και διάφορων βασικών παραγόντων ελέγχου των παραμέτρων και αποτελεσμάτων.

Το Κεφάλαιο 3 παρουσιάζει τη διάταξη, τον εξοπλισμό και τη μεθοδολογία των δοκιμών, καθώς και τις εργαστηριακές δοκιμές/εργασίες οι οποίες εκτελέστηκαν στην παρούσα έρευνα. Επίσης δίνει λεπτομέρειες για την παρασκευή των δειγμάτων και δοκιμίων, καθώς και των μεταβλητών οι οποίες διερευνήθηκαν.

Το Κεφάλαιο 4 ερμηνεύει τη βασική φυσικοχημική συμπεριφορά και τη συνδυάζει με τα φυσικά χαρακτηριστικά της βελτιωμένης με ιπτάμενη τέφρα αργίλου. Το κεφάλαιο αυτό παρουσιάζει και αναλύει τα αποτελέσματα των δοκιμών για όλες τις ομάδες μιγμάτων με ιπτάμενη τέφρα, και επιχειρεί να παρουσιάσει μία κατάσταση ως βάση αναφοράς για τη μελέτη της επίδρασης της δομής στη μηχανική συμπεριφορά μαλακής αργίλου βελτιωμένης με ιπτάμενη τέφρα.

Το Κεφάλαιο 5 ερμηνεύει τη μικροδομή μαλακής αργίλου βελτιωμένης με ιπτάμενη τέφρα, με βάση τις αναλύσεις περίθλασης ακτίνων Χ και Πολωτικού Μικροσκοπίου (PLM).

Το Κεφάλαιο 6 παρουσιάζει τα αποτελέσματα από τη φάση διάτμησης τριαξονικών δοκιμών σε συνθήκες θλίψης και εφελκυσμού, για σημαντικό εύρος τάσεων. Εξετάζεται η συμπεριφορά τάσεων-παραμορφώσεων η οποία παρατηρήθηκε για τα δύο επιλεγμένα μίγματα βελτιωμένης αργίλου και για τη μη βελτιωμένη άργιλο. Στη συνέχεια γίνεται σύγκριση της συμπεριφοράς των τριων δειγμάτων και επιχειρείται να επεξηγηθεί ένα πλαίσιο συμπεριφοράς ελαφρά σιμεντωμένων αργίλων υψηλής πλαστικότητας.

Το Κεφάλαιο 7 συνοψίζει τα κύρια συμπεράσματα τα οποία προκύπτουν από τα αποτελέσματα της έρευνας. Προτείνεται μία υπόθεση για την ερμηνεία της συμπεριφοράς των τεχνητά σιμεντωμένων μαλακών αργίλων όσον αφορά την αντοχή

τους, όπως αυτή η συμπεριφορά παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 6. Επίσης γίνονται προτάσεις για μελλοντικές ερευνητικές εργασίες.

2 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

2.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται ανασκόπηση των εργαστηριακών και θεωρητικών ερευνών της συμπεριφοράς εδαφών βελτιωμένων με συνδετικό υλικό στη μάζα τους. Αρχικά εξετάστηκαν οι βασικές έννοιες και μηχανισμοί της σταθεροποίησης με χρήση ενός συνδετικού υλικού, και ακολούθως οι παράγοντες οι οποίοι επηρεάζουν τη μηχανική συμπεριφορά της σκληρυμένης βελτιωμένης αργίλου.

Επιπλέον μελετήθηκαν οι υπάρχουσες έρευνες με θέμα τη μηχανική συμπεριφορά (αντοχή, δυσκαμψία, συμπιεστότητα, διαπερατότητα κ.α.) αργίλου βελτιωμένης με την προσθήκη ενός συνδετικού υλικού, όπως παρουσιάζονται σε μεγάλο αριθμό δημοσιευμένων εργασιών. Εξετάστηκε η επίδραση της σταθεροποίησης με χρήση συνδετικού υλικού στις ιδιότητες και τη συμπεριφορά του εδάφους. Τέλος σχολιάζονται οι περιορισμοί αυτών των μελετών.

Επιπλέον μελετήθηκαν προηγούμενες έρευνες με θέμα τη φυσικοχημική και μικροδομική συμπεριφορά αργίλων, βελτιωμένων με διάφορα συνδετικά υλικά, καθώς υπάρχουν πολλές ομοιότητες στα τελικά προϊόντα των χημικών αντιδράσεων της σταθεροποίησης με ιπτάμενη τέφρα.

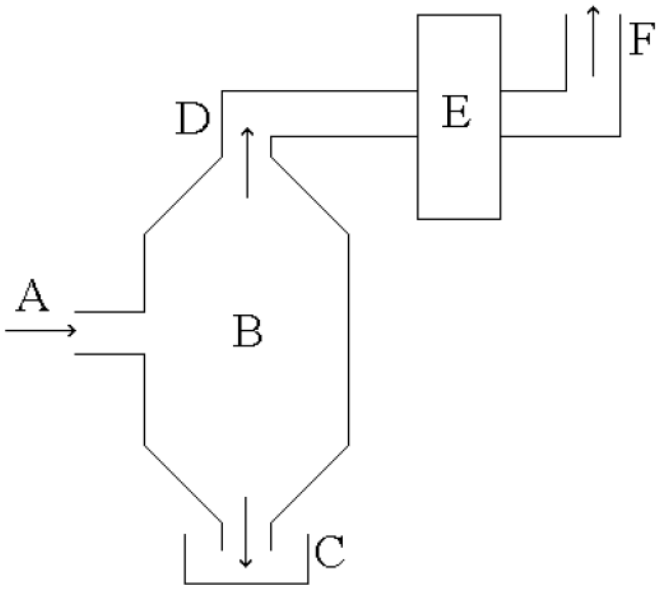
Τέλος, παρουσιάζονται τα θέματα τα οποία εξετάστηκαν και ερμηνεύθηκαν στην παρούσα έρευνα.

2.2 Βασικές Έννοιες και Μηχανισμοί της Σταθεροποίησης με Ιπτάμενη Τέφρα

2.2.1 Χαρακτηρισμός Τέφρας

Ο όρος “ιπτάμενη τέφρα” συχνά χρησιμοποιείται για να περιγράψει οποιοδήποτε υλικό από λεπτόκοκκα σωματίδια το οποίο κατακάθεται από τα αέρια καπνοδόχων βιομηχανικών καμίνων όπου καίονται στερεά καύσιμα. Η ποσότητα τέφρας, η οποία συλλέγεται από τις καμίνους ενός εργοστασίου, κυμαίνεται από λιγότερο από έναν τόνο την ημέρα έως και πολλούς τόνους ανά λεπτό. Τα χαρακτηριστικά και οι ιδιότητες διαφορετικών ιπτάμενων τεφρών εξαρτώνται από τη φύση του καυσίμου

και το μέγεθος της καμίνου όπου καίεται. Η κονιοποίηση των στερεών καυσίμων για μεγάλες καμίνους ατμοηλεκτρικών σταθμών (ΑΗΣ), δημιουργεί ένα άμεσο επείγον πρόβλημα. Η ξηρή τέφρα πρέπει να συλλεγεί από τα αέρια των καπνοδόχων και να αποτεθεί ταχέως και ασφαλώς.



Σχήμα 2.1 – Σχηματική διάταξη καμίνου. A – Το καύσιμο εισάγεται στην κάμινο. B – Χώρος καύσης. C – Εξαγωγή τέφρας πυθμένα. D – Καπναέρια με αιωρούμενη ιπτάμενη τέφρα. E – Διαχωρισμός μέσω φίλτρου της τέφρας από τα καπναέρια. F – Εκπομπή καπναερίων.

Οι ιπτάμενες τέφρες κατατάσσονται σε δύο κατηγορίες, ανάλογα με την προέλευσή τους και τη χημική και ορυκτολογική τους σύνθεση. Η καύση ανθρακίτη ή ασφαλτούχου γαιάνθρακα γενικά παράγει ιπτάμενες τέφρες χαμηλής περιεκτικότητας σε ασβέστιο. Οι ιπτάμενες τέφρες υψηλής περιεκτικότητας σε ασβέστιο, προκύπτουν από καύση λιγνίτη ή υποασφαλτούχου γαιάνθρακα. Και οι δύο τύποι τέφρας περιέχουν κατά πλειονότητα άμορφη πυριτική ύαλο.

Η ιπτάμενη τέφρα, λόγω της ορυκτολογικής της σύνθεσης, και του λεπτοσωματιδιακού και άμορφου χαρακτήρα της, είναι γενικά ποζολανική και σε ορισμένες περιπτώσεις έχει επίσης ικανότητα σιμέντωσης από μόνη της (χωρίς τη συνδρομή άλλου υλικού). Η τέφρα πυθμένα και η σκωρία καμίνου είναι πολύ πιο χονδρόκοκκες και δεν είναι ποζολανικής φύσης. Είναι συνεπώς σημαντικό να αναγνωρίσουμε ότι όλη η παραγόμενη τέφρα δεν είναι ιπτάμενη τέφρα, και ότι όλες οι ιπτάμενες τέφρες οι οποίες παράγονται από διαφορετικούς ΑΗΣ παραγωγής δεν

είναι εξίσου ποζολανικές, και άρα δεν είναι πάντοτε κατάλληλες προς χρήση ως ορυκτά πρόσμικτα σε εδάφη.

2.2.2 Τύποι και Ιδιότητες Τέφρας

Ο χαρακτηρισμός της τέφρας με όρους σύνθεσης, ορυκτολογίας, χημείας επιφανειών και αντιδρασιμότητας είναι θεμελιώδους σημασίας για την ανάπτυξη διάφορων εφαρμογών της τέφρας.

2.2.2.1 Ορισμοί και Προδιαγραφές

Οι ποζολάνες ASTM C 618-93) είναι πυριτιούχα και αργιλιούχα υλικά (Si, Al), τα οποία αν και από μόνα τους διαθέτουν μικρή ή καθόλου συγκολλητική αξία (ικανότητα σιμέντωσης), ωστόσο σε πολύ λεπτόκοκκη μορφή και με παρουσία υγρασίας, αντιδρούν χημικά με το υδροξείδιο του ασβεστίου, σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, και σχηματίζουν ενώσεις με ιδιότητες σιμέντωσης (ASTM Standard C 618-80). Σημειώνουμε εδώ ότι *ο όρος* ***σιμέντωση*** *χρησιμοποιείται για να αποδώσει τη φύση των συγκολλητικών ιδιοτήτων του τσιμέντου, ασθενέστερων ή ισχυρότερων, χωρίς να αναφέρεται αποκλειστικά στο τσιμέντο*.

Οι ιπτάμενες τέφρες, οι οποίες έχουν την ικανότητα να αντιδρούν με το $Ca(OH)_2$ σε θερμοκρασίες δωματίου, δύνανται να δρούν ως ποζολανικά υλικά. Η ποζολανική τους δράση αποδίδεται στα οξείδια SiO_2 και Al_2O_3 σε άμορφη (μη κρυσταλλική) κατάσταση. Η Προδιαγραφή ASTM C 618-93 αναφέρεται σε ιπτάμενη τέφρα, ακατέργαστη φυσική ποζολάνη ή τεχνητά ασβεστούχα φυσική ποζολάνη, για χρήση ως ορυκτού πρόσμικτου σε σκυρόδεμα τσιμέντου Πόρτλαντ.

2.2.2.2 Κατάταξη

Το ASTMC-618-93 κατατάσσει τις ιπτάμενες τέφρες, από καύση άνθρακα, σε δύο κατηγορίες : Κατηγορία F και Κατηγορία C. Οι ιπτάμενες τέφρες Κατηγορίας F παράγονται κανονικά από καύση ανθρακίτη ή ασφαλτούχου γαιάνθρακα. Οι ιπτάμενες τέφρες Κατηγορίας C παράγονται από καύση λιγνίτη ή υπασφαλτούχου γαιάνθρακα. Οι περισσότερες ιπτάμενες τέφρες είναι πλούσιες σε SiO_2, Al_2O_3, και Fe_2O_3, και περιέχουν σημαντικές ποσότητες CaO, MgO, MnO, TiO_2, Na_2O, K_2O, SO_3, κλπ. Κατά ASTM, οι ιπτάμενες τέφρες Κατηγορίας C (ιπτάμενες τέφρες υψηλής περιεκτικότητας σε άσβεστο) τυπικά περιέχουν CaO περισσότερο από 10% έως και 40%, και οι Κατηγορίας F (ιπτάμενες τέφρες χαμηλής περιεκτικότητας σε άσβεστο)

γενικά περιέχουν λιγότερο από 10% CaO. Λόγω της υψηλής περιεκτικότητας σε CaO, οι ιπτάμενες τέφρες Κατηγορίας C συμμετέχουν τόσο σε αντιδράσεις σιμέντωσης όσο και σε ποζολανικές. Ενώ οι ιπτάμενες τέφρες Κατηγορίας F, στη διάρκεια της διαδικασίας ενυδάτωσης, συμμετέχουν κυρίως σε ποζολανική αντίδραση. Συνεπώς οι ιπτάμενες τέφρες Κατηγορίας C κατατάσσονται ως πρόσμικτα/πρόσθετα ποζολανικά και με ιδιότητες σιμέντωσης, και οι ιπτάμενες τέφρες Κατηγορίας F ως κανονικές ποζολάνες για χρήση στο σκυρόδεμα.

2.2.2.3 Φυσικές Ιδιότητες της Τέφρας

Η ιπτάμενη τέφρα αποτελείται από λεπτά σωματίδια, σε μορφή κόνης, κυρίως σφαιρικού σχήματος, πλήρη ή κενά, και κατά πλειονότητα σε υαλώδη (άμορφη) κατάσταση. Το ανθρακικό υλικό της τέφρας αποτελείται από γωνιώδη σωματίδια. Η κοκκομετρική διαβάθμιση των περισσότερων ιπτάμενων τεφρών του ασφαλτούχου γαιάνθρακα είναι γενικά παρόμοια με της ιλύος (δηλ. υλικό διερχόμενο από το κόσκινο No. 200, 0.075 mm). Αν και η ιπτάμενη τέφρα του υπασφαλτούχου γιαάνθρακα έχει επίσης κοκκομετρία ιλύος, είναι γενικά ελαφρά χονδρότερη από εκείνη του ασφαλτούχου γαιάνθρακα. Το ειδικό βάρος της τέφρας συνήθως κυμαίνεται μεταξύ 2.1 και 3.0, ενώ η ειδική της επιφάνεια κυμαίνεται μεταξύ 170 και 1000 m^2/kg. Το χρώμα της τέφρας ποικίλλει από καστανό έως τεφρό και μαύρο, ανάλογα με την ποσότητα του άκαυτου άνθρακα που περιέχει.

2.2.2.4 Χημικές Ιδιότητες της Τέφρας

Οι χημικές ιδιότητες της τέφρας επηρεάζονται σε μεγάλο βαθμό από τις ιδιότητες του άνθρακα που καίεται και τις τεχνικές χειρισμού και αποθήκευσης του άνθρακα. Βασικά υπάρχουν τέσσερις τύποι ή διαβαθμίσεις άνθρακα, που διαφέρουν σε γεωλογική προέλευση, χημική σύνθεση, θερμαντική αξία και απόδοση σε τέφρα. Οι τέσσερις τύποι (διαβαθμίσεις ενανθράκωσης) άνθρακα είναι ανθρακίτης, ασφαλτούχος γαιάνθρακας, υπασφαλτούχος γαιάνθρακας, και λιγνίτης. Επίσης, ορισμένες φορές, η ιπτάμενη τέφρα κατατάσσεται, εκτός του τρόπου χειρισμού της σε ξηρή, ενυδατωμένη ή υγρή μορφή, και σύμφωνα με τον τύπο του άνθρακα από τον οποίο προέρχεται.

Τα κύρια συστατικά της τέφρας ασφαλτούχου γαιάνθρακα είναι SiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3, ασβέστιο και διάφορες ποσότητες άνθρακα όπως αυτές προσδιορίζοναι με την απώλεια καύσης. Η ιπτάμενη τέφρα λιγνίτη ή υπαφαλτούχου γαιάνθρακα, σε σύγκριση με εκείνη του ασφαλτούχου γιαάνθρακα, χαρακτηρίζεται από υψηλότερα

ποσοστά οξειδίων ασβεστίου και μαγνησίου, χαμηλότερα ποσοστά οξειδίων πυριτίου και σιδήρου, και χαμηλότερη περιεκτικότητα σε άνθρακα. Πολύ μικρές ποσότητες ανθρακίτη καίονται σε καμίνους, συνεπώς υπάρχουν μόνο μικρές ποσότητες τέφρας ανθρακίτη. Η ιπτάμενη τέφρα λιγνίτη ή υπασφαλτούχου γαιάνθρακα έχει υψηλότερο ποσοστό οξειδίου ασβεστίου και μικρότερη απώλεια σε καύση από την ιπτάμενη τέφρα ασφαλτούχου γαιάνθρακα. Επίσης, η ιπτάμενη τέφρα λιγνίτη ή υπασφαλτούχου γαιάνθρακα μπορεί να έχει μεγαλύτερα ποσοστά θειϊκών ενώσεων από την ιπτάμενη τέφρα ασφαλτούχου γαιάνθρακα. Σύμφωνα με την προδιαγραφή ASTM C 618-93, η ιπτάμενη τέφρα η οποία περιέχει περισσότερο από 70% κατά βάρος SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3 και έχει χαμηλό ποσοστό ασβέστου ορίζεται ως κατηγορίας F.

Συνοψίζοντας, η ιπτάμενη τέφρα υψηλού ποσοστού ασβεστίου, Κατηγορίας C, κανονικά παράγεται από χαμηλού βαθμού ενανθράκωσης γαιάνθρακες (λιγνίτες ή υπασφαλτούχους γαιάνθρακες) και διαθέτει ιδιότητες σιμέντωσης (όταν αντιδρά με το νερό, σκληρύνεται χωρίς προσθήκη άλλου υλικού). Από την άλλη πλευρά, η ιπτάμενη τέφρα χαμηλού ποσοστού ασβεστίου, Κατηγορίας F, συνήθως παράγεται από υψηλού βαθμού ενανθράκωσης γαιάνθρακες (ασφαλτούχους γαιάνθρακες και ανθρακίτες) και έχει ποζολανικές ιδιότητες (δηλαδή σκληρύνεται όταν αντιδράσει με νερό, όχι μόνη της αλλά μαζί με $Ca(OH)_2$). Η κύρια διαφορά μεταξύ τέφρας Κατηγορίας F και C, είναι στα ποσοστά ασβεστίου και οξειδίων του πυριτίου, αργιλίου και σιδήρου. Στην ιπτάμενη τέφρα Κατηγορίας F, το συνολικό ασβέστιο τυπικά κυμαίνεται μεταξύ 1 και 12%, ως επί το πλείστον σε μορφή υδροξειδίου του ασβεστίου και θειϊκού ασβεστίου. Επίσης περιέχει υαλώδους μορφής συστατικά, σε συνδυασμό με οξείδια πυριτίου και αργιλίου. Αντιθέτως, η ιπτάμενη τέφρα Κατηγορίας C, έχει μετρημένα ποσοστά οξειδίου του ασβεστίου έως και 30 με 40%. Μία ακόμη διαφορά των δύο κατηγοριών F και C είναι ότι η ποσότητα των αλκαλίων (συνδυασμένο νάτριο και κάλιο) και θειϊκών (SO_4), είναι γενικά υψηλότερα στην ιπτάμενη τέφρα Κατηγορίας C από ό,τι σε εκείνη της Κατηγορίας F.

2.2.3 Αντιδράσεις Τέφρας - Εδάφους

Η επίδραση της τέφρας στα φυσικά χρακτηριστικά του εδάφους αποδίδεται κυρίως στις αλλαγές υφής του εδάφους. Η αλλαγή στην υφή του εδάφους συσχετίζεται με το φαινόμενο βάρος, το πορώδες, τη διαπερατότητα, το λόγο κενών, και την ικανότητα κατακράτησης υγρασίας, οι οποίες έχουν άμεσο αντίκτυπο στην δραστικότητα του εδάφους.

Οι κενόσφαιρες της τέφρας αντικαθιστούν μεγαλύτερα σωματίδια εδάφους, και καθιστούν δυνατή τη συγκέντρωση μικρών κόκκων ιλύος στα κενά, μεταβάλλοντας την υφή (Khan και Khan, 1996, Ram *κ.ά.*, 2007b) και τη δομή των πόρων (Yunusa *κ.ά.*, 2006), του εδάφους. Οι ιπτάμενες τέφρες με υψηλό ποσοστό διαλυτού Ca και κατάλληλη κοκκομετρική διαβάθμιση, ιδιαίτερα με υψηλό ποσοστό μεταξύ 2 και 200 μm, δύνανται να αναβαθμίσουν τις δομικές ιδιότητες τού εδάφους (Yunusa κ.ά., 2006).

Αργιλικά εδάφη υψηλής πλαστικότητας, με προσθήκη 600 t/ha (τόνοι ανά εκτάριο) ξηρής τέφρας αναβαθμίζουν τις φυσικοχημικές τους ιδιότητες (Fulekar, 1993), με σημαντική μείωση των αργιλικών ιδιοτήτων, και βελτίωση της εργασιμότητας του εδάφους. Το φαινόμενο βάρος της τέφρας βρέθηκε ότι είναι χαμηλότερο από του συνηθισμένου καλλιεργήσιμου εδάφους (Sikka και Kansal, 1994). Παρατηρήθηκε ευρεία διακύμανση του φαινόμενου βάρους της τέφρας από 0.81 έως 1.16 Mg/m^3 (Chatterjee κ.ά., 1988, Sarkar κ.ά., 2005). Η αναβάθμιση των ιδιοτήτων διαφόρων τύπων εδαφών, λόγω μείωσης του φαινόμενου βάρους, η οποία οφείλεται στη βελτίωση με ιπτάμενη τέφρα, έχει τύχει ευρείας αναγνώρισης (Page κ.ά., 1979). Οι ιδιότητες που επηρεάζονται είναι το εργάσιμο, η ικανότητα κατακράτησης ύδατος και η διαπερατότητα.

2.2.4 Δομή και Μικροδομή Βελτιωμένης Αργίλου

Ο όρος «δομή» είχε αρχικά εισαχθεί για τις αργίλους (π.χ. Mitchell, 1976), και είχε περιγραφεί από τον Burland (1990) ότι περιλαμβάνει το συνδυασμό της σύνδεσης (δηλαδή της σιμέντωσης/συγκόλλησης μεταξύ σωματιδίων) και της υφής (δηλαδή της διάταξης και της κατανομής των σωματιδίων τα οποία αποτελούν το έδαφος). Ένα συνηθισμένο αποτέλεσμα της δομής, είναι η απόδοση υψηλότερης αντοχής και δυσκαμψίας στο έδαφος. Επίσης επιτρέπει στο έδαφος να υφίσταται σε μία κατάσταση μεγαλύτερου όγκου από εκείνον του ίδιου υλικού, αλλά αναζυμωμένου ή ανασυνεστημένου. Για τις άμμους, η δομή έχει συχνά εξισωθεί μόνον με τους δεσμούς μεταξύ κόκκων, αν και η υφή άμμων με γεωλογική γήρανση δύναται επίσης να επηρεάσει τη μέγιστη αντοχή (π.χ. Dusseault & Morgenstern, 1979, Cuccovillo & Coop, 1999). Η επίδραση της δομής, έχει παρατηρηθεί σε ευρύ φάσμα φυσικών εδαφών και ασθενών βράχων (δηλαδή σκληρών εδαφών και μαλακών βράχων), ιζηματογενών ή αυτόχθονων, καθώς και σε τεχνητά σιμεντωμένα εδάφη. Η δομή των φυσικών εδαφών έχει εξεταστεί από πολλούς ερευνητές (Lerouiel

και Vaughan, 1990,Burland, 1990,Nagaraj κ.ά., 1998,Liu και Carter, 1999,Asaoka κ.ά., 2000,Baudet και Stallebrass, 2004, Low κ.ά., 2008). Η δομή των φυσικών εδαφών, συχνά σχηματίζεται από την απόθεση στις επαφές μεταξύ σωματιδίων, ουσιών από διαλύματα. Αυτό προκαλείται περισότερο από έλλειμμα ηλεκτρικού φορτίου στις επιφάνειες των σωματιδίων και από δυνάμεις vander Waals (Mitchell 1993), παρά από αντιδράσεις ποζολανικές ή ενυδάτωσης. Η δομή αργίλων βελτιωμένων με άσβεστο έχει μελετηθεί, μεταξύ άλλων, από τους Locat κ.ά. (1990, 1996) και τους Rao και Rajasekaran (1996). Ωστόσο, η απουσία της αρχικής αντίδρασης ενυδάτωσης στην βελτίωση με άσβεστο δύναται να οδηγήσει σε διαφορετική μικροδομή από αυτήν η οποία παράγεται από τη βελτίωση με τσιμέντο. Επιπλέον, η δομή τεχνητά σιμεντωμένων εδαφών έχει επίσης μελετηθεί από διάφορους ερευνητές (π.χ. Hirai κ.ά.,1989, Coop & Atkinson, 1993, Huang & Airey, 1998, Kasama κ.ά., 2000, Malandraki και Toll, 2000, Consoli κ.ά., 2000, Schnaid κ.ά., 2001, Kamruzzaman, 2002, Rotta κ.ά., 2003, Chew, 2004, Chin, 2006).

Η μικροδομή μίας αργίλου βελτιωμένης με την προσθήκη συνδετικού υλικού είναι συχνά σημαντικά διαφορετική από εκείνη της μη βελτιωμένης αργίλου. Ο Kezdi (1979) πρότεινε ότι λόγω της προσθήκης τσιμέντου, είναι δυνατός ο σχηματισμός ενός σκελετού εδάφους-τσιμέντου, όπου κάθε μονάδα του σκελετού αποτελείται από πυρήνα ενυδατωμένου πηκτώματος (γέλης, gel) τσιμέντου (tobermoritegel) και δευτερογενών προϊόντων τσιμέντωσης, δηλαδή ένυδρου πυριτικού ασβεστίου (CSH, Calcium Silicate Hydrate) και ένυδρου αργιλικού ασβεστίου (CAH, Calcium Aluminate Hydrate) τα οποία συνδέουν τα γειτονικά σωματίδια αργίλου. Επιπρόσθετα, η αντοχή του δεσμού μεταξύ σωματιδίων αυξάνεται λόγω μείωσης της διάχυτης διπλοστιβάδας και λόγω της κροκίδωσης των δευτερογενών υλικών τσιμέντωσης. Αυτός θεώρησε ότι η αρχική κατάσταση αμέσως μετά την ανάμιξη, αποτελείται από συσσωματώματα αργιλικών σωματιδίων, περιβαλλόμενα από τσιμεντοπολτό. Η κύρια αντίδραση ενυδάτωσης περιλαμβάνει μόνο το κέλυφος του τσιμεντοπολτού, και σχηματίζει σώματα σκληρυμένου τσιμέντου. Η δευτερεύουσα ποζολανική αντίδραση περιλαμβάνει τα εσωτερικά αργιλικά σωματίδια, οδηγώντας στο σχηματισμό σωμάτων σκληρυμένου εδάφους. Επίσης θεώρησαν ότι η αντοχή του βελτιωμένου εδάφους εξαρτάται και από τους δύο τύπους σκληρυμένων σωμάτων.

Οι Locat κ.ά. (1990) παρουσίασαν μικροφωτογραφίες της μικροδομής ευαίσθητης αργίλου βελτιωμένης με άσβεστο (Σχήμα 2.2). Όπως δείχνει το Σχήμα 2.2(Α), πριν την προσθήκη της ασβέστου, η άργιλος έχει ανοικτή μικροϋφή, με ορατά

μεμονωμένα σωματίδια αργίλου και συμπλέγματα σωματιδίων. Στο Σχήμα 2.2(B), μετά ωρίμανση 10 ημερών από την προσθήκη άνυδρης ασβέστου (CaO), το έδαφος έχει κροκιδωθεί σε μεγαλύτερα συσσωματώματα. Ενώ τα Σχήματα 2.2(C-F) δείχνουν τα συσσωματώματα να έχουν συνδεθεί μεταξύ τους με σιμέντωση από τα προϊόντα της επακόλουθης ποζολανικής αντίδρασης. Για άργιλο βελτιωμένη με τσιμέντο, οι Chew κ.ά. (2004) παρατήρησαν ότι, καθώς αυξάνεται το ποσοστό του τσιμέντου από 10% σε 50%, γίνεται πιο προφανής η κροκιδωμένη φύση της δομής, με μεγάλα ανοίγματα (κενά) διεσπαρμένα ανάμεσα στα συσσωματώματα των σωματιδίων εδάφους. Αυτό το απέδωσαν στη διάλυση οξειδίων πυριτίου και αργιλίου από τα αργιλικά ορυκτά και την επακόλουθη αντίδρασή τους με τα Ca^{++} για να σχηματίσουν CSH και CASH (Calcium Aluminum Silicate Hydrate, ένυδρου αργιλιοπυριτικού ασβεστίου). Στη συνέχεια τα προϊόντα αυτά αποθέτονται στην επιφάνεια του σωματιδίου. Παρατήρησαν επίσης ότι σημαντική ποσότητα ύδατος είναι παγιδευμένη μέσα στα συσσωματώματα των κροκιδωμένων σωματιδίων, όπως παρατήρησαν και οι Locatelal. (1996) για άργιλο σταθεροποιημένη με άσβεστο.

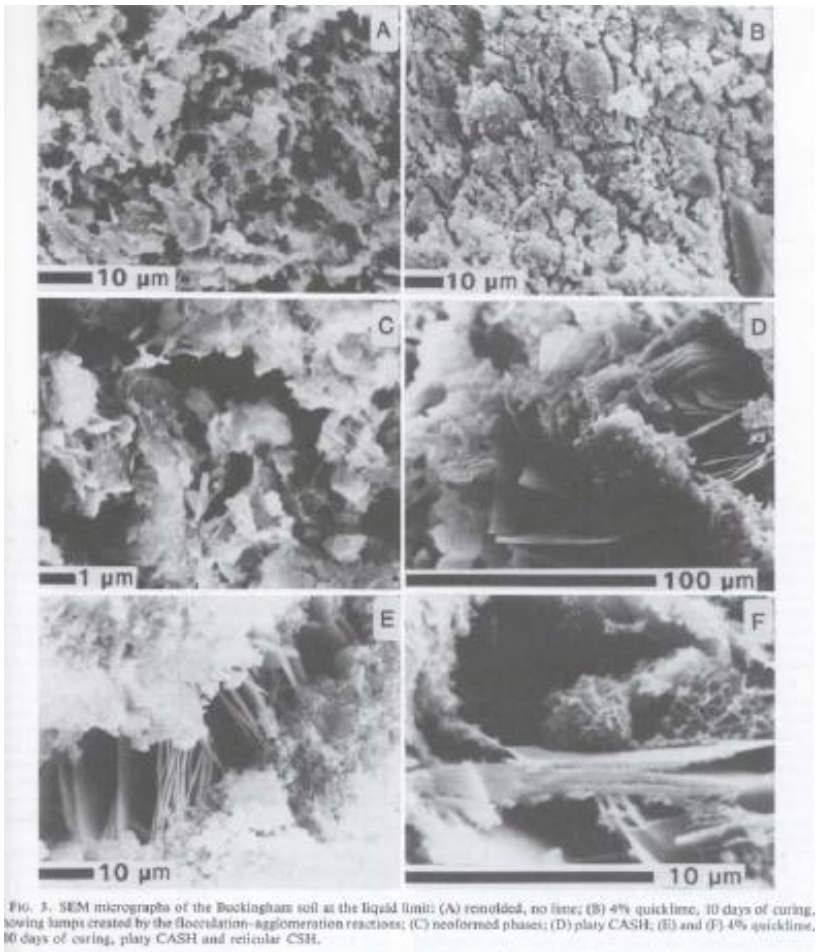
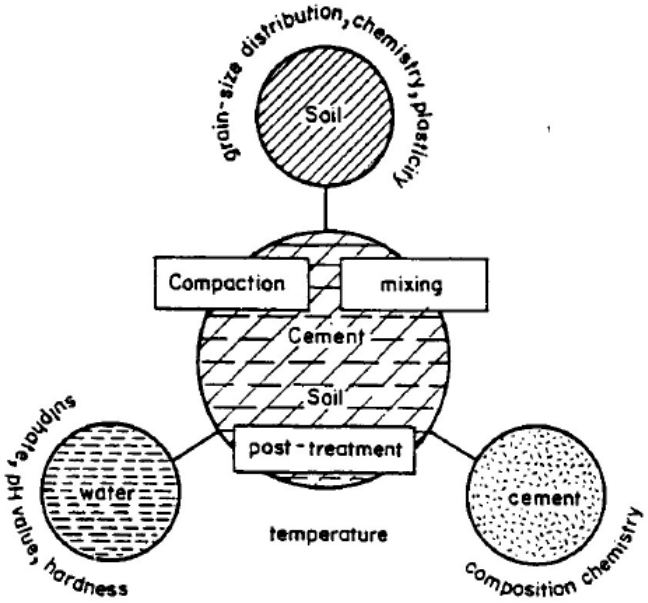


FIG. 3. SEM micrographs of the Buckingham soil at the liquid limit: (A) remolded, no lime; (B) 4% quicklime, 10 days of curing, showing lumps created by the flocculation–agglomeration reactions; (C) neoformed phases; (D) platy CASH; (E) and (F) 4% quicklime, 90 days of curing, platy CASH and reticular CSH.

*Σχήμα 2.2- Μικροφωτογραφίες από Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης (SEM) εδάφους βελτιωμένου με άσβεστο (Local κ.ά., 1990)[**A**: αναζυμωμένο χωρίς άσβεστο, **B**: 4% άνυδρη άσβεστος και 10 ημέρες ωρίμανση με εμφανή σχηματισμό συσσωματωμάτων, **D**:*

*πλακοειδές CASH, **E-F**: 4% άν. άσβεστος και 50 ημ. ωρίμανση, πλακοειδές CASH και δικτυοειδές CSH]*

Πιο πρόσφατα, οι Kamruzzaman (2002) και Chin (2006) ερεύνησαν την εξέλιξη της μικροδομής αργίλου βελτιωμένης με τσιμέντο, σε διαφορετικές συνθήκες φόρτισης, και την επίδραση της στις μακροσκοπικές ιδιότητες. Ο Kamruzzaman (2002) παρατήρησε ότι κατά τη διάρκεια μονοδιάστατης στερεοποίησης (σε συμπιεσόμετρο), τα μεγαλύτερα κενά μεταξύ συσσωματωμάτων καταρρέουν στο πρώιμο στάδιο στερεοποίησης, ενώ οι μικροί πόροι εντός των συσσωματωμάτων συμπιέζονται μόνον αφού η τάση υπερβεί την τάση προστερεοποίησης. Μετά από ορισμένο επίπεδο τάσης, παρατηρείται σημαντική μείωση του φαινόμενου δείκτη συμπίεσης, γεγονός το οποίο υποδηλώνει ότι είναι δυνατή η πλήρης καταστροφή της δομής με την εφαρμογή πολύ υψηλής τάσης. Εξετάζοντας δείγματα τα οποία διατμήθηκαν σε αστράγγιστες συνθήκες, ο Kamruzzaman (2009) αναφέρει ότι σε υψηλές πλευρικές πιέσεις (πέραν της τάσης διαρροής), το δείγμα προφανώς απώλεσε τη δομή του, στη διάρκεια της ισότροπης στερεοποίησης, αλλά ακόμη έδειχνε να εμφανίζει κάποια επίδραση της σιμέντωσης στη διάρκεια της διάτμησης. Σε χαμηλή πλευρική τάση, η καταστροφή δομής της βελτιωμένης αργίλου, συμβαίνει μόνο στη φάση διάτμησης. Ωστόσο, ο Kamruzzaman (2009) δεν εκτέλεσε στραγγιζόμενες τριαξονικές δοκιμές, και γενίκευσε την καταστροφή δομής για στραγγιζόμενες και για αστράγγιστες διαδρομές τάσεων σε διαφορετικές συνθήκες φόρτισης. Ο Chin (2006) παρατήρησε ότι η καταστροφή δομής στην τριαξονική φόρτιση, εδάφους βελτιωμένου με τσιμέντο, εξαρτάται από την εντατική κατάσταση. Για δείγματα λοιπόν, τα οποία διατμήθηκαν σε ενεργές πλευρικές τάσεις πολύ χαμηλότερες από την τάση ισότροπης διαρροής, παρατηρήθηκε ότι παρέμεναν ορατά μεγάλα συμπλέγματα σωματιδίων, ακόμη και μέσα στη ζώνη διάρρηξης. Από την άλλη πλευρά, για δείγματα τα οποία διατμήθηκαν σε υψηλότερες ενεργές πλευρικές τάσεις (δηλαδή σε τάσεις οι οποίες πλησίαζαν ή ήταν υψηλότερες από την τάση ισότροπης διαρροής), η κυρίαρχη μικροδομική μεταβολή φαίνεται να είναι η σύνθλιψη συμπλεγμάτων σωματιδίων και το κλείσιμο κενών στο στάδιο πριν τη μέγιστη αντοχή, και μαζική θραύση συμπλεγμάτων και συσσωματωμάτων πλακιδίων στο στάδιο μετά τη μέγιστη αντοχή, η οποία αυξάνεται σε έκταση με τη θλιπτική τάση και την ογκομετρική συμπίεση (Σχήμα 2.3). Ωστόσο, η έρευνα του Chin (2006) περιορίστηκε σε μία μόνο αναλογία μίξης. Και συνεπώς, δεν είναι σαφές αν υπάρχει ομοιότητα συμπεριφοράς για μίγματα διαφορετικών αναλογιών.



Σχήμα 2.3 – Παράγοντες οι οποίοι ελέγχουν τις ιδότητες εδάφους βελτιωμένου με τσιμέντο (Kezdi, 1979)

Το πολωτικό μικροσκόπιο (PLM, Polarised Light Microscope), το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM, Scanning Electron Microscope) και η περίθλαση ακτίνων X (XRD, X-Ray Diffraction), έχουν χρησιμοποιηθεί και προηγουμένως για την εξέταση της μικροϋφής διάφορων πορωδών υλικών (π.χ. Choquette κ.ά., 1987,Delage κ.ά., 1996,Locat κ.ά., 1996,Ninjgarav κ.ά., 2007,Romero and Simms, 2008,Koliji κ.ά., 2010). Όταν χρησιμοποιούνται συνδυαστικά η μικροσκοπία και η XRD μπορούν να παρέχουν συνδυασμένες ποιοτικές και ποσοτικές πληροφορίες σχετικά με τη διάταξη και την κατανομή των σωματιδίων και των πόρων μέσα στο υλικό. Τέτοιες πληροφορίες μπορούν να βελτιώσουν την κατανόηση της μακροσκοπικής και μηχανικής συμπεριφοράς των εδαφών (RomeroandSimms, 2008).

2.3 Τεχνητή Σιμέντωση για Βελτίωση Μαλακών Αργίλων

Η τεχνητή σιμέντωση (συγκόλληση) γίνεται όλο και πιο σημαντική για τη σταθεροποίηση και βελτίωση μαλακών αργιλικών εδαφών. Τα πρόσθετα σιμέντωσης χρησιμοποιούνται για τη σταθεροποίηση στείρων υλικών μεταλλείων για υπόγεια απόθεση (π.χ. MacKay and Emery, 1992). Ο κύριος σκοπός της τεχνητής σιμέντωσης είναι η δημιουργία δεσμών μεταξύ των σωματιδίων του εδάφους, με αποτέλεσμα την αύξηση της αντοχής και τη μείωση της συμπιεστότητας των εδαφικών υλικών (π.χ. Fischer κ.ά., 1978, Uddin κ.ά.,1997, Tremblay κ.ά., 2001,

Ismail κ.ά., 2002a, Lo and Wardani, 2002, Chew κ.ά., 2004, Kamruzzaman κ.ά., 2009). Ενώ η μηχανική συμπεριφορά σιμεντωμένων αργίλων γίνεται όλο και καλύτερα κατανοητή, η φύση της μικροδομής και των δεσμών οι οποίοι αναπτύσσονται σε τεχνητά σιμεντωμένες αργίλους ακόμη περιγράφονται ελλειπώς στη σχετική βιβλιογραφία.

Πολλά χαρακτηριστικά της τεχνητής σιμέντωσης των αργίλων χαρακτηρίζουν επίσης τη σιμέντωση των αποθέσεων φυσικών αργίλων (π.χ. Loiselle κ.ά., 1971, Sangrey, 1972, Boone and Lutenegger, 1997, Graham κ.ά., 2005). Αποδείξεις φυσικής σιμέντωσης έχουν βρεθεί σε πολλά ευαίσθητα εδάφη, ιδιαίτερα σε ορισμένες περιοχές του Καναδά (π.χ. Sangrey, 1972, Bentley and Smalley, 1978, Quigley, 1980, Graham κ.ά., 2005). Η διερεύνηση της επίδρασης της φυσικής σιμέντωσης στη συμπεριφορά των εδαφών έχει ενισχυθεί με τη χρήση τεχνητά σιμεντωμένων δειγμάτων παρασκευασμένων στο εργαστήριο (π.χ. Graham κ.ά., 2005). Αυτή η προσέγιση αποφεύγει το κόστος και τις τεχνικές δυσκολίες, που σχετίζονται με την λήψη αδιατάρακτων δειγμάτων φυσικά σιμεντωμένων εδαφών, και μπορεί να δώσει εικόνα των διαδικασιών σχηματισμού φυσικών εδαφών και μαλακών βράχων.

Επιπλέον, η ανάπτυξη καταστατικών προσομοιωμάτων για φυσικά και τεχνητά σιμεντωμένα εδάφη απαιτεί καλή κατανόηση της αρχικής μικροδομής και των δεσμών που αναπτύσσονται στη διάρκεια σχηματισμού των εδαφών, και της επακόλουθης καταστροφής της δομής στη διάρκεια της φόρτισης. Είναι συνεπώς σημαντικό να μελετηθούν οι μεταβολές στη μικροδομή και η σύνδεση των σωματιδίων του εδάφους λόγω της προσθήκης των συνδετικών υλικών σιμέντωσης, καθώς και να διερευνηθούν οι σχέσεις μεταξύ των μικροδομικών μεταβολών και της μηχανικής συμπεριφοράς του υλικού. Η συμπεριφορά των τεχνητά σιμεντωμένων αργίλων έχει βρεθεί ότι εξαρτάται από τη σύνδεση των σωματιδίων, την κοκκομετρική σύνθεση και την υφή (Mitchell and Soga, 2005). Επίσης θεωρείται ότι εξαρτάται από την ορυκτολογική σύνθεση και τη δραστικότητα της αργίλου καθώς και τον τύπο του υλικού σύνδεσης (Croft, 1967a,Croft, 1967b,Noble and Plaster, 1970, Osula,1996, Tremblay, κ.ά. 2001, Ismail κ.ά., 2002a, Ismail κ.ά., 2002b, Bhattacharja κ.ά., 2003, Wareham and Mackechnie, 2006). Ωστόσο, οι τελευταίοι αυτοί παράγοντες έχουν μελετηθεί λιγότερο καλά για αργίλους βελτιωμένες με τέφρα.

Τα συσσωματώματα (clusters) και τα συμπλέγματα (aggregates) σωματιδίων εδαφών συχνά περιγράφονται ως “συναθροίσματα” (assemblages) σωματιδίων

αργίλου, τα οποία συμπεριφέρονται ως συμπιεστά, εύθραυστα μακροσωματίδια και αλληλεπιδρούν ώστε να προσδώσουν αντοχή και δυσκαμψία στις αργίλους (Mitchell and Soga, 2005). Παρότι τα μίγματα εδάφους και συνδετικού υλικού είναι καλά αναμιγμένα, τα σωματίδια της αργίλου σχηματίζουν συχνά συσσωματώματα περικλεισμένα από πολτό τέφρας (Croft, 1967b, Bergado κ.ά., 1996). Η προσθήκη τέφρας στο έδαφος προκαλεί μία αντίδραση ενυδάτωσης στο έδαφος, ακολουθούμενη από ποζολανική αντίδραση μεταξύ του υδροξειδίου ασβεστίου που παρέχεται από το ασβέστιο του συνδετικού υλικού και του πυριτίου και αργιλίου του εδάφους (π.χ. Herzog and Mitchell, 1963, Croft, 1967a, Bergado κ.ά., 1996, Bhattacharja κ.ά., 2003). Η αντίδραση ενυδάτωσης και η ποζολανική οδηγούν στο σχηματισμό άμορφου πηκτώματος (γέλης, ζελατίνης) ένυδρου πυριτικού και αργιλικού ασβεστίου. Στη συνέχεια αυτά τα παράγωγα κρυσταλλώνονται για να σχηματίσουν δεσμούς μεταξύ σωματιδίων και συσωματωμάτων (Croft, 1967a), προσδίδοντας φαινόμενη συνοχή στο προκύπτον σύνθετο υλικό.

Οι αντιδράσεις ενυδάτωσης επιτελούνται με ταχύτερο ρυθμό από τις ποζολανικές αντιδράσεις και συμβαίνουν κυρίως στο χώρο μεταξύ συμπλεγμάτων σωματιδίων, δημιουργώντας μία ισχυρή μάζα που περικλείει τα μη συνδεδεμένα σωματίδια και τα συμπλέγματα. Αντιστρόφως, οι ποζολανικές αντιδράσεις συμβαίνουν μεταξύ του παραγόμενου υδροξειδίου του ασβεστίου και του πυριτίου και αργιλίου, τα οποία διασπώνται από τις επιφάνειες των αργιλικών σωματιδίων, και συνδέουν τα σωματίδια στο εσωτερικό των συμπλεγμάτων σωματιδίων της αργίλου (Bergado κ.ά., 1996, Bhattacharja κ.ά., 2003). Αυτές οι δύο μορφές αντίδρασης συνδυάζονται για να δημιουργήσουν γεφυρώσεις αφενός μεταξύ των συμπλεγμάτων και αφετέρου στο εσωτερικό των συμπλεγμάτων, δημιουργώντας μία σχετικά ισχυρά συνδεδεμένη υφή μέσα στη μάζα του εδάφους.

Η τέφρα είναι συνδετικό υλικό, σχετικά μικρής αποτελεσματικότητας, και είναι καλά γνωστή για τον αργό ρυθμό σκλήρυνσής της μετά την αρχική πήξη, καθώς και για την εργασιμότητα του μίγματος που προκύπτει, ανάλογα και με την ποσότητα που προστίθεται στο έδαφος. Αντιθέτως με τα μίγματα με προσθήκη τσιμέντου, η ενυδατωμένη τέφρα παραμένει σχετικά μαλακή για μεγάλο χρονικό διάστημα μετά την ανάμιξη. Για το λόγο αυτό η τέφρα συχνά προστίθεται ως συστατικό του τσιμέντου Πόρτλαντ για να αποφευχθεί η ταχεία πήξη. Αν και η τέφρα μπορεί να αυξήσει σημαντικά την αντοχή και δυσκαμψία των κοκκωδών εδαφών (HuangandAirey, 1998), η προσθήκη μόνης της τέφρας στις μαλακές αργίλους δεν βελτιώνει σημαντικά τη διατμητική τους αντοχή ή τα χαρακτηριστικά

συμπιεστότητας. Αν ωστόσο προστεθεί σε μίγματα τσιμέντου και αργίλου, τότε η τέφρα μπορεί να μεταβάλλει σημαντικά τα χαρακτηριστικά της τσιμεντωμένης αργίλου.

Οι Choquette κ.ά. (1987) μελέτησαν την επίδραση της τεχνητής σιμέντωσης με άνυδρη άσβεστο στην μικροϋφή και ορυκτολογική σύνθεση θαλάσσιων αργίλων του ανατολικού Καναδά. Συμπέραναν ότι η προσθήκη ασβέστου προκαλεί άμεση κροκίδωση των σωματιδίων της αργίλου (Σχήμα 2.2 B) και η κροκιδωμένη δομή διατηρείται με την ανάπτυξη δεσμών σιμέντωσης. Επίσης πρότειναν ότι η σταθεροποίηση με άσβεστο έχει ως αποτέλεσμα την παραγωγή πλακοειδών ορυκτών (Σχήμα 2.2 D,E και F), τα οποία διαμοιράζουν το χώρο μεταξύ των συμπλεγμάτων σωματιδίων στο έδαφος και αυξάνουν τον όγκο των μικροπόρων. Επίσης παρατήρησαν μία συσχέτιση μεταξύ της έκτασης της μικροδομικής μεταβολής λόγω της προσθήκης ασβέστου και της μετρούμενης αντοχής της βελτιωμένης αργίλου.

Οι Locat κ.ά. (1996) διερεύνησαν τη μηχανική και υδραυλική συμπεριφορά αργίλου βελτιωμένης με άσβεστο, προτείνοντας ότι αν το ποσοστό ασβέστου είναι αρκετά υψηλό (μεγαλύτερο από 3%) ώστε να προκαλέσει ποζολανικές αντιδράσεις μέσα στο έδαφος (για σταθερό λόγο κενών), το παραγόμενο υλικό σιμέντωσης θα πληρώσει το χώρο των πόρων και μπορεί να μειώσει την διαπερατότητα μέχρι και μία τάξη μεγέθους.

2.4 Επικρατέστεροι Παράγοντες Ελέγχου των Χαρακτηριστικών Σκλήρυνσης Αργίλου Βελτιωμένης με Ιπτάμενη Τέφρα

2.4.1 Χαρακτηριστικά Σταθεροποιητικών Υλικών

2.4.1.1 Γενικά

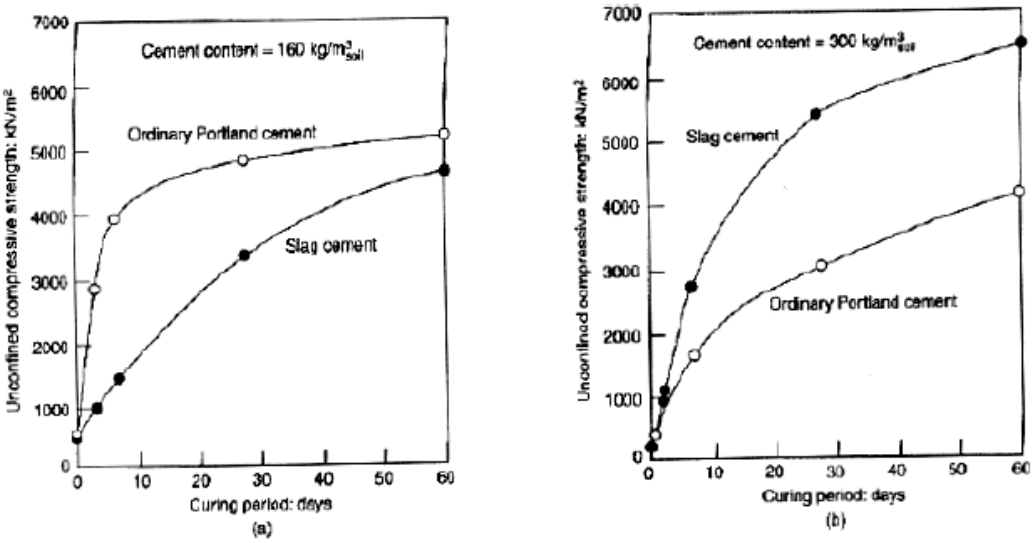
Ανάλογα με τις ιδιότητες του εδάφους προς βελτίωση, επιλέγονται διαφορετικά συνδετικά υλικά. Η άσβεστος, το τσιμέντο και η ιπτάμενη τέφρα είναι τα πλέον δημοφιλή συνδετικά υλικά λόγω υψηλής διαθεσιμότητας και αποτελεσματικότητας, χαμηλού κόστους και ευκολότερης αποθήκευσης (Bergado κ.ά., 1996). Η χημεία της σταθεροποίησης εδαφών καλύπτεται εδώ συνοπτικά, λόγω του γεγονότος ότι αποτελεί από μόνη της μία πολυσύνθετη επιστήμη. Για μελέτη του θέματος σε βάθος προτείνεται η εργασία των Janz & Johansson (2002). Το ύδωρ αποτελεί

προαπαιτούμενο για τις χημικές αντιδράσεις των συνδετικών υλικών, και η υγρασία του αέρα είναι αρκετή για να αρχίσουν αυτές οι αντιδράσεις. Αν τα συνδετικά υλικά αρχίσουν να αντιδρούν πριν αναμιχθούν μέσα στο έδαφος, τότε θα μειωθεί η σταθεροποιητική τους επίδραση. Όσο όμως είναι αποθηκευμένα στις αεροστεγείς συσκευασίες τους, παραμένουν τελείως αδρανή.

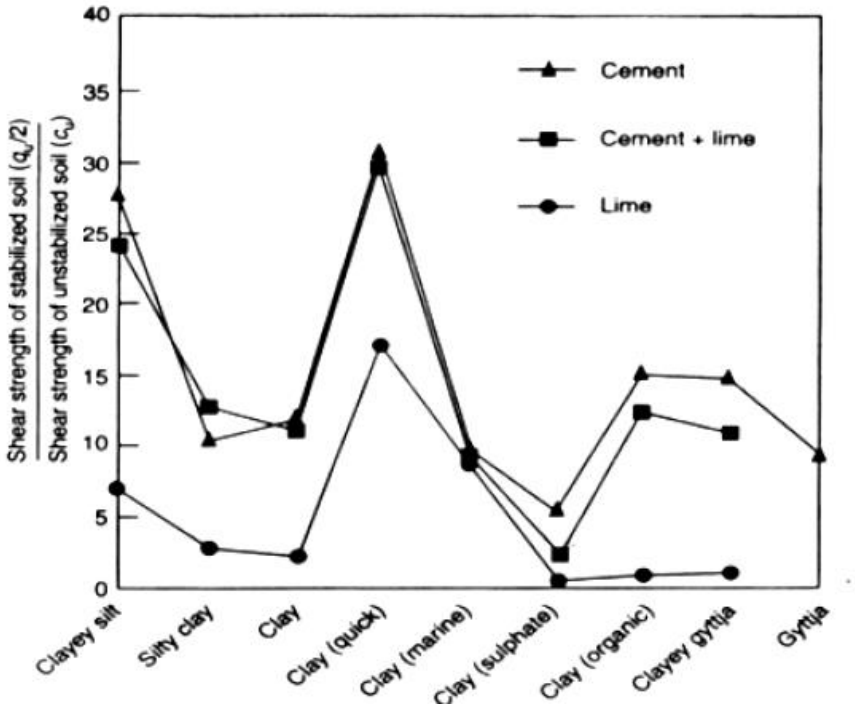
Γενικά, η αντοχή ενός βελτιωμένου εδάφους αυξάνεται με την ποσότητα του σταθεροποιητικού υλικού (όπως αναλυτικά περιγράφεται στην ενότητα 2.5). Ωστόσο ο ρυθμός αύξησης της αντοχής δεν είναι ανάλογος με το ποσοστό τσιμέντου (Kawasaki κ.ά. 1981). Για την άργιλο του Μπανγκόκ, οι Uddin κ.ά. (1997) παρατήρησαν ότι ο μεγαλύτερος ρυθμός αύξησης επιτυγχάνεται για ποσοστά τσιμέντου μεταξύ 10% και 25%. Για τη θαλάσσια άργιλο Σιγκαπούρης, ο Kamruzzaman (2002) παρατήρησε σημαντική αύξηση της αντοχής της βελτιωμένης αργίλου για εύρος περιεκτικότητας σε τσιμέντο μεταξύ 5% και 40%. Ο Sharma (2013) διατύπωσε την άποψη ότι για υψηλής πλαστικότητας αργίλους, όπως οι άργιλοι του ποταμού Jhumar στην Ινδία, το βέλτιστο ποσοστό τέφρας για βελτίωση εδάφους είναι 20% ενώ για την άσβεστο είναι 8.5%. Αφετέρου, οι Miura κ.ά. (2001) και οι Horpibulsuk κ.ά. (2003) παρατήρησαν ότι, ο λόγος της αρχικής υγρασίας της αργίλου προς την περιεκτικότητα σε τσιμέντο (δηλαδή ο λόγος ύδατος της αργίλου προς το τσιμέντο) είναι πιο κατάλληλη παράμετρος, από μόνη την περιεκτικότητα σε τσιμέντο, για την ποσοτικοποίηση της ανάπτυξης αντοχής των βελτιωμένων με τσιμέντο μαλακών αργίλων. Παρόμοια, οι Lee κ.ά. (2005) έδειξαν ότι η αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη της βελτιωμένης αργίλου εξαρτάται και από τους δύο λόγους εδάφους/τσιμέντο και ύδατος/τσιμέντο.

Επίσης ερευνήθηκαν οι διαφορές στη βελτίωση, οι οποίες προκύπτουν από τη χρήση διαφορετικών συνδετικών υλικών, περιλαμβανομένης και της τέφρας. Οι Kawasaki κ.ά. (1981) συνέκριναν την επίδραση σκωρίας υψικαμίνου και κοινού τσιμέντου Πόρτλαντ, για δύο διαφορετικούς τύπους εδαφών στην Ιαπωνία, τα εδάφη Kanagawa και Saga. Τα αποτελέσματα στο Σχήμα 2.4 δείχνουν ότι η βελτίωση η οποία επιτυγχάνεται εξαρτάται από τον τύπο του συνδετικού υλικού και του εδάφους, ή ακριβέστερα από τις χημικές αντιδράσεις οι οποίες συμβαίνουν μεταξύ των συνδετικών υλικών και των εδαφών. Παρόμοια, οι Åhnberg κ.ά. (1995) συνέκριναν την επίδραση του τσιμέντου, της ασβέστου και μίγματος τσιμέντου και ασβέστου, τα οποία αναμίχθηκαν με διαφορετικά εδάφη στη Σουηδία, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.5. Βασισμένοι σε αποτελέσματα υπαίθρου, για αμμώδη εδάφη με 5% λεπτόκοκκα, οι Saitoh κ.ά. (1990) παρατήρησαν ότι η σκωρία υψικαμίνου προσδίδει υψηλότερη

θλιπτική αντοχή από το κοινό τσιμέντο Πόρτλαντ. Εκτός του μίγματος τσιμέντου και ασβέστου, έχουν επίσης μελετηθεί και μίγματα άλλων συνδετικών υλικών, όπως μίγμα τέφρας και τσιμέντου (Balasubramaniam et. al, 1998).



Σχήμα 2.4 – Επίδραση του τύπου τσιμέντου (Πόρτλαντ ή σκωρίας καμίνου) στη θλιπτική αντοχή του μίγματος εδάφους-τσιμέντου για τα εδάφη : (a) Kanagawa, και (b) Saga (Kawasaki κ.ά., 1981)



Σχήμα 2.5 – Επίδραση διαφορετικών υλικών σύνδεσης (σταθεροποίησης) στη θλιπτική αντοχή διάφορων εδαφών στη Σουηδία (Ahnberg κ.ά., 1995)

2.4.1.2 Τσιμέντο

Το τσιμέντο χρησιμοποιήθηκε για οικοδομικούς σκοπούς από την εποχή της Ρωμαϊκής Αυτοκρατορίας, και αποτελεί σήμερα βασικό υλικό στην οικοδομική βιομηχανία. Για την παραγωγή του τσιμέντου, αναμιγνύονται και αλέθονται, ασβεστόλιθος και άργιλος. Στη συνέχεια γίνεται ασβεστοποίηση με πύρωση του μίγματος σε περιστροφικές καμίνους (κιλν, kiln) στους 1400°C. Το αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας είναι σφαιροειδείς κόκκοι (pellets) ονομαζόμενοι κλίνκερ Πόρτλαντ. Στη συνέχεια τα κλίνκερ αναμιγνύονται, για παράδειγμα, με γύψο και αλέθονται σε κλίμακα μικρομέτρου. Υπάρχει τεράστιος αριθμός τύπων τσιμέντου για διαφορετικές εφαρμογές. Για να προσδοθούν στο τσιμέντο άλλες ιδιότητες, σε αυτήν την τελευταία άλεση, περιλαμβάνονται μαζί με τα κλίνκερ διάφορα πρόσθετα (Janz&Johansson, 2002). ‘Οταν το τσιμέντο έρθει σε επαφή με το ύδωρ, αρχίζουν οι χημικές αντιδράσεις. Τότε σχηματίζεται γύρω από το σωματίδιο του τσιμέντου, ένα πήκτωμα (γέλη, gel) με τη συντομογραφική χημική ονομασία CSH (Calcium Silicate Hydrate, ένυδρο πυριτικό ασβέστιο). Αυτό το πήκτωμα CSH είναι πορώδες και αποτελείται επί το πλείστον από ασβέστιο και πυρίτιο, με ορισμένη ποσότητα χημικά δεσμευμένου ύδατος. Αυτό ενεργεί ως συνδετικό υλικό (κόλλα) καθώς πληρώνει τα κενά μεταξύ των σωματιδίων, προκαλώντας στο τσιμέντο ανάπτυξη μεγαλύτερης πυκνότητας και αντοχής. Λόγω της χημικής αντίδρασης εκλύεται θερμότητα. Ταυτόχρονα, λαμβάνουν χώρα πολυσύνθετες χημικές αντιδράσεις. Οι πλέον σημαντικές ενώσεις για την ανάπτυξη αντοχής αποτελούνται από ασβέστιο, πυρίτιο, αργίλιο και σίδηρο. Κανονικά, μετά από τρεις ημέρες, τα μισά από τα σωματίδια του τσιμέντου έχουν αντιδράσει, και μετά από τρεις μήνες έχει αντιδράσει το 90% (Janz & Johansson, 2002). Συνεπώς η αρχική αύξηση αντοχής είναι ιπολύ ταχεία.

2.4.1.3 Άσβεστος

Η άνυδρη άσβεστος, CaO, παράγεται από την ασβεστοποίηση του ασβεστόλιθου, $CaCO_3$, με πύρωση σε 1100°C. Στη διάρκεια της αντίδρασης ασβεστοποίησης εκπέμπονται μεγάλες ποσότητες CO_2 (Εξίσωση 2.1). Όταν ασβεστοποιείται ο ασβεστόλιθος, περίπου το 40% της μάζας του εκφεύγει με τη μορφή αερίων, επί το πλείστον CO_2, (Rogbeck κ.ά., 2006)

CaCO+ θερμότητα→CaO+ CO (2.1)

Το οξείδιο του ασβεστίου, CaO, υφίσταται σε πολλές μορφές, ορισμένες από αυτές είναι εύκολα διαθέσιμες για χημικές αντιδράσεις, και ονομάζονται

αντιδράσιμες, $CaO_{αντιδράσιμο,}$ και μερικές είναι δεσμευμένες σε χημικές ενώσεις. Υπάρχει λοιπόν διαφορά μεταξύ CaO και $CaO_{αντιδράσιμο}$. Η άνυδρη (κεκαυμένη) άσβεστος τυπικά αποτελείται από περίπου 90% $CaO_{αντιδράσιμο}$. Όταν η άνυδρη άσβεστος έρθει σε επαφή με ύδωρ, αντιδρά και σχηματίζει ένυδρη (εσβεσμένη) άσβεστο, $Ca(OH)_2$, (Εξίσωση 2.2)

$$CaO + H_2O \rightarrow Ca(OH)_2 + θερμότητα \quad (2.2)$$

Αυτή η αντίδραση, δίνει πολλά σημαντικά πλεονεκτήματα κατά τη σταθεροποίηση εδαφών. Βοηθά στη μείωση της υγρασίας του εδάφους, η οποία έχει άμεσο σταθεροποιητικό αποτέλεσμα. Αυξάνει το pH, συνθήκη προαπαιτούμενη για να λάβουν χώρα οι δευτερεύουσες ποζολανικές αντιδράσεις (Janz & Johansson, 2002). Παράγει θερμότητα, η οποία αυξάνει την ταχύτητα των χημικών αντιδράσεων. Από μόνο του το οξείδιο του ασβεστίου, CaO, δεν προκαλεί σχηματισμό προϊόντων τα οποία αυξάνουν την αντοχή. Όμως στις δευτερεύουσες ποζολανικές αντιδράσεις, με ποζολανικό υλικό μέσα στο έδαφος, σχηματίζονται ενώσεις που περιέχουν επί το πλείστον ασβέστιο, αργίλιο και πυριτικά. Αυτές οι ενώσεις είναι παρόμοιες με αυτές που δημιουργούνται από τσιμέντο. Συγκρινόμενες με τις αντιδράσεις του τσιμέντου, οι ποζολανικές αντιδράσεις είναι πολύ αργές. Ενώ το τσιμέντο αντιδρά σε χρόνο ημερών, τα προϊόντα των ποζολανικών αντιδράσεων απαιτούν μήνες για να αποκτήσουν την πλήρη αντοχή τους. Η λέξη ποζολάνα (pozzolana) προέρχεται από τους Ρωμαίους, οι οποίοι χρησιμοποίησαν ηφαιστειακή πυριτική τέφρα ως υδραυλικό υλικό σύνδεσης, το οποίο εντόπισαν στην πόλη Ποζουόλη (Pozzuoli).

2.4.1.4 Ιπτάμενη Τέφρα

Όπως περιγράφηκε με λεπτομέρεια στηνενότητα 2.2, όταν καίονται σε κάμινο σκληροί άνθρακες ή βιοκαύσιμα, παράγεται θερμότητα, καπναέρια και τέφρα. Τα βαρύτερα και μεγαλύτερα σωματίδια τέφρας παραμένουν στον πυθμένα της καμίνου, αποκαλούνται τέφρα πυθμένα και αφαιρούνται κάτω από την κάμινο. Τα σωματίδια της τέφρας πυθμένα, είναι γενικά μεγάλα, και συχνά η τέφρα αυτή περιλαμβάνει ορισμένη ποσότητα άκαυτης οργανικής ύλης. Στη διάρκεια της διαδικασίας, η τέφρα πυθμένα συχνά υγραίνεται. Τα μικρότερα σωματίδια τέφρας αιωρούνται στα καπναέρια, τα οποία πριν διαφύγουν στην ατμόσφαιρα, διέρχονται από φίλτρο.

Η ιπτάμενη τέφρα έχει υαλώδη δομή και περιέχει ποζολανικά υλικά. Η θερμοκρασία καύσης είναι σημαντική για την ποιότητα της τέφρας. Υψηλότερη θερμοκρασία καύσης δίνει περισσότερο υαλώδη τέφρα με λεπτότερα σωματίδια, καθιστώντας την τέφρα πιο αποτελεσματική ως συνδετικό υλικό. Ο σκληρός

άνθρακας συνήθως καίεται σε θερμοκρασία περί τους 1300°C, και τα βιοκαύσιμα σε ελαφρώς χαμηλότερη θερμοκρασία, περί τους 800°C. Αυτός είναι ένας από τους λόγους, οι οποίοι καθιστούν την βιοτέφρα λιγότερο αποτελεσματική ως συνδετικό υλικό, σε σχέση με την τέφρα σκληρού άνθρακα.

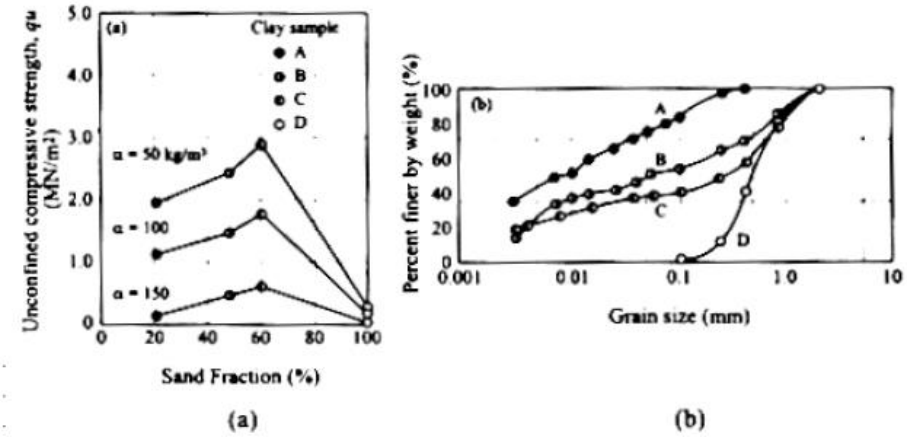
Τα ποζολανικά υλικά της τέφρας, αντιδρούν με το ύδωρ και το οξείδιο ασβεστίου CaO, το οποίο προέρχεται από το τσιμέντο ή την άσβεστο. Τα υλικά αυτά αντιδρώντας, δημιουργούν παρόμοια προϊόντα με των αντιδράσεων του τσιμέντου. Καθώς οι ποζολανικές αντιδράσεις είναι πολύ αργές, η αύξηση αντοχής η οποία προκαλείται είναι επίσης πολύ αργή. Το μέγεθος και ο ρυθμός αύξησης της αντοχής καθορίζονται κυρίως από τη χημική σύνθεση της τέφρας. Η σύνθεση αυτή ποικίλλει σημαντικά από τέφρα σε τέφρα, καθώς το καιόμενο καύσιμο και η τεχνολογία καύσης είναι οι κύριοι παράγοντες οι οποίοι καθορίζουν την ποιότητα της τέφρας.

2.4.2 Χαρακηριστικά του Εδάφους

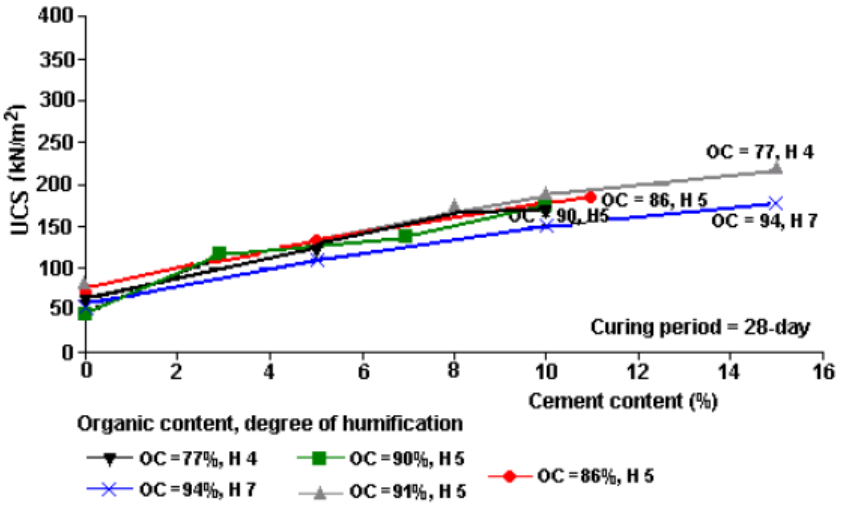
Είναι κοινά αποδεκτό ότι διαφορετικοί τύποι εδαφών (τύρφη, άργιλος, ιλύς, άμμος) επηρεάζουν τις χημικές αντιδράσεις μεταξύ εδάφους και συνδετικών υλικών και συνεπώς και τις ιδιότητες του βελτιωμένου εδάφους. Οι Niina κ.ά. (1977) παρατήρησαν την επίδραση της κοκκομετρικής διαβάθμισης στην ανεμπόδιστη αντοχή εδάφους βελτιωμένου με τσιμέντο. Όπως δείχνει το Σχήμα 2.6, το καλύτερο αποτέλεσμα στη βελτίωση προέκυψε όταν το κλάσμα της άμμου ήταν περίπου 60%, ανεξάρτητα από την ποσότητα του περιεχόμενου τσιμέντου. Επίσης οι Taki & Yang (1991) παρατήρησαν ότι το χονδρόκοκκο έδαφος εμφανίζει μεγαλύτερη αύξηση αντοχής, για δεδομένο ποσοστό τσιμέντου. Ο Stavridakis (2006) περιγράφει ότι η μείωση μπεντονίτη και η αύξηση του κοκκομετρικού κλάσματος της άμμου συνεπάγονται αύξηση της αντοχής αργίλων και μικτών εδαφών σταθεροποιημένων με τσιμέντο.

Οι Wissa κ.ά. (1965), μελέτησαν την επίδραση της διαφορετικής ορυκτολογικής σύνθεσης για διάφορους τύπους αργίλων. Παρατήρησαν ότι γενικώς, εδάφη με υψηλότερη ποζολανική αντιδρασιμότητα εμφανίζουν μεγαλύτερη αύξηση αντοχής όταν βελτιώνονται με τσιμέντο. Για παράδειγμα, τα μοντμοριλλονιτικά και καολινιτικά αργιλικά εδάφη ήταν αποτελεσματικοί ποζολανικοί παράγοντες, συγκρινόμενα με άλλα τα οποία περιέχουν κυρίως ιλλίτη, χλωρίτη και βερμικουλίτη. Εξήγησαν ότι η ποζολανική αντίδραση μεταξύ αργιλικών σωματιδίων και ένυδρης ασβέστου εξαρτάται από την ορυκτολογική σύνθεση, ιδιαίτερα από την παρουσία άμορφων οξειδίων πυριτίου και αργιλίου. Επίσης, οι Saitoh κ.ά. (1985), επεσήμαναν

τη σημασία της ποζολανικής αντιδρασιμότητας για την αποτελεσματικότητα της βελτίωσης αργίλων με τσιμέντο. Ο Endo (1976) απέδειξε ότι η αύξηση της αρχικής υγρασίας του εδάφους μειώνει σημαντικά την θλιπτική αντοχή του μίγματος για οποιοδήποτε δεδομένο ποσοστό τσιμέντου. Ωστόσο, οι Terashi κ.ά. (1980) δηλώνουν ότι, σε πολύ χαμηλή υγρασία, δηλαδή πλησίον του ορίου πλαστικότητας, ο βαθμός βελτίωσης επίσης δεν είναι πολύ σημαντικός. Ο Huat (2006) ερεύνησε την επίδραση της παρουσίας οργανικών στην αντοχή τροπικών τυφρωδών εδαφών βελτιωμένων με τσιμέντο. Όπως δείχνει το Σχήμα 2.7, υψηλότερο ποσοστό οργανικών στο έδαφος, συνεπάγεται χαμηλότερη αντοχή του βελτιωμένου με τσιμέντο εδάφους.



Σχήμα 2.6 – Επίδραση της κοκκομετρικής διαβάθμισης στη βελτίωση με τσιμέντο (Niima κ.ά., 1977)

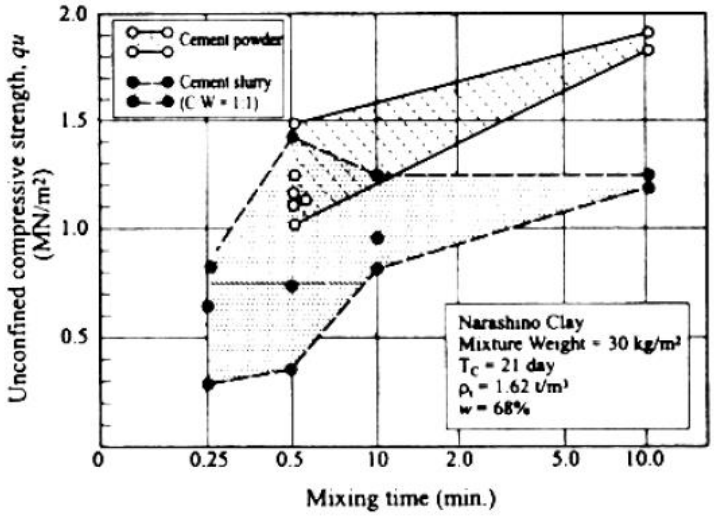


Σχήμα 2.7 – Επίδραση του ποσοστού οργανικών στην αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη τυρφώδους εδάφους (Huat, 2006)

2.4.3 Συνθήκες Ανάμιξης

Οι συνθήκες ανάμιξης περιλαμβάνουν παράγοντες όπως τον τύπο αναμικτήρα, το χρονισμό της μεθόδου προσθήκης του συνδετικού υλικού και το βαθμό ανάμιξης. Η σημασία της ανάμιξης έγκειται στην επιδίωξη δημιουργίας υψηλού βαθμού ομοιομορφίας στη μάζα του βελτιωμένου εδάφους. Για άργιλο βελτιωμένη με τσιμέντο, οι Nakamura κ.ά. (1982) ερεύνησαν τη σχέση μεταξύ αντοχής σε ανεμπόδιστη θλίψη και χρόνου ανάμιξης, για δείγματα παρασκευασμένα στο εργαστήριο με προσθήκη είτε σκόνης τσιμέντου ή τσιμεντοπολτού (Σχήμα 2.8). Το Σχήμα δείχνει ότι η μείωση του χρόνου ανάμιξης προκαλεί μείωση της αντοχής σε ανεμπόδιστη θλίψη. Στο εργαστήριο, η διαδικασία που προδιαγράφει η Ιαπωνική Γεωτεχνική Εταιρεία (2000) προτείνει τον αμφισβητήσιμο χρόνο 15÷ 20 λεπτών ως κατάλληλο για την "επαρκή ανάμιξη" στο εργαστήριο, με χρήση αναμικτήρα Hobart.

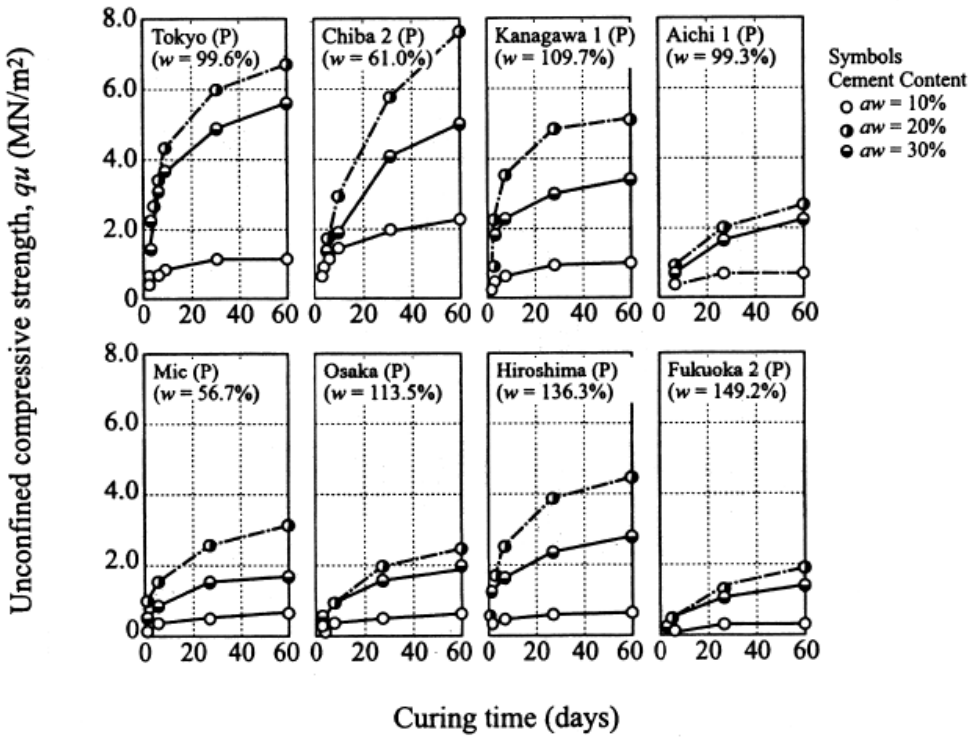
Για την επιτόπου ανάμιξη τσιμέντου-εδάφους, οι Yoshizawa κ.ά. (1996) έδειξαν ότι ο αριθμός των στελεχών ανάμιξης και των λεπίδων ανάμιξης καθώς και η ταχύτητα περιστροφής μπορούν να επηρεάσουν την αντοχή του βελτιωμένου εδάφους. Αναφέρουν ότι δύναται να επιτευχθεί καλύτερη βελτίωση, όταν χρησιμοποιούνται τέσσερα στελέχη ανάμιξης και υψηλότερη ταχύτητα περιστροφής, συγκρινόμενα με ένα στέλεχος ανάμιξης και χαμηλή ταχύτητα περιστροφής. Μελετήθηκαν επίσης (π.χ. Nishibayashi κ.ά., 1985, Enami κ.ά., 1986, Nishibayashi, 1988, Saitoh κ.ά., 1990) και άλλοι παράγοντες οι οποίοι δύνανται να επηρεάσουν το βαθμό ανάμιξης στη διάρκεια της επιτόπου διαδικασίας, όπως το πλήθος των στελεχών, η διάταξη των λεπίδων ανάμιξης, η ταχύτητα διείσδυσης/απόσυρσης των στελεχών και οι μέθοδοι έγχυσης του πρόσθετου υλικού.



Σχήμα 2.8 – Επίδραση χρόνου ανάμιξης στη βελτίωση με τσιμέντο (Nakamura κ.ά., 1982)

2.4.4 Συνθήκες Ωρίμανσης

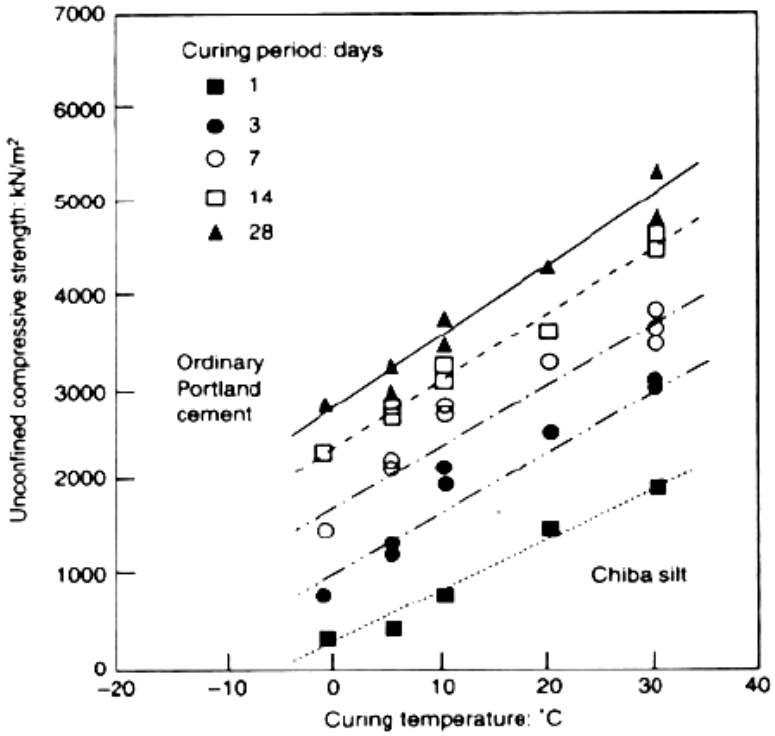
Άλλοι παράγοντες, οι οποίοι επιδρούν στην ανάπτυξη της αντοχής του βελτιωμένου εδάφους, στη διάρκεια της ωρίμανσης, είναι η θερμοκρασία ωρίμανσης, οι ασκούμενες τάσεις, ο χρόνος ωρίμανσης και η υγρασία. Γενικά, όσο μεγαλύτερος είναι ο χρόνος ωρίμανσης, τόσο καλύτερη είναι η ανάπυξη αντοχής, λόγω της προόδου της ποζολανικής αντίδρασης (Kezdi, 1979). Όπως δείχνει το Σχήμα 2.9, η αντοχή αυξάνεται με το χρόνο ωρίμανσης, ασχέτως του τύπου του εδάφους (Kawasaki κ.ά., 1981). Τα αποτελέσματα των δοκιμών είναι παρόμοια για τσιμέντο Πόρτλαντ και για ιπτάμενη τέφρα (Saitoh, 1988,Uddin κ.ά., 1997,Lorenzo κ.ά., 2004,Stavridakis, 2006,Kamruzzaman κ.ά., 2009).



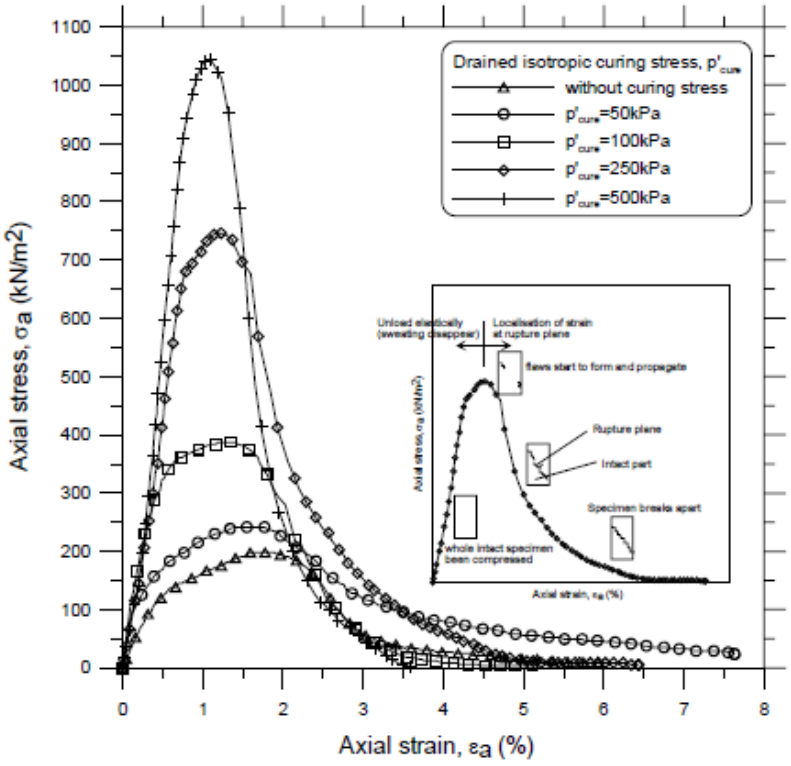
Σχήμα 2.9 – Επίδραση του χρόνου ωρίμανσης στην αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη (Kawasaki κ.ά., 1981)

Η επίδραση της θερμοκρασίας ωρίμανσης στην αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη του εργαστηριακά βελτιωμένου εδάφους, μελετήθηκε από τους Enami κ.ά. (1980), και φαίνεται στο Σχήμα 2.10. Γενικά φαίνεται ότι με την υψηλότερη θερμοκρασία ωρίμανσης, επιτυγχάνεται υψηλότερη αντοχή. Η αύξηση της αντοχής σε ανεμπόδιστη θλίψη είναι σχεδόν γραμμική για θερμοκρασίες ωρίμανσης μεταξύ 0° και 30° C, για

δείγματα διάφορων ηλικιών έως και 28 ημερών. Ο Chin (2006), έδειξε ότι η αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη αυξάνεται με την πλευρική τάση, στην οποία ωρίμασαν σε στραγγιζόμενες συνθήκες τα βελτιωμένα με τσιμέντο δείγματα. Ωστόσο, σε αστράγγιστες συνθήκες ωρίμανσης, η αύξηση της πλευρικής τάσης δεν οδηγεί σε σημαντική αύξηση της αντοχής σε ανεμπόδιστη θλίψη (Σχήμα 2.11). Οι Harleston κ.ά. (2009), μελέτησαν την επίδραση της υγρασίας στην αντοχή σταθεροποιημένων με τσιμέντο στρώσεων οδοστρωμάτων. Ωρίμασαν τα δείγματα σε υγρασία 100% και σε υγρασία δωματίου (50%- 80%) και παρατήρησαν ότι όσο αυξάνεται η υγρασία, αυξάνεται η αντοχή.



Σχήμα 2.10 – Επίδραση του χρόνου ωρίμανσης στην αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη (Enami κ.ά., 1985)



Σχήμα 2.11 – Αποτελέσματα αντοχής σε ανεμπόδιστη θλίψη για βελτιωμένα δείγματα ωριμασμένα υπό ισότροπη τάση, σε συνθήκες στράγγισης (Chin, 2006)

2.5 Εργαστηριακές Έρευνες Βελτιωμένων Εδαφών

2.5.1 Μεταβολές των Βασικών Ιδιοτήτων ενός Βελτιωμένου Εδάφους.

Πολλές έρευνες έδειξαν ότι η βελτίωση εδαφών με συνδετικά υλικά οδηγεί σε αύξηση του ορίου πλαστικότητας και του ορίου υδαρότητας (π.χ. Locat, 1990,Uddin κ.ά., 1997,Petchgate κ.ά., 2001,Chew κ.ά., 2004,Lee κ.ά., 2005, και Chin, 2006). Οι Locat κ.ά. (1996) και Chew κ.ά. (2004) απέδωσαν την αύξηση του ορίου υδαρότητας στην παρουσία παγιδευμένου ύδατος μέσα στα κατά μεγάλο μέρος κενά συσσωματώματα σιμεντωμένου εδάφους.

Οι Chew κ.ά. (2004) απέδωσαν επίσης την αύξηση του ορίου πλαστικότητας στη συσσωμάτωση των σωματιδίων του εδάφους σεακόμη μεγαλύτερα συσσωματώματα. Ο Chin (2006) ανεκάλυψε επίσης ότι το όριο υδαρότητας αυξάνεται μετά από τη βελτίωση με τσιμέντο αλλά μειώνεται με την αύξηση του φορτίου υπό το οποίο γίνεται η ωρίμανση. Ο Chin (2006) απέδωσε τη μείωση στη σύνθλιψη συσσωματωμάτων, η οποία μειώνει την ποσότητα του παγιδευμένου ύδατος μέσα στα συσσωματώματα.

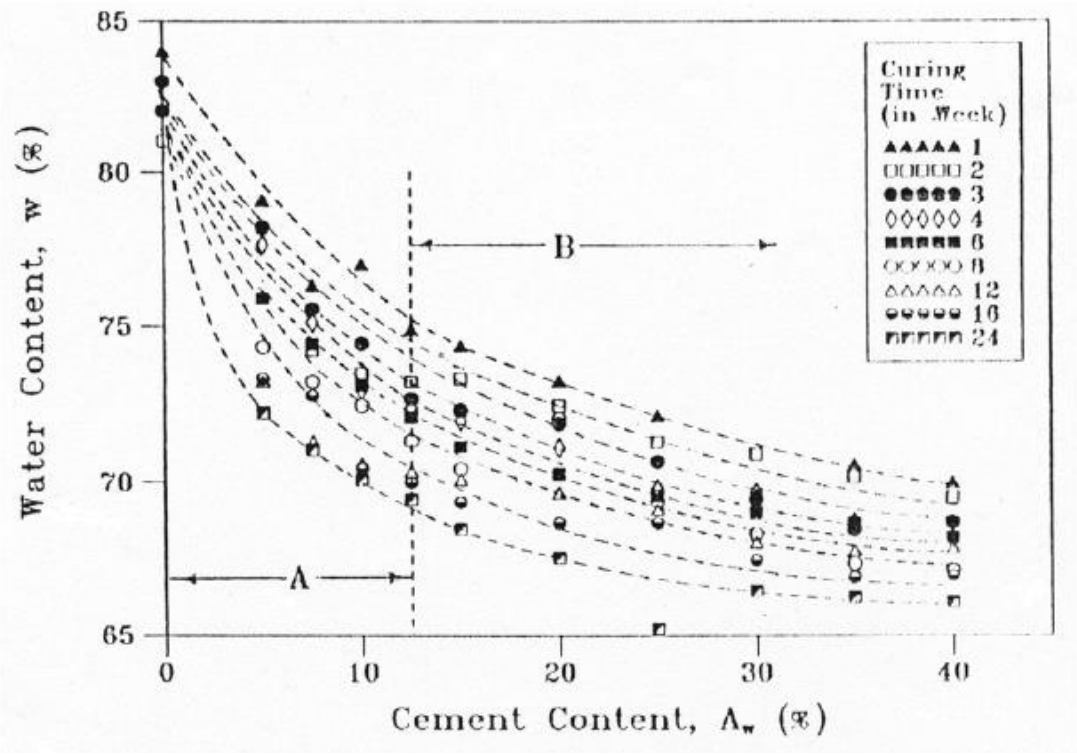
Επίσης άλλες έρευνες έδειξαν ότι η βελτίωση με τσιμέντο μειώνει την υγρασία και το ειδικό βάρος (Uddin κ.ά., 1997,Chew κ.ά., 2004,Lorenzo κ.ά., 2004, Chin, 2006). Οι Lorezo κ.ά. (2004) απέδωσαν τη μείωση της υγρασίας με την αύξηση του ποσοστού τσιμέντου και του χρόνου ωρίμανσης στις αντιδράσεις ενυδάτωσης και την ποζολανική. Οι Assarson κ.ά. (1974) και Chew κ.ά. (2004) παρατήρησαν ότι τα διαλυτά προϊόντα της ενυδάτωσης του τσιμέντου οδηγούν στην αύξηση της συγκέντρωσης ηλεκτρολυτών στο υγρό των πόρων και συνεπώς στην αύξηση της τιμή του pH. Τα διαλυμένα δισθενή ιόντα ασβεστίου (Ca^{2+}) αντικαθιστούν τα μονοσθενή ιόντα (π.χ. Na^{+}, K^{+}), τα οποία κανονικά έλκονται στην επιφάνεια των αρνητικά φορτισμένων αργιλικών σωματιδίων. Ο συνωστισμός ιόντων Ca^{2+} στην επιφάνεια των αργιλικών σωματιδίων επιφέρει την κροκίδωση των σωματιδίων αργίλου (Suzuki κ.ά., 1981,Shen 1999). Συνεπώς, το μέγεθος των σωματιδίων (στην πραγματικότητα των συσσωματωμάτων σιμεντωμένων εδαφικών σωματιδίων) αυξάνεται με την αύξηση του ποσοστού τσιμέντου.

Ωστόσο, πολλές απόψεις και συμπεράσματα για τη βελτίωση εδαφών με τσιμέντο ή άσβεστο δεν ισχύουν για εδάφη βελτιωμένα με ιπτάμενη τέφρα, και τα κύρια σημεία της παρούσας έρευνας είναι να διερευνήσει την επίδραση της τέφρας ως μοναδικού συνδετικού υλικού για τη βελτίωση μίας φυσικής αργίλου.

2.5.2 Φυσικά Χαρακτηριστικά του Βελτιωμένου Εδάφους

2.5.2.1 Μεταβολή της Υγρασίας

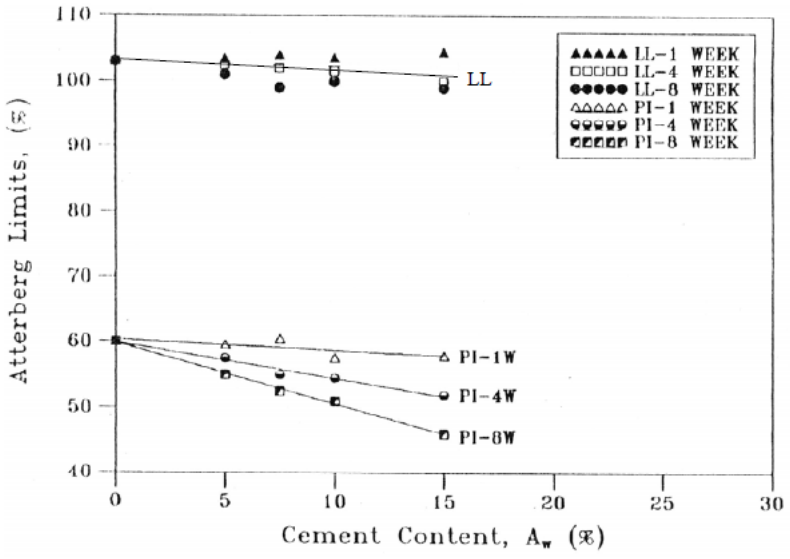
Το αποτέλεσμα της προσθήκης συνδετικού υλικού σε μία μαλακή άργιλο είναι η μείωση της τελικής υγρασίας του βελτιωμένου εδάφους (Uddin κ.ά., 1997,Yin και Lai, 1998). Οι Uddin κ.ά. (1997) παρατήρησαν ότι μέχρι ένα ορισμένο ποσοστό τσιμέντου, η μείωση της υγρασίας είναι πολύ μεγάλη, ενώ πέραν αυτού του ποσοστού είναι ηπιότερη, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.12. Μειώσεις της υγρασίας παρατηρούνται και με την αύξηση του χρόνου ωρίμανσης (Σχήμα 2.12). Αυτοί πρότειναν ότι η αντίδραση ενυδάτωσης συνεχίζεται με την παρέλευση του χρόνου, οδηγώντας σε μείωση της τελικής υγρασίας των βελτιωμένων αργίλων.



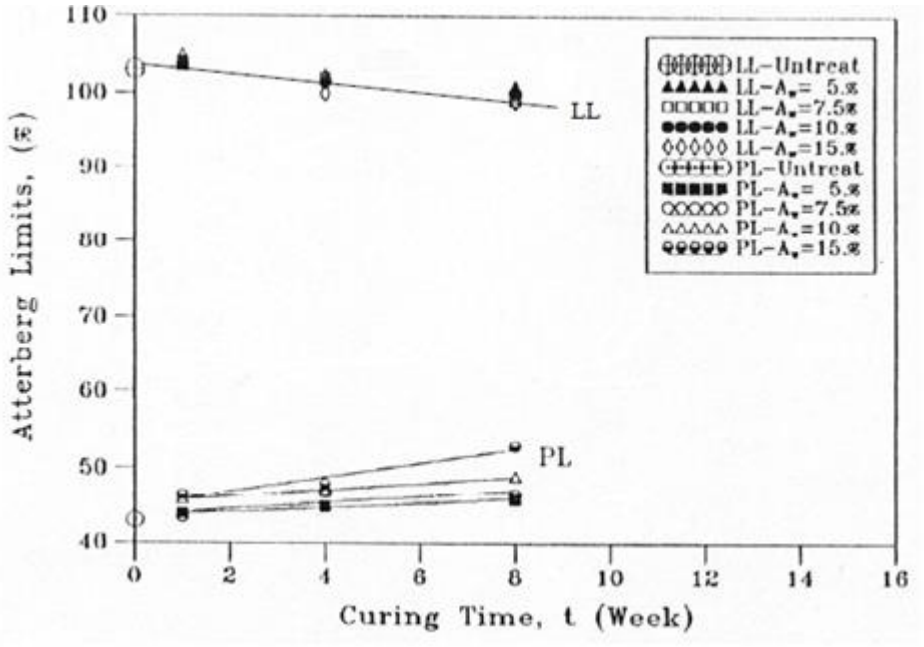
Σχήμα 2.12 – Επίδραση του ποσοστού τσιμέντου και του χρόνου ωρίμανσης στην τελική υγρασία της βελτιωμένης αργίλου (Uddin κ.ά., 1997)

2.5.2.2 Πλαστικότητα

Ο δείκτης πλαστικότητας βελτιωμένης αργίλου, μειώνεται με την αύξηση του συνδετικού υλικού και του χρόνου ωρίμανσης, προκύπτοντας από την αύξηση του ορίου πλαστικότητας και την ελαφρά έως καθόλου μείωση του ορίου υδαρότητας (Σχήμα 2.13). Αυτή η παρατήρηση ίσως χρησιμεύσει στην εξήγηση της φυσικοχημικής συμπεριφοράς της βελτιωμένης αργίλου.



Σχήμα 2.13Α – Επίδραση του ποσοστού τσιμέντου στα όρια Atterberg βελτιωμένης αργίλου (Uddin κ.ά., 1997)

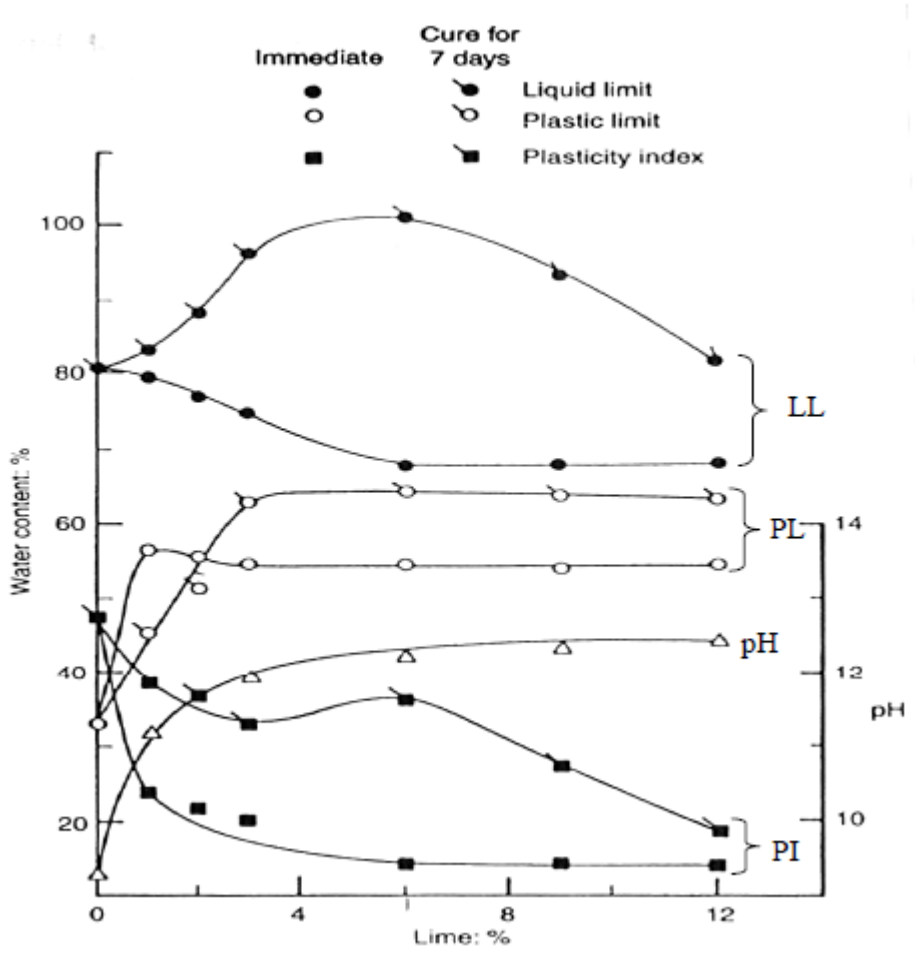


Σχήμα 2.13Β – Επίδραση του χρόνου ωρίμανσης στα όρια Atterberg βελτιωμένης αργίλου (Uddin κ.ά., 1997)

Οι Sivapullaiah κ.ά. (2000) συμπέραναν ότι με την προσθήκη ασβέστου, ο δείκτης πλαστικότητας του εδάφους BlackCotton στην Ινδία μειώνεται (Σχήμα 2.14). Παρατήρησαν ότι, αμέσως μετά την προσθήκη ασβέστου, το όριο υδαρότητας μειωνόταν σημαντικά. Από την άλλη πλευρά, το όριο πλαστικότητας αυξανόταν με την αύξηση του χρόνου ωρίμανσης. Προτάθηκε ότι η σημαντική μείωση του ορίου υδαρότητας αμέσως μετά την προσθήκη ασβέστου οφειλόταν στη συμπίεση της διπλοστιβάδας, λόγω του συνωστισμού ιόντων ασβεστίου (Ca^{++}) στην επιφάνεια των αργιλικών σωματιδίων. Η αύξηση του ορίου υδαρότητας με το χρόνο ωρίμανσης αποδίδεται επίσης στη μεταβολή της υφής της αργίλου προς μία πιο κροκιδωμένη κατάσταση (Sridharan και Jayadeva, 1982,Sivapullaiah κ.ά., 2000).

2.5.2.3 Κοκκομετρική Διαβάθμιση

Οι Assarson κ.ά. (1974) παρατήρησαν ότι τα διαλυτά προϊόντα της αντίδρασης ενυδάτωσης της τέφρας αυξάνουν τη συγκέντρωση ηλεκτρολυτών και επιφέρουν τα επακόλουθα αποτελέσματα όπως λεπτομερώς αναφέρονται στην ενότητα 2.5.1. Συνεπώς, το μέγεθος των σωματιδίων αυξάνεται με την αύξηση του ποσοστού του συνδετικού υλικού.



Σχήμα 2.14 – Επίδραση του ποσοστού ασβέστου στα όρια Atterberg της βελτιωμένης αργίλου Black Cotton (Sivapullaiah κ.ά., 2000)

2.5.3 Μηχανικά Χαρακτηριστικά Βελτιωμένου Εδάφους

2.5.3.1 Χαρακτηριστικά Διαπερατότητας

Η διαπερατότητα ή υδραυλική αγωγιμότητα εδάφους βελτιωμένου με τσιμέντο έχει εξεταστεί από πολλούς ερευνητές (π.χ. Jefferies, 1981, Kilpatrick και Garner, 1992, Deschens κ.ά., 1995, Yu κ.ά., 1999, Porbaha κ.ά. 2000, Kamruzzaman, 2002, Chin, 2006). Αυτή η ιδιότητα είναι σημαντική για το σχεδιασμό διαφραγματικών τοίχων όπου απαιτείται η μείωση της διήθησης. Οι Porbaha et al. (2000) παρατήρησαν ότι η κατανομή του μεγέθους των πόρων μέσα στο μίγμα τσιμέντου εδάφους επηρεάζει το συντελεστή διαπερατότητας του βελτιωμένου εδάφους. Οι Kauschingerκ.ά. (1992) παρατήρησαν ότι η διαπερατότητα αργίλου βελτιωμένης με τσιμέντο μειώνεται με την αύξηση του ποσοστού τσιμέντου και του χρόνου

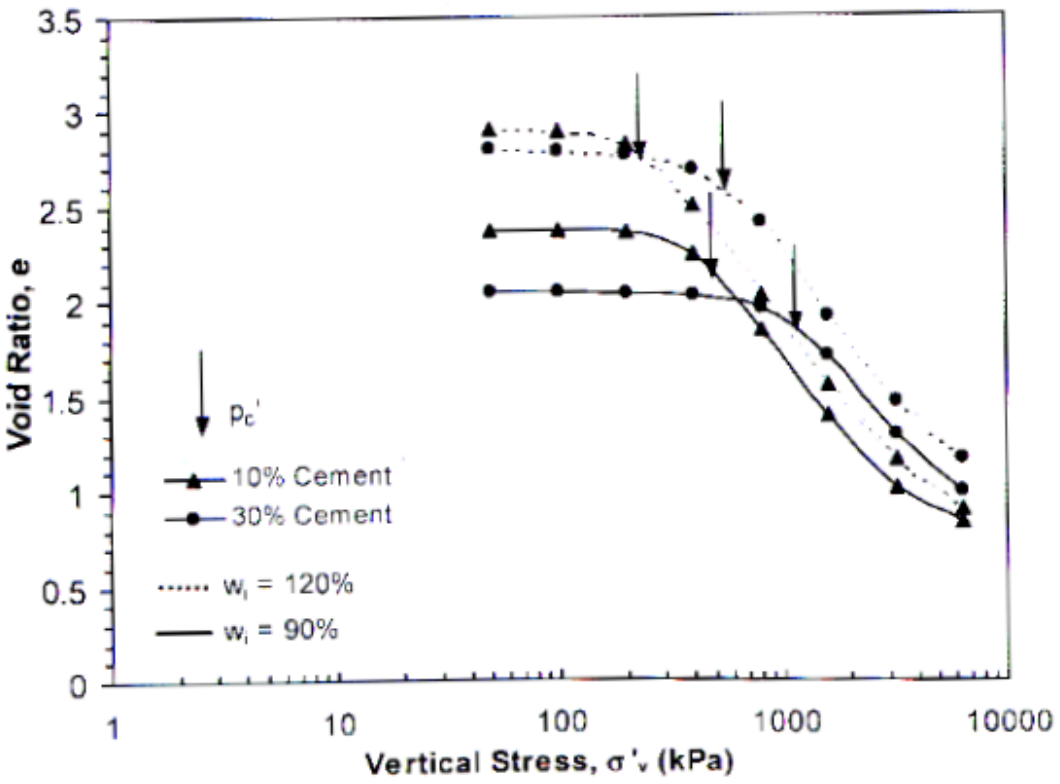
ωρίμανσης. Οι Broderic και Daniel (1990) πρότειναν ότι, η μείωση αυτή είναι δυνατόν να οφείλεται στα συγκολλητικά ποζολανικά προϊόντα, τα οποία φράζουν τους πόρους της μάζας του μίγματος εδάφους τσιμέντου. Αντίθετα, οι Suzuki κ.ά. (1981) παρατήρησαν αύξηση της διαπερατότητας λόγω κροκίδωσης του τσιμεντωμένου εδάφους. Ο Chin (2006) ανέφερε ότι η διαπερατότητα θαλάσσιας αργίλου βελτιωμένης με τσιμέντο μειώνεται με τη στερεοποίηση και είναι πολύ μικρότερη από της μη βελτιωμένης αργίλου στον ίδιο λόγο κενών.

2.5.3.2 Χαρακτηριστικά Συμπιεστότητας

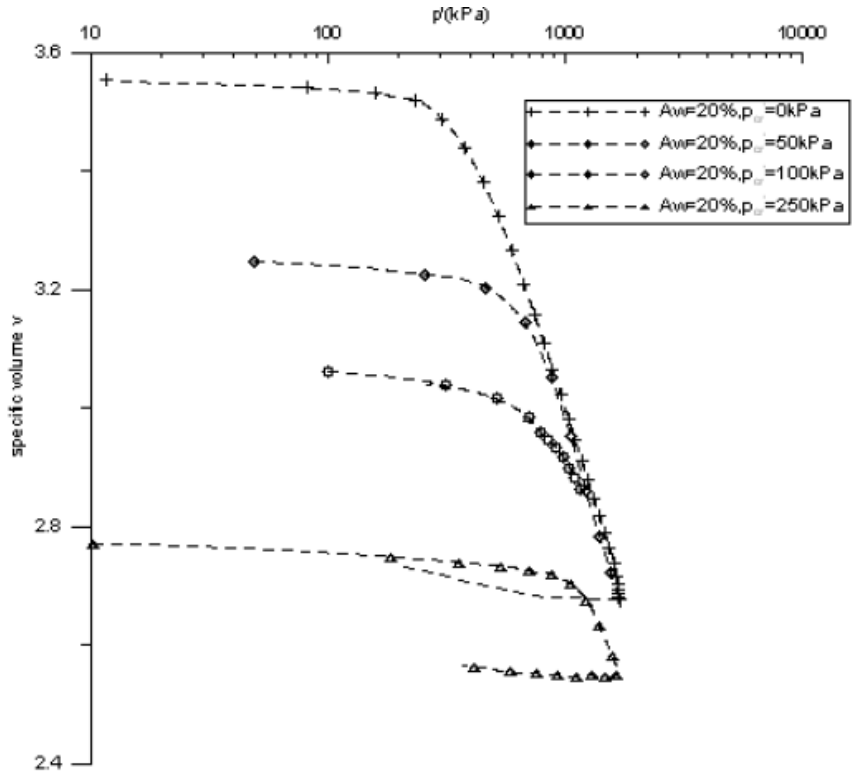
Η μείωση της συμπιεστότητας μαλακής αργίλου λόγω προσθήκης ενός συνδετικού υλικού είναι καλά τεκμηριωμένη. Οι Uddin κ.ά. (1997) θεωρούν ότι απαιτείται ορισμένο ελάχιστο ποσοστό τσιμέντου (> 5%) για τη βελτίωση της συμπιεστότητας της αργίλου. Οι Miura κ.ά. (2001) πρότειναν ότι η αντίσταση στη συμπίεση βελτιώνεται αξιοσημείωτα μέχρις ότου η τάση στερεοποίησης φθάσει τη φαινόμενη τάση προστερεοποίησης (τάση διαρροής στην καμπύλη μονοδιάστατης συμπίεσης), μετά από την οποία συμβαίνει μεγάλη ογκομετρική συμπίεση. Επίσης, οι Huang και Airey (1998) πρότειναν ότι η επίδραση του συνδετικού υλικού είναι σημαντική μόνο για τάσεις κάτω από τη φαινόμενη τάση προστερεοποίησης. Ο Kamruzzaman (2002) παρατήρησε ότι στη δοκιμή στερεοποίησης σε συμπιεσόμετρο, το ποσοστό τσιμέντου αλλά και η αρχική υγρασία, επηρεάζουν τη θέση της καμπύλης συμπίεσης μετά τη διαρροή, καθώς και το μέγεθος της κατακόρυφης φαινόμενης τάσης προστερεοποίησης σε μονοδιάστατη συμπίεση (Σχήμα 2.15). Παρόμοια, ο Chin (2006) παρατήρησε ότι η τάση ισότροπης διαρροής αυξάνεται με το φορτίο ωρίμανσης (Σχήμα 2.16). Οι Balasubramanian κ.α. (1998) (Σχήμα 2.17) αναφέρουν ότι, σε τάσεις πολύ μεγαλύτερες από τη φαινόμενη τάση προστερεοποίησης, η σχέση $e-\log p'$ της βελτιωμένης αργίλου είναι σχεδόν παράλληλη με τη γραμμή πρωτογενούς συμπίεσης της μη βελτιωμένης αργίλου. Οι Huang&Airey (1998) αναφέρουν ότι οι κλίσεις των γραμμών συμπίεσης είναι πρακτικά ανεξάρτητες από το ποσοτό τσιμέντου, με βάση αποτελέσματα ισότροπης συμπίεσης με πιέσεις κυψέλης έως 70 MPa. Καθώς αυξάνεται το ποσοστό τσιμέντου, η γραμμή κανονικής στερεοποίησης μετατίθεται δεξιά στο διάγραμμα v-lnp' plot, και αυτό αποδίδεται στην αλλαγή της κοκκομετρικής διαβάθμισης του εδάφους. Επίσης παρατήρησαν ότι σε πλευρικές τάσεις μεγαλύτερες από 20 MPa, παρουσιάζονταν αποκλίσεις από τη γραμμική συμπεριφορά στο διάγραμμα v-lnp' και ο δείκτης συμπίεσης μειωνόταν για όλα τα ποσοστά τσιμέντου. Οι Rotta κ.ά. (2003) αναφέρουν παρόμοια αποτελέσματα για διάφορα τεχνητά ελαφρά σιμεντωμένα εδάφη, και ο Chin (2006) για τεχνητά ισχυρά σιμεντωμένη άργιλο Σιγκαπούρης, όλα ωριμασμένα υπό φορτίο. Στην έρευνα των Rotta κ.ά. (2003), το

βελτιωμένο έδαφος ωρίμασε υπό κατακόρυφη ορθή τάση έως 2 MPa και στερεοποιήθηκε ισότροπα μέχρι τα 6 MPa. Βρέθηκε ότι, μετά την αρχική διαρροή, οι διαδρομές τάσεων των δειγμάτων, με διαφορετικό αρχικό λόγο κενών, μετά τη διαρροή ακολουθούν όλες μία γραμμή συμπίεσης, η οποία είναι μοναδική για κάθε ποσοστό συνδετικού υλικού, και η οποία, καθώς αυξάνεται η ισότροπη τάση, συγκλίνει προς τη γραμμή εγγενούς συμπίεσης του μη βελτιωμένου εδάφους. Οι Cuccovillo και Coop (1999) παρατήρησαν επίσης παρόμοια χαρακτηριστικά σε φυσικούς ασβεστοψαμμίτες με διαφορετικό λόγο κενών. Ωστόσο, οι Rotta κ.ά. (2003) προσέθεταν τσιμέντο μόνο έως 3%. Ο Chin (2006) προσέθετε περισσότερο τσιμέντο έως 20%. Στην έρευνα του Chin, το βελτιωμένο έδαφος ωρίμασε σε πλευρική πίεση έως 250 kPa και δοκιμάστηκε υπό ισότροπη συμπίεση. Παρατηρήθηκε ότι η γραμμή συμπίεσης, μετά τη διαρροή και καθώς αυξάνεται η τάση ισότροπης συμπίεσης, τείνει να συγκλίνει προς μία μοναδική γραμμή συμπίεσης.

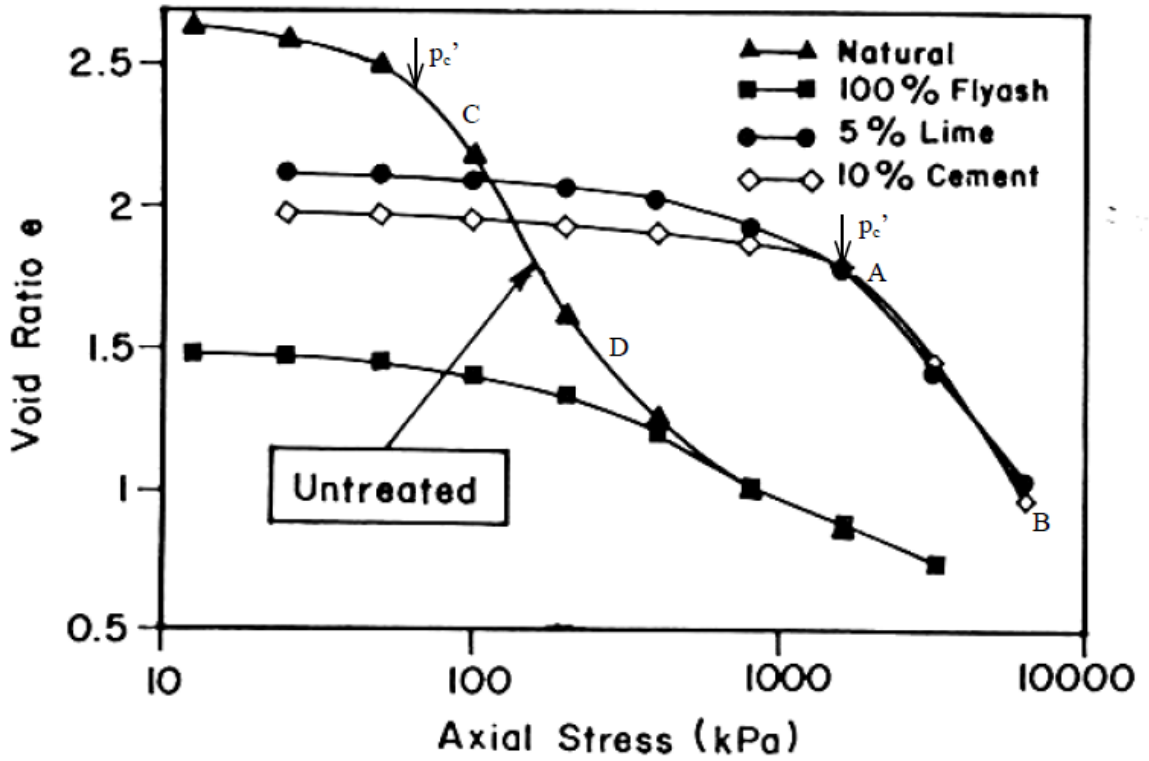
Οι Uddin κ.ά. (1997) παρατήρησαν ότι ο δείκτης συμπίεσης (C_c) μειώνεται με την αύξηση του ποσοστού τσιμέντου, όταν το ποσοστό είναι κάτω από 15%. Ο Kamruzzaman (2002) ανέφερε επίσης ότι ο δείκτης συμπίεσης μειώνεται με την αύξηση του ποσοστού τσιμέντου και του χρόνου ωρίμανσης. Αντίθετα, οι Rotta κ.ά. (2003) αλλά και οι Lorenzo και Bergado (2004) παρατήρησαν ότι μεγαλύτερα ποσοστά τσιμέντου έδιναν μεγαλύτερους δείκτες συμπίεσης στην περιοχή μετά τη διαρροή.



Σχήμα 2.15 – Επίδραση της αρχικής υγρασίας και του ποσοστού τσιμέντου στη σχέση e-logσ'$_v$ (Kamruzzaman, 2002)



Σχήμα 2.16 – Συμπεριφορά σε ισότροπη συμπίεση αργίλου βελτιωμένης με τσιμέντο υπό διάφορες εντατικές καταστάσεις κατά την περίοδο ωρίμανσης (Chin, 2006)

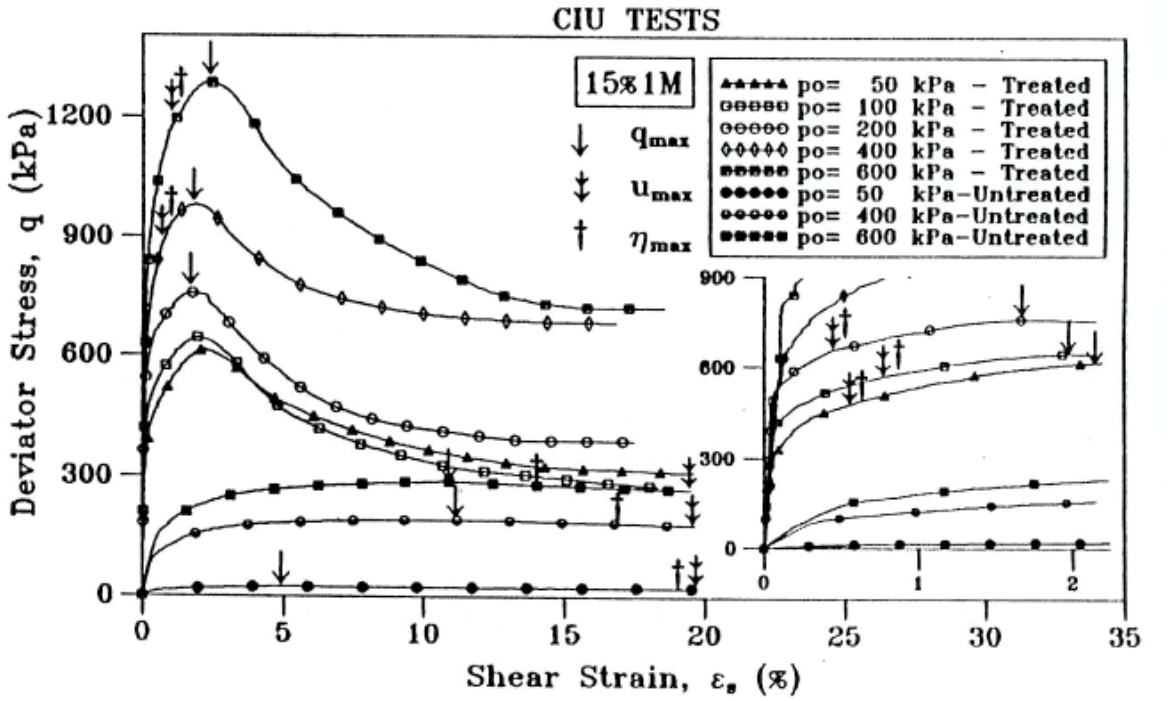


Σχήμα 2.17 – Επίδραση συνδετικού μέσου στη σχέση e-logσ'ν σε βελτιωμένη ή μη άργιλο (Balasubramanian, 1998)

2.5.3.3 Σχέση Τάσεων Παραμορφώσεων

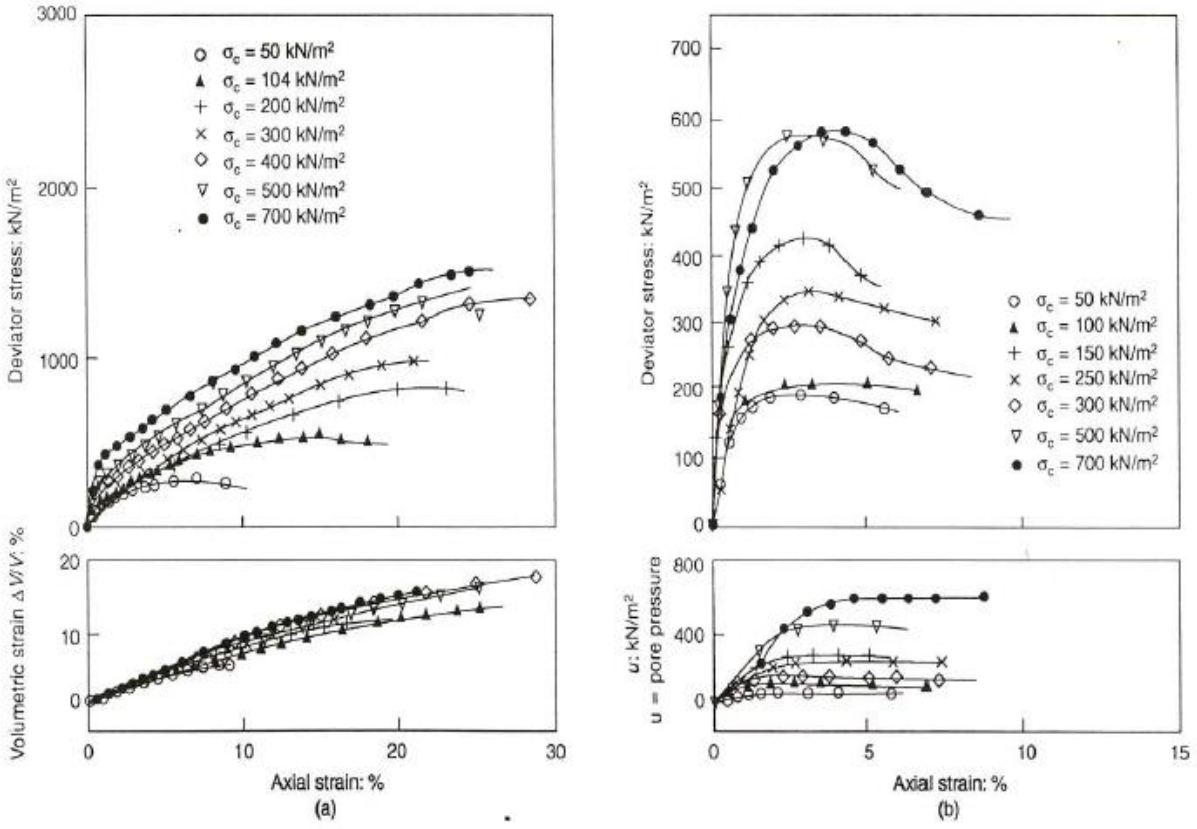
Οι Yin και Lai (1998) ερεύνησαν τη σχέση τάσεων–παραμορφώσεων θαλάσσιων ιζημάτων του Χονγκ Κονγκ (αργιλοϊλυώδους άμμου) βελτιωμένων με τσιμέντο, σε αστράγγιστες δοκιμές τριαξονικής θλίψης με διάφορες πλευρικές πιέσεις και διαφορετικές αρχικές υγρασίες του μη βελτιωμένου εδάφους. Βρέθηκε ότι ενώ το ποσοστό τσιμέντου και η πλευρική πίεση παρέμεναν σταθερά, το βελτιωμένο έδαφος συμπεριφερόταν ως έντονα υπερστερεοποιημένο λόγω της μείωσης της αρχικής υγρασίας του μη βελτιωμένου εδάφους. Παρόμοια συμπεριφορά υπερστερεοποιημένου εδάφους, παρατηρήθηκε λόγω της αύξησης του ποσοστού τσιμέντου διατηρώντας σταθερή την αρχική υγρασία και την πλευρική πίεση. Ωστόσο, σε πολύ χαμηλό ποσοστό τσιμέντου (π.χ. 5%), ακόμη και αν η αρχική υγρασία του μη βελτιωμένου εδάφους ήταν χαμηλή (π.χ. 60%), η σχέση τάσεων-παραμορφώσεων παρέμενε παρόμοια με του κανονικά στερεοποιημένου εδάφους με όλκιμη συμπεριφορά.

Οι Uddin κ.ά. (1997) ανέφεραν ότι η πλευρική πίεση επιδρά σημαντικά στη σχέση αποκλίνουσας τάσης-παραμόρφωσης της μαλακής αργίλου της Μπανγκόκ βελτιωμένης με τσιμέντο, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.18. Βρέθηκε ότι η μέγιστη αποκλίνουσα τάση, αυξάνεται με την αύξηση της πλευρικής πίεσης. Επιπλέον, η σχέση αποκλίνουσας τάσης-παραμόρφωσης, βρέθηκε ότι είναι γραμμική έως το 60% με 70% της μέγιστης αποκλίνουσας τάσης, και στη συνέχεια απέκλινε από τη γραμμικότητα με διαφορετικό ρυθμό, ανάλογα με την πλευρική πίεση. Οι Uddin κ.ά. (1997) παρατήρησαν επίσης ότι, για μεγαλύτερα ποσοστά τσιμέντου με χαμηλή πλευρική πίεση, η βελτιωμένη άργιλος επέδειξε ευδιάκριτη συμπεριφορά χαλάρωσης με την αύξηση της παραμόρφωσης. Παρόμοια, για το ίδιο ποσοστό τσιμέντου και μεγαλύτερους χρόνους ωρίμανσης, η βελτιωμένη άργιλος εμφάνισε ευκρινώς καθορισμένη μέγιστη αποκλίνουσα τάση, ακολουθούμενη από μεγαλύτερη χαλάρωση.



Σχήμα 2.18 – Σχέση αποκλίνουσας τάσης και διατμητικής παραμόρφωσης αργίλου βελτιωμένης με τσιμέντο (Uddin κ.ά., 1997)

Οι Porbaha κ.ά. (2000) ανέφεραν τα αποτελέσματα ισότροπα στερεοποιημένων στραγγιζόμενων (CID) και αστράγγιστων (CIU) δοκιμών θλίψης σε δείγματα θαλάσσιας αργίλου βελτιωμένης με 5% τσιμέντου, παρασκευασμένων στο εργαστήριο. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.19, βρέθηκε ότι και στις δύο δοκιμές CID και CIU, επιτεύχθηκαν υψηλότερες αποκλίνουσες τάσεις με την αύξηση της πλευρικής πίεσης. Στην περίπτωση της δοκιμής CID, η μέγιστη αποκλίνουσα τάση αναπτύχθηκε σε μεγαλύτερη παραμόρφωση αστοχίας (~20%). Ωστόσο, στη δοκιμή CIU, η αποκλίνουσα τάση αυξήθηκε μέχρι μία ευκρινώς καθοριζόμενη μέγιστη τιμή σε παραμόρφωση μικρότερη από 5%, πριν φτάσει την κατάσταση παραμένουσας αντοχής. Λόγω της ανάπτυξης υπερπίεσης πόρων, τα αστράγγιστα δοκίμια αστόχησαν σε τάσεις μικρότερες από των στραγγιζόμενων, όπως και αναμενόταν.



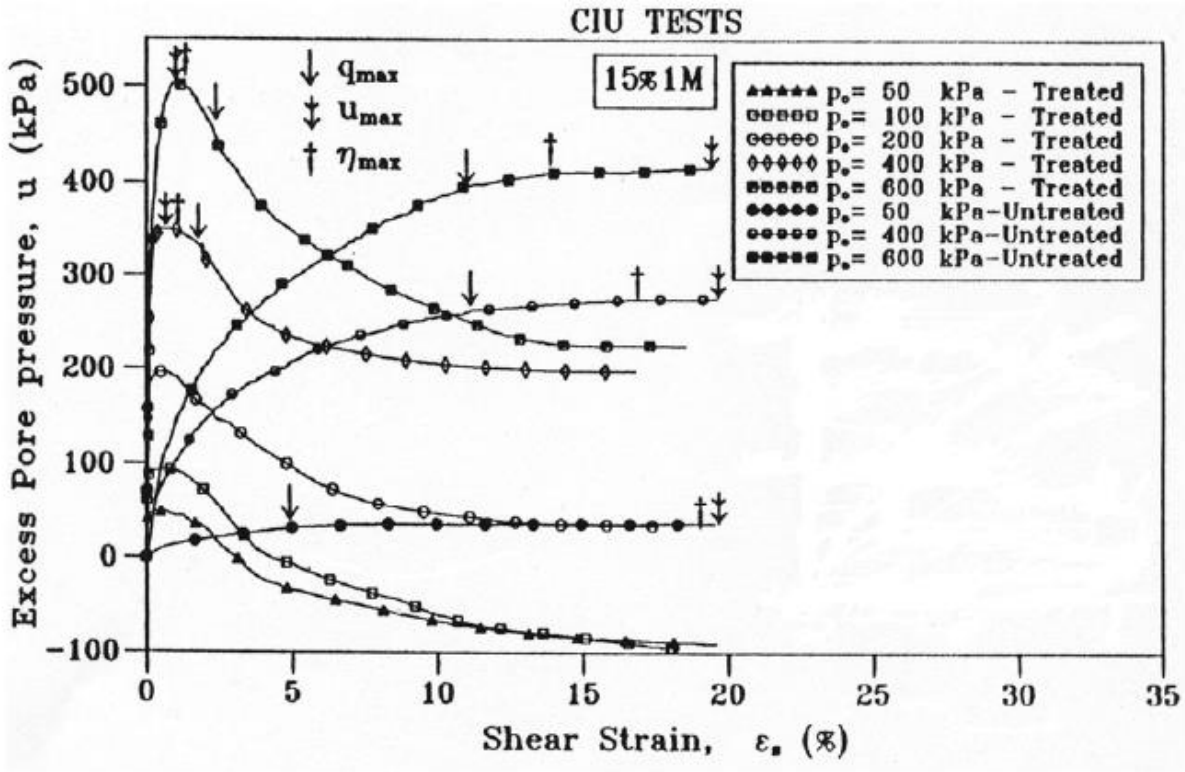
Σχήμα 2.19 – Σχέση αποκλίνουσας τάσης και διατμητικής παραμόρφωσης αργίλου βελτιωμένης με τσιμέντο σε συνθήκες (a) CID και (b) CIU (Porbaha κ.ά., 2000)

Οι Horpibulsuk κ.ά. (2004) μελέτησαν τη συμπεριφορά σε αστράγγιστη διάτμηση της βελτιωμένης με τσιμέντο αργίλου Ariake με υψηλή υγρασία, και πρότειναν ότι οι δεσμοί σιμέντωσης παίζουν κυρίαρχο ρόλο στα χαρακτηριστικά αντοχής του υλικού. Επίσης διαπίστωσαν ότι, ακόμη και αν τα δείγματα διατμηθούν σε πλευρικές πιέσεις υψηλότερες από τη μέση ενεργή τάση διαρροής, οι δεσμοί σιμέντωσης συνέχισαν να έχουν αξιοσημείωτη επίδραση στη διατμητική αντοχή του υλικού.

2.5.3.4 Πίεση Πόρων

Οι Uddin κ.ά. (1997) αναφέρουν ότι σε χαμηλή πλευρική πίεση (50-100 kPa), η βελτιωμένη με τσιμέντο άργιλος εμφανίζει μικρή θετική πίεση πόρων η οποία στη συνέχεια, σε μεγαλύτερες παραμορφώσεις, παίρνει αρνητικές τιμές (Σχήμα 2.20). Από την άλλη πλευρά, σε μεγαλύτερη πλευρική πίεση, η θετική πίεση πόρων έφθασε σε μέγιστη τιμή και στη συνέχεια μειώθηκε σε χαμηλότερη τιμή. Για την ίδια πλευρική πίεση με μεγαλύτερο ποσοστό τσιμέντου, η βελτιωμένη άργιλος εμφανίζει μείωση της παραμόρφωσης στη μέγιστη τιμή πίεσης πόρων. Οι Uddin κ.ά. (1997) επίσης παρατήρησαν ότι, για μεγαλύτερους χρόνους ωρίμανσης, εμφανίζεται ευδιάκριτη μέγιστη τιμή της πίεσης πόρων, ακολουθούμενη από σημαντική μείωση

της τιμής της. Επίσης, δείγματα με μακροχρόνια ωρίμανση, αναπτύσσουν μεγαλύτερη αρνητική πίεση πόρων, σε σχέση με δείγματα βραχυχρόνιας ωρίμανσης.



Σχήμα 2.20 – Σχέση πίεσης πόρων και διατμητικής παραμόρφωσης για άργιλο βελτιωμένη με τσιμέντο (Uddin κ.ά., 1997)

2.5.3.5 Διατμητικές Παράμετροι (c΄ και φ΄) και Περιβάλλουσα Αστοχίας

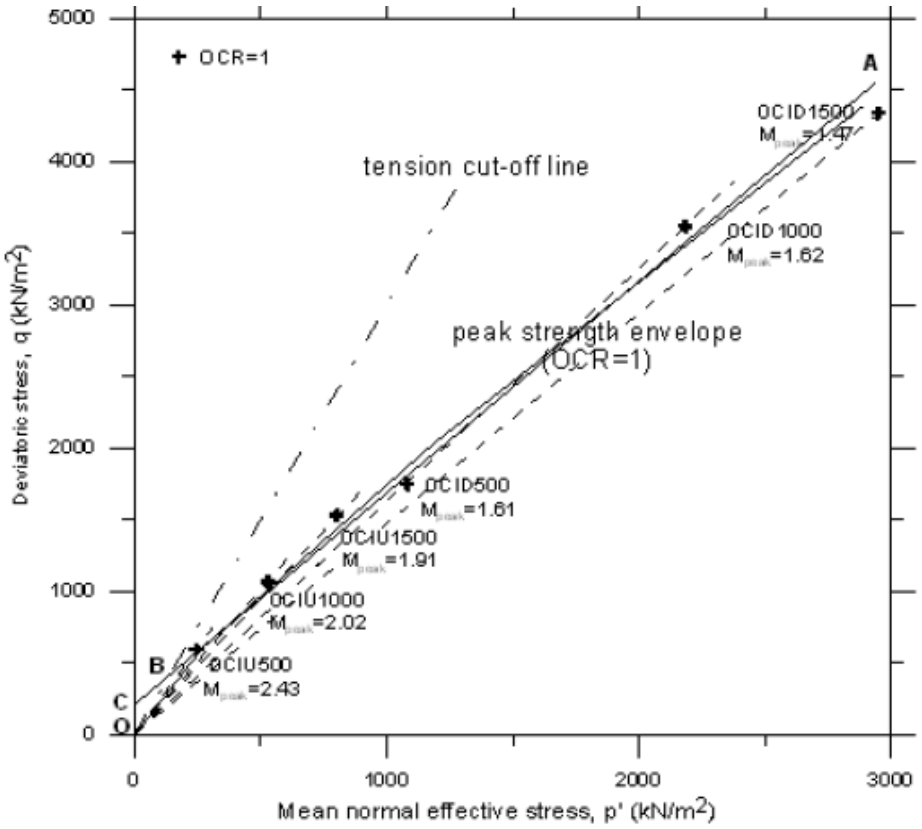
Στις εργαστηριακές έρευνες και μελέτες που έχουν πραγματοποιηθεί για τον προσδιορισμό των μηχανικών χαρακτηριστικών τεχνητά σιμεντωμένων εδαφικών υλικών, παράμετροι όπως η γωνία εσωτερικής τριβής (φ΄) και η συνοχή (c΄) δεν παρουσιάζουν μια ομοιόμορφη συμπεριφορά ωστέ να είναι εφικτό ένα συγκεκριμένο συμπέρασμα για την μείωση ή αύξηση των τιμών τους με την προσθήκη ένος συνδετικού μέσου όπως τσιμέντο, άσβεστος ή ιπτάμενη τέφρα.

Ο Broms (1986) διατύπωσε την άποψη ότι οι δύο συνιστώσες της αντοχής, δηλαδή η φ' και η c' αυξάνουν μέσω δύο διαδικασιών. Θεώρησε ότι η αντίσταση τριβής αυξάνεται λόγω σχηματισμού σημαντικού πλήθους αλληλεμπλοκών σωματιδίων στον σκελετό αργίλου-τσιμέντου ενώ η συνιστώσα της συνοχής αυξάνεται λόγω μείωσης του πάχους του προσροφημένου ύδατος της διάχυτης διπλοστιβάδας. Οι Yin & Lai (1998) αναφέρουν ότι, για αποθέσεις θαλάσσιας αργίλου του Χονγκ Κονγκ, η συνοχή του βελτιωμένου εδάφους αυξάνεται με την αύξηση του ποσοστού τσιμέντου και τη μείωση της αρχικής υγρασίας του μη βελτιωμένου εδά-φους. Ωστόσο, η γωνία

εσωτερικής τριβής μειώνεται με την αύξηση του ποσοστού τσιμέντου και τη μείωση της αρχικής υγρασίας. Αντίθετα, οι Uddin κ.ά. (1997) ανα-φέρουν ότι, για άργιλο του Μπανγκόκ, η συνοχή και η γωνία τριβής, αυξάνουν και οι δύο με την αύξηση του ποσοστού τσιμέντου και του χρόνου ωρίμανσης, και σε ποσοστό τσιμέντου περίπου 15%, φθάνουν ασυμπτωτικά σε μέγιστες τιμές. Οι Horpibulsuk κ.ά. (2004) επίσης αναφέρουν παρόμοια αποτελέσματα.

Οι Azman κ.ά. (1994) μελέτησαν την επίδραση του ποσοστού τσιμέντου στις παραμέτρους αντοχής "μαύρου εδάφους" (blacksoil) της Μαλαισίας. Αυτοί παρατήρησαν ότι, καθώς αυξανόταν το ποσοστό τσιμέντου, το βελτιωμένο έδαφος εμφάνιζε υψηλότερη γωνία τριβής και χαμηλότερη συνοχή. Αυτό είναι σαφώς αντίθετο με ότι ανέφεραν οι Yin & Lai (1998). Από την άλλη πλευρά, επιτεύχθηκε υψηλότερη συνοχή και χαμηλότερη γωνία τριβής, καθώς μειωνόταν η πλευρική πίεση. Οι Azman κ.ά. (1994) ταξινόμησαν τους τύπους αστοχίας αργίλων βελτιωμένων με τσιμέντο σε, αστοχίες με «υπερίσχυση τριβής» για πολύ υψηλές πλευρικές πιέσεις, αστοχίες με εκδήλωση «σιμέντωσης και τριβής» για μεσαίες πλευρικές πιέσεις, και αστοχίες με «υπερίσχυση σιμέντωσης» για χαμηλές πλευρικές πιέσεις.

Ο Chin (2006) παρατήρησε ότι οι μέγιστες αντοχές θαλάσσιας αργίλου βελτιωμένης με τσιμέντο εμφανίζουν μεγαλύτερο λόγο μέγιστων τάσεων (q/p') σε χαμηλή τιμή p' (Σχήμα 2.21), γεγονός παρόμοιο με τα ευρύματα των Tatsuoka και Kobayashi (1983). Αυτό υποδηλώνει ότι η συμβολή της δομής του εδάφους στη διάρκεια εκδήλωσης της μέγιστης αντοχής έχει μεγαλύτερη σχετική αξία σε χαμηλότερες πλευρικές πιέσεις.



Σχήμα 2.21 – Περιβάλλουσα μέγιστης αντοχής για βελτιωμένα δείγματα με OCR = 1 στο επίπεδο τάσεων p'-q (Chin, 2006)

2.5.4 Τριαξονικές Δοκιμές σε Συνθήκες Θλίψης και Εφελκυσμού

Στο σημείο αυτό διευκρινίζεται ότι : η αναφορά σε ***θλίψη*** σημαίνει *εκτέλεση τριαξονικής δοκιμής κατά την οποία αυξάνεται η κατακόρυφη ενεργή τάση*, ενώ η αναφερά σε ***εφελκυσμό***, *σημαίνει δοκιμή κατά την οποία αυξάνεται η οριζόντια ενεργή τάση*.

Η συμπεριφορά αναζυμωμένων και φυσικά δομημένων αργίλων έχει επαρκώς μελετηθεί και τεκμηριωθεί. Η έρευνα της υπάρχουσας βιβλιογραφίας δεν απέδωσε δεδομένα για σύγκριση μεταξύ δοκιμών θλίψης και εφελκυσμού σε χαμηλές ορθές τάσεις, ιδαίτερα για τεχνητά εδάφη. Τα αποτελέσματα που παρουσιάζει ο Parry (1960) για αναζυμωμένη άργιλο δείχνουν ότι η περιβάλλουσα διατμητικών τάσεων είναι ίδια σε δοκιμές θλίψης και εφελκυσμού. Όμως η περιοχή τάσεων που εξέτασε δεν ήταν χαμηλή και η έρευνά του δεν περιλάμβανε αργίλους στην αρχική αδιατάρακτη κατάσταση.

Υπάρχουν πολλές έρευνες και δημοσιεύσεις σχετικά με δοκιμές θλίψης σε φυσικά και τεχνητά εδάφη. Όμως δεν υπάρχουν πολλά διαθέσιμα δεδομένα για

αποτελέσματα δοκιμών εφελκυσμού. Ένα από τα πολλά πλεονεκτήματα δοκιμών εφελκυσμού είναι η δυνατότητα ανάπτυξης εφελκυστικής κύριας τάσης, η οποία θα ελαχιστοποιούσε το μέγεθος της προεκβολής της περιβάλλουσας αντοχής που απαιτείται για να προκύψει η απότμηση της συνοχής. Οι Bishop και Garga (1969) αναφέρουν δοκιμές εφελκυσμού σε αδιατάρακτη άργιλο του Λονδίνου, με χρήση δοκιμίων με μειωμένη διατομή στο μέσον του ύψους τους. Το πλεονέκτημα της χρήσης τέτοιων δοκιμίων, είναι η δυνατότητα ανάπτυξης εφελκυστικής κατακόρυφης τάσης στη μεσαία διατομή ενώ η τάση στις ακραίες διατομές είναι θλιπτική.

Σύμφωνα με τις απόψεις των Mitchell κ.ά. (1969), ο αριθμός των δεσμών μεταξύ σωματιδίων και άρα της διατμητικής αντοχής του εδάφους είναι ανάλογος με την ενεργή ορθή τάση στη θραύση (δηλαδή ισχύει ο νόμος της τριβής). Συνεπώς στην άργιλο, η αντοχή των δεσμών λόγω σιμέντωσης ή δευτερεύουσας στερεοποίησης μπορεί να προσδιοριστεί ευκρινέστερα αν οι ενεργές τάσεις στη θραύση διατηρηθούν πολύ χαμηλές, ώστε να είναι μικρή η συμβολή της τριβής η οποία είναι ανάλογη της ορθής τάσης. Με βάση τριαξονικές δοκιμές θλίψης, ο Mitchell (1970) ανέφερε ότι η περιβάλλουσα διάτμησης της φυσικά σιμεντωμένης αργίλου Leda αποτελείται από τρεις ζώνες : (1) στην περιοχή χαμηλών τάσεων έχει χαρακτήρα τριβής λόγω μικρορωγματώσεων, (2) στην περιοχή ενδιάμεσων τάσεων έχει χαρακτήρα συνοχής λόγω των δεσμών σιμέντωσης, και (3) στην περιοχή υψηλών τάσεων εμφανίζει κράτυνση λόγω της πλαστικής ροής. Ο Jarret (1971) εκτέλεσε στραγγιζόμενες τριαξονικές δοκιμές εφελκυσμού σε άργιλο Leda σε χαμηλές ενεργές τάσεις, κάνοντας χρήση δοκιμίων με μειωμένη διατομή στο μέσον του ύψους τους, και ανέφερε μία σχεδόν ευθύγραμμη περιβάλλουσα στην περιοχή χαμηλών τάσεων, κατά πάσα πιθανότητα λόγω μικρορωγματώσεων. Ο Iyer (1975) εκτέλεσε στραγγιζόμενες δοκιμές θλίψης και εφελκυσμού σε μη ρωγματωμένη και μη σιμεντωμένη πλαστική άργιλο Drammen, σε χαμηλές ενεργές τάσεις. Για να αποφύγει τις δυσκολίες στη χρήση ελαστικής μεμβράνης, την παρέλειψε και χρησιμοποιήσε ως υγρό της κυψέλης υγρή παραφίνη. Τα αποτελέσματα αυτών των δοκιμών έδειξαν ότι, στην περιοχή χαμηλών τάσεων, η διατμητική αντοχή σε εφελκυσμό ήταν ανεξάρτητη της μέσης ενεργής ορθής τάσης. Επίσης το μέγεθος της συνοχής ήταν περίπου ίδιο στις δοκιμές θλίψης και εφελκυσμού. Για να εξηγήσει τη διαφορά μηχανισμών θραύσης σε θλίψη και εφελκυσμό της πλαστικής αργίλου Drammen, πρότεινε προσομοίωμα και τόνισε τη σημασία των δοκιμών εφελκυσμού για τον προσδιορισμό της συνοχής λόγω κράτυνσης (δευτερεύουσας στερεοποίησης).

Στη συνέχεια δημοσιεύθηκαν πολλές έρευνες βασισμένες σε δοκιμές εφελκυσμού για διάφορους τύπους εδαφών (Wu & Kolymbas 1991, Lade κ.ά. 1996, Sulem 2008, Mofiz & Rahman 2010, etc.). Ωστόσο, δεν αναφέρονται έρευνες για τη διαφορά της συμπεριφοράς σε θλίψη και εφελκυσμό,σιμεντωμένων εδαφών, στην περιοχή χαμηλών ενεργών τάσεων. Υπάρχουν προηγούμενες έρευνες (Parry 1960, Mitchell κ.ά. 1969, Mitchell 1970, Jarret 1971, Iyer 1975) για φυσικές αργίλους, είτε ευαίσθητες ή αργίλους πουέχουν υποστεί δευτερεύουσα στερεοποίηση μετά την κανονική στερεοποίηση. Αυτές οι έρευνες βοήθησαν στην κατανόηση της έννοιας τωνδεσμών, και επίσης στον καθορισμό της περιβάλλουσας διάτμησης για χαμηλές ενεργές τάσεις. Επίσης, η διαφορά στη φύση της συνοχής, για κανονικά στερεοποιημένες αργίλους και για εδάφη με χημική (τεχνητή) σιμέντωση,όπως η συνοχή αυτή προσδιορίζεται από δοκιμές εφελκυσμούσύμφωνα με τις προαναφερθείσες τεχνικές, οδηγεί σε καλύτερη κατανόηση του διαφορετικού τρόπου θραύσης. Η παρούσα έρευνα αποτελεί μία προσπάθεια προς αυτήν την κατεύθυνση. Για να απαλειφθεί η αβεβαιότητα που σχετίζεται με τα φυσικά σιμεντωμένα εδάφη (π.χ. ανομοιογένεια, μικρορωγματώσεις, κλπ.), στην έρευνα αυτή χρησιμοποιήθηκε τεχνη-τά παρασκευασμένο σιμεντωμένο έδαφος. Αυτό θα βοηθήσει στον προσδιορισμό της επιρροής μόνον των δεσμών σιμέντωσης στη συμπεριφορά του εδάφους σε θλίψη και εφελκυσμό.

2.5.5 Ορισμός της Διαρροής και της Περιβάλλουσας Διαρροής για Σιμεντωμένα Εδάφη

"*Η διαρροή είναι σημαντικό χαρακτηριστικό της συμπεριφοράς τάσεων-παραμορφώσεων ελαφρά υπερστερεοποιημένων αργίλων. Ωστόσο, εξ ανάγκης, οι τεχνικές που χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση των καταστάσεων διαρροής πρέπει να είναι μερικώς εμπειρικές. Είναι συνεπώς σημαντικό οι τεχνικές να είναι όσο το δυνατό πιο γενικές, ώστε να μην οδηγούν σε αβάσιμα συμπεράσματα και οι περιορισμοί τους να γίνονται κατανοητοί. Οι τάσεις διαρροής, συνήθως εντοπίζονται από την τομή δύο ευθείων γραμμών που προσεγγίζουν το προσδιορισμένο με εργαστηριακές μετρήσεις διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων, για φυσικές αργίλους οι οποίες έχουν υποστεί διαγενετική γήρανση. Ωστόσο, αυτή η διαδικασία είναι ανεφάρμοστη σε ανασυνεστημένες αναζυμωμένες αργίλους όπου η γραμμική συμπεριφορά πριν τη διαρροή ακολουθείται άμεσα από εκθετική συμπεριφορά μετά τη διαρροή. Η γεωμετρία της πλήρους επιφάνειας οριακής κατάστασης μίας φυσικής αργίλου στο χώρο p'-q-v*

συσχετίζεται με το προσομοίωμα κρίσιμης κατάστασης. Οι αποκλίσεις μεταξύ μετρούμενων περιβαλλουσών στο χώρο p'-qκαι του τροποποιημένου προσομοιώματος Αργίλου Cam αποδεικνύεται ότι προκύπτουν από τις διαφορές στη σχεδίαση δεδομένων και την ανισοτροπία της συμπεριφοράς πριν τη διαρροή." – Graham κ.ά. (1988).

Η διαρροή στα αργιλικά εδάφη είνα καλά γνωστή και οι Roscoe & Schofield (1963) εξέτασαν με λεπτομέρεια τις έννοιες που σχετίζονται με τη διαρροή μαλακών αργίλων. Θεωρητικά, η περιβάλλουσα διαρροής σημειώνει το τέλος της ελαστικής συμπεριφοράς. Ωστόσο, αυτό δεν είναι τόσο εύκολο να εφαρμοσθεί σε εργαστηριακές παρατηρήσεις.

Πολλοί ερευνητές έχουν αναφέρει τις δυσκολίες για τον προσδιορισμό του σημείου διαρροής εδαφών (Barksdale & Blight 1997), μαλακών βράχων (Cecconi κ.ά. 1998), και της αργίλου Bothkennar (Smith κ.ά. 1992). Όπως έχουν δηλώσει οι Rotta κ.ά. (2003) για εδάφη τεχνητά σιμεντωμένα, η σταδιακή έναρξη θραύσης των δεσμών σιμέντωσης, η κοκκομετρία του εδάφους, και τα χαρακτηριστικά μικροδομής του συνδετικού υλικού μπορούν να προσθέσουν σημαντικές δυσκολίες στον προσδιορισμό του σημείου διαρροής σε σιμεντωμένα εδάφη.

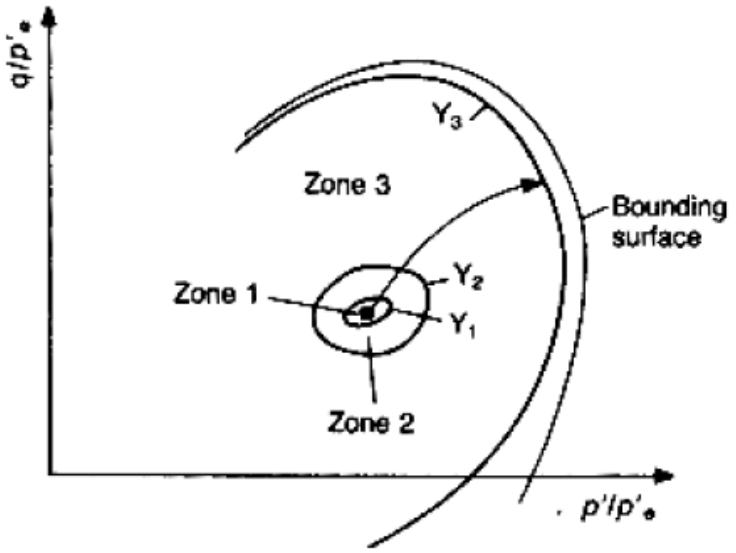
Η «διαρροή» των εδαφών έχει χαρακτηρισθεί από διάφορους ερευνητές ως «μοναδική διαρροή» ή «πολλαπλή διαρροή». Η έννοια της «μοναδικής διαρροής» έχει χρησιμοποιηθεί από πολλούς ερευνητές (π.χ. Mitchell, 1970,Wong&Mitchell, 1975,Atkinson, 1990, Anagnostopoulos κ.ά., 1991, Coop and Atkinson, 1993, Kavvadas κ.ά., 1993,1994, Cuccovillo and Coop, 1997, Callisto and Calabresi, 1998,Cotechia and Chandler, 2000,Rotta κ.ά., 2003). Οι περισσότεροι από αυτούς τους ερευνητές ορίζουν τη διαρροή ως μία κατάσταση κατά την οποίαεπέρχεται σημαντική μείωση της δυσκαμψίας. Για παράδειγμα, οι Anagnostopoulos κ.ά.(1991) ορίζουν την «αρχική διαρροή»για τη μάργα της Κορίνθου, ως μία απότομη μείωση της δυσκαμψίας στις καμπύλες τάσεων-παραμορφώσεων για δοκιμή τριαξονικής θλίψης. Οι Kavvadas κ.ά. (1993, 1994) όρισαν την «αρχική διαρροή» για μαλακό βράχο (λιγνίτη), ως το σημείο μετάβασης από την ευθύγραμμη στην πιο καμπύλη (πλαστική) περιοχή του διαγράμματος τάσεων-παραμορφώσεων.

Ωστόσο, ορισμένοι από αυτούς τους ερευνητές ορίζουν τη «διαρροή» ως το όριο της ελαστικής περιοχής, το οποίο έχει την ίδια κλασσική σημασία της «διαρροής» της Μηχανικής. Ο Atkinson (1990) πρότεινε για τον όρο «διαρροή» να περιορίζεται μόνο για την περιγραφή του τέλους της ελαστικής περιοχής. Με βάση αυτήν την άποψη, οι Coop και Atkinson (1993) όρισαν τη διαρροή τεχνητά σιμεντωμένης ανθρακικής άμμου από το διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων. Επιπλέον οι

Cuccovillo και Coop (1997) όρισαν τη διαρροή δύο άμμων με δομή (του πυριτικού ψαμμίτη και του ασβεστοψαμμίτη) από την αλλαγή του εφαπτομενικού μέτρου διάτμησης G στο διάγραμμα G-logε_s ή G-log$q$.

Πολλαπλά σημεία διαρροής έχουν επίσης προταθεί από ορισμένους ερευνητές (π.χ. Vaughan, 1988,Maccarini, 1987,Bressani, 1990,Leddra κ.ά., 1990, Jardine κ.ά., 1991, Jardine, 1992,Smithκ.ά., 1992,Malandraki and Toll, 1996). Ο Vaughan (1985, 1990b) όρισε τη διαρροή ως την κατάσταση στην οποία το υλικό δείχνει ασυνέχεια στη συμπεριφορά τάσεων-παραμορφώσεων. 'Οπως έχουν επισημάνει οι Malandraki και Toll (1996), αυτό δίνει τη δυνατότητα καθορισμού περισσότερων από ένα σημείων διαρροής.

Ο Vaughan (1988) πρότεινε δύο όρια διαρροής για τα αυτόχθονα εδάφη (residual soils). Το πρώτο σημείο διαρροής αντιπροσωπεύει την τάση στην οποία ορισμένοι από τους δεσμούς αρχίζουν να αστοχούν, ενώ στο δεύτερο όριο διαρροής επέρχεται δραματική μείωση της δυσκαμψίας. Ο Maccarine (1987) και ο Bressani (1990) όρισαν δύο σημεία διαρροής για τεχνητά σιμεντωμένο έδαφος, ενώ οι Leddra κ.ά. (1990) όρισαν δύο σημεία διαρροής για μαλακούς βράχους. Βασισμένοι στην έρευνα της μηχανικής συμπεριφοράς ανασυνεστημένου εδάφους, οι Jardine κ.ά.(1991), ο Jardine (1992) καιοι Smith κ.ά.(1992) πρότειναν τρία σημεία διαρροής, τα οποία χαρακτήρισαν ως "Y1", "Y2" και "Y3" όπως φαίνεται στο σχήμα 2.22. Το "Y1" είναι το όριο της γραμμικής ελαστικής συμπεριφοράς. "Y2" είναι το τέλος της συνολικής ελαστικής συμπεριφοράς (γραμμικής και μη γραμμικής). "Y3" είναι η αρχή της διαρροής με μεγάλες παραμορφώσεις.



Σχήμα 2.22 – Προσδιορισμός περιβαλλουσών διαρροής κατά Smith κ.ά. (1992)

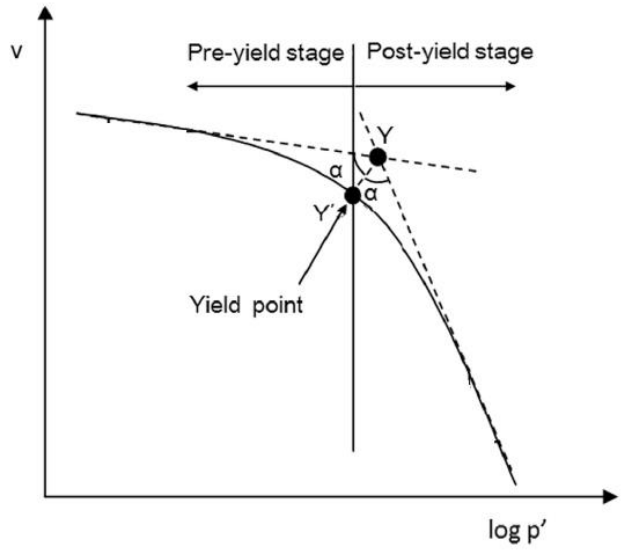
Οι Malandraki και Toll (1996) πρότειναν τρία όρια διαρροής για σιμεντωμένα υλικά, «πρώτη διαρροή», «δεύτερη διαρροή» και «τελική διαρροή». Ως σημείο «πρώτης διαρροής», ορίζουν το σημείο πρώτης αλλαγής της δυσκαμψίας. Ωςσημείο «δεύτερης διαρροής» ορίζουν το σημείο όπου αρχίζει η μεγάλη μείωση της τιμής της δυσκαμψίας. Ενώ το σημείο «τελικής διαρροής» είναι ταυτόσημο με το "Y3", και ορίζεται ως το σημείο στο οποιο το υλικό έχει ήδη χάσει σχεδόν όλη τη δυσκαμψία η οποία οφείλεται στους δεσμούς μεταξύ σωματιδίων. Οι Malandraki and Toll (1996) επεσήμαναν επιπλέον ότι για κανονικά στερεοποιημένες αργίλους και χαλαρές άμμους, δεν υφίσταται η «δεύτερη διαρροή», ενώ για υπερστερεοποιημένες αργίλους, πυκνές άμμους και μαλακούς βράχους, η «δεύτερη διαρροή» προσδιορίζεται εύκολα από τη διπλή λογαριθμική καμπύλη εφαπτομενικής δυσκαμψίας–αξονικής παραμόρφωσης.

Χρησιμοποιώντας όργανα μέτρησης μικρής παραμόρφωσης, οι Tatsuoka και Shibuya (1991) πρότειναν ότι το όριο του τέλους των ελαστικών παραμοφώσεων για κανονικά στερεοποιημένες αργίλους, είναι περίπου στο 0.0001%, αλλά η τιμή αυτή αυξάνεται με την υπερστερεοποίηση. Επίσης πρότειναν ότι οι μαλακοί βράχοι μπορεί να εμφανίσουν όριο ελαστικής παραμόρφωσης 0.01%. Ο Jardine (1995) διαπίστωσε ότι το όριο ελαστικής παραμόρφωσης αυξάνεται ως αποτέλεσμα της σιμέντωσης. Επίσης οι Clayton κ.ά. (1994) ανέφεραν ότι το όριο ελαστικής παραμόρφωσης για κρητίδα (κιμωλία) μπορεί να φθάσει έως και το 0.03%.

Οι Cuccovillo και Coop (1997) διαπίστωσαν ότι σε πλευρική πίεση 1800 kPa, το όριο ελαστικής παραμόρφωσης για άμμο με δομή (δηλ. πυριτικό ψαμμίτη και ασβεστοψαμμίτη) είναι περίπου 0.015%. Ωστόσο, χρησιμοποιώντας τις μεθόδους του Maccarini's (1987) και του Bressani's (1990), οι Malandraki και Toll (1996) αναφέρουν ότι η «δεύτερη διαρροή» συνέβη σε αξονική παραμόρφωση περίπου 2%. Εξ αυτού, οι Malandraki και Toll (1996) προτείνουν ότι η «δεύτερη διαρροή» στις μεθόδους ορισμένων ερευνητών (π.χ. Maccarini, 1987,Bressani, 1990,Vaughan, 1988,Vaughan κ.ά., 1988) είναι σχεδόν όμοια με την «τελική διαρροή». Σύμφωνα με τον ορισμό των Malandraki και Toll (1996), η «δεύτερη διαρροή» από τη διπλή λογαριθμική καμπύλη εφαπτομενικής δυσκαμψίας – αξονικής παραμόρφωσης, συμπίπτει με τον ορισμό της «αρχικής διαρροής» από τους Anagnostopoulos κ.ά. (1991) andKavvadas κ.ά.(1993, 1994), και με τονορισμό της «διαρροής» από τους Coop και Atkinson(1993). Οι Malandraki και Toll (1996) επίσης διατύπωσαν ότι το "Y2" όπως ορίζεται από ορισμένους ερευνητές (π.χ. Jardine κ.ά., 1991 και Jardine,

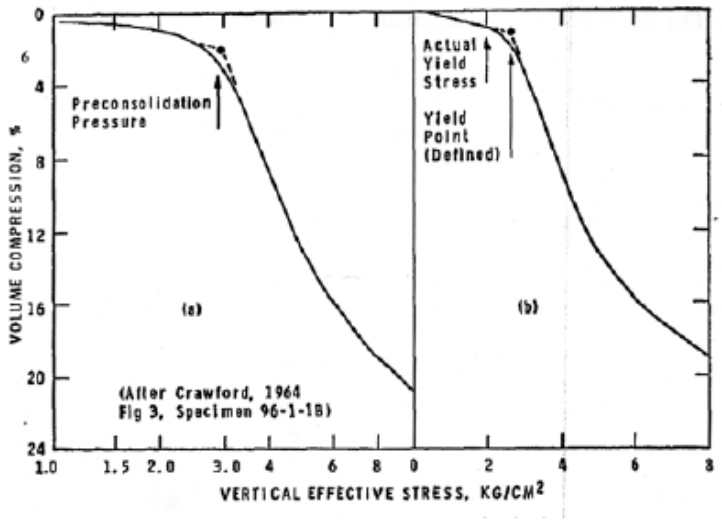
1992) μπορεί να συμπίπτει με την «πρώτη διαρροή» όπως ορίζεται από άλλους ερευνητές (π.χ. Vaughan, 1988 και Bressani, 1990) για ισχυρά σιμεντωμένα υλικά, γεγονός που υποδηλώνει ότι το υλικό είναι ελαστικό μέχρι να αρχίσει η μεγάλη μείωση της τιμής της δυσκαμψίας. Συνεπώς, το σημείο διαρροής κατά Coop και Atkinson(1993) και κατά Cuccovillo και Coop(1997), το σημείο "Y2" κατά Jardine (1992) και κατά Smith κ.ά.(1992), και η «δεύτερη διαρροή» κατά Malandraki και Toll (1996) φαίνεται ότι μπορεί να ορίσει τη «διαρροή» ισχυρά σιμεντωμένων υλικών όπως έδαφος βελτιωμένο με τσιμέντο. Αυτό ισχύει και για τον ορισμό της «πρωτεύουσας διαρροής» των Rottaκ.ά. (2003).

Στη μέθοδο του Rotta (2003), η «πρωτεύουσα διαρροή» ορίζεται ως το σημείο στο οποίο το διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων (δηλ. p'-v) αρχίζει να αποκλίνει από την αρχική γραμμική συμπεριφορά. Επιπλέον ο Gao (2012) αναφέρει ότι η αντίστοιχη τάση διαρροής Y' προσδιορίζεται παραδοσιακά από την καμπύλη ογκομετρικής συμπίεσης (δηλ. e-logp΄) με τη μέθοδο των δύο γραμμών, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.23a. Δηλαδή η τάση διαρροής προσδιορίζεται από το σημείο τομής της καμπύλης συμπίεσης με τη διχοτόμο της γωνίας που σχηματίζουν οι δύο ευθείες γραμμές που προσεγγίζουν την καμπύλη συμπίεσης. Το πλεονέκτημα της χρησιμοποίησης του Y΄ ως τάσης διαρροής είναι ότι η καμπύλη συμπίεσης μπορεί εύκολα να διαιρεθεί με το σημείο Y' στο στάδιο «προ της διαρροής» (pre-yield) και το στάδιο «μετά τη διαρροή» (post-yield), επειδή το σημείο είναι *επί* της καμπύλης ογκομετρικής συμπίεσης.



2.23a - Προσδιορισμός σημείου διαρροής κατά Rotta (2003)

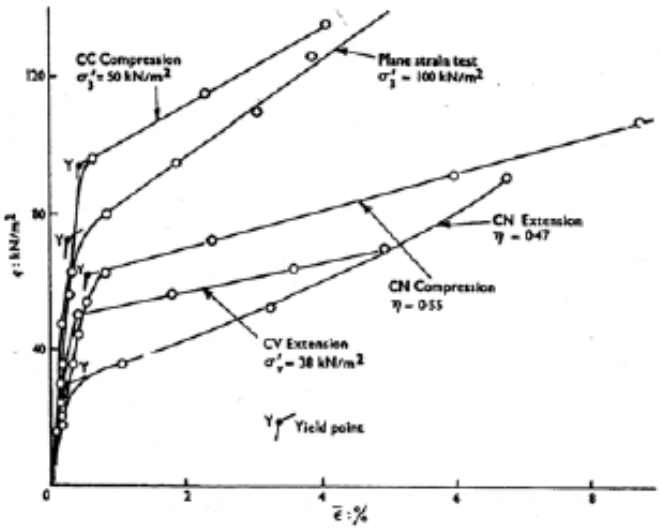
Η «διαρροή» σιμεντωμένων εδαφών μπορεί να εντοπιστεί και προσδιοριστεί με διάφορες μεθόδους σύμφωνα με την έννοια της «απλής διαρροής» ή της «πολλαπλής διαρροής», δηλαδή με τις μεθόδους «τάσεων-παραμορφώσεων», «δυσκαμψίας», και άλλες. Στη μέθοδο «τάσεων-παραμορφώσεων», σχεδιάζεται η καμπύλη αποκλίνουσας τάσης ή μέσης ενεργής τάσης σε συνάρτηση με την αποκλίνουσα παραμόρφωση ή την ογκομετρική παραμόρφωση, σε φυσική ή λογαριθμική κλίμακα (π.χ. Mitchell, 1970,Wong & Mitchell, 1975, Maccarini, 1987, Bressani, 1990, Airey, 1993, Coop και Atkinson, 1993, Cotechia και Chandler, 2000, Rotta κ.ά., 2003). Για παράδειγμα ο Mitchell (1970) σχεδίασε την καμπύλη μονοδιάστατης στερεοποίησης σε γραμμική κλίμακα τάσεων και όρισε το σημείο διαρροής με την τυπική μέθοδο Casagrande (Σχήμα 2.23b).



2.23b - Προσδιορισμός σημείου διαρροής κατά Mitchell (1970)

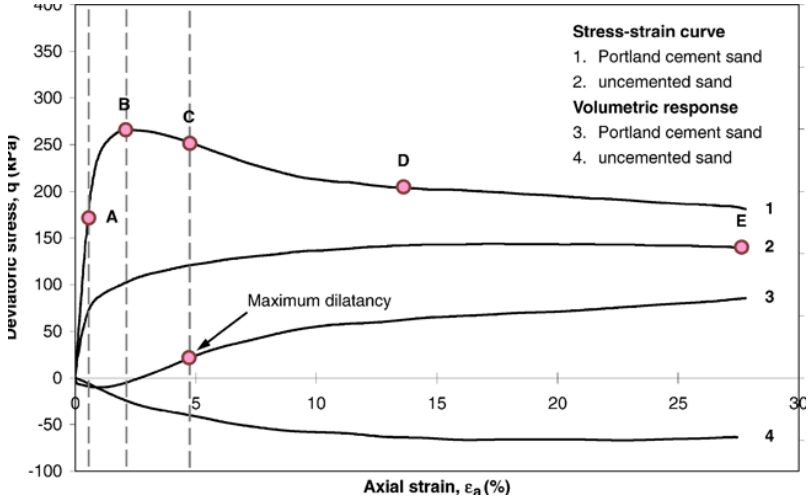
Ο Mitchell παρατήρησε ότι "*...σε τάσεις μικρότερες από την τάση διαρροής, η συμπίεση του δοκιμίου είναι μικρή, κατά το μεγαλύτερο μέρος αναστρέψιμη, και σχεδόν σε γραμμική σχέση με την εφαρμοζόμενη τάση. Σε τάσεις οι οποίες υπερβαίνουν την τάση διαρροής, η συμπίεση του δοκιμίου είναι σχετικά μεγάλη και κυρίως μη αναστρέψιμη".* Ωστόσο, στο ίδιο διάγραμμα, ο Mitchell εντόπισε ένα σημείο διαρροής, το οποίο ταυτίζεται με εκείνο που ορίζεται από τη μέθοδο Rotta, η οποία εξετάζεται στη συνέχεια. Οι Wong & Mitchell (1975) χρησιμοποιούν τη μέθοδο των Taylor & Quinney (1931) για να ορίσουν το σημείο διαρροής από δεδομένη εργαστηριακή καμπύλη τάσεων-παραμορφώσεων για ευαίσθητη σιμεντωμένη άργιλο (Σχήμα 2.23c). Οι ίδιοι αναφέρουν ότι "*αυτή η μέθοδος ορισμού της περιβάλλουσας διαρροής θεωρείται κατάλληλη για σιμεντωμένες αργίλους, εφόσον πάντοτε υπάρχει ένα αρκετά απότομο «σπάσιμο» (μεγάλη καμπυλότητα) στα διαγράμματα τάσεων-*

παραμορφώσεων". Επιπλέον, επεσήμαναν ότι "*η ύπαρξη μίας μοναδικής επιφάνειας διαροής, είναι μεγάλης σημασίας για τα ευαίσθητα σιμεντωμένα εδάφη. Μετά την αρχική κατάρρευση των δεσμών σιμέντωσης (αρχική διαρροή) μία μικρή αύξηση της εφαρμοζόμενης τάσης προκαλεί παραμόρφωση σχετικά μεγάλου μεγέθους η οποία είναι αντίστοιχη της πλαστικής ροής. Φαίνεται λοιπόν ότι συμβαίνει μία προοδευτική κατάρρευση των δεσμών σιμέντωσης μετά από την αρχική διαρροή, και θα αποτελούσε υπερβολική απλούστευση η ταύτιση της ευαίσθητης αργίλου μετά τη διαρροή με μία μη ευαίσθητη κανονικά στερεοποιημένη άργιλο. Απαιτείται εξαιρετικά μεγάλη ογκομετρική παραμόρφωση (μέχρι και 50%) για να φθάσουμε την κανονικά στερεοποιημένη ή μη δομημένη κατάσταση.*"



2.23c - Προσδιορισμός σημείου διαρροής κατά Wong & Mitchell (1975)

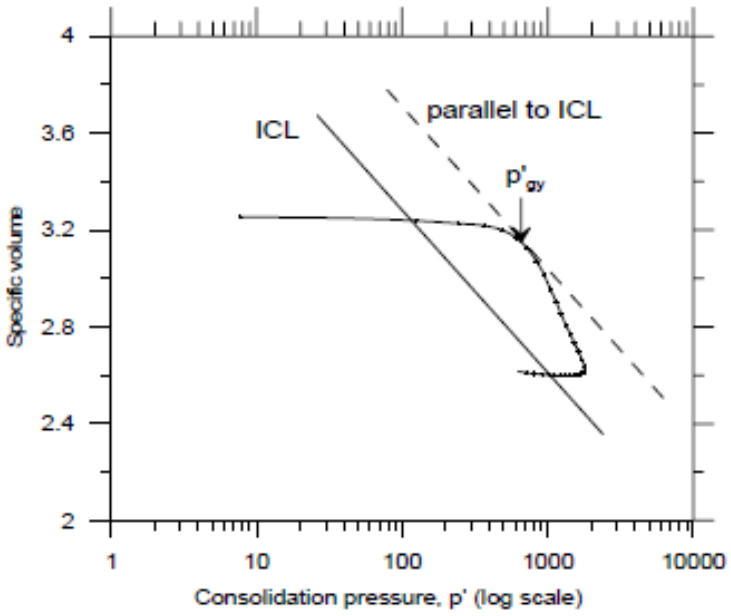
Οι Rotta κ.ά. (2003) προτείνουν ως «πρωτεύουσα διαρροή» το σημείο όπου το διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων αποκλίνει από την αρχική γραμμική του πορεία, και στο οποίο ξεκινά η πρώτη θραύση δεσμών. Οι Coop και Atkinson (1996) χρησιμοποίησαν την ίδια μέθοδο για να εντοπίσουν τη «διαρροή» στα διαγράμματα αποκλίνουσας τάσης-αξονικής παραμόρφωσης και μέσης ενεργής τάσης-ογκομετρικής παραμόρφωσης φυσικά σιμεντωμένων ανθρακικών άμμων (Σχήμα 2.23d).



2.23d - Προσδιορισμός σημείου διαρροής κατά Coop & Atkinson (1996)

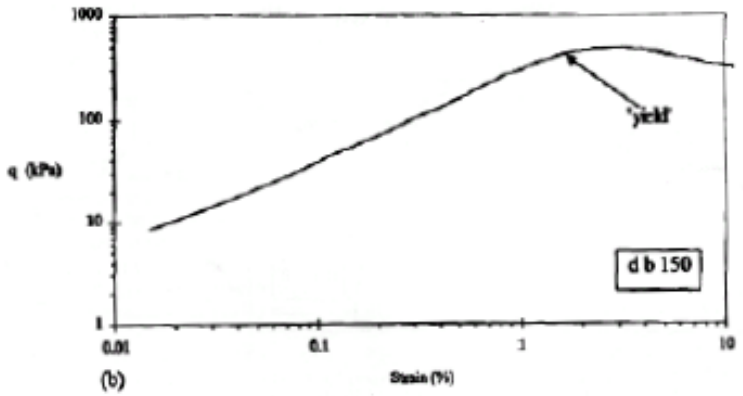
Ο Airey (1993) επίσης εφήρμοσε την ίδια μέθοδο για να ορίσει τη «διαρροή» σε διάγραμμα αποκλίνουσας τάσης-αξονικής παραμόρφωσης φυσικά σιμεντωμένων ανθρακικών άμμων.

Οι Cotechia και Chandler's (2000) πρότειναν ως «σημείο συνολικής διαρροής» το σημείο επαφής της καμπύλης συμπίεσης με μία γραμμή παράλληλη στην καμπύλη εγγενούς συμπίεσης (Burland 1990). Στο σημείο αυτό, ο λόγος της τάσης επί της καμπύλης συμπίεσης προς την τάση επί της καμπύλης εγγενούς συμπίεσης είναι μέγιστος (Σχήμα 2.23e). Ο Chin (2006) εφήρμοσε τη μέθοδο των Cotechia και Chandler's (2000) για να προσδιορίσει την περιβάλλουσα συνολικής διαρροής για τη θαλάσσια άργιλο Σιγκαπούρης βελτιωμένη με τσιμέντο.



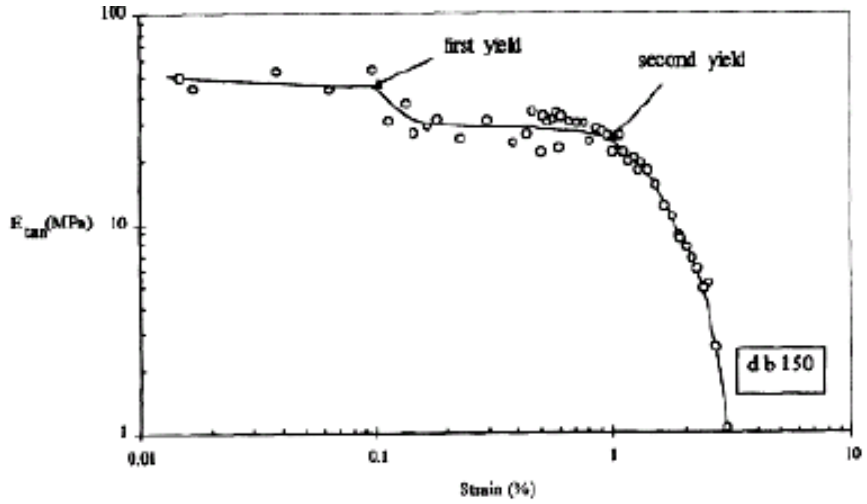
2.23e - Προσδιορισμός σημείου διαρροής κατά Cotechia & Chandler (2000)

Ο Maccarini (1987) προσδιορίζει την «πρώτη διαρροή» στο τέλος του ευθύγραμμου τμήματος του διαγράμματος αποκλίνουσας τάσης-αξονικής παραμόρφωσης. Ενώ τη «δεύτερη διαρροή» ως το σημείο μέγιστης καμπυλότητας του ίδιου διαγράμματος σε φυσική κλίμακα. Η «πρώτη διαρροή» είναι παρόμοια με την «πρωτεύσα διαρροή» του Rotta, ενώ η «δεύτερη διαρροή» είναι παρόμοια με το σημείο διαρροής των Wong και Mitchell. Ο Bressani (1990) χρησιμοποίησε το ίδιο διάγραμμα σε διπλή λογαριθμικη κλίμακα, σε μία προσπάθεια να εντοπίσει μία πιο σαφή αλλαγή συμπεριφοράς (Σχήμα 2.23f).

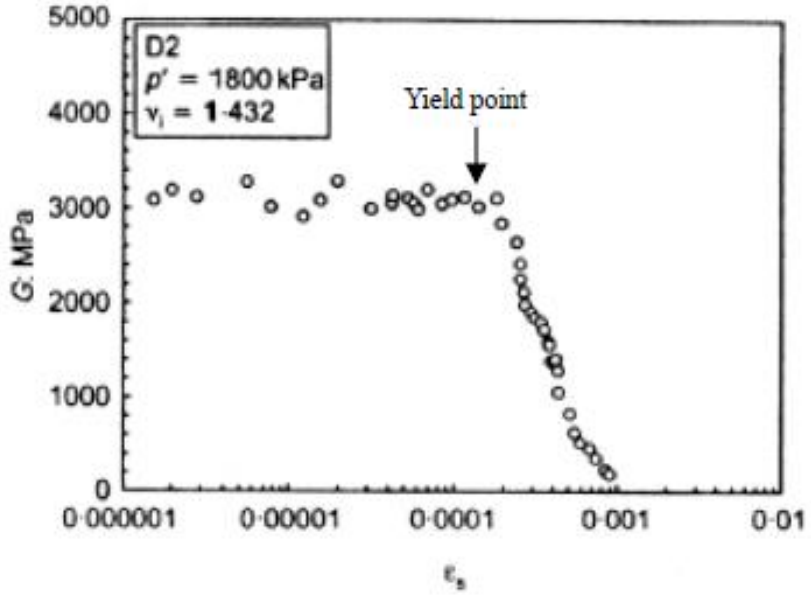


2.22f - Προσδιορισμός σημείου διαρροής κατά Bressani (1990)

Στη «μέθοδο δυσκαμψίας», χρησιμοποιείται το διάγραμμα εφαπτομενικού μέτρου, E ή G, σε συνάρτηση με την παραμόρφωση σε διπλή λογαριθμική κλίμακα ή σε συνδυασμό λογαριθμικής (για την παραμόρφωση) και φυσικής (για το εφαπτομενικό μέτρο) (π.χ. Malandraki και Toll, 1996,Cuccovillo και Coop, 1997). Οι Malandraki και Toll (1996) εντόπισαν τη διαρροή ενός τεχνητά σιμεντωμένου εδάφους, από τις αλλαγές της εφαπτομενικής δυσκαμψίας (E_{tan}) σε συνάρτηση με την αξονική παραμόρφωση σε διπλή λογαριθμική κλίμακα (Σχήμα 2.23g). Οι Cuccovillo και Coop (1997) όρισαν τη διαρροή άμμου με δομή από τις αλλαγές του εφαπτομενικού μέτρου διάτμησης G σε συνάρτηση με την αποκλίνουσα τάση ή παραμόρφωση σε λογαριθμική κλίμακα (Σχήμα 2.23h).

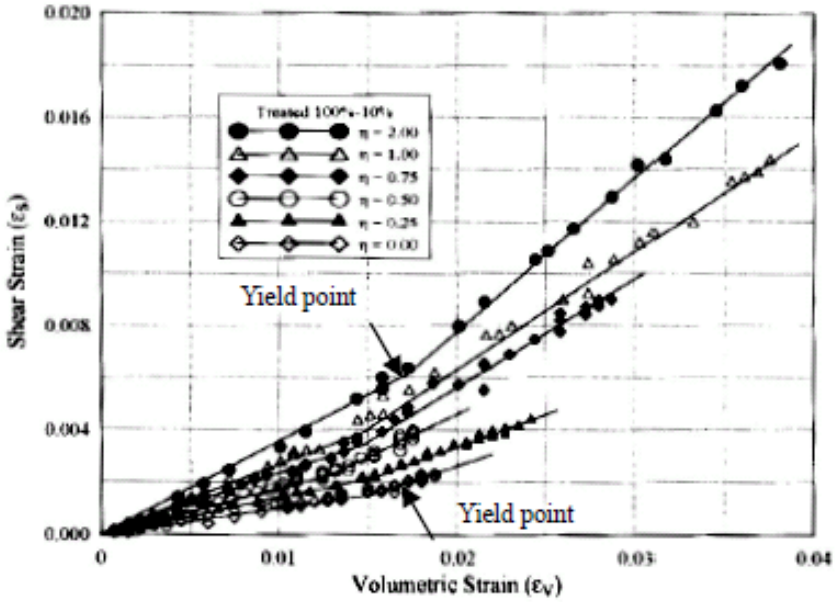


2.23g - Προσδιορισμός σημείου διαρροής κατά Malandraki (1996)



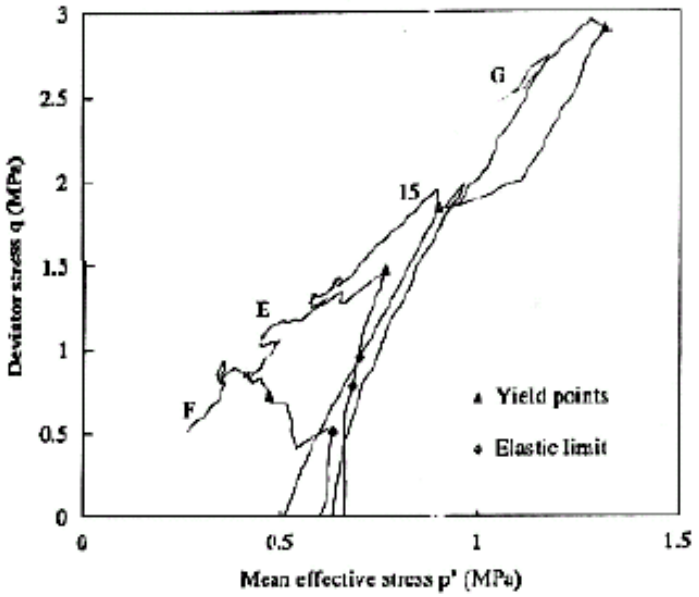
2.23h - Προσδιορισμός σημείου διαρροής κατά Cuccovillo & Coop (1997)

Υπάρχουν επίσης και άλλες μέθοδοι για τον ορισμό της «διαρροής» στα εδάφη. Για παράδειγμα οι Bergado κ.ά. (2006) ορίζουν τη «διαρροή» της μαλακής αργίλου του Μπανγκόκ βελτιωμένης με τσιμέντο, στο διάγραμμα διατμητικής παραμόρφωσης προς ογκομετρική παραμόρφωση. Παρατήρησαν ότι αυτή η σχέση είναι δι-γραμμική και όρισαν ως σημείο διαρροής το σημείο μετάβασης (από τη μία ευθεία στην άλλη) (Σχήμα 2.23i).



2.23i - Προσδιορισμός σημείου διαρροής κατά Bergado κ.ά.(2006)

Ο Airey (1993) χρησιμοποίησε τη διαδρομή τάσεων ισότροπα στερεοποιημένης αστράγγιστης τριαξονικής δοκιμής (CIU) για να ορίσει το σημείο διαρροής φυσικά σιμεντωμένου ανθρακικού εδάφους. Στο χώρο τάσεων, το σημείο μετάβασης της διαδρομής ενεργών τάσεων, στις περισσότερες περιπτώσεις ορίζεται ως σημείο διαρροής (Σχήμα 2.23j).



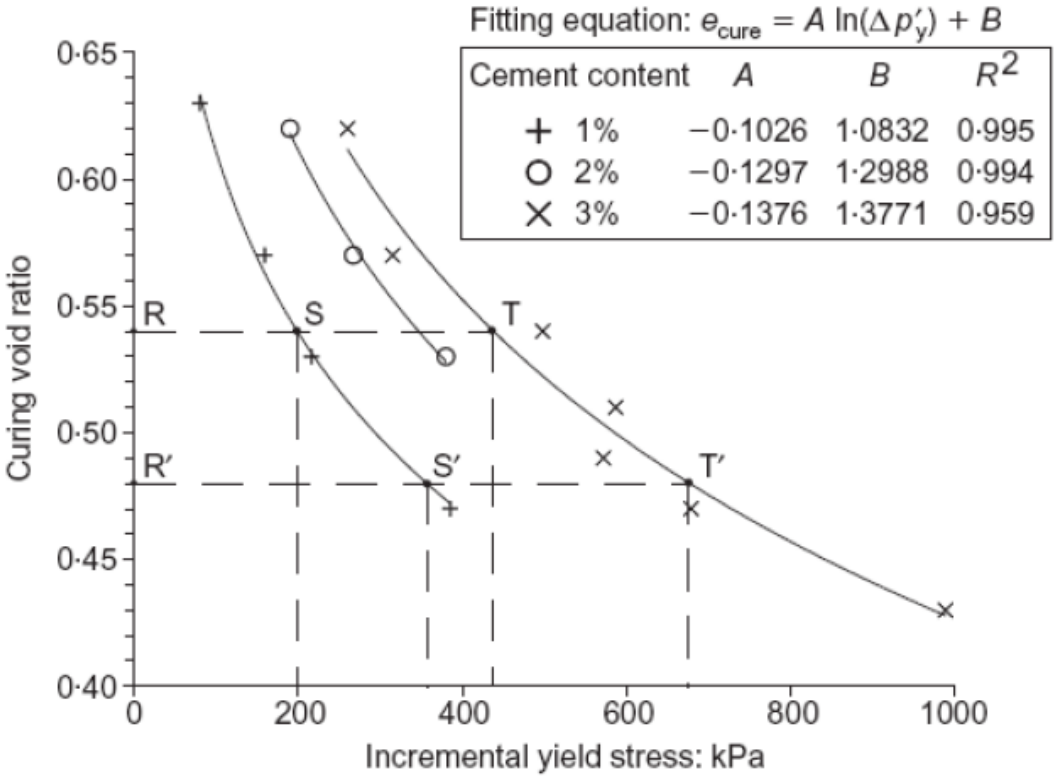
2.23j - Προσδιορισμός σημείου διαρροής κατά Airey (1993)

Οι Coop και Atkinson (1996) αναφέρουν ότι, σε χαμηλές πλευρικές τάσεις, η διάτμηση σιμεντωμένων ανθρακικών άμμων, μπορεί να δώσει τάση διαρροής

υψηλότερη από την αντίστοιχη τάση στην περιβάλλουσα αστοχίας σε τριβή του μη σιμεντωμένου εδάφους. Επίσης ότι η συνέχιση της φόρτισης οδηγεί σε χαλάρωση λόγω παραμόρφωσης. Ενώ σε υψηλές πλευρικές τάσεις, η διαρροή συμβαίνει σε θλίψη, η αντοχή είναι τριβής και το υλικό εμφανίζει εργοκράτυνση.

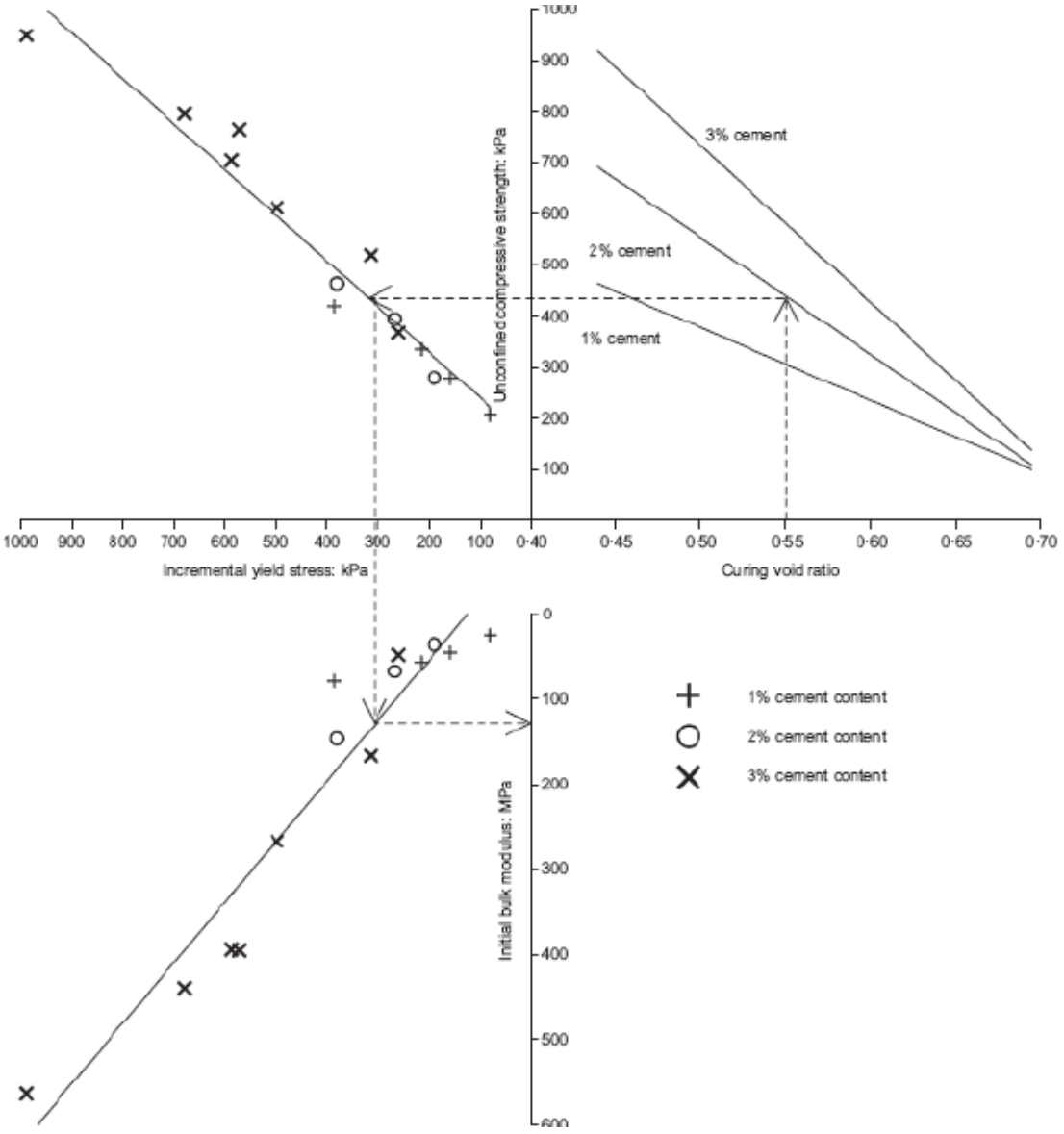
Οι Cuccovillo και Coop (1997) αναφέρουν τη συμπεριφορά δύο άμμων με δομή σε τριαξονικές δοκιμές θλίψης για ευρύ φάσμα πλευρικών τάσεων. Παρατήρησαν ότι η καταστροφή των δεσμών επιφέρει τη σταδιακή μετατροπή του δομημένου υλικού σε υλικό με συμπεριφορά τριβής, προκαλώντας τη μεταβολή της τάσης διαρροής και της διατμητικής δυσκαμψίας (δυστμησίας). Τέλος πρότειναν ότι, καθώς προχωρούσε η καταστροφή των δεσμών, η μεταβολή της διατμητικής δυσκαμψίας φαινόταν ότι εξαρτάται από το ποιό δομικό χαρακτηριστικό υπερίσχυε.

Ωστόσο, όλες οι παραπάνω έρευνες, διεξήχθησαν υπό ορισμένες μόνο συνθήκες, χωρίς να εξετάζουν την επίδραση διάφορων παραγόντων, όπως οι αναλογίες μίξης (του συνδετικού υλικού) και το επιβαλλόμενο φορτίο κατά την ωρίμανση. Οι Rotta κ.ά. (2003) παρατήρησαν ότι για τεχνητά σιμεντωμένα εδάφη, η μεταβολή της τάσης διαρροής σε σχέση με το λόγο κενών και την περιεκτικότητα σε τσιμέντο εξαρτάται από την ιστορία της τάσης ωρίμανσης (Σχήμα 2.24).



Σχήμα 2.24 – Μεταβολήτης τάσης διαρροής σε σχέσημετο λόγο κενών με τον χρόνο ωρίμανσης και το ποσοστό τσιμέντου (Rottaκ.ά., 2003).

Οι Consoli κ.ά. (2006) αναφέρουν ότι προέκυψεμία μοναδική σχέση μεταξύ τάσης διαρροής, αντοχής σε ανεμπόδιστη θλίψη και μέτρου ογκομετρικής παραμόρφωσης, ανεξάρητα από το ποσοστό τσιμέντου (Σχήμα 2.25). Από την άλλη πλευρά, η σχέση μεταξύ αρχικού μέτρου ογκομετρικής παραμόρφωσης και τάσης αρχικής διαρροής, βρέθηκε ότι εξαρτάται από το ποσοστό τσιμέντου. Ωστόσο, οι έρευνές τους, όπως και των Coop και Atkinson (1996) και Cuccovillo και Coop (1997), εστιάζονται μόνο σε ασθενώς σιμεντωμένα εδάφη, τα οποία αποσκοπούσαν στην προσομοίωση φυσικά σιμεντωμένων εδαφών.



Σχήμα 2.25: Σχέση αρχικού λόγου κενών μετά την ωρίμανση, αντοχής σε ανεμπόδιστη θλίψη, τάσης διαρροής και μέτρου ογκομετρικής παραμόρφωσης (Consolικ.ά., 2006)

Όπως προαναφέρθηκε, ορισμένες έρευνες έχουν διεξαχθεί σε εδάφη βελτιωμένα με τσιμέντο, τα οποία συχνά είναι ισχυρότερα σιμεντωμένα απότις φυσικές αργίλους (Uddin κ.ά. 1997, Tan κ.ά.2003, Chew κ.ά. 2004, Horpibulsuk κ.ά. 2004, Lee κ.ά. 2005, Chin2006). Οι έρευνες των Tan κ.ά. (2003) και Lee κ.ά. (2005) αφορούσαν κυρίως τη δοκιμή ανεμπόδιστης θλίψης. Οι έρευνες των Uddin κ.ά. (1997), Horpibulsuk κ.ά. (2004) και Chew κ.ά. (2004) περιλάμβαναν και ορισμένες αστράγγιστες τριαξονικές δοκιμές σε στερεοποιημένα δοκίμια, οι οποίες όμως δεν συμπληρώθηκαν με αντίστοιχες στραγγιζόμενες δοκιμές, εξέταση σε ηλεκτρονικό μικροσκόποιο σάρωσης και άλλες δοκιμές, οι οποίες όπως έδειξε η έρευνα Chin(2006), είναι κρίσιμες για την κατανόηση των μικροδομικών μεταβολών που συμβαίνουν στη διάρκεια της διάτμησης.

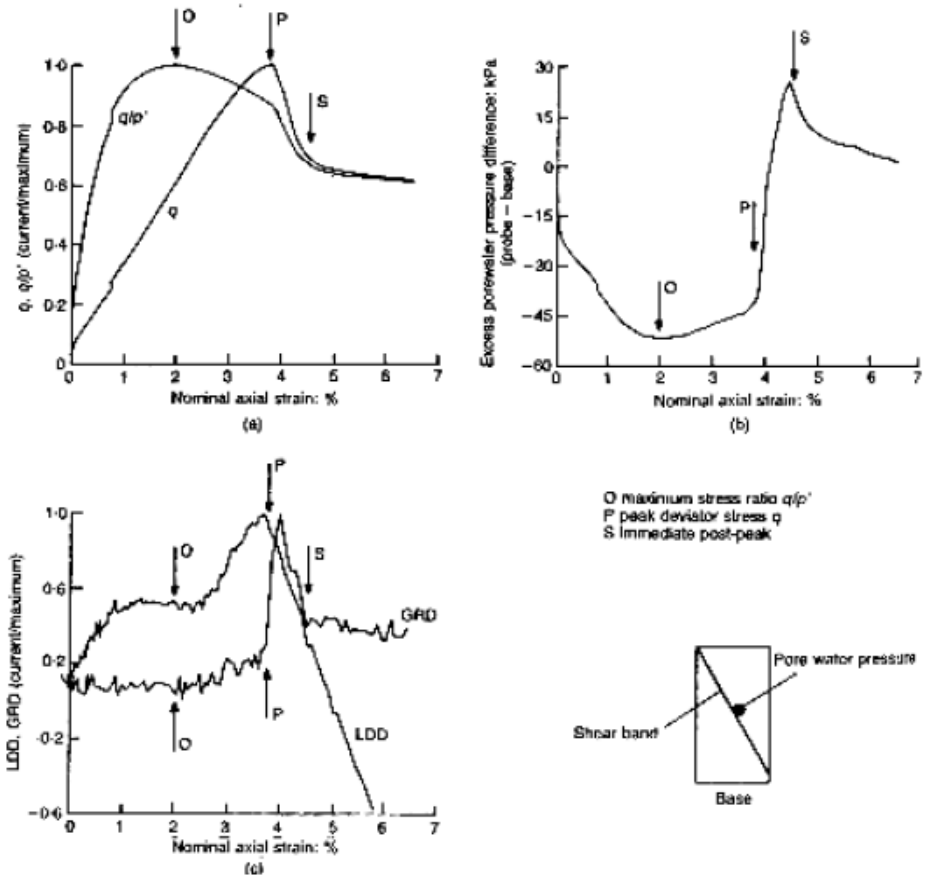
Επειδή η επιφάνεια αρχικής διαρροής ελαφρά σιμεντωμένων εδαφικών υλικών, δεν έχει ορισθεί μέχρι σήμερα και επίσης η εξέλιξή της μετά τη διαρροή δεν έχει μελετηθεί για μίγματα με διαφορετικές αναλογίες, παραμένει κατά μεγάλο μέρος άγνωστη η διαφορά συμπεριφοράς μετά τη διαρροή. Συνεπώς, απαιτείται η διερεύνηση της εξέλιξης της επιφάνειας διαρροής στη διάρκεια της διάτμησης πριν τη μέγιστη αντοχή, ώστε να είναι δυνατή η περιγραφή της συμπεριφοράς σε διάτμηση σε αυτό το στάδιο. Αν και παρατηρείται πολύ συχνά το φαινόμενο της χαλάρωσης, σε εδάφη βελτιωμένα με τσιμέντο, ωστόσο παραμένει ακόμη άγνωστο το ποιός είναι ο καθοριστικός παράγων για την εμφάνιση αυτής της συμπεριφοράς. Ο προσδιορισμός αυτού του παράγοντα αποτελεί και ένα από τα μέρη της εργαστηριακής εργασίας της παρούσας έρευνας.

2.5.6 Χαλάρωση και Συμπεριφορά μετά τη Μέγιστη Αντοχή Τεχνητά Σιμεντωμένων Εδαφών

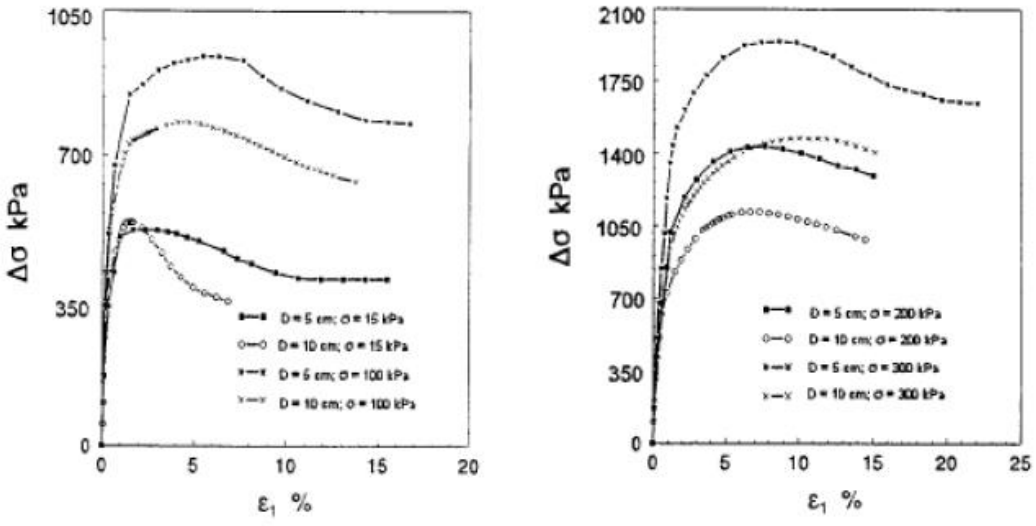
Υπάρχει σημαντικό πλήθος ερευνών για τη χαλάρωση των σιμεντωμένων εδαφών. Οι Georgiannou & Burland (2001) αναφέρουν ότι η ψαθυρή συμπεριφορά σε διάτμηση στιφρών φυσικών αργίλων, σε δοκιμές τριαξονικής θλίψης με χαμηλές έως ενδιάμεσες πλευρικές πιέσεις, προκύπτει λόγω του εντοπισμού (περιορισμού) της παραμόρφωσης στην επιφάνεια ολίσθησης όπου αναπτύσσεται η μέγιστη αντοχή, και στη συνέχεια στην ολίσθηση, κατά μήκος της προκύπτουσας επιφάνειας ολίσθησης, προσεγγιστικά άκαμπτων τεμαχών. Παρατηρήθηκε ότι, μετά από παραμόρφωση μερικών χιλιοστών του μέτρου, η διατμητική αντοχή μειώνεται ταχύτατα από τη

μέγιστη τιμή της σε μία πρακτικά σταθερή τιμή, στην οποία προσδόθηκε από τον Burland (1990) ο όρος «αντοχή μετά τη θραύση» (post-rupturestrength). Οι ανωτέρω ερευνητές, πρότειναν την υπόθεση ότι, η ταχεία απώλεια αντοχής μετά τη μέγιστη τιμή της, προκύπτει κατά κύριο λόγο από αλλαγές στη μικροδομή, οφειλόμενες κυρίως στη θραύση δεσμών μεταξύ σωματιδίων. Επίσης πρότειναν ότι είναι αναμενόμενο, αυτή η διαδικασία χαλάρωσης μάλλον να είναι περισσότερη δραματική, από εκείνη που οφείλεται στο πολύ γνωστό φαινόμενο δημιουργίας ζωνών διάτμησης (shearbands) σε υπερστερεοποιημένα ανασυνεστημένα εδάφη, και η οποία οφείλεται κυρίως στη διαστολικότητα (dilation), την απώλεια αλληλεμπλοκής και την τοπική στράγγιση, χωρίς όμως τη θραύση δεσμών (Atkinson&Richardson, 1987). Επιπλέον, παρατήρησαν ότι όταν συμβαίνει ο εντοπισμός (περιορισμός) της παραμόρφωσης στο επίπεδο ολίσθησης, όπως γίνεται συχνά, τότε οι μετρήσεις μεταβολής του όγκου δεν είναι πλέον αντιπροσωπευτικές.

Στο Σχ. 2.26, οι Viggiani κ.ά. (1993) προτείνουν ότι ο εντοπισμός της παραμόρφωσης ξεκινάει από τη μέγιστη τιμή του λόγου q/p’, που συμβαίνει πριν τη μέγιστη αντοχή, και συνεχίζεται μέχρι αυτήν. Επίσης έχουν διεξαχθεί ορισμένες έρευνες για την επίδραση του μεγέθους και της λεπτότητας (=ύψους/διάμετρο) του δοκιμίου στη συμπεριφορά των σιμεντωμένων εδαφών. Οι Abdulla κ.ά. (1997) εντόπισαν πιθανές επιδράσεις του μεγέθους και της λεπτότητας στα χαρακτηριστικά τάσης-παραμόρφωσης-αντοχής σιμεντωμένων άμμων. Αυτοί αναφέρουν ότι μικρότερα δοκίμια με ίδια λεπτότητα επιδεικνύουν μεγαλύτερη δυσκαμψία και αντοχή από τα μεγαλύτερα δοκίμια, όταν ακολουθούν παρόμοιες διαδρομές τάσεων (Σχ. 2.27). Η διάτμηση κοντύτερων δοκιμίων αποδίδει σημαντικά μικρότερο όγκο αποδομημένου υλικού, προσφέροντας πιο αντιπροσωπευτική απόκριση του υλικού (Σχ. 2.27). Οι ίδιοι προτείνουν ότι ίσως είναι προτιμότερα μεγάλα δοκίμια, με λεπτότητα ένα, εφόσον ληφθούν τα κατάλληλα μέτρα λίπανσης των εδράσεων τους.



Σχήμα 2.26: Αστράγγιστη τριαξονική θλίψη αργίλου Todi: σχέση τάσεων-παραμορφώσεων, διαφοράς πίεσης πόρων και δεικτών ομοιογένειας της παραμόρφωσης (Viggiani κ.ά., 2003)

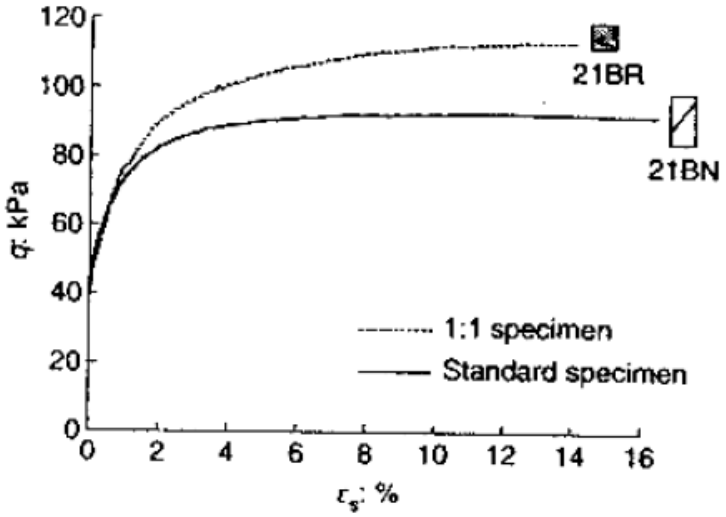


(a) χαμηλήπλευρικήτάση (b) υψηλήπλευρικήτάση

Σχήμα 2.27 – Επίδραση του μεγέθους δοκιμίου, για λόγο ύψους προς διάμετρο 1:1, στην συμπεριφορά σε τριαξονική καταπόνηση (κατά Abdulha & Panos, 1997)

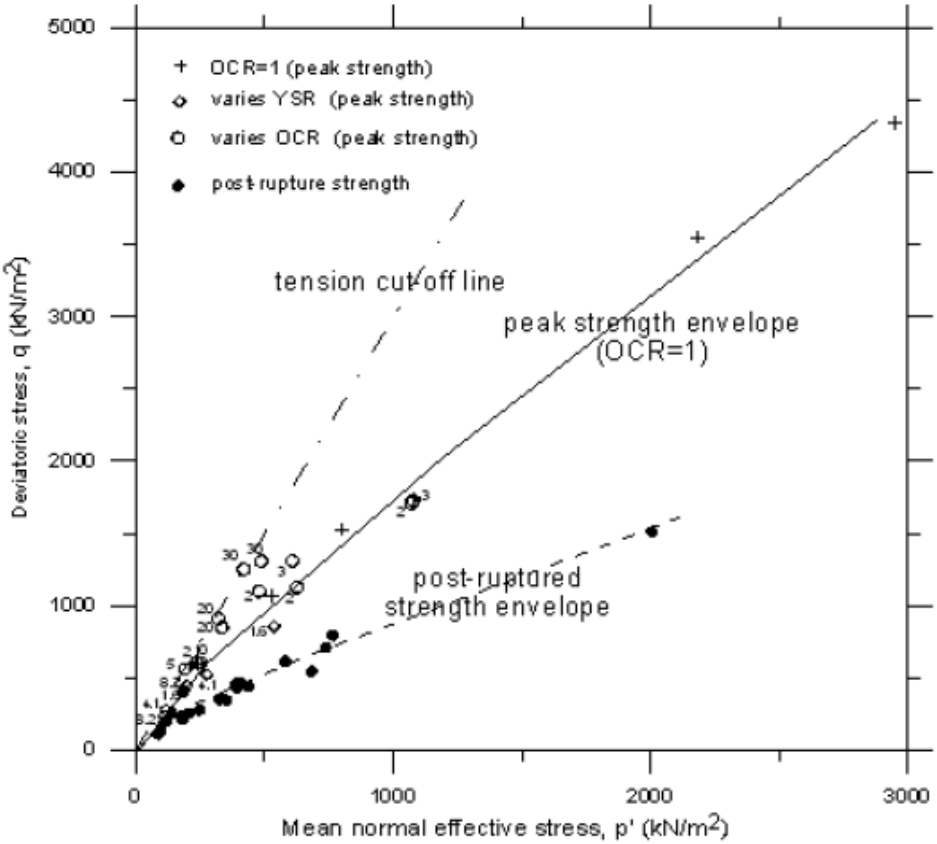
Οι Callisto και Calabresi (1998) εκτέλεσαν συμβατικές τριαξονικές δοκιμές, σε δοκίμια με διάμετρο/ύψος=1 με λίπανση των εδράσεων τους, και βρήκαν ότι δεν ήταν κινηματικά δυνατή η ανάπτυξη της συνηθισμένης επιφάνειας θραύσης.

Αντ΄αυτού, οι παραμορφώσεις κατά την αστοχία ήταν περισσότερο ομοιόμορφες (Σχ. 2.28), γεγονός παρόμοιο με αυτό που παρατηρείται σε «πραγματικά τριαξονικές» δοκιμές. Παρατήρησαν επίσης ότι, αν και το αρχικό τμήμα του διαγράμματος q-ε, είναι αρκετά παρόμοιο με εκείνο του συμβατικού δοκιμίου με ύψος/διάμετρο=2 και τραχεία έδραση (χωρίς λίπανση), ωστόσο οι αντοχές που μετρήθηκαν στις δύο δοκιμές είναι αρκετά διαφορετικές.



Σχήμα 2.28-Επίδραση της λεπτότητας του δοκιμίου στα αποτελέσματα τριαξονικής δοκιμής με σταθερή p' (Callisto και Calabresi, 1998)

Οι Rouainia και Wood (2000) επισήμαναν ότι, μόνον αν η εκτελούμενη δοκιμή καταστρέψει συστηματικά τη δομή ολόκληρου του δοκιμίου, τότε η κατάσταση του φυσικού εδάφους μπορεί να πλησιάσει ασυμπτωτικά την κατάσταση υλικού χωρίς δομή.Ο εντοπισμός της παραμόρφωσης στην επιφάνεια ολισθησης εμποδίζει την περαιτέρω ομοιογενή καταστροφή της δομής, και συνεπώς η πλήρης απώλεια της δομής συμβαίνει μόνο μέσα στη ζώνη της συγκεντρωμένης διάτμησης. Οι Cotecchia και Chandler (1997) επισήμαναν επίσης ότι τα αποτελέσματά τους ίσως υποδηλώνουν ότι το υλικό στο επίπεδο θραύσης έχει παρόμοια υφή με εκείνη του ανασυνεστημένου υλικού, όμως αυτό ίσως δεν συμβαίνει πάντα.



Σχήμα 2.29 – Περιβάλλουσα αντοχής μετά τη θραύση για δείγματα με αναλογίες ανάμιξης εδάφους:τσιμέντου:ύδατος 5:1:6 (κατάChin, 2006)

Οι Kasam κ.ά. (2000) βρήκαν ότι, στο επίπεδο p'-q, η γραμμή κατάστασης αστοχίας μίας ελαφρά σιμεντωμένης αργίλου, είναι παράλληλη με της μη σιμεντωμένης αργίλου, ενώ στο διάγραμμα e-lnp', η κλίση της είναι πιο απότομη από της μη σιμεντωμένης αργίλου. Αντίθετα, ο Chin (2006) παρατήρησε η περιβάλλουσα θραύσης μίας τεχνητά ισχυρά σιμεντωμένης αργίλου είναι καμπύλη και όχι ευθεία γραμμή (Σχ. 2.29). Ωστόσο η εντατική κατάσταση στο επίπεδο ολίσθησης δεν μπορεί να καθορισθεί πλήρως. Αντίστοιχα, και η γραμμή κρίσιμης κατάστασης δεν μπορεί να ορισθεί με σαφήνεια. Ο Chin (2006) πρότεινε επίσης ότι, ένα κατάλληλο κριτήριο που διέπει την έναρξη της χαλάρωσης, είναι ο λόγος η=q/p'. Ωστόσο, οι ενδείξεις των δεδομένων του δεν είναι καθοριστικές και το συμπέρασμα του δεν είναι αξιόπιστο, λόγω του σχηματισμού ζώνης διάτμησης, και άρα απαιτούνται περαιτέρω δεδομένα για να επιβεβαιωθεί. Συμπερασματικά, απαιτείται περαιτέρω έρευνα για να διερευνήσει τα σχετικά θέματα, όπως το επικρατέστερο κριτήριο χαλάρωσης και η συμπεριφορά χαλάρωσης μετά τη μέγιστη αντοχή ενός σιμεντωμένου εδάφους.

2.6 Καταστατικά Προσομοιώματα σε Εδαφικά Υλικά με Δομή

Τατελευταία30 έτη, υπήρξαν σημαντικές εξελίξεις στην ανάπτυξη καταστατικών προσομοιωμάτων τα οποία ενσωματώνουν την επίδραση της δομής του εδάφους (π.χ. Wong&Mitchell, 1975,Oka και Adachi, 1985,Hirai κ.ά., 1989,Gens και Nova, 1993,Chazallon and Hicher, 1995, 1998, Wheeler 1997, Kasama κ.ά., 2000, Rouania και Muir Wood, 2000, Kavvadas και Amorosi, 2000, Vatsala κ.ά., 2001, Liu και Carter, 2002, Lee κ.ά., 2004, Baudet και Stallebrass, 2004, Horpibulsuk κ.ά., 2009). Πολλοί ερευνητές χρησιμοποίησαν μεγεθυμένη επιφάνεια διαρροής για να προσομοιώσουν την επίδραση της δομής (π.χ. Rouainia και Muir Wood, 2000, Kavvadas και Amorosi, 2000, Liu και Carter, 2002, Asaoka κ.ά., 2000, Baudet και Stallebrass κ.ά., 2004).

Η θέση και το μέγεθος της επιφάνειας διαρροής δομημένου εδάφους, αλλάζει με την απώλεια δομής ή τη σιμέντωση. Όταν το έδαφος απωλέσει τελείως τη δομή του, η επιφάνεια διαρροής συμπίπτει με εκείνη του μη δομημένου ή ανασυνεστημένου εδάφους. Για παράδειγμα, ο Muir Wood (1995) πρότεινε καταστατικό προσομοίωμα για δομημένο έδαφος βασισμένο στο προσομοίωμα Αργίλου Cam τροποποιημένου για κινηματική κράτυνση. Η επιφάνεια διαρροής δομημένου εδάφους είναι η διεσταλμένη ελλειπτική επιφάνεια αναφοράς της Αργίλου Cam. Η εξέλιξη της επιφάνειας διαρροής του δομημένου εδάφους ελέγχεται από μία παράμετρο δομής και από την τάση προστερεοποίησης, η οποία αλλάζει με την πλαστική παραμόρφωση. Οι Liu και Carter (2002) επίσης πρότειναν προσομοίωμα Δομημένης Αργίλου διαστέλοντας την Τροποποιμένη επιφάνεια διαρροής Αργίλου σε επιφάνεια διαρροής δομημένου εδάφους. Σε αυτό το προσομοίωμα, η δομημένη Άργιλος Cam εξιδανικεύεται σε ισότροπα κρατυνόμενο και αποδομούμενο υλικό.

Πολλά προσομοιώματα δεν περιλαμβάνουν την εφελκυστική αντοχή (π.χ. MuirWood, 1995,Liu and Carter, 2002,Asaokaκ.ά., 2000,Baudet and Stallebrassκ.ά., 2007). Σε αυτά τα προσομοιώματα, η επιφάνεια διαρροής για το δομημένο έδαφος είναι η μεγεθυμένη επιφάνεια διαρροής για το μη σιμεντωμένο ή ανασυνεστημένο έδαφος. Καθώς η επιφάνεια διαρροής δομημένου εδάφους, διέρχεται από την αρχή των αξόνων του χώρου των τάσεων, το αποτέλεσμά της είναι ουσιαστικά η αύξηση της πίεσης «προστερεοποίησης» (συχνά επονομαζόμενης «τάση ισότροπης διαρροής», καθώς στην πραγματικότητα δεν υφίσταται υπερστερεοποίηση), προκαλώντας στο έδαφος επιρροή παρόμοια με της υπερστερεοποίησης. Συνεπώς, το

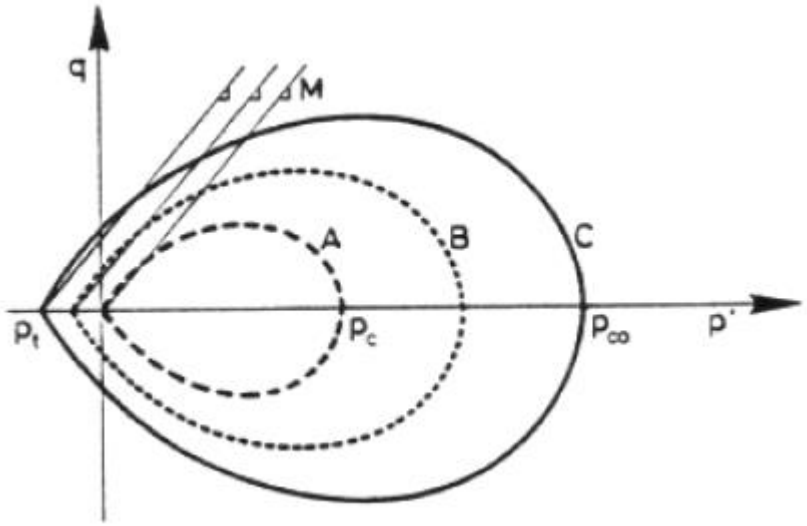
αποτέλεσμα που έχει η δημιουργία δομής θεωρείται ισοδύναμο με της υπερστερεοποίησης.

Ορισμένα καταστατικά προσομοιώματα προσομοιώνουν την εφελκυστική αντοχή (π.χ. Liu κ.ά., 2006,Horpibulsuk κ.ά., 2009,Lee κ.ά., 2004,Rouainia και MuirWood, 2000,Kavvadas και Amorosi, 2000,Gens και Nova, 1993,Lagioia και Nova, 1993, 1995). Μία συνηθισμένη μέθοδος για να επιτευχθεί αυτό, είναι να μετατεθεί αριστερά η επιφάνεια διαροής του δομημένου υλικού, ώστε ένα μέρος της να καλύπτει την περιοχή εφελκυσμού στο χώρο των τάσεων. Όπως στα προσομοιώματα χωρίς εφελκυστική αντοχή, η θέση και το μέγεθος της επιφάνειας διαρροής για δομημένο έδαφος, επίσης αλλάζει με την καταστροφή της δομής ή των δεσμών και τελικά συμπίπτει με την επιφάνεια διαρροής για μη δομημένο ή ανασυνεστημένο έδαφος. Για παράδειγμα, οι Gens και Nova (1993) πρότειναν ένα καταστατικό προσομοίωμα για δομημένα εδάφη και μαλακούς βράχους περιλαμβάνοντας μία μοναδική επιφάνεια διαρροής και μη-συναρτημένο νόμο πλαστικής ροής. Η εξέλιξη της επιφάνειας διαρροής ελέγχεται από την ογκομετρική κράτυνση (όπως σε μη δομημένα εδάφη) και τη διάσπαση των δεσμών. Σε υψηλή πλευρική πίεση, η επιφάνεια διαρροής αρχικά μετατίθεται δεξιά (για να προσομοιώσει τη μείωση της εφελκυστικής αντοχής) και διαστέλλεται. Καθώς η πλαστική παραμόρφωση συνεχίζει να αυξάνεται, η επιφάνεια διαρροής συνεχίζει να κινείται προς τα δεξιά, αλλά μειώνεται σε μέγεθος. Σε χαμηλή πλευρική πίεση, η αρχική φάση διαστολής δεν συμβαίνει.

Οι Wong και Mitchell (1975) δημιούργησαν ένα οιονεί ελαστικό προσομοίωμα με εργοκρά-τυνση (work-hardening plastic model) για ευαίσθητη σιμεντωμένη άργιλο. Στην οιονεί ελαστική (quasi-elastic) περιοχή, το έδαφος δύναται να θεωρηθεί ισότροπο, αλλά οι σχετικές παράμετροι εξαρτώνται από τις τάσεις. Η αρχική διαρροή συναρτάται με την καταστροφή των δεσμών σιμέντωσης και ορίζεται μία μοναδική περιβάλλουσα διαρροής, ανεξάρτητη της διαδρομής τάσεων. Η περιβάλλουσα μετά τη διαρροή διαστέλλεται με ογκομετρική κράτυνση, και θεωρώντας ότι το σχήμα της παραμένει ίδιο. Ωστόσο, η επιφάνεια διαρροής αναπτύχθηκε με βάση εργαστηριακά καθορισμένο μη συναρτημένο νόμο πλαστικής ροής.

Δύο παραδείγματα καταστατικών προσομοιωμάτων, τα οποία εισάγουν ρητά τη δομή και την καταστροφή της δομής σε ελαστο-πλαστικό πλαίσιο με μοναδική περιβάλλουσα διαρροής, παρέχονται χωριστά από τους Oka κ.ά. (1985) και Gens και Nova (1993). Οι Gens και Nova (1993) παρουσίασαν ένα εννοιολογικό πλαίσιο για την ελαστο-πλαστική προσομοίωση σιμεντωμένων εδαφών. Θεώρησαν ότι η επιφάνεια διαρροής έχει το ίδιο σχήμα

όπως εκείνη του μη σιμεντωμένου εδάφους, αλλά με μεγέθυνση για να λάβει υπόψη την πρόσθετη αντοχή που παρέχουν οι δεσμοί (Σχήμα 2.30).



Σχήμα 2.30 – Διαδοχικές επιφάνειες διαρροής για αυξανόμενο βαθμό σύνδεσης. Η επιφάνεια Α αντιστοιχεί σε ασύνδετο υλικό κατά Gens και Nova, 1993

Οι Kavvadas και Amorosi (2000) πρότειναν ένα καταστατικό προσομοίωμα για δομημένο έδαφος με περιβάλλουσα αντοχής δεσμών (Bond Strength Envelope, BSE) η οποία είναι ουσιαστικά μία εξωτερική περιβάλλουσα για δομημένο έδαφος. Συγκρινόμενο με το προσομοίωμα των Gens και Nova (1993), αυτό το προσομοίωμα απαιτεί δύο επιφάνειες διαρροής. Η εσωτερική επιφάνεια οριοθετεί την ελαστική και πλαστική κατάσταση. Η εξωτερική επιφάνεια ελέγχεται από την αντοχή των δεσμών. Η εξέλιξη της επιφάνειας διαρροής ελέγχεται από δύο κανόνες κράτυνσης. Ο πρώτος κανόνας, κινηματικής κράτυνσης, ελέγχει τη θέση της επιφάνειας, ενώ ο δεύτερος κανόνας, ισότροπης κράτυνσης, ελέγχει το μέγεθος της επιφάνειας διαρροής του δομημένου εδάφους. Η κινηματική κράτυνση έχει δύο συνιστώσες. Η ογκομετρική συνιστώσα προσομοιώνει την εγγενή ογκομετρική κράτυνση και την αποδόμηση η οποία προκαλείται από την ογκομετρική παραμόρφωση. Αυτή η συνιστώσα είναι παρόμοια με το προσομοίωμα των Gens και Nova (1993), και των Lagioia και Nova (1995). Η αποκλίνουσα συνιστώσα προσομοιώνει την αποδόμηση η οποία προκαλείται από τη διάτμηση. Αυτό επιτρέπει στην επιφάνεια διαρροής να μειώνει το μέγεθος της με την πλαστική διατμητική παραμόρφωση.

Οι Oka και Adachi (1985) και οι Adachi και Oka (1995) ανέπτυξαν προσομοίωμα για να περιγράψουν την απόκριση χαλάρωσης λόγω παραμόρφωσης μαλακής αργίλου ή μαλακών βράχων εισάγοντας τανυστή ιστορίας τάσεων. Η αντοχή του υλικού αποτελείται από δύο συνιστώσες : αντοχή τριβής και αντοχή σιμέντωσης ή συνοχή. Η συνιστώσα τριβής θεωρείται

ότι είναι κάποιο κλάσμα της συνολικής τάσης. Ο νόμος χαλάρωσης ή αποδόμησης και ο νόμος πλαστικής ροής, εφαρμόζονται σε σχέση με τις συνδυασμένες τάσεις, χαρακτηριστικό το οποίο είναι παρόμοιο με του προσομοιώματος των Gens και Nova (1993).

Οι Burland (1990), Leroueil και Vaughan (1990), Chandler (2000) και πολλοί άλλοι έχουν δείξει ότι οι ιδιότητες ενός ανασυστημένου εδάφους (ονομαζόμενες εγγενείς ιδιότητες) αποτελούν ένα χρήσιμο πλαίσιο αναφοράς για την ερμηνεία της συμπεριφοράς του σχετιζόμενου φυσικού αδιατάρακτου εδάφους. Ειδικότερα, ένα τέτοιο πλαίσιο αναφοράς δύναται να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση της επίδρασης της μικροδομής (δηλαδή υφής και σύνδεσης) στο φυσικό υλικό, και της προοδευτικής καταστροφής της στη διάρκεια της φόρτισης και διάτμησης.

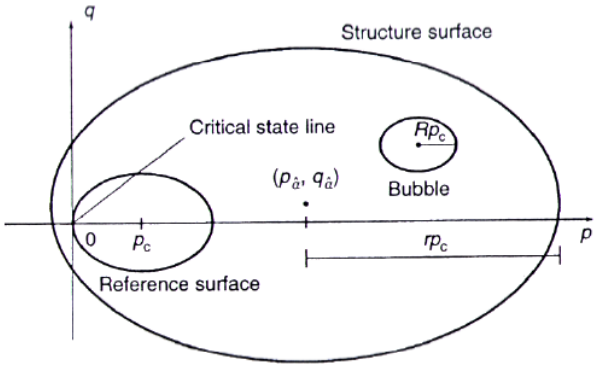
Οι Rouainia και Wood (2000) βασισμένοι στο προσομοίωμα του Wood (1995), ανέπτυ-ξαν ένα προσομοίωμα για φυσικές αργίλους, εξαρτώμενο από το ρυθμό παραμόρφωσης, το οποίο δέχεται ότι το μέγεθος της επιφάνειας διαρροής για το δομημένο έδαφος (αναφερόμενη στο εξής και ως επιφάνεια δομής) εξαρτάται από την προεπιλεγμένη τιμή μίας παραμέτρου καταστροφής. Όπως δείχνει το Σχήμα 2.31, αυτό το προσομοίωμα εισάγει τρεις ελλειπτικές περιβάλλουσες στο επίπεδο (p΄-q). Αυτές οι τρεις περιβάλλουσες, περιλαμβάνουν:

(α) μία κινηματικά κρατυνόμενη «φούσκα» (kinematically hardening bubble), που διαχω-ρίζει τις περιοχές ελαστικής και πλαστικής απόκρισης και κινείται με την τρέχουσα τάση,

(β) μία επιφάνεια δομής η οποία ενεργεί ως επιφάνεια οριακής κατάστασης και περιλαμβάνει πληροφορίες για το τρέχον μέγεθος και την ανισοτροπία της δομής, και

(γ) μία επιφάνεια αναφοράς, η οποία αντιπροσωπεύει τη συμπεριφορά του ανασυστημένου ή πλήρως αναζυμωμένου εδάφους.

Καθώς επισυμβαίνει πλαστική παραμόρφωση, η επιφάνεια δομής (β) τείνει να καταρρεύσει προς την επιφάνεια οριακής κατάστασης (α). Η πτώση στην τιμή της δυσκαμψίας συμβαίνει όταν το έδαφος φθάσει στην πλαστική κατάσταση και η τρέχουσα τιμή της δυσκαμψίας εξαρτάται από κάποια μέτρηση της απόστασης μεταξύ κινηματικής επιφάνειας (α) και επιφάνειας δομής (β).



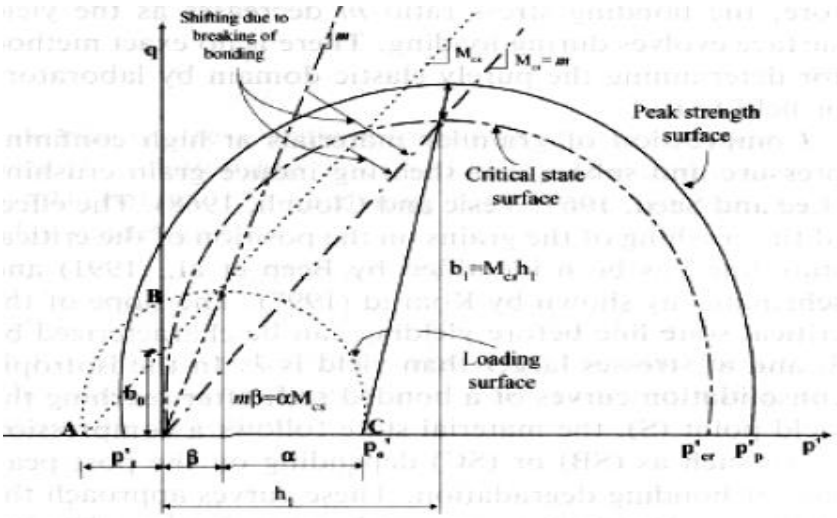
Σχήμα 2.31 – Επιφάνεια αναφοράς, επιφάνεια δομής, και επιφάνεια διαρροής μορφής φούσκας για το προσομοίωμα καταστροφής της δομής (κατά Rouaina και Wood, 2000)

Στα προσομοιώματα των Rouainia και Wood (2000), Oka κ.ά. (1985) και Gens&Nova (1993), οι ελαστικές ιδιότητες έχουν θεωρηθεί ότι παραμένουν σταθερές, και η καταστροφή της δομής περιλαμβάνεται στην πλαστική διατύπωση. Σε αντίθεση, οι Chazallon & Hicher (1995, 1998), εξετάζουν την εναλλακτική στρατηγική, να λάβουν υπόψη την καταστροφή της δομής μέσω μεταβολής των ελαστικών ιδιοτήτων, σύμφωνα με ένα θερμοδυναμικά αποδεκτό, ρυθμό απελεθέρωσης ενέργειας καταστροφής. Η συνολική συμπεριφορά εκφράζεται με το σιμεντωμένο και το μη σιμεντωμένο υλικό, και προσομοιώνεται αντίστοιχα.

Οι Liu&Carter (2002) επίσης εισήγαγαν την επίδραση της δομής στο Τροποποιημένο προσομοίωμα Αργίλου Cam. Θεώρησαν ότι ο λόγος κενών για δομημένο έδαφος στη διάρκεια της αρχικής συμπίεσης αποτελείται από δύο μέρη: ένα ελαστικό μέρος το οποίο εξαρτάται από την τρέχουσα μέση ενεργό τάση και ένα πλαστικό μέρος το οποίο εξαρτάται από το μέγεθος της τρέχουσας επιφάνειας διαρροής. Το πλαστικό μέρος υποδιαιρείται σε δύο συνιστώσες ένα μέρος συναρτημένο με τις εγγενείς ιδιότητες του εδάφους και το άλλο συναρτημένο με τη δομή του εδάφους. Κατά την αρχική διαρροή η επιφάνεια διαρροής περιλαμβάνει την τρέχουσα εντατική κατάσταση και διαστέλλεται ισότροπα, απεικονίζοντας την καταστροφή της δομής. Ωστόσο, αυτό το προσομοίωμα είναι κατάλληλο μόνο για φυσικά δομημένες αργίλους με αμελητέα ή ελαφρά σιμέντωση.

Οι Kasama κ.ά. (2000) πρότειναν ένα καταστατικό προσομοίωμα για άργιλο ελαφρά βελτιωμένη με τσιμέντο, θεωρώντας ότι η κατάσταση αστοχίας της είναι ίδια με εκείνη της μη βελτιωμένης αργίλου. Βασισμένοι σε παρόμοια παραδοχή, οι Lee κ.ά. (2004) πρότειναν ένα καταστατικό προσομοίωμα για άργιλο βελτιωμένη με τσιμέντο, εισάγοντας το λόγο τάσης σύνδεσης (των σωματιδίων) m και την παράμετρο κρίσιμης κατάστασης λ’ (Σχήμα 2.32). Αυτές οι παράμετροι χρησιμεύουν για την προσομοίωση της αύξησης της αρχικής δυσκαμψίας και διατμητικής αντοχής του βελτιωμένου με τσιμέντο εδάφους και την

επακόλουθη προοδευτική μείωση της δυσκαμψίας και αντοχής λόγω θραύσης των δεσμών ως αποτελέσματος της διάτμησης.



Σχήμα 2.32 – Επιφάνεια διαρροής για άργιλο βελτιωμένη με τσιμέντο (κατά Lee κ.ά., 2004)

Πιο πρόσφατα, οι Baudet και Stallebrass (2007) πρότειναν καταστατικό προσομοίωμα για τη δομική συνοχή. Αυτά τα προσομοιώματα, επίσης παραδέχονται ότι το σχήμα επιφάνειας διαρροής για δομημένο έδαφος είναι ίδιο με εκείνο για μη σιμεντωμένο ή ανασυνεστημένο έδαφος. Συνεπώς, από μόνη της η διεσταλμένη επιφάνεια διαρροής πιθανότατα δεν επαρκεί να προσομοιώσει τη συμπεριφορά αργίλου βελτιωμένης με τέφρα.

Μέχρι τώρα, οι περισσότεροι ερευνητές εστίαζαν σε φυσικά και τεχνητά εδάφη με ισχυρή δομή, χρησιμοποιώντας εργαστηριακά δεδομένα από αργίλους βελτιωμένες με τσιμέντο, ως συνδετικό υλικό, λόγω της ικανότητάς της να ανπτύσσει τα χαρακτηριστικά αντοχής σε υψηλές τιμές και με ταχύτητα. Τα προσομοιώματα τα οποία εξετάστηκαν παραπάνω, όταν εφαρμοστούν σε ελαφρώς σιμεντωμένη άργιλο υψηλής πλαστικότητας, ίσως εμφανίσουν διαφορετική συμπεριφορά όπως αλλάγή του σχήματος της επιφάνειας διαρροής με την αύξηση και το είδος του χρησιμοποιούμενου συνδετικού υλικού έχουν δύο μειονεκτήματα καθώς και πολλά από τα προσομοιώματα έχουν αρκετές παραμέτρους οι οποίες δεν μπορούν να εκτιμηθούν με ευκολία. Αυτό, σε ακραίες περιπτώσεις, μπορεί να οδηγήσει σε εσφαλμένα εκτιμημένες τιμές των παραμέτρων.

2.7 Σημαντικά Θέματα Έρευνας

2.7.1 Παρουσίαση των Θεμάτων

Με βάση την ανασκόπηση των προηγούμενων ενοτήτων, η παρούσα ενότητα παρουσιάζει ορισμένα σημαντικά θέματα σε σχέση με τις έρευνες για τη συμπεριφορά μαλακών αργίλων βελτιωμένων με ιπτάμενη τέφρα.

Πρώτον, οι γνώσεις για την αρχική διαρροή και την εξέλιξη της επιφάνειας διαρροής υπό εφελκυστική φόρτιση, για παράδειγμα τριαξονική εφελκυστική φόρτιση, είναι ακόμα ασαφείς. Ενώ τα εργαστηριακά τριαξονικά δεδομένα για άργιλο βελτιωμένη με τέφρα παραμένουν περιορισμένα, όπως έχει ήδη περιγραφεί σε προηγούμενες ενότητες του κεφαλαίου.

Δεύτερον, η επίδραση στην επιφάνεια διαρροής της αναλογίας εδάφους / τέφρας / ύδατος, της τάσης ωρίμανσης και άλων συνθηκών ωρίμανσης όπως ο χρόνος ωρίμανσης, είναι επίσης ασαφής (βλέπε ενότητα 2.5).

Τρίτον, οι συνθήκες οι οποίες διέπουν την αρχή της χαλάρωσης λόγω παραμόρφωσης σε αργιλικά εδάφη βελτιωμένα με ασθενή συνδετικά υλικά (π.χ. ιπτάμενη τέφρα), χρήζουν περαιτέρω έρευνας, καθώς η υπάρχουσα βιβλιογραφία δεν καλύπτει το θέμα αυτό.

2.7.2 Έκταση Εργασιών της Παρούσας Έρευνας

Αυτή η έρευνα, κατά μεγάλο μέρος εστίασε στη μηχανική συμπεριφορά της υψηλής πλαστικότητας αργίλου βελτιωμένης με ιπτάμενη τέφρα. Αρχικά μελετήθηκε η συμπεριφορά αργιλικών δειγμάτων βελτιωμένων με διαφορετικά ποσοστά τέφρας και υγρασίας, και σε διαφορετικές συνθήκες ωρίμανσης.

Η επίδραση της τάσης ωρίμανσης στην επιφάνεια αρχικής διαρροής ερευνήθηκε σε ισότροπες συνθήκες. Μελετήθηκε η συμπεριφορά μετά τη διαρροή και οι αλλαγές στην επιφάνεια διαρροής, σε δείγματα με διαφορετικές αναλογίες μίξης, καθώς επίσης το μέγεθος της επιρροής στις ιδιότητες της αργίλου, από την προσθήκη ή μη ιπτάμενης τέφρας.

Με βάση τις παρατηρήσεις των δοκιμών της παρούσας έρευνας, προτάθηκε μία θεωρία για ελαφρά σιμεντωμένες αργίλους υψηλής πλαστικότητας, με στόχο τη μόρφωση ενός πλαισίου μηχανικής συμπεριφοράς.

ΣΗΜΕΙΩΣΗ : Για συντομία, στο υπόλοιπο της Διατριβής, η ΙΠΤΑΜΕΝΗ ΤΕΦΡΑ, πολλές φορές θα αναφέρεται απλά ως ΤΕΦΡΑ.

3 ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ & ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ

Αυτό το Κεφάλαιο παρουσιάζει το πρόγραμμα δοκιμών του εργαστηριακού μέρους αυτής της έρευνας. Πρώτα εξετάζονται τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν και οι αναλογίες ανάμιξης του αργιλικού υλικού με την τέφρα. Ακολουθεί η παρουσίαση της διαδικασίας παρασκευής και προστερεοποίησης των δοκιμίων. Επίσης περιγράφεται η διαδικασία των δοκιμών, οι χρησιμοποιούμενες συσκευές, καθώς και οι φυσικές ιδιότητες των διάφορων μιγμάτων της βελτιωμένης αργίλου. Τέλος περιγράφεται η διαδικασία των αναλύσεων για τον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών μικροδομής, με Περίθλαση Ακτίνων Χ για τη βελτιωμένη άργιλο και με Πολωτικό Μικροσκόπιο για τη βελτιωμένη και τη μη βελτιωμένη άργιλο.

3.1 Εισαγωγή

Η ανάμιξη συνδετικών υλικών με ένα έδαφος επηρεάζει σε κυμαινόμενο βαθμό τις βασικές ιδιότητες του μη βελτιωμένου, μη σταθεροποιημένου εδάφους, όπως περιγράφεται με λεπτομέρεια στο Κεφάλαιο 2. Κατά το σχεδιασμό της βελτίωσης του εδάφους, οι ιδιότητες αντοχής και παραμόρφωσης τυπικά παρουσιάζουν το μεγαλύτερο ενδιαφέρον για τον προσδιορισμό του βαθμού βελτίωσης που απαιτείται. Ωστόσο, κατά την εκτίμηση των παραμέτρων αντοχής και παραμόρφωσης από διάφορες δοκιμές, είναι επίσης σημαντικό να εξετασθεί και η μεταβολή άλλων ιδιοτήτων και η πιθανή επίδρασή τους στη συμπεριφορά του σταθεροποιημένου εδάφους. Τέτοιες πιθανές επιδράσεις μπορούν να έχουν για παράδειγμα οι μεταβολές της υγρασίας, του βαθμού κορεσμού και της διαπερατότητας. Επιπρόσθετα, η βασική κατανόηση του είδους των χημικών αντιδράσεων οι οποίες λαμβάνουν χώρα και των ενώσεων που σχηματίζονται όταν χρησιμοποιείται συνδετικό υλικό (δηλ. τέφρα) είναι ουσιαστικής σημασίας για την ανάλυση της ταχύτητας και του τύπου των μεταβολών οι οποίες μπορεί να προκύψουν για τις ιδιότητες. Αυτό ισχύει και για τη χημική ανθεκτικότητα των σταθεροποιημένων εδαφών. Ωστόσο, τα θέματα χημικής ανθεκτικότητας δεν εξετάζονται στην παρούσα έρευνα.

3.2 Υλικά

3.2.1 Άργιλος Αγίου Στεφάνου

Η άργιλος που χρησιμοποιήθηκε σε αυτή την έρευνα ελήφθη από φρέατα και αποθέσεις υλικών από εκσκαφές στον Άγιο Στέφανο της ανατολικής Αττικής. Ειδικότερα, αυτή η άργιλος χρησιμοποιείται για την παραγωγή οπτόπλινθων της τοπικής κεραμοποιϊας «Φλεσσιόπουλου».

Από αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν στο Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών (ΙΓΜΕ) υπό την εποπτεία του γενικού διευθυντή κ. Γ. Οικονόμου, η ορυκτολογική σύνθεση του αργιλικού δείγματος χαρακτηρίζεται από γενικά υψηλή περιεκτικότητα σε ιλλίτη (περίπου 20-30%) και χαμηλή περιεκτικότητα σε καολινίτη, χλωρίτη και μοντμοριλλονίτη. Επίσης βρέθηκε υψηλό ποσοστό ανθρακικών ορυκτών στα φρέατα από τα οποία είχαν ληφθεί τα δείγματα, με μέση περιεκτικότητα 17.1%. Αντίθετα, το ποσοστό των οργανικών είναι χαμηλό και κυμαίνεται μεταξύ 1.5% και 4%. Συγκρίνοντας τα φυσικά χαρακτηριστικά και τις ιδιότητες διαφορετικών φυσικών αργίλων από την περιοχή της Χαλκίδας και της Αττικής, αποφασίσθηκε ότι η πλέον κατάλληλη για αυτή την έρευνα είναι η άργιλος του Αγίου Στεφάνου, καθώς είναι υψηλής πλαστικότητας, γεγονός το οποίο αποτελεί βασικό στοιχείο για τον προσδιορισμό του πλαισίου συμπεριφοράς μίας ελαφρά σιμεντωμένης αργίλου.

Οι βασικές ιδιότητες της αργίλου Αγίου Στεφάνου από δοκιμές που εκτελέστηκαν στο Εργαστήριο Θεμελιώσεων του ΕΜΠ, συνοψίζονται στον Πίνακα 3.1.

Ιδιότητα	Τιμή	Ιδιότητα	Τιμή
Όριο Υδαρότητας, LL (%)	72	Κοκκομετρική Διαβάθμιση:	
Όριο Πλαστικότητας, PL (%)	26	Άμμος (%)	8
Δείκτης Πλαστ/τητας, PI (%)	46	Ιλύς (%)	23
Επί τόπου Φυσ. Υγρ., w (%)	31	Άργιλος (%)	69
Δείκτης Υδαρότητας, I_L	0.11	Υγρ. Φαιν. Βάρος, γ_b (kN/m^3)	15.1
Αρχικός Λόγος Κενών, e_o	2.29	Ξηρ. Φαιν. Βάρος, γ_d (kN/m^3)	8.4
Ειδικό Βάρος Στερεών, Gs	2.78		

Πίνακας 3.1 – Βασικές ιδιότητες αργίλου Αγίου Στεφάνου

3.2.2 Ιδιότητες Τέφρας Πτολεμαίδας

Τα περισσότερα λιγνιτικά κοιτάσματα της Ελλάδας συναντώνται στη λεκάνη Φλώρινας-Πτολεμαΐδας-Κοζάνης. Στη μεγάλη αυτή περιοχή της Βόρειας Ελλάδας, γίνεται εντατική εκμετάλλευση με τη μέθοδο ανοικτής εξόρυξης και τροφοδοτούνται οι γειτονικοί ατμοηλεκτρικοί σταθμοί (ΑΗΣ) παραγωγής ενέργειας.

Η ελληνική τέφρα που παράγεται στους ΑΗΣ της Πτολεμαΐδας είναι τύπου C. Όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 2, η τέφρα τύπου C έχει υψηλό ποσοστό οξειδίου ασβεστίου (10%-35%), είναι ποζολανική και συγκολλητική και διαθέτει υδραυλικά χαρακτηριστικά.

Η τέφρα της Πτολεμαΐδας είναι ένα λεπτόκοκκο υλικό με κοκκομετρική σύνθεση που φαίνεται στον Πίνακα 3.2. Σύμφωνα με τους Koukouzas κ.ά. (2005), αυτός ο συγκεκριμένος τύπος τέφρας περιέχει υλικό λεπτότερο από τα 45μm σε ποσοστό ≥55%, με το υπόλοιπο υλικό να έχει διαβάθμιση 45-90μm. Επίσης περιέχει ύαλο από την οποία αποτελείται το μεγαλύτερο μέρος της μάζας της, ενώ επικρατούν φαινοκρύσταλλοι ορυκτών όπως χαλαζίας, άστριοι, γκελενίτης, ανυδρίτης, οξείδιο ασβεστίου, πορτλανδίτης και χλωρίτης (Πίνακας 3.3, Σχήματα 3.1 & 3.2).

Size of Granules	Fly ash samples				
	T1	T2	T5	T6	TA
< 45μm	56.1	64.7	63.3	57.7	60.6
45-90μm	43.9	35.3	36.7	42.3	39.4
Total	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0

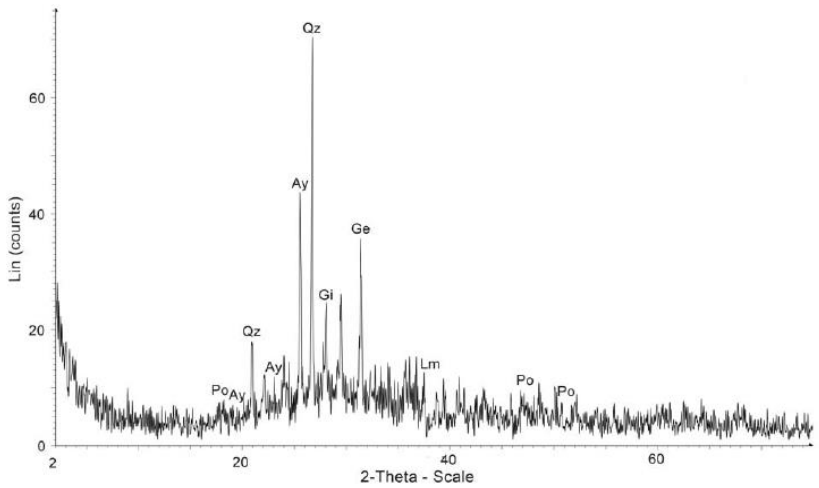
Πίνακας 3.2 – Κοκκομετρική σύνθεση κατά βάρος (%) της τέφρας Πτολεμαΐδας (Koukouzas κ.ά., 2005)

Mineral	Chemical formula	Fly Ash				
		T1	T2	T5	T6	TA
Quartz	SiO_2	+	+	+	+	+
Feldspars	$(Na,K)AlSi_3O_8$	+	+	+	+	+
Gehlenite	$Ca_2Al_2SiO_7$	-	+	-	-	-
Anhydrite	$CaSO_4$	+	+	+	+	+
Lime	CaO	+	+	+	+	+
Portlandite	$Ca(OH)_2$	+	+	+	+	+
Muscovite	$KAl_2(AlSi_3O_{10})(OH,F)_2$	-	-	-	+	-
Gismondine	$CaAl_2Si_2O_8 4H_2O$	+	-	+	+	+
Chlorite	$(Mg,Fe^{2+})_5Al(Si_3Al)O_{10}(OH)_9$	+	+	+	-	+

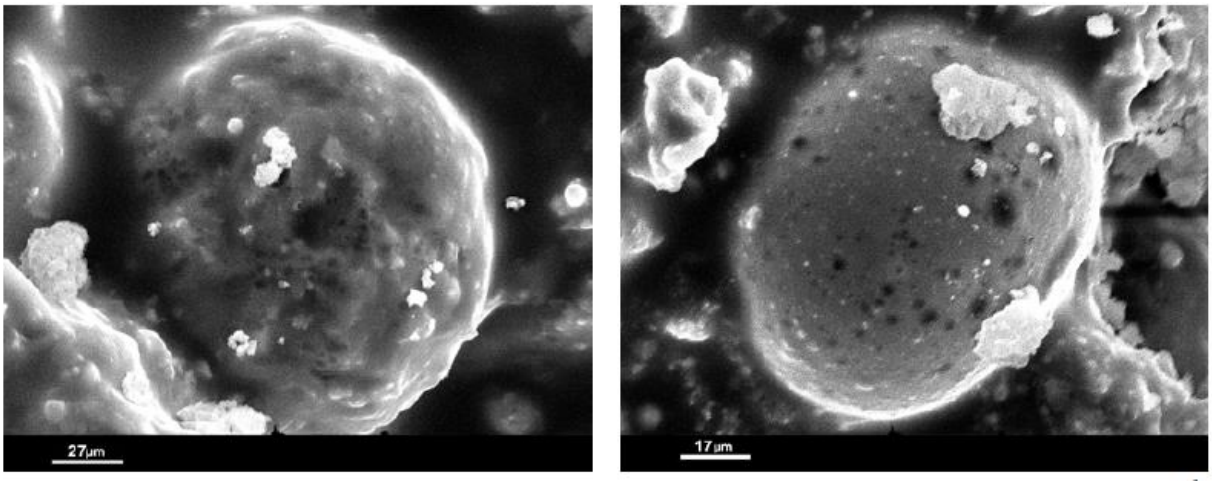
Πίνακας 3.3 – Ορυκτολογική σύνθεση της τέφρας Πτολεμαΐδας προσδιορισμένη με περιθλασιμετρία ακτίνων Χ (Koukouzas κ.ά., 2005)

	T1	T2	T3	T4	T5	T6	TA	Mean	Standard Deviation
SiO_2	30.11	28.55	28.93	29.10	30.54	31.84	33.78	30.41	1.8640
Al_2O_3	17.40	16.85	17.50	16.70	17.02	16.74	16.92	17.02	0.3168
TiO_2	1.01	0.52	1.36	0.89	0.80	0.94	0.85	0.91	0.2518
Fe_2O_3	7.34	6.19	6.16	5.82	6.71	7.01	6.04	6.47	0.5615
MgO	3.18	3.94	3.03	3.72	3.05	3.00	2.78	3.24	0.4221
CaO	26.85	26.02	27.69	27.78	26.22	23.91	22.57	25.86	1.9474
Na_2O	1.42	1.30	2.10	2.11	1.80	1.55	1.93	1.75	0.3275
K_2O	1.19	1.75	1.18	1.12	1.21	1.72	1.77	1.42	0.3071
SO_3	8.62	11.36	8.53	10.32	9.39	9.56	9.84	9.66	0.9816
Total	97.12	96.48	96.48	97.56	96.74	96.27	96.48		

Πίνακας 3.4 – Χημική σύνθεση κατά βάρος(%)της τέφρας Πτολεμαΐδας (Koukouzas κ.ά., 2005)



Σχήμα 3.1 – Αποτελέσματα Περιθλασιομετρίας Ακτίνων Χ τέφρας Πτολεμαΐδας. Qz: Χαλαζίας, Ca: Ασβεστίτης, Fs: Άστριοι, Po: Πορτλανδίτης, Lm: Οξείδιο ασβεστίου, Ay: Ανυδρίτης, Ge: Γκελενίτης, Gi: Γισμονδίνη (Koukouzas κ.ά., 2005)



Σχήμα 3.2 – Εικόνες τέφρας από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM): Τυπικό σχήμα κενόσφαιρας στην τέφρα Πτολεμαΐδας (Koukouzas κ.ά.,2005)

3.3 Εξεταζόμενες Μεταβλητές

Σκοπός αυτής της έρευνας δεν ήταν να συνθέσει τη φυσικοχημική και μικροδομική συμπεριφορά των ελαφρά σιμεντωμένων αργίλων, αλλά να ερευνήσει, αξιολογήσει και επεξηγήσει την μηχανική συμπεριφορά των ελαφρά σιμεντωμένων αργίλων με την εκτέλεση εργαστηριακών δοκιμών. Συνεπώς, ο κύριος σκοπός των δοκιμών αυτής της έρευνας είναι, να διερευνήσει την μηχανική συμπεριφορά αργίλου βελτιωμένης με τέφρα υπό διάφορες συνθήκες τριαξονικής φόρτισης, ώστε να προκύψει η βάση για το πλαίσιο συμπεριφοράς των ελαφρά σιμεντωμένων αργίλων. Για το σκοπό αυτό το πρόγραμμα δοκιμών χρησιμοποίησε διάφορες τιμές περιεκτικότητας σε τέφρα, υγρασίας και χρόνου ωρίμανσης των μιγμάτων. Η προστιθέμενη ποσότητα ύδατος σκοπό είχε τη δημιουργία ομοιόμορφου σχετικά υδαρούς πολτού του μίγματος αργίλου και τέφρας. Η επιλογή διάφορων αναλογιών μίξης αργίλου και τέφρας σκοπό είχε να διερευνηθεί η συμπεριφορά του μίγματος της υψηλής πλαστικότητας αργίλου με την τέφρα όσον αφορά την δημιουργία δομής. Μετά την παρασκευή τους, τα σταθεροποιημένα δείγματα φορτίσθηκαν με κατακόρυφη τάση 50 kPa. Η περίοδος ωρίμανσης έφθανε μέχρι τις 730 ημέρες.

Για να διερευνηθεί η συσχέτιση χρόνου ωρίμανσης, σταθεροποίησης της αντοχής, συμπιεστότητας και σχέσης τάσεων-παραμορφώσεων της βελτιωμένης με τέφρα αργίλου του Αγίου Στεφάνου χρησιμοποίηθηκαν περιεκτικότητες 4% έως 25% σε τέφρα και 82% έως 115% σε συνολική υγρασία. Η συνολική αυτή υγρασία, για λόγους ονοματοδοσίας των μιγμάτων, είναι εκφρασμένη επί του ξηρού βάρους της

αργίλου μόνον, ενώ η περιεκτικότητα σε ξηρά τέφρα είναι εκφρασμένη ως ποσοστό επί του βάρους του πολτού της αργίλου (ξηρό βάρος αργίλου + συνολικό βάρος ύδατος του τελικού μίγματος). Οι αναλογίες εδάφους-ύδατος-τέφρας, όπως επεξηγήθηκαν προηγουμένως, για τα διάφορα μίγματα συνοψίζονται στον Πίνακα 3.5. Η εκτίμηση της αντοχής, της συμπιεστότητας και των βασικών ιδιοτήτων έγιναν σε διάφορες περιόδους ωρίμανσης.

Μίγμα (ε:υ:τ)	**Συνολική Υγρασία (%)**	**Τέφρα (%)**	**Χρόνος Ωρίμανσης (ημέρες)**	**Δοκιμές που εκτελέσθηκαν στην παρούσα έρευνα για κάθε μίγμα**
ΑΑΣ-80-00	80	0	14~365	Φυσικά Χαρακτηριστικά, 1DCT, UU, ICT, CIDC, PLM
ΑΑΣ-82-04	82	4	14~365	Φυσικά Χαρακτηριστικά, 1DCT, UU
ΑΑΣ-85-06	85	6	14~365	Φυσικά Χαρακτηριστικά, 1DCT, UU
ΑΑΣ-87-08	87	8	14~365	Φυσικά Χαρακτηριστικά, 1DCT, UU
ΑΑΣ-90-10	90	10	14~730	Φυσικά Χαρακτηριστικά, 1DCT, UU, ICT, CIDC, CIDE, PLM, XRD
ΑΑΣ-95-15	95	15	14~730	Φυσικά Χαρακτηριστικά, 1DCT, UU, ICT, CIDC, CIDE, PLM, XRD
ΑΑΣ-115-25	115	25	14~730	Φυσικά Χαρακτηριστικά, 1DCT, UU
Παρατηρήσεις	4. Δοκιμές προσδιορισμού φυσικών χαρακτηριστικών μετά την ανάμιξη και κατά τη διάρκεια της περιόδου ωρίμανσης. 5. 1DCT: Δοκιμή Στερεοποίησης σε Συμπιεσόμετρο. 6. ICT: Δοκιμή Ισότροπης Θλίψης. 7. CIDC/CIDE: Δοκιμή Ισότροπα Στερεοποιημένης Στραγγιζόμενης Θλίψης/Εφελκυσμού. 8. PLM: Ανάλυση με Πολωτικό Μικροσκόπιο. 9. XRD: Ανάλυση με Περίθλαση Ακτίνων Χ.			

Πίνακας 3.5 – Αναλογίες μιγμάτων και δοκιμές της παρούσας έρευνας

3.4 Παρασκευή Δοκιμίων και Διαδικασία Δοκιμής

3.4.1 Ανάμιξη και Παρασκευή Δοκιμίων Μίγματος Εδάφους και Τέφρας

Τα δοκίμια μη βελτιωμένης αργίλου του Αγίου Στεφάνου παρασκευάσθηκαν από τη φυσική υγρή τους κατάσταση χωρίς να προξηρανθούν. Οι Lee κ.ά. (2005) παρατήρησαν ότι η προξήρανση προκαλεί μεγάλες μη αναστρέψιμες μεταβολές στα όρια Atterberg της αργίλου, που υποδηλώνουν χημικές μεταβολές. Το επιλεγμένο συνδετικό υλικό, δηλαδή η τέφρα Πτολεμαΐδος, λειοτριβήθηκε σε λεπτή σκόνη. Το υλικό της λειοτρίβησης αποξηράνθηκε σε φούρνο και ελήφθη το διερχόμενο από το κόσκινο No. 40, ώστε να επιτευχθεί ομοιόμορφη σύνδεσή του με τη μάζα του εδάφους.

Για δεδομένη περιεκτικότητα συνδετικού υλικού, η διατμητική αντοχή του βελτιωμένου εδάφους εξαρτάται από τη συνολική υγρασία της αργίλου. Όμως, υφίσταται μία βέλτιστη υγρασία της αργίλου, στην οποία η διατμητική αντοχή είναι μέγιστη (Lorenzo κ.ά., 2006). Η βέλτιστη υγρασία της αργίλου είναι η συνολική υγρασία της αργίλου στην οποία επιτυγχάνεται η μέγιστη αντοχή. Ως συνολική υγρασία της αργίλου (βελτιωμένης με τέφρα), περιλαμβάνει τη φυσική υγρασία της μη βελτιωμένης αργίλου, την υγρασία που προστίθεται κατά την αναζύμωση της αργίλου και την υγρασία που προστίθεται κατά την ανάμιξη της τέφρας. Αυτή η συνολική υγρασία του μίγματος αργίλου-ύδατος-τέφρας εκφράζεται ως ποσοστό επί του ξηρού βάρους της αργίλου. Αντίστοιχος ορισμός της συνολικής υγρασίας του μίγματος έχει χρησιμοποιηθεί και από τους Lorenzo και Bergado (2004). Η περιεκτικότητα σε τέφρα στην παρούσα έρευνα εκφράζεται ως λόγος του βάρους της ξηράς τέφρας προς το άθροισμα του συνολικού βάρους του υγρού εδάφους και του βάρους του συνολικά επιπλέον προστιθέμενου νερού στο μίγμα.

Για τον προσδιορισμό της βέλτιστης υγρασίας των βελτιωμένων με ιπάμενη τέφρα δειγμάτων, εκτελέστηκαν δοκιμές με υγρασία κυμαινόμενη μεταξύ 1.1 και 1.6 φορές το όριο υδαρότητας, ανάλογα με την ποσότητα της τέφρας που προστέθηκε στο μίγμα εδάφους-ύδατος.

Τα μίγματα εδάφους–τέφρας παρασκευάσθηκαν από τον πολτό της αναζυμωμένης αργίλου και την κονιοποιημένη τέφρα. Ένα ποσοστό της καθορισμένης ποσότητας ύδατος προστέθηκε καταρχάς στην άργιλο του Αγίου Στεφάνου και αναμίχθηκε επιμελώς στον αναδευτήρα του ΕΜΠ (Σχήμα 3.3) ώστε να ληφθεί ο πολτός αργίλου. Στη συνέχεια η επιλεγμένη ποσότητα τέφρας και η υπόλοιπη ποσότητα ύδατος προστέθηκαν στον πολτό της αργίλου ώστε να επιτευχθεί μία πλήρης και

ομοιόμορφη ανάμιξη. Η όλη διαδικασία ανάμιξης διαρκούσε μόνον 15 λεπτά, ώστε να αποφευχθεί απώλεια της τελικής υγρασίας λόγω σκλήρυνσης του μίγματος αργίλου – τέφρας.

Σχήμα 3.3 – Αναμικτήρας ΕΜΠ για παρασκευή μιγμάτων εδάφους – τέφρας

Το βελτιωμένο μίγμα τοποθετήθηκε σε μήτρα ανοξείδωτου χάλυβα με άκαμπτα τοιχώματα, διαμέτρου 150mm και ύψους 120mm (Σχήμα 3.4Α). Και στα δύο άκρα της μήτρας τοποθετήθηκαν χάρτινα φίλτρα σε επαφή με το δοκίμιο, τα οποία καλύφθηκαν με διάτρητη μεταλλική πλάκα για να επιτρέπεται η διαφυγή του παγιδευμένου αέρα και της περίσσειας ύδατος στη διάρκεια της προστερεοποίησης και της περιόδου ωρίμανσης. (Σχήμα 3.4Β)

Σχήμα 3.4Α – Μήτρα Ανοξείδωτου Χάλυβα Άκαμπτων Τοιχωμάτων για την ωρίμανση των μιγμάτων

Σχήμα 3.4Β – Εργαστηριακή διάταξη για την προστερεοποίηση του μίγματος

Μετά την παρασκευή του μίγματος και την τοποθέτησή του στη μεταλλική μήτρα, εφαρμόστηκε σε αυτό σταθερή κατακόρυφη τάση 50 kPa ώστε να σταθεροποιηθεί το μίγμα, να εκδιωχθεί ο παγιδευμένος στη μάζα του μίγματος αέρας, και να αυξηθεί η ομογένεια του μίγματος. Όταν ολοκληρώθηκε το στάδιο της προστερεοποίησης, το οποίο χρονικά δεν είναι ίδιο για όλα τα μίγματα, η βελτιωμένη άργιλος μαζί με τη μήτρα τοποθετήθηκαν σε δεξαμενή με απεσταγμένο νερό, για μία περίοδο ωρίμανσης 28 ημερών. Στη συνέχεια η βελτιωμένη άργιλος αφαιρέθηκε από τη μήτρα, περιτυλίχθηκε προσεκτικά και τοποθετήθηκε σε θάλαμο σταθερής υγρασίας για περαιτέρω ωρίμανση και για να χρησιμοποιηθεί για τη μόρφωση δοκιμίων για μονοδιάστατη στερεοποίηση και τριαξονικές δοκιμές.

3.4.2 Εξοπλισμός Εργαστηριακών Δοκιμών

3.4.2.1 Δοκιμές Στερεοποίησης σε Συμπιεσόμετρο

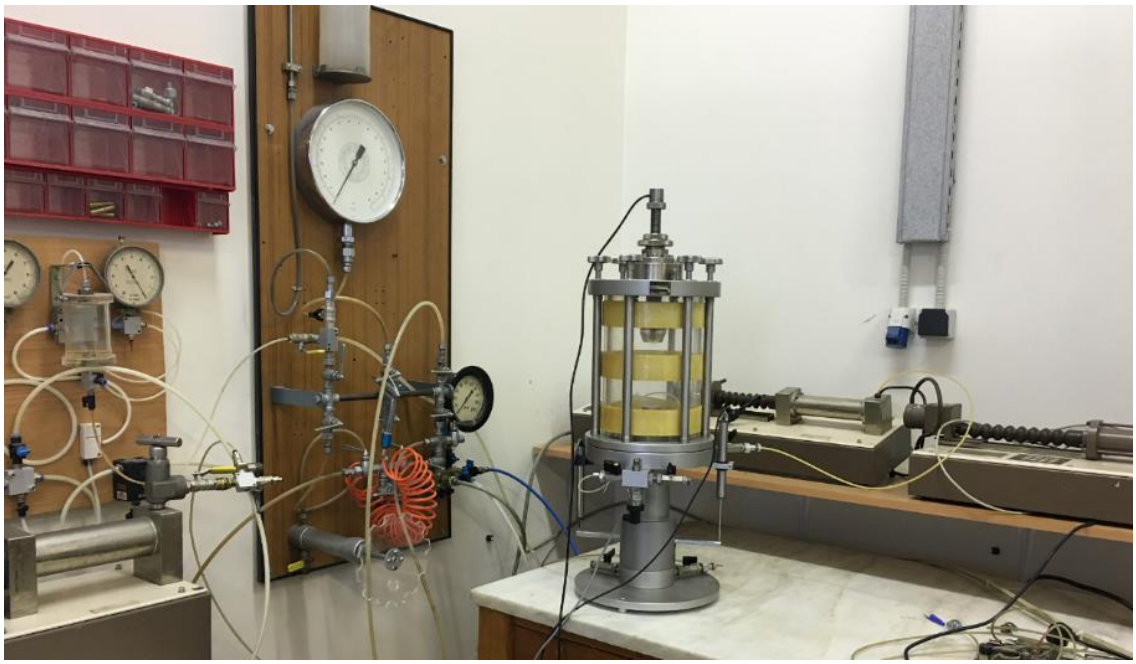
Σε αυτή την έρευνα, χρησιμοποιήθηκαν συμπιεσόμετρα σταθερού δακτυλίου και εμπρόσθιας, χειροκίνητης φόρτισης (BS1377- μέρος, 1990) για την εκτέλεση των δοκιμών στερεοποίησης στα διάφορα μίγματα αργίλου – τέφρας (Σχήμα 3.5). Οι συσκευές είναι κατασκευής της Wykeham Farrance. Το προστερεοποιημένο δοκίμιο εδάφους τοποθετήθηκε σε τυποιημένο μεταλλικό δακτύλιο διαμέτρου 70mm και ύψους 19mm, με δύο πορόλιθους στα άκρα του και εφαρμοσθείσα μέγιστη τάση στερεοποίησης 3200 kPa. Μετά την επιβολή του φορτίου μετρήθηκε η συμπίεση του δοκιμίου από ενσωματωμένο σύστημα ελέγχου. Στη διάρκεια της δοκιμής, το δοκίμιο παρέμεινε εμβαπτισμένο σε απιονισμένο νερό. Κάθε αύξηση φορτίου διατηρήθηκε σταθερή για 24 ώρες ώστε να θεωρηθεί ολοκληρωμένη η πρωτογενής στερεοποίηση, και στη συνέχεια γινόταν χειροκίνητη επιβολή του επόμενου φορτίου. Ακολουθήθηκε ρυθμός φόρτισης $\Delta p/p_1=1.0$.

Σχήμα 3.5 – Συμπιεσόμετρο Χειροκίνητης Φόρτισης που χρησιμοποιήθηκε για τη δοκιμή Στερεοποίησης

3.4.2.2 Τριαξονικές Δοκιμές

Οι δύο διατάξεις τριαξονικών δοκιμών που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτή την έρευνα είναι (α) το Συμβατικό Σύστημα Τριαξονικής Δοκιμής της Wykeham Farrance (Σχήμα 3.6) σχεδιασμένο κυρίως για δοκιμές διαδρομών τάσεων, και (β) το Σύστημα Τριαξονικής Δοκιμής της GDS (GDSTTS, Σχήμα 3.7). Το δεύτερο είναι ένα πλήρως αυτοματοποιημένο σύστημα, το οποίο εκτελεί μεγάλη ποικιλία ειδικών δοκιμών τριαξονικής φόρτισης, δηλ. δοκιμή με πολλά στάδια φόρτισης, ημιστατικές δοκιμές (χαμηλής ταχύτητας – ερπυσμού), και αναβαθμισμένες επιλογές όπως μετρήσεις μικρών τοπικών αξονικών και πλευρικών παραμορφώσεων (με τη βοήθεια του φαινομένου Hall), μετρήσεις με πιεζοηλεκτιρκά στοιχεία (bender element) καθώς και δοκιμές σε ακόρεστα δοκίμια.

Σχήμα 3.6- Διάταξη τριαξονικής δοκιμής της Wykeham Farrance



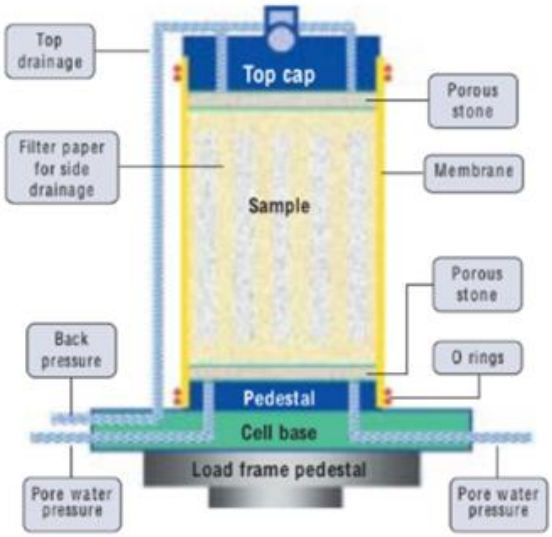
Σχήμα 3.7- Διάταξη τριαξονικής δοκιμής Bishop & Wesley της GDS

Κάθε διάταξη αποτελείται από τριαξονική κυψέλη, πλαίσιο συνεχούς (μη βαθμιδωτής) φόρτισης (stepless compression load frame) ικανότητας 10000 kg για την επιβολή του αξονικού φορτίου στη διάταξη της Wykeham Farrance, ρυθμιστές πίεσης/όγκου για εύρος πιέσεων 500 kPa έως 100MPa οι οποίοι παρείχαν τις απαιτούμενες πιέσεις κυψέλης, αντιπιέσεις και πιέσεις του πλαισίου φόρτισης, κιβώτιο/πίνακα ελέγχου για την καταγραφή της δραστηριότητας των μετατροπέων, παροχή ηλεκτρικού ρεύματος για τους μετατροπείς, υπολογιστή για κάθε τριαξονική διάταξη για την εκτέλεση του απαραίτητου λογισμικού ελέγχου και διάθεση των μετρήσεων των δεδομένων της δοκιμής σε πραγματικό χρόνο, και κεντρικό σύστημα καταγραφής των δεδομένων της δοκιμής.

3.4.2.2.1 Τριαξονικές Κυψέλες

(a) Τριαξονική Κυψέλη 35mm της Wykeham Farrance

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.8, η τυπική κυψέλη Wykeham Farrance που χρησιμοποιήθηκε σε αυτή την έρευνα έχει ικανότητα μέγιστου φορτίου 2000 kN και είναι κατασκευασμένη από ελαφρύ μη διαβρώσιμο κράμα. Η κυψέλη έχει αφαιρούμενη πλάκα βάσης, η οποία ορισμένες φορές αναφέρεται και ως έδρανο. Η πλάκα βάσης της κυψέλης, πάνω στην οποία κοχλιώντεαι σταθερά ο θάλαμος έχει τέσσερις βαλβίδες απαέρωσης με ψηφιακούς μετατροπείς εγκατεστημένους στις τέσσερεις σωλήνες πίεσης που εξέρχονται από την πλάκα βάσης. Από αυτούς, δύο σωλήνες χρησιμοποιούνται για την πλήρωση της κυψέλης με νερό και συνεπώς οι μετατροπείς τους μετρούν την πίεση της κυψέλης στη διάρκεια της τριαξονικήςδοκιμής. Ενώ οι δύο άλλοι μετατροπείς χρησιμεύουν για τη μέτρηση της πίεσης πόρων. Ο κύριος σκοπός των βαλβίδων ενεργοποίησης/απενεργοποίησης είναι να απομονώνουν, να εφαρμόζουν και να μετρούν τις αντίστοιχες πιέσεις (κυψέλης, αντιπίεσης και πίεσης πόρων). Η αξονική παραμόρφωση μετριέται εξωτερικά με χρήση μετατροπέα μετακίνησης και η ογκομετρική παραμόρφωση μετριέται μέσω μετατροπέα μετακίνησης τοποθετημένου στη σωλήνωση αντιπίεσης.



Σχήμα 3.8- Τριαξονική κυψέλη 35mm της Wykeham Farrance

(b) Κυψέλη 38/50mmBishop και Wesley της GDS

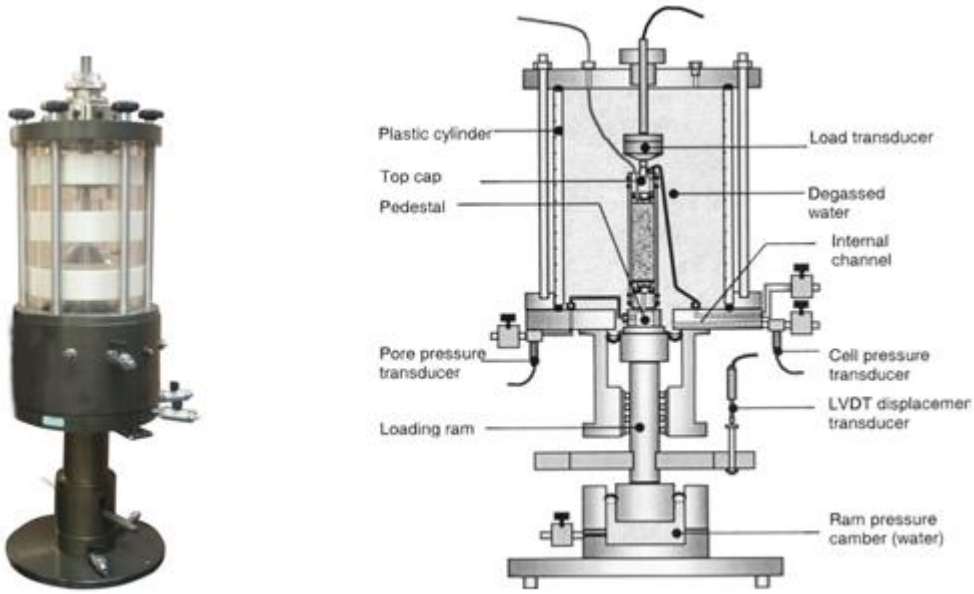
Αυτή η υψηλής ποιότητας τριαξονική διάταξη διαδρομής τάσεων GDS αποτελείται βασικά από κυψέλη Bishop και Wesley όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.9, τρεις ρυθμιστές πίεσης/όγκου, εσωτερική εμβαπτιζόμενη δυναμοκυψέλη (loadcell) για τη μέτρηση του αξονικού φορτίου, μετατροπέα πίεσης για τη μέτρηση της πίεσης πόρων και μετατροπείς γραμμικής μετακίνησης για τη μέτρηση της κατακόρυφης μετακίνησης (Σχήμα 3.7).

Η κυψέλη διαδρομής τάσεων είναι τύπου Bishop και Wesley που χρησιμοποιεί τη διαφορά μεταξύ πίεσης κυψέλης και πίεσης του κάτω θαλάμου (rampressurechamber στο Σχ. 3.9) για να εφαρμόσει φορτίο στο δοκίμιο. Επίσης μπορούν να εφαρμοστούν συγκεκριμένες μετακινήσεις εισπιέζοντας στον κάτω θάλαμο συγκεκριμένη ποσότητα νερού μέσω ρυθμιστή πίεσης της GDS. Καθώς είναι γνωστή η οριζόντια επιφάνεια του εμβόλου του κάτω θαλάμου, η μετακίνηση υπολογίζεται
από το λογισμικό. Η κυψέλη έχει αφαιρούμενη κεφαλή, με τους κοχλίες στερέωσης της κυψέλης να προσδίδουν πρόσθετη δυσκαμψία.

Μεταξύ της δυναμοκυψέλης (load cell) και της πλάκας στην κεφαλή του δοκιμίου (top cap) παρεμβάλλεται ειδική χωνοειδής θήκη (suction cap) με την οποία επιβάλλεται αρνητικό αποκλίνον φορτίο στο δοκίμιο, καθιστώντας δυνατή την εκτέλεση δοκιμών εφελκυσμου.

Από το Σχήμα 3.9, μπορεί να παρατηρηθεί με σαφήνεια ότι η κυψέλη είναι αυτοδύναμη, φορητή, και δεν απαιτεί εξωτερικό πλαίσιο φόρτισης. Το αξονικό φορτίο εφαρμόζεται στο δοκίμιο, επιβάλλοντας πίεση στον κάτω θάλαμο που

βρίσκεται κάτω από τη βάση της κυψέλης. Το έμβολο πιέζει προς τα πάνω ένα άξονα φόρτισης, στο άνω άκρο του οποίου είναι η βάση στην οποία εδράζεται το εδαφικό δοκίμιο. Στη συμβατική κυψέλη τριαξονικής συσκευής, το έμβολο φόρτισης ωθείται προς τα κάτω σε επαφή με την πλάκα κεφαλής του δοκιμίου, με σταθερή τη βάση του δοκιμίου. Αντίθετα, στην κυψέλη διαδρομής τάσεων, η βάση του δοκιμίου μετακινείταιι προς τα άνω, με σταθερή την κεφαλή του επί της οποίας εφαρμόζει η ανυποχώρητη δυναμοκυψέλη. Αυτό αποτελεί ένα βασικό χαρακτηριστικό της κυψέλης διαδρομής τάσεων, που επιτρέπει όχι μόνο τη μέτρηση της συνολικής μεταβολής όγκου αλλά και την κατακόρυφη διόγκωση του δοκιμίου. Στη συμβατική τριαξονική συσκευή είναι δυνατή η μέτρηση μόνο της συνολικής μεταβολής όγκου του δοκιμίου.



Σχήμα 3.9- Τριαξονική κυψέλη 35/50mm Bishop & Wesley της GDS

Το δοκίμιο υπόκειται σε στράγγιση από την κεφαλή, επιτρέποντας τη μέτρηση της πίεσης πόρων μέχρι την εκτόνωσή της ($\Delta u=0$), με μετατροπέα πίεσης στη βάση της τριαξονικής κυψέλης, όπως φαίνεται στα Σχήματα 3.8 και 3.9. Η επιβολή πλευρικής πίεσης στο δοκίμιο γίνεται με απεσταγμένο νερό. Για τη στεγανοποίηση του δοκιμίου χρησιμοποιούνται ελαστικές μεμβράνες του εμπορίου, πάχους 0.30 mm, καθώς και ελαστικοί δακτύλιοι που σφραγίζουν τη μεμβράνη στη βάση έδρασης και την πλάκα κεφαλής του δοκιμίου.

Η δυναμοκυψέλη που είναι τοποθετημένη στο εσωτερικό της τριαξονικής κυψέλης επιτρέπει την ακριβή μέτρηση του φορτίου για υπλογισμό της αποκλίνουσας τάσης

(deviatorstress) χωρίς να χρειάζεαι να λάβει υπόψη την τριβή που ασκείται στο έμβολο φόρτισης. Και για τις δύο τριαξονικές διατάξεις (Wykeham Farrance και Bishop & Wesley) χρησιμοποιήθηκαν δυναμοκυψέλες ακρίβειας 1 kN. Η εσωτερική δυναμοκυψέλη της διάταξης Bishop & Wesley έχει τάση εξόδου που δεν επηρεάζεται από την πίεση του νερού της τριαξονικής κυψέλης.

Ο σχεδιασμός της δυναμοκυψέλης και για τους δύο τύπους τριαξονικής κυψέλης βασίζεται στη χρήση ηλεκτρομηκυνσιομέτρων σε δοκό με πέλματα. Τα μηκυνσιόμετρα είναι συνδεδεμένα με τέτοιο τρόπο, ώστε να παρέχουν σήμα ανάλογο με το κατακόρυφο φορτίο που επιβάλλεται στο δοκίμιο, ακόμη και αν αυτό το φορτίο δεν είναι ευθυγραμμισμένο με τον άξονα του δοκιμίου, επίσης το σήμα είναι ανεπηρέαστο από την πίεση του υγρού μέσα στην τριαξονική κυψέλη.

Υπάρχει διαφορά στις δύο διατάξεις στον τρόπο εφαρμογής της δυναμοκυψέλης. Η δυναμοκυψέλη της Wykeham Farrance εφαρμόζεται με χρήση σφραγιστικού υλικού και είναι μετακινούμενη, ενώ εκείνη της κυψέλης των Bishop & Wesley ακινητοποιείται σε συγκεκριμένη στάθμη, και η κατακόρυφη θλίψη και εφελκυσμός εφαρμόζονται με το έμβολο φόρτισης.

3.4.2.2.2 Βάθρο Βάσης Τριαξονικής Κυψέλης

Στην κυψέλη χαμηλής πίεσης το δοκίμιο τοποθετείται μεταξύ των πλακών βάσης/έδρασης και κεφαλής που έχουν την ίδια διάμετρο με το δοκίμιο, με τη μεσολάβηση πορωδών λίθων πάχους 2.8 mm και διαμέτρου 35 mm ή 38 mm ώστε να εξασφαλίζεται ομοιόμορφη κατανομή του νερού στο δοκίμιο. Αυτή η διάταξη έδρασης της βάσης του δοκιμίου θεωρείται «σταθερή» επειδή εμποδίζει την ακτινική παραμόρφωση του δοκιμίου στη βάση και την κεφαλή του, και έχει ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη ανομοιόμορφων τάσεων και παραμορφώσεων στη διάρκεια της διατμητικής φάσης των τριαξονικών δοκιμών.

Η πίεση πόρων μετράται με τη σύνδεση μετατροπέα στο σωλήνα στράγγισης στη βάση του δοκιμίου.

3.4.2.2.3 Ρυθμιστές Πίεσης/Όγκου

Για την επίτευξη της απαιτούμενης πίεσης κυψέλης και αντιπίεσης, χρησιμοποιήθηκαν δύο ρυθμιστές πίεσης όγκου (PVC, Pressure/Volume Controllers).

Για τη διάταξη των Bishop & Wesley ήταν απαραίτητος και τρίτος ρυθμιστής PVC για να κινήσει το υδραυλικό πλαίσο φόρτισης (στον κάτω θάλαμο). Στη διάρκεια του προγράμματος δοκιμών χρησιμοποιήθηκαν δύο τύποι PVC, τυπικός (STDDPC Standard Pressure/Volume Controller) και προηγμένος (ADVDPC, Advanced Pressure/Volume Controller). Ο ρυθμιστής STDDPC, συνήθως λειτουργεί σε 3 MPa/200 cc, και έχει τη δική του διασύνδεση με υπολογιστή, συνεπώς μπορεί να ελεγχθεί απευθείας από τον υπολογιστή. Επίσης υπάρχει αυτόματο σύστημα προστασίας για τυχόν υπέρβαση ορίων πίεσης ή όγκου. Ο προηγμένος ρυθμιστής ADVDPC, είναι πηγή παροχής σταθερής πίεσης, που μπορεί να αντικαταστήσει παραδοσιακές εργαστηριακές παροχές πίεσης, όπως ο πεπιεσμένος αέρας, εισπιεζόμενο λάδι και διατάξεις νεκρού φορτίου.

Και οι δύο τύποι ρυθμιστών αποτελούνται βασικά από θάλαμο πίεσης που περιέχει νερό και ο οποίος στο ένα άκρο συνδέεται με δεξαμενή και την τριαξονική κυψέλη και στο άλλο άκρο τίθεται υπό πίεση με κινούμενο έμβολο. Ο τυπικός ρυθμιστής STDDPC ήταν σε μακρά χρήση στο Εργαστήριο Θεμελιώσεων του ΕΜΠ, σε ποικιλία διατάξεων δοκιμών, που περιλαμβάνουν τριαξονικές δοκιμές σταθερής ταχύτητας παραμόρφωσης. Αυτός ο τύπος ρυθμιστή είναι συμπαγής, και μετακινείται ευκολότερα από τον ADVDPC, όμως ο δεύτερος έχει μέγιστη ικανότητα πίεσης 100MPa και όγκου 1000cc.

Η συμβατική τριαξονική διάταξη Wykeham Farrance χρησιμοποιεί 2 τυπικούς ρυθμιστές STDDPC για την επίτευξη των απαιτούμενων πιέσεων κυψέλης και αντιπίεσης, κατά τη διεξαγωγή στραγγιζόμενων δοκιμών θλίψης. Η διάταξη Bishop & Wesley χρησιμοποιεί 1 τυπικό ρυθμιστή STDDPC για την αντιπίεση και 2 προηγμένους ADVDPC για τη ρύθμιση της πίεσης κυψέλης και τον έλεγχο μεταβολής όγκου του κάτω θαλάμου.

3.4.2.2.4 Σύστηματα Ελέγχου

Και οι δύο τριαξονικές διατάξεις είναι πλήρως αυτοματοποιημένες χρησιμοποιώντας διαφορετικό εξοπλισμό και λογισμικό.

Η GDS έχει αναπτύξει μία αναβαθμισμένη έκδοση του συστήματος ελέγχου για ενσωμάτωση στη διάταξη Bishop & Wesley, η οποία περιγράφεται ως εξής. Η μέτρηση των μεταβλητών της δοκιμής όπως δύναμη, πίεση, και μετακίνηση γίνεται εντός και εκτός της τριαξονικής κυψέλης. Το κύριο πλεονέκτημα του συστήματος αυτού (GDSLAB) είναι ότι έχει την ικανότητα ελέγχου όλου του υπάρχοντος

εξοπλισμού της GDS, αλλά και εξοπλισμού άλλων κατασκευαστών. Επίσης επιτρέπει συγχρόνως τον έλεγχο διαφορετικών παραμέτρων, καθώς οι διαφορετικοί σταθμοί μετρήσεων μπορούν να χρησιμοποιούν από κοινού τον εξοπλισμό ελέγχου (π.χ. κοινή χρήση διαύλων καταγραφέα δεδομένων).

Και στα δύο συστήματα ελέγχου όλα τα δεδομένα μετρήσεων μπορούν να απεικονισθούν γραφικά σε πραγματικό χρόνο, και για μέχρι τρία διαγράμματα. Το σύστημα GDSLAB, έχει επιπλέον τη δυνατότητα να απεικονίσει γραφικά, εκτός των μετρήσεων, και δεδομένα τα οποία υπολογίζει. Ο υπολογιστής κάθε τριαξονικής διάταξης εκτελεί ένα πρόγραμμα ελέγχου ικανό να αντιμετωπίσει όλα τα απαραίτητα δεομένα μίας τριαξονικής δοκιμής. Δηλαδή, την αρχική ανάπτυξη πίεσης πόρων, τον κορεσμό με αντιπίεση, τη στερεοποίηση (η Bishop & Wesley και για ανισότροπη στερεοποίηση K_o) και βεβαίως τη διατμητική αντοχή σε συνθήκες θλίψης (η Bishop & Wesley και σε συνθήκες εφελκυσμού).

3.4.2.2.5 Απόκτηση Δεδομένων

Τα συστήματα ελέγχου που περιγράφηκαν προηγουμένως ενσωματώνουν δύο διαφορετικά συστήματα απόκτησης δεδομένων. Το σύστημα AT2000 της Wykeham Farrance, στη διάρκεια μίας συνηθισμένης τριαξονικής δοκιμής, παρακολουθεί τους πέντε μετατροπείς (αξονικής δύναμης που ασκείται στο δοκίμιο και μετράται από εσωτερική εμβαπτιζόμενη δυναμοκυψέλη, αξονικής μετακίνησης στην πλάκα κεφαλής του δοκιμίου, μεταβολής όγκου του δοκιμίου μετρούμενης με ρυθμιστή/μετατροπέα PVC, πίεσης της τριαξονικής κυψέλης με μετατροπέα/ρυθμιστή PVC, και της πίεσης πόρων που μετράται στην πλάκα βάσης). Το σύστημα AT 2000 περιλαμβάνει κιβώτιο τερματικού σταθμού, όπου συνδέονται τα βύσματα όλων των μετατροπέων, μία αναλογική/ψηφιακή κάρτα εισόδου/εξόδου δεδομένων εγκατεστημένη στον υπολογιστή και από ένα πρόγραμμα απόκτησης δεδομένων, το οποίο ελέγχει τις εγγραφές τους. Το τερματικό κιβώτιο, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.6 είναι ανθεκτικό και κατάλληλο για πρακτική χρήση ως κόμβου μεταξύ των μετατροπέων και της κάρτας εισόδου/εξόδου δεδομένων που είναι εγκατεστημένη στον υπολογιστή.

Ίδιου τύπου χρήση γίνεται και στο σύστημα απόκτησης δεδομένων της GDS. Η τυπική συσκευή GDS 8 διαύλων για την απόκτηση δεδομένων, γνωστή ως «πίνακας σειριακών δεδομένων» (serial data pad), μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε οποιοδήποτε

συνδυασμό διατάξεων. Η συσκευή των 16 bit έχει οκτώ περιοχές τιμών ελεγχόμενες από τον υπολογιστή, ειδικά σχεδιασμένες για να προσαρμόζονται σε μετατροπείς που χρησιμοποιούνται σε τριαξονική δοκιμή δηλ. δυναμοκυψέλη, μετατροπείς πίεσης, και μετατροπείς μετακίνησης (Σχήματα 3.7 και 3.9).

3.4.2.2.6 Βαθμονόμηση

Στη διάρκεια του προγράμματος δοκιμών της παρούσας έρευνας, έγιναν βαθμονομήσεις των ηλεκτρονικών συστημάτων μέτρησης, ώστε να παραχθούν αξιόπιστα και ακριβή αποτελέσματα.

(a) Βαθμονόμηση δυναμοκυψέλης

Μία μέθοδος, που χρησιμοποιήθηκε για τη βαθμονόμηση της δυναμοκυψέλης και στις δύο τριαξονικές διατάξεις, ήταν η χρήση του πλαισίου βαθμονόμησης με νεκρά φορτία του Εργαστηρίου Θεμελιώσεων του ΕΜΠ. Ο έλεγχος γίνεται με την εφαρμογή γνωστού φορτίου στη δυναμοκυψέλη και έλεγχο της τιμής εξόδου του συστήματος αν συμφωνεί με αυτό το φορτίο. Για τις μετρήσεις σε χαμηλά φορτία έγινε πιο προηγμένος έλεγχος, με χρήση ειδικού για το σκοπό αυτό, μικρού δυναμομετρικού δακτυλίου. Για την κυψέλη διαδρομής τάσεων Bishop&Wesley, τοποθετήθηκε ένα πρακτικά ασυμπίεστο δοκίμιο μεταξύ της πλάκας βάσης του δοκιμίου και της δυναμοκυψέλης, και ασκήθηκε μία βαθμονομημένη πίεση στον κάτω θάλαμο. Για μεγαλύτερα φορτία, χρησιμοποιήθηκε δεύτερη δυναμοκυψέλη αναφοράς, ώστε να γίνει διασταυρωμένος έλεγχος των μετρήσεων του συστήματος.

(b) Βαθμονόμηση των μετατροπέων πίεσης

Όλες οι συσκευές επιβολής πίεσης και μετατροπείς πίεσης συνδέθηκαν με μία τριαξονική κυψέλη στην οποία μπορεί να ασκηθεί εσωτερική πίεση. Ασκήθηκε πίεση με μία από τις συσκευές ελέγχοντας ότι όλες οι άλλες μετρούν την ίδια τιμή πίεσης με την επιβαλλόμενη. Μία άλλη μέθοδος ελέγχου ήταν η χρήση ανεξάρτητης βαθμονομημένης πηγής πίεσης ως τιμής αναφοράς.

(c) Βαθμονόμηση μετατροπέων μετακίνησης

Αυτοί αποτελούν τις ευκολότερα βαθμονομούμενες συσκευές. Καθορίστηκε δεδομένη μετακίνηση του μετατροπέα, η οποία ελέγχθηκε είτε με χαλύβδινο κανόνα ή με μεταλλικό τεμάχιο γνωστής διάστασης.

3.4.3 Σκοπός του Προγράμματος Εργαστηριακών Δοκιμών

Οι παράγοντες που εξετάστηκαν σε αυτή την έρευνα είναι :

- Περιεκτικότητα σε τέφρα
- Χρόνος ωρίμανσης
- Αρχική συνολική υγρασία του μίγματος αργίλου-τέφρας
- Συμπιεστότητα
- Σταθερότητα αντοχής στη διάρκεια της περιόδου ωρίμανσης

3.4.4 Πρόγραμμα Εργαστηριακών Δοκιμών

3.4.4.1 Διαδικασία δοκιμής και συσκευές

Μετά τον καθορισμένο χρόνο ωρίμανσηςτων 28 ημερών, τα δείγματα της μη βελτιωμένης και της βελτιωμένης με τέφρα αργίλου του Αγίου Στεφάνου αφαιρέθηκαν από τις μήτρες και δοκιμάστηκαν σε διάφορες χρονικές περιόδους. Το πρόγραμμα δοκιμών περιελάμβανε τις εξής δοκιμές :

- μονοδίαστατη στερεοποίηση σε συμπιεσόμετρο
- αστράγγιστη ανεμπόδιστη θλίψη (UU)
- ισότροπη συμπίεση (ICT)
- ισότροπα στερεοποιημένες και στραγγιζόμενες (CID) δοκιμές σε θλίψη και εφελκυσμό

Επιπλέον ορισμένα από τα μίγματα, μετά το στάδιο της προστερεοποίησης και σε χρόνο ωρίμανσης 112 ημερών, εξετάστηκαν με Πολωτικό Μικροσόπιο και Περίθλαση Ακτίνων Χ. Σημειώνεται ότι, ακολουθώντας τις κατευθυντήριες οδηγίες των BS1377 (1990), σε όλα τα δείγματα των μιγμάτων που επιλέχθηκαν για το στάδιο της έρευνας σχετικά με το πλαίσιο συμπεριφοράς, και πριν την εφαρμογή της τριαξονικής φόρτισης, ασκήθηκαν αντιπιέσεις πόρων μέχρι την επίτευξη κορεσμού. Σύμφωνα με τους Black και Lee (1973) η αντιπίεση πόρων αυξάνεται μέχρι να επιτευχθεί τιμή του συντελεστή Β τουλάχιστον ίση με 0.9. Η τιμή του Β σε αυτή την έρευνα είναι συνήθως μεγαλύτερη του 0.95. Οι δοκιμές που εκτελέστηκαν στα πλαίσια αυτής της έρευνας συνοψίζονται στον Πίνακα 3.5.

Η μόρφωση των δοκιμίων, με τις απαιτούμενες διαστάσεις των τριαξονικών δοκιμών, έγινε με συνδυασμένη πίεση και περιστροφή χαλύβδινου κυλινδρικού οδηγού, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.10.

Σχήμα 3.10 – Συσκευή μόρφωσης δοκιμίων

3.4.4.2 Προσδιορισμός Φυσικών Χαρακτηριστικών και Δεικτών

Τα φυσικά χαρακτηριστικά του μη βελτιωμένου και του βελτιωμένου εδάφους (αργίλου Αγίου Στεφάνου) προσδιορίστηκαν σύμφωνα με το BS1377- μέρος 2, (1990). Τα χαρακτηριστικά που προσδιορίστηκαν είναι (1) Υγρασία, (2) Όρια Atterberg, (3) Κοκκομετρική Διαβάθμιση και (4) Ειδικό Βάρος Στερεών. Η κοκκομετρικά ανάλυση της μη βελτιωμένης αργίλου προσδιορίστηκε με τη μέθοδο του αραιομέτρου, χρησιμοποιώντας ως διασκορπιστή εξαμεταφωσφορικό νάτριο. Όμως, αυτή η μέθοδος δεν εφαρμόστηκε στην βελτιωμένη άργιλο διότι θα προκαλούσε διάσπαση των συμπλεγμάτων που σχηματίζονται από την αντίδραση της

τέφρας με την άργιλο, όπως αναφέρουν οι Rao&Rajasekaran (1996) για άργιλο βελτιωμένη με άσβεστο.

3.4.4.3 Προσδιορισμός Αντοχής και Συμπιεστότητας

3.4.4.3.1 Δοκιμή Στερεοποίησης σε Συμπιεσόμετρο

Προσδιορίστικαν τα χαρακτηριστικά συμπιεστότητας για επτά αναλογίες μίξης, από μηδενική περιεκτικότητα σε τέφρα (μη βελτιωμένη άργιλος) μέχρι 25% τέφρας, και για χρόνους ωρίμανσης των μιγμάτων από 28 έως 365 ημέρες. Οι επιβαλλόμενες κατακόρυφες τάσεις που εφαρμόστηκαν στη διάρκεια των δοκιμών ήταν 12.5kPa, 25kPa, 50 kPa, 100 kPa, 200 kPa, 400 kPa, 800 kPa, 1600 kPa και 3200 kPa. Στη συνέχεια έγινε αποφόρτιση των δοκιμίων, με διπλασιασμό του ρυθμού αποφόρτισης σε σχέση με τη φόρτιση (δηλ. με παράλειψη μίας βαθμίδας φορτίου σε κάθε αποφόρτιση).

3.4.4.3.2 Δοκιμή Αστράγγιστης Ανεμπόδιστης Θλίψης

Στις δοκιμές αστράγγιστης ανεμπόδιστης θλίψης (UU) χρησιμοποιήθηκε ένα ζεύγος μετατροπέων γραμμικής μεταβλητής μετακίνησης (LVDT). Και οι δύο μετατροπείς βαθμονομήθηκαν για εύρος γραμμικής διαδρομής περίπου 15mm. Το σύστημα απόκτησης δεδομένων χρησιμοποιήθηκε για την συλλογή δεδομένων φορτίου και παραμόρφωσης. Το δείγμα διατμήθηκε με ελεγχόμενη ταχύτητα παραμόρφωσης 1.00 mm/min (1% ανά λεπτό) με βάση το BS 1377- μέρος 7, (1990) και Head, (1986).

3.4.4.3.3 Δοκιμή Ισότροπης Στερεοποίησης

Οι δοκιμές ισότροπης στερεοποίησης εκτελέστηκαν σε δείγματα της μη και βελτιωμένης με τέφρα αργίλου για να εκτιμηθεί η συμπιεστότητά της. Χρησιμοποιήθηκε συσκευή διαδρομής τάσεων της GDS (Σχήμα 3.7). Πριν από την ισότροπη στερεοποίηση, το δοκίμιο κορέσθηκε με αντιπίεση μέχρι ο συντελεστής Β να πλησιάσει ή να υπερβεί την τιμή 0.9 (BlackandLee, 1973). Για να επιτευχθεί αυτό συνήθως απαιτείται αντιπίεση περίπου 390 kPa. Η πλευρική στράγγιση επετράπη ώστε να διευκολύνει την εκτόνωση της πίεσης πόρων μέσω σωληνώσεως εκροής που συνδέεται στην πλάκα κεφαλής του δοκιμίου. Στη διάρκεια της δοκιμής μετρήθηκαν οι μεταβολές πίεσης και όγκου με αντίστοιχους μετατροπείς, επιτρέποντας τον προσδιορισμό της ενεργού τάσης και του λόγου κενών.

3.4.4.3.4 Δοκιμή τριαξονικής Θλίψης και Εφελκυσμού

Στα βελτιωμένα με τέφρα δείγματα αργίλου έγιναν τριαξονικές δοκιμές θλίψης και εφελκυσμού με ισότροπη στερεοποίηση και στράγγιση (CID). Για τις δοκιμές αυτές το δείγμα περιβάλλεται περιμετρικά με μανδύα ελαστικής μεμβράνης. Τα δοκίμια διατμήθηκαν σε διάφορες υψηλές πλευρικές πιέσεις σε διατάξεις τριαξονικής δοκιμής Bishop & Wesley της εταιρείας GDS και της Wykeham Farrance. Επιπλέον, όταν εκτελέστηκαν οι δοκιμές εφελκυσμού, η πλάκα κεφαλής του δοκιμίου περιβλήθηκε με εύκαμπτο μανδύα από Vylastic (PVC Plastisol) ώστε η ίδια και η επέκτασή της να εφαρμόζουν σταθερά και στεγανά στο δοκίμιο.

Για τη στραγγιζόμενη τριαξονική διάτμηση στα τρία δείγματα της έρευνας (με ποσοστά τέφρας 0%, 10% και 15%) επελέγησαν ταχύτητες παραμόρφωσης 0.003-0.006 mm/min. Για να υπολογισθεί η ταχύτητα αξονικής παραμόρφωσης (ταχύτητα διάτμησης) σύμφωνα με το BS1377:Part 8-1990, εκτελέστηκαν τριαξονικές δοκιμές στερεοποίησης για να εκτιμηθεί ο απαιτούμενος χρόνος δοκιμής.

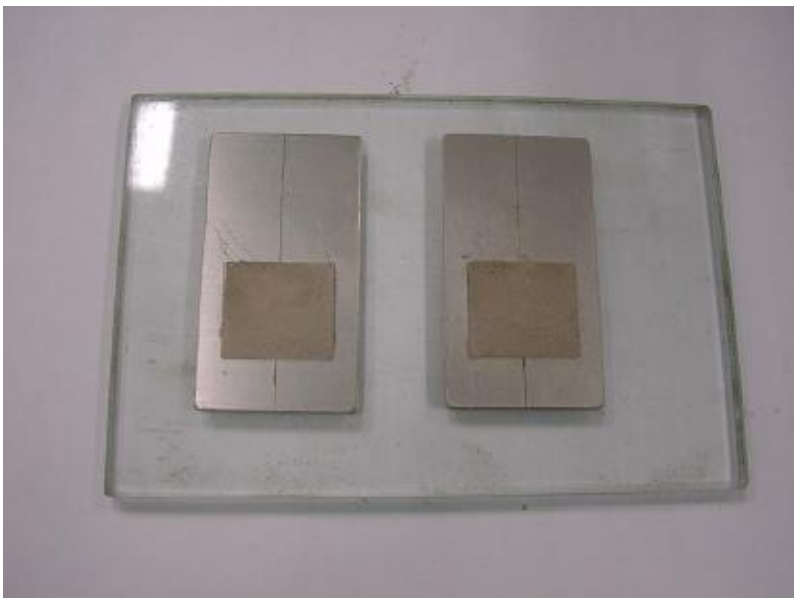
3.4.4.4 Προσδιορισμός Χαρακτηριστικών Μικροδομής

3.4.4.4.1 Ανάλυση Κόνεως με Περίθλαση Ακτίνων Χ (XRPD)

Η ανάλυση κόνεως με περίθλαση ακτίνων Χ (XRPD) των δύο μιγμάτων αργίλου βελτιωμένης με τέφρα (με ποσοστά 10% και 15%) εκτελέστηκαν στο εργαστήριο μεταλλογνωσίας της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων Μεταλλουργών του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου με τη βοήθεια της Αν. Καθηγήτριας Μαρίας Περράκη.

Η ορυκτολογική σύνθεση των δειγμάτων αργίλου βελτιωμένης με τέφρα προσδιορίστηκε με την ανάλυση κόνεως με περίθλαση ακτίνων Χ. (XRPDX-Ray Powder Diffraction). Η συνολική ορυκτολογική σύνθεση μελετήθηκε σε δείγματα τυχαίου προσανατολισμού αποξηραμένα στον ατμοσφαιρικό αέρα.

Τα διαγράμματα ανάλυσης XRD, προέκυψαν με χρήση καθοδικού σωλήνα ακτίνων Χ Cu-K_a (λ = 1.5148 Å), με άνοδο χαλκού, τάση εισόδου 30kV και ρεύμα έντασης 30mA. Επιλέχθηκε συνεχής σάρωση με ταχύτητα 2^o ανά λεπτό. Χρησιμοποίηθηκαν κονιοποιημένα δείγματα βελτιωμένης (με τέφρα) αργίλου τα οποία αποξηράνθηκαν στον ατμοσφαιρικό αέρα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.11. Η ορυκτολογική ανάλυση από τα φάσματα περίθλασης ακτίνων Χ έγινε με βάση τις χαρακτηριστικές γωνίες περίθλασης Bragg σύμφωνα με τον Brown (1961), και τα δεδομένα ελήφθησαν από το πρότυπο Αρχείο Περίθλασης Κόνεων (Powder Diffraction File, JCPDS, 1995).



Σχήμα 3.11 - Δείγματα για ανάλυση XRD στο εργαστήριο ορυκτολογίας του ΕΜΠ

3.4.4.4.2 Ανάλυση με Πολωτικό Μικροσκόπιο

Οι αναλύσεις με πολωτικό μικροσκόπιο μη βελτιωμένης και βελτιωμένης αργίλου με τέφρα 10% και 15% και ωρίμανση 112 ημ., καθώς και με τέφρα 25% και ωρίμανση 365 ημ. έγιναν με Πολωτικό Μικροσκόπιο ZEISS Axio Scope.A1 (Σχήμα 3.12), στο εργαστήριο του Ινστιτούτου Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών (ΙΓΜΕ) στην Αθήνα. Δηλαδή οι αναλύσεις έγιναν σε χρόνους κατά τους οποίους είχαν ολοκληρωθεί οι ποζολανικές αντιδράσεις. Για να ελαχιστοποιηθεί η διατάραξη της μικροδομής του δείγματος, πριν την ανάλυση με πολωτικό μικροσκόπιο, χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Αποξήρανσης Κρίσιμου Σημείου (Mitchell, 1992).

Στις περισσότερες περιπτώσεις, τα δείγματα παρασκευάζονται σε μορφή τυποποιημένων ορθογωνικών πλακιδίων 27x46 mm. Οι ορθογωνικές τομές βράχων και παρόμοιων υλικών συχνά παρασκευάζονται ως λεπτές τομές πάχους 30 μικρών χωρίς κάλυψη με υάλινη πλάκα. Εναλλακτικά μπορεί να στιλβωθούν πυρήνες διαμέτρου μίας ίντσας. Επίσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν κόκκοι ή θραύσματα στερεωμένοι σε εποξειδικούς δίσκους, οι οποίοι στη συνέχεια στιλβώνονται κατά το μισό τους πάχος για να αποκαλύψουν μία διατομή του υλικού.

Το πλέον κρίσιμο βήμα πριν την ανάλυση ήταν η λείανση και στίλβωση του δείγματος, ώστε οι επιφανειακές ατέλειες να μην παρεμβαίνουν στις αλληλεπιδράσεις ηλεκτρονίων-δείγματος. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό για δείγματα που περιέχουν ορυκτά με διαφορετικές σκληρότητες. Η στίλβωση πρέπει να αποδώσει μία επίπεδη επιφάνεια με ομοιόμορφη ομαλότητα. Τα περισσότερα πυριτικά ορυκτά είναι ηλεκτρικοί μονωτές. Η κατεύθυνση μία δέσμης ηλεκτρονίων

προς το δείγμα μπορεί να προκαλέσει φόρτιση του δοκιμίου, το οποίο πρέπει να αποφορτιθεί. Πριν την ανάλυση τα δείγματα τυπικά καλύφθηκαν με λεπτό υμένα αγώγιμου υλικού με τη μέθοδο θερμικής εξάτμισης. Όταν τα δείγματα τοποθετήθηκαν στη βάση, η επικαλυμμένη επιφάνειά τους ήρθε σε ηλεκτρική επαφή με τη βάση (τυπικά αυτό γίνεται με αγώγιμη ταινία ή βαφή). Η επιλογή της επικάλυψης εξαρτάται από τον τύπο ανάλυσης που θα γίνει. Για παράδειγμα, οι περισσότερες χημικές αναλύσεις EPMA (Electron Probe Micro Analysis) γίνονται σε δείγματα καλυμμένα με άνθρακα, που σχηματίζει υμένα αρκετά λεπτό και ελαφρύ ώστε να μην προκαλεί παρεμβολές στη δέσμη ηλεκτρονίων.

Σχήμα 3.12- Πολωτικό Μικροσκόπιο ZEISS (PLM) των εργαστηρίων του ΙΓΜΕ

4 ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑΣ ΔΟΜΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΑΠΟΔΟΜΗΣΗΣ ΤΗΣ ΒΕΛΤΙΩΜΕΝΗΣ ΑΡΓΙΛΟΥ

4.1 Εισαγωγή

Αυτό το κεφάλαιο εξετάζει τη δημιουργία και καταστροφή δομής στη βελτιωμένη με τέφρα μαλακή άργιλο. Πρώτα εξετάζονται τα βασικά μηχανικά χαρακτηριστικά της σιμεντωμένης και μη σιμεντωμένης αργίλου, δίνοντας παράλληλα και τα δεδομένα για την υγρασία και τα όρια Atterberg, ώστε να συνθέσουν μία ολοκληρωμένη εικόνα της συμπεριφοράς της τεχνητά βελτιωμένης αργίλου με διάφορα ποσοστά ιπτάμενης τέφρας και πώς αυτά τα ποσοστά επηρεάζουν τη δομή της. Ακολουθεί η ανάλυση των χαρακτηριστικών αντοχής, συμπιεστότητας και σχέσης τάσεων-παραμορφώσεων της βελτιωμένης με τέφρα αργίλου, με τη βοήθεια δοκιμών στερεοποίησης σε συμπιεσόμετρο και τριαξονικών δοκιμών ανεμπόδιστης θλίψης για διαφορετικές περιεκτικότητες σε τέφρα καθώς και για διαφορετικούς χρόνους ωρίμανσης. Στη συνέχεια ερμηνεύονται οι όροι «Δημιουργία Δομής» (σχηματισμός δεσμών σιμέντωσης) και «Καταστροφή Δομής» (θραύση δεσμών σιμέντωσης) και επαληθεύονται από τις προκύπτουσες μικροδομές, οι οποίες αναλύονται διεξοδικά στο επόμενο κεφάλαιο.

4.2 Βασικά Φυσικά Χαρακτηριστικά

4.2.1 Υγρασία

Τα Σχήματα 4.1 και 4.2 δείχνουν τη μεταβολή της τελικής υγρασίας της βελτιωμένης με τέφρα αργίλου μετά από διαφορετικούς χρόνους ωρίμανσης χωρίς ή με προστερεοποίηση του δείγματος στα 50 kPa, αντίστοιχα. Σε αυτή την έρευνα, για την ονοματοδοσία των μιγμάτων, η συνολική υγρασία του αρχικού μίγματος ορίζεται ως ο λόγος του βάρους του συνολικού ύδατος προς το βάρος των στερεών μόνον της αργίλου. Οι υπολοιποι υπολογισμοί υγρασίας έγιναν σε σχέση με το ξηρό βάρος αργίλου και τέφρας με ξήρανση σε κλίβανο επί 24 ώρες και θερμοκρασία 105^{o}C.

Στον Πίνακα 4.1 και στο Σχήμα 4.2, παρουσιάζεται η μείωση της υγρασίας λόγω του κατακόρυφου φορτίου των 50 kPa που επιβάλλεται στο μίγμα. Και στα δύο Σχήματα 4.1 και 4.2 παρατηρείται ότι το μεγαλύτερο μέρος της μείωσης στην υγρασία λαμβάνει χώρα μέσα στις πρώτες 28 ημέρες ωρίμανσης, και ότι το μέγεθος

της μείωσης αυξάνει με την αύξηση του ποσοστού της τέφρας. Επισημαίνεται ότι δεν υφίσταται σημαντική μείωση υγρασίας ακόμη και σε χρόνο ωρίμανσης 365 ημερών (1 έτος) και αυτό οφείλεται στην επίπτωση της τέφρας ως συνδετικού υλικού.

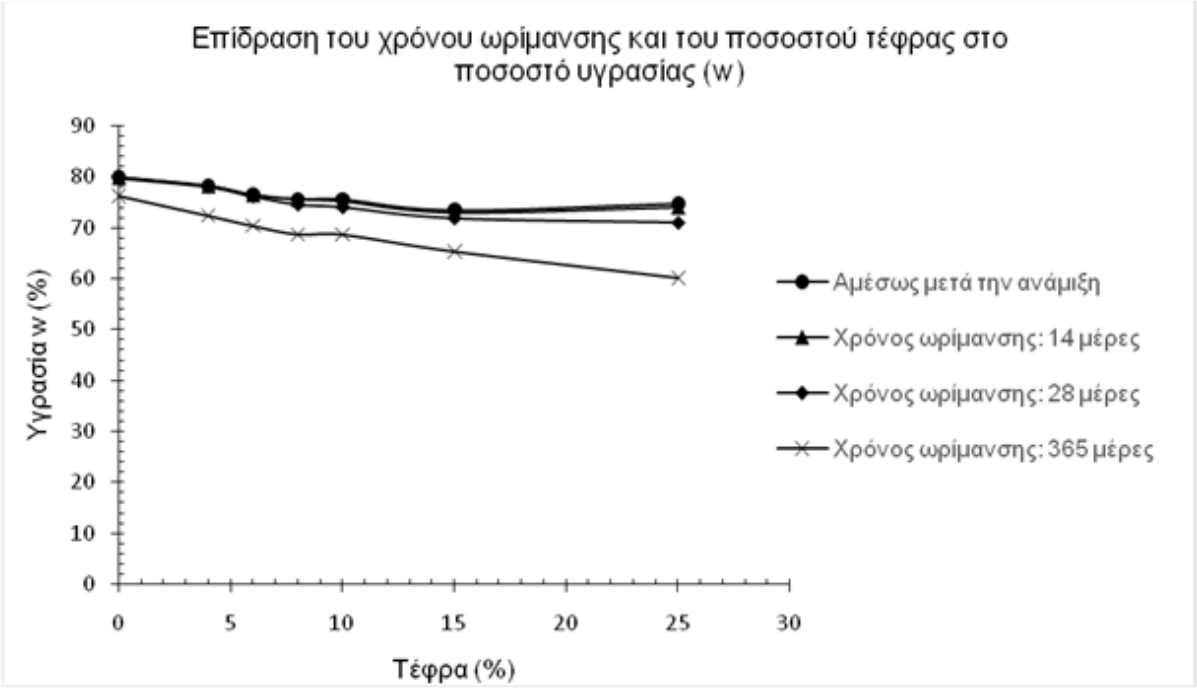
Παρόμοια μείωση της υγρασίας σε αργίλους παρατηρήθηκε και από τους Thenoux κ.ά. (2009), Das (2009), Ahmaruzzaman (2010), και Saraswat κ.ά. (2014). Αυτό δεν εκπλήσσει καθώς η τέφρα δεν είναι τόσο ισχυρό συνδετικό υλικό ώστε να αυξήσει την αντοχή του εδάφους. Τα φυσικά και μηχανικά χαρακτηριστικά βελτιώθηκαν σε κάποιο βαθμό με την προσθήκη της τέφρας, αλλά για ποσοστά τέφρας πάνω από κάποιο όριο. Όπως φαίνεται στα Σχήματα 4.1 και 4.2 εμφανίζεται μία σημαντική αλλαγή στην υγρασία για ποσοστά τέφρας 15% και πάνω.

Αυτό μπορεί να εμηνευθεί με το ό,τι το ύδωρ απορροφάται και μετατρέπεται σε ένυδρο CASH (Calcium Alumino-Silicate Hydrate) στη διάρκεια της ποζολανικής αντίδρασης και της ενυδάτωσης, και δεν αποβάλλεται με την επαναθέρμανση των προϊόντων σιμέντωσης στους 105°C. Αυτή η άποψη επαληθεύτηκε με την εκτέλεση μίας απλής δοκιμής με ισοδύναμη ποσότητα CaO αντί της τέφρας. Καθώς και οι δύο αντιδράσεις, ποζολανική και ενυδάτωσης, εμπεριέχουν ασβέστιο, η συνολική ποσότητα ύδατος που θα χρησιμοποιηθεί πρέπει να είναι ανάλογη με την ποσότητα του διαθέσιμου ασβέστιου. Στο Σχήμα 4.3 παρουσιάζονται συγκριτικά αποτελέσματα δύο δειγμάτων θαλάσσιας αργίλου βελτιωμένης με 5% καθαρό Ca και 7.38% κοινού τσιμέντου πόρτλαντ (OPC), αντίστοιχα. Οι αναλογίες έχουν επιλεγεί ώστε η ποσότητα ασβεστίου να είναι ίση και στα δύο δείγματα. Επίσης η ποσότητα τσιμέντου OPC ήταν αρκετά μικρή ώστε να εξασφαλιστεί ότι οι ποζολανικές αντιδράσεις θα ολοκληρωθούν λόγω πλήρους χρησιμοποίησης του ασβεστίου. Η ξηρή σκόνη CaO και κοινού τσιμέντου αναμίχθηκε με πολτό αργίλου αρχικής υγρασίας 80%, και όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.3, η υγρασία μετά 28 ημέρες ήταν περίπου ίση στα δύο δείγματα, επαληθεύοντας συνεπώς την παραπάνω παραδοχή.

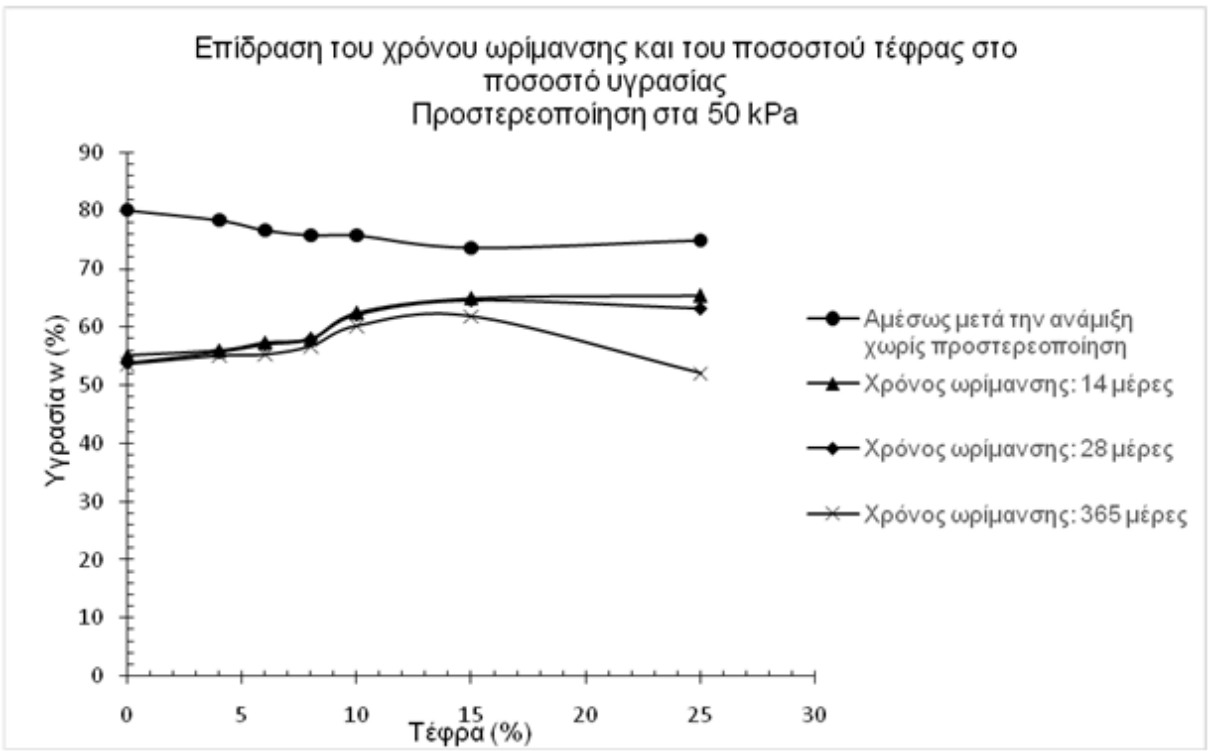
Αναφερόμενοι πάλι στα Σχήματα 4.1 και 4.2, οι υγρασίες 14 και 28 ημερών δεν έδειξαν κάποια σημαντική μείωση, για ποσοστά τέφρας μικρότερα από 15%. Για υψηλότερα ποσοστά τέφρας υπήρξε μία ελαφρά μεγαλύτερη μείωση της υγρασίας με την αύξηση του χρόνου ωρίμανσης. Επιπλέον, η κατακόρυφη μετατόπιση μεταξύ των καμπυλών άμεσης μέτρησης και 28 ημερών, αυξανόταν σημαντικά καθώς αυξανόταν το ποσοστό της τέφρας, αλλά σχεδόν σταθεροποιήθηκε για ποσοστό τέφρας περίπου 15%. Αυτό υποδηλώνει ότι η αντίδραση μπορεί να επιβραδύνεται για μεγαλύτερα ποσοστά τέφρας.

Μίγμα	Χρόνος ωρίμανσης (μέρες)	$w_{πολτός}$ (%)	$w_{προστερ.50\ kPa}$ (%)	LL (%)	PL (%)	PI (%)
ΑΑΣ-80-00	0	80	-	73	27	46
	14	79.89	55.12	74	28	46
	28	79.74	53.81	72	27	45
	365	76.21	53.60	73	28	45
ΑΑΣ-82-04	0	78.25	-	92	48	44
	14	78.21	55.98	90	46	44
	28	78.01	55.68	84	43	41
	365	72.31	55.01	79	39	40
ΑΑΣ-85-06	0	76.51	-	92	49	43
	14	76.47	57.32	88	42	46
	28	76.14	56.97	83	39	44
	365	70.32	55.24	78	37	41
ΑΑΣ-87-08	0	75.67	-	92	48	44
	14	75.59	58.01	87	42	45
	28	74.56	57.89	83	37	46
	365	68.64	56.68	75	33	42
ΑΑΣ-90-10	0	75.63	-	92	48	44
	14	75.21	62.42	86	40	46
	28	74.03	62.09	81	36	45
	365	68.61	60.14	68	28	40
ΑΑΣ-95-15	0	73.51	-	89	49	40
	14	73.01	64.87	82	38	44
	28	71.85	64.54	76	32	44
	365	65.31	61.75	62	24	38
ΑΑΣ-115-25	0	74.80	-	88	48	40
	14	74.02	65.34	79	35	44
	28	71.01	63.15	56	29	27
	365	55.11	50.05	45	10	35

Πίνακας 4.1 – Τιμές φυσικών χαρακτηριστικών των μιγμάτων



Σχήμα 4.1 – Επίδραση στην υγρασία του χρόνου ωρίμανσης και ποσοστού τέφρας χωρίς προστερεοποίηση των δειγμάτων.



Σχήμα 4.2 – Επίδραση στην υγρασία του χρόνου ωρίμανσης και ποσοστού τέφρας με προστερεοποίηση των δειγμάτων στα 50 kPa

Description	Final Water Content, w_w (%)	Atterberg's Limit (%)			Unconfined Compressive Strength, q_u (kPa)
		LL	PL	PI	
5% pure CaO	65.47	109.43	68.42	41.01	210
7.38% Cement	65.16	108.04	68.32	39.72	200

Σχήμα 4.3 – Επίδραση ποσοστού κοινού τσιμέντου και CaO (οξειδίου ασβεστίου) στα χαρακτηριστικά των βελτιωμένων αργίλων (αρχική υγρασία 80%, ξηρή ανάμιξη και ωρίμανση 28 ημέρες) (Kamruzzaman, 2002)

4.2.2 Όρια Atterberg

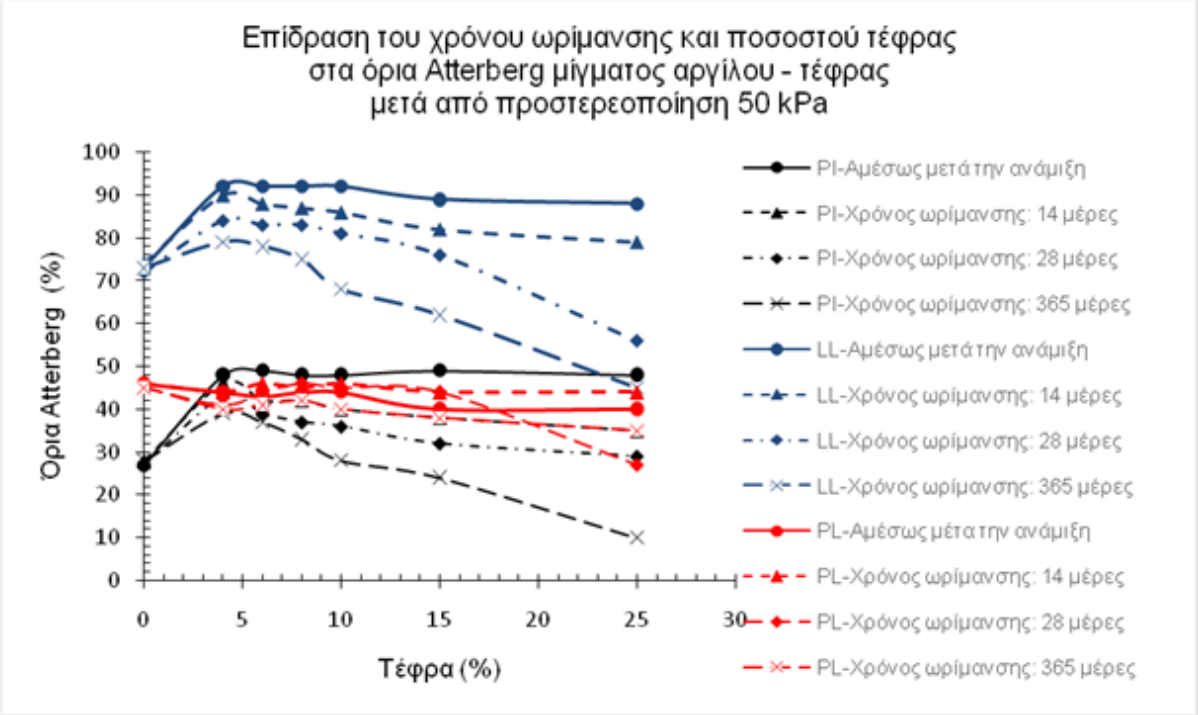
Για λόγους σύγκρισης, οι δοκιμές των ορίων Atterberg σε αυτή την έρευνα έγιναν μετά τη φόρτιση των δειγμάτων με κατακόρυφη τάση 50 kPa ώστε να σταθεροποιηθεί το μίγμα, να επιτραπεί η διαφυγή του παγιδευμένου αέρα από τη μάζα του μίγματος αργίλου – τέφρας, και να αυξηθεί η ομογένεια του μίγματος.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.4, ο δείκτης πλαστικότητας (PI) μειώνεται ελαφρά στα χαμηλά ποσοστά τέφρας μέχρι 6%, και στη συνέχεια ακολουθεί μία σταθερή μείωση καθώς αυξάνεται το ποσοστό της τέφρας. Αυτό μπορεί να αποδοθεί στην σχεδον παράλληλη πορεία των διαγραμμάτων του ορίου πλαστικότητας και υδαρότητας, για χρόνους ωρίμανσης έως 28 ημέρες. Δηλαδή οι μεταβολές και για τα δύο όρια είναι περίπου ίσες. Αυτό ερμηνεύεται με την παραδοχή ότι, η ποσότητα ύδατος που παγιδεύεται μέσα στα συσσωματώματα, και δεν συμμετέχει στη μεταβολή της συνεκτικότητας του μίγματος, προστίθεται και στα δύο όρια (πλαστικότητας και υδαρότητας) και στη συνέχεια απαλείφεται αριθμητικά με την αφαίρεση του ορίου πλαστικότητας από το όριο υδαρότητας, για να προκύψει ο δείκτης πλαστικότητας. Ειδικότερα, το όριο πλαστικότητας αυξάνει μονοτονικά με το αυξανόμενο ποσοστό της τέφρας, μετά χρόνο ωρίμανσης 14 ημερών, με μεγαλύτερο ρυθμό αύξησης στις μικρότερες περιεκτικότητες σε τέφρα. Παρόμοιες τάσεις μεταβολής παρατηρήθηκαν σε άλλες αργίλους βελτιωμένες με τέφρα (π.χ. Thenoux κ.ά., 2009) καθώς και σε αργιλώδη εδάφη σταθεροποιημένα με άσβεστο και τσιμέντο τα οποία περιείχαν σημαντικό ποσοστό αργιλικών ορυκτών (π.χ. Brandl κ.ά., 1981; Local κ.ά., 1996; Uddin κ.ά., 1997, Kamruzzaman, 2002). Οι Local κ.ά. (1990) υπέθεσαν ότι μία πιθανή αιτία αυτής της μείωσης είναι η μόρφωση

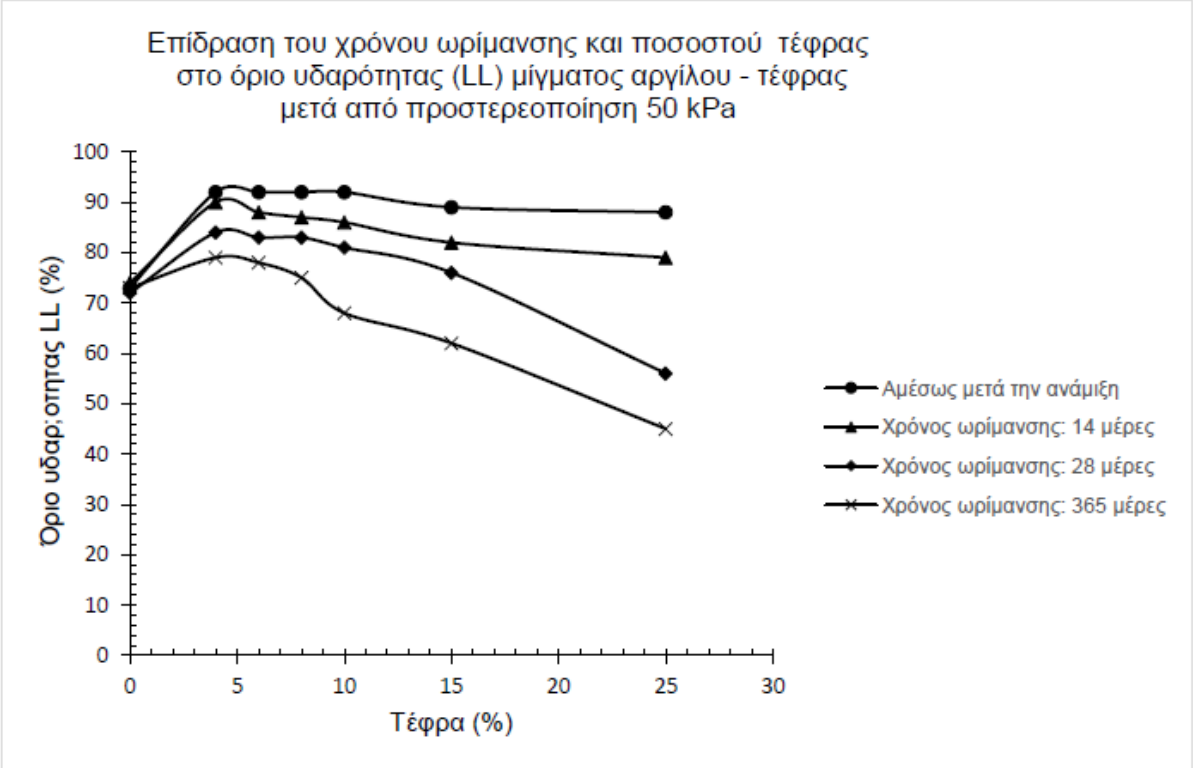
συμπλεγμάτων σωματιδίων και η σιμέντωσή τους σε μεγαλύτερου μεγέθους συσσωματώματα. Μία άλλη πιθανή αιτία είναι το νερό που παγιδεύεται στούς εσωτερικούς πόρους των συσσωματωμάτων. Όπως έχουν προτείνει οι Local κ.ά. (1996), η παρουσία του ύδατος στο εσωτερικό των συσσωματωμάτων αυξάνει τη φαινόμενη υγρασία χωρίς ουσιαστικά να επηρεάζει την αλληλεπίδραση μεταξύ συσσωματωμάτων.

Το όριο υδαρότητας μειώθηκε σημαντικά στις υψηλές περιεκτικότητες σε τέφρα (≥15%) και σε χρόνους ωρίμανσης μεγαλύτερους των 28 ημερών. Αυτό είναι συμβατό με την παραδοχή ότι υπάρχει νερό παγιδευμένο στους εσωτερικούς πόρους των συσσωματωμάτων. Ωστόσο οι ρυθμοί μεταβολής αυτών των δύο ορίων Atterberg σε υψηλότερες περιεκτικότητες σε τέφρα δεν είναι ίδιοι. Αυτό υποδηλώνει ότι η παραδοχή του παγιδευμένου ύδατος εξηγεί πολλές αλλά όχι όλες τις μεταβολές που παρατηρούνται στα όρια πλαστικότητας και υδαρότητας.

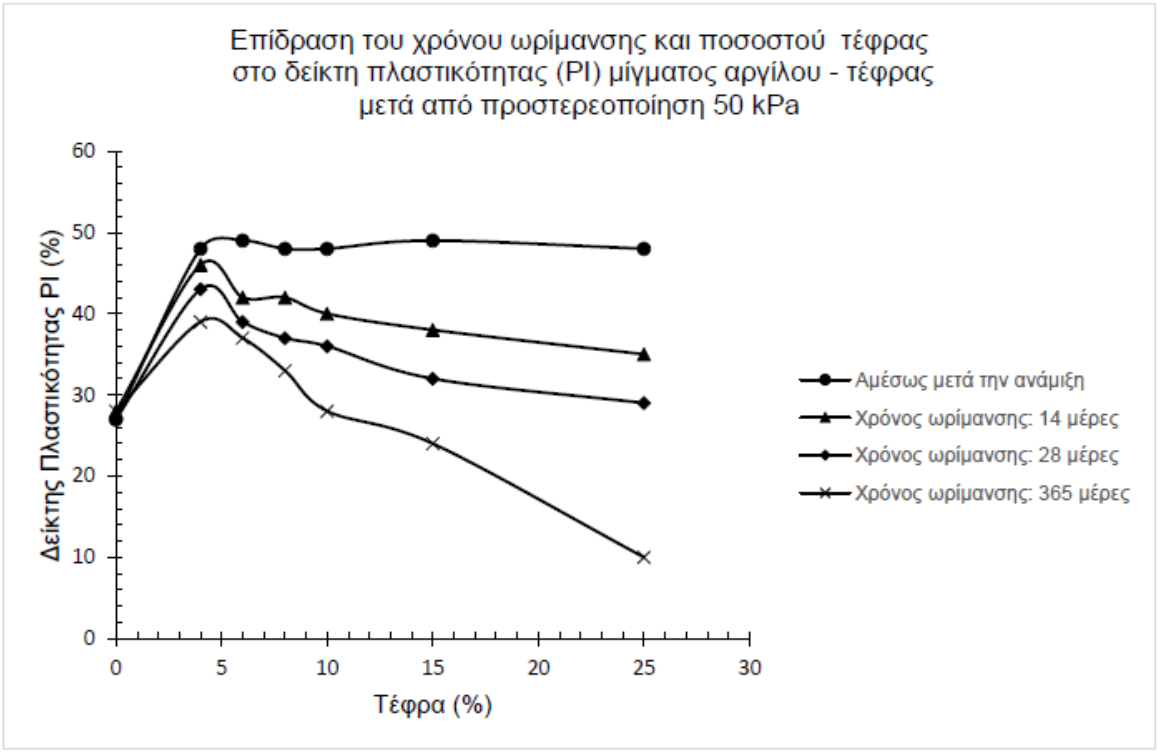
Θα πρέπει να επισημανθεί ότι η τάση μεταβολής του ορίου υδαρότητας σε σχέση με την περιεκτικότητα σε τέφρα φαίνεται να εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τον τύπο του εδάφους. Οι Sivapullaiah κ.ά. (2000) αναφέρουν παρόμοια τάση μείωσης στο έδαφος BlackCotton (με υψηλό ποσοστό μοντμοριλλονίτη και υψηλή διόγκωση) βελτιωμένο με άσβεστο, μετά από χρόνο ωρίμανσης 7 ημερών. Επίσης οι Kinuthia κ.ά. (1999) ανέφεραν παρόμοια τάση για καολινίτη βελτιωμένο με άσβεστο, που μετρήθηκε λίγες ώρες μετά την ανάμιξη. Αντιθέτως, τα δεδομένα των Local κ.ά. (1996) σε άργιλο της Louiseville, βελτιωμένη με άσβεστο, μετά από 100 ημέρες ωρίμανσης, δείχνουν μία γενική αύξηση του ορίου υδαρότητας με την αύξηση του ποσοστού ασβέστου. Ο Brandl (1981) αναφέρει αποκλίνουσες τάσεις μεταβολής για δύο τύπους εδαφών, με το πλαστικότερο έδαφος (που περιέχει μοντμοριλλονίτη) να εμφανίζει σημαντική μείωση του ορίου υδαρότητας (LL) μετά από 7 και 270 ημέρες ωρίμανσης, ενώ το λιγότερο πλαστικό έδαφος να εμφανίζει αντίστοιχη αύξηση. Η γενική τάση φαίνεται να είναι η μείωση του ορίου υδαρότητας σε υψηλής πλαστικότητας έδαφος και η αύξησή του σε χαμηλής πλαστικότητας έδαφος. Οι προηγούμενες διαπιστώσεις υποδηλώνουν ότι, σε εδάφη υψηλής πλαστικότητας η ενθυλάκωση των συσσωματωμάτων αργίλου από τα υλικά σιμέντωσης (συγκόλλησης) έχει επικρατέστερη επίδραση, οδηγώντας σε μείωση του ορίου υδαρότητας. Επιπλέον, σε εδάφη χαμηλής πλαστικότητας, η παρουσία παγιδευμένου ύδατος στο εσωτερικό των συσσωματωμάτων έχει την επικρατέστερη επίδραση, οδηγώντας σε αύξηση του ορίου υδαρότητας.



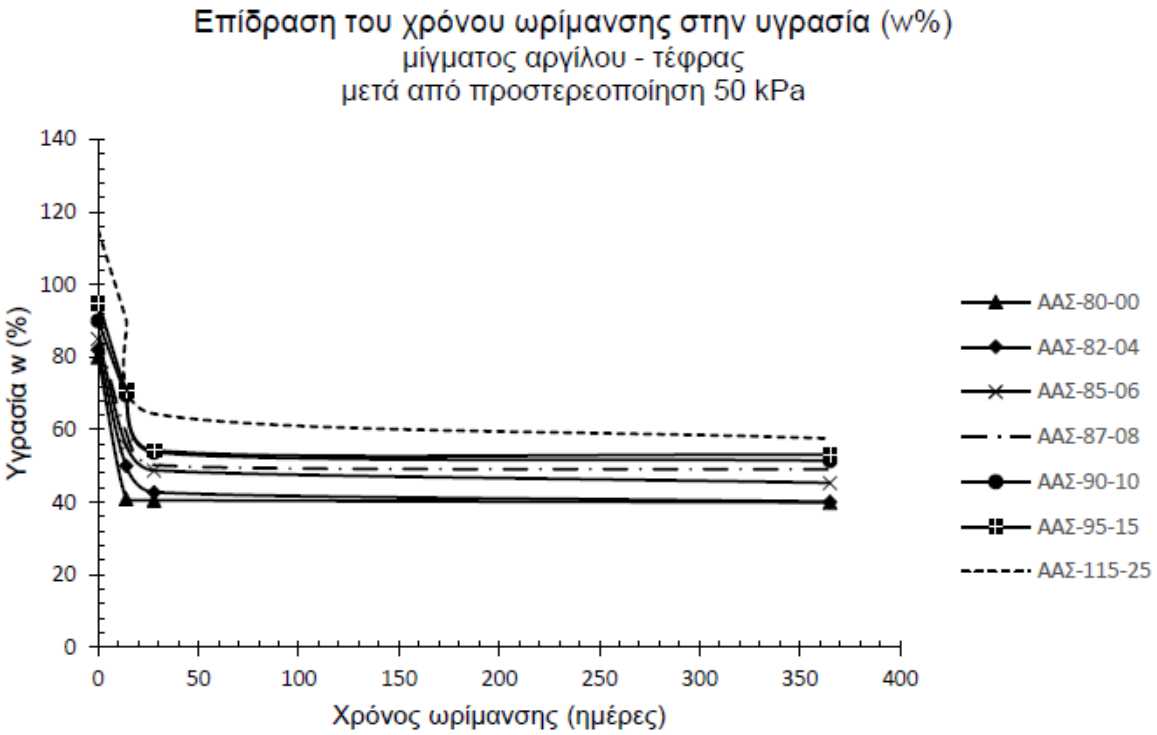
Σχήμα 4.4 – Επίδραση χρόνου ωρίμανσης και ποσοστού τέφρας στα όρια Atterberg της βελτιωμένης αργίλου μετά από προστερεοποίηση των δειγμάτων στα 50 kPa



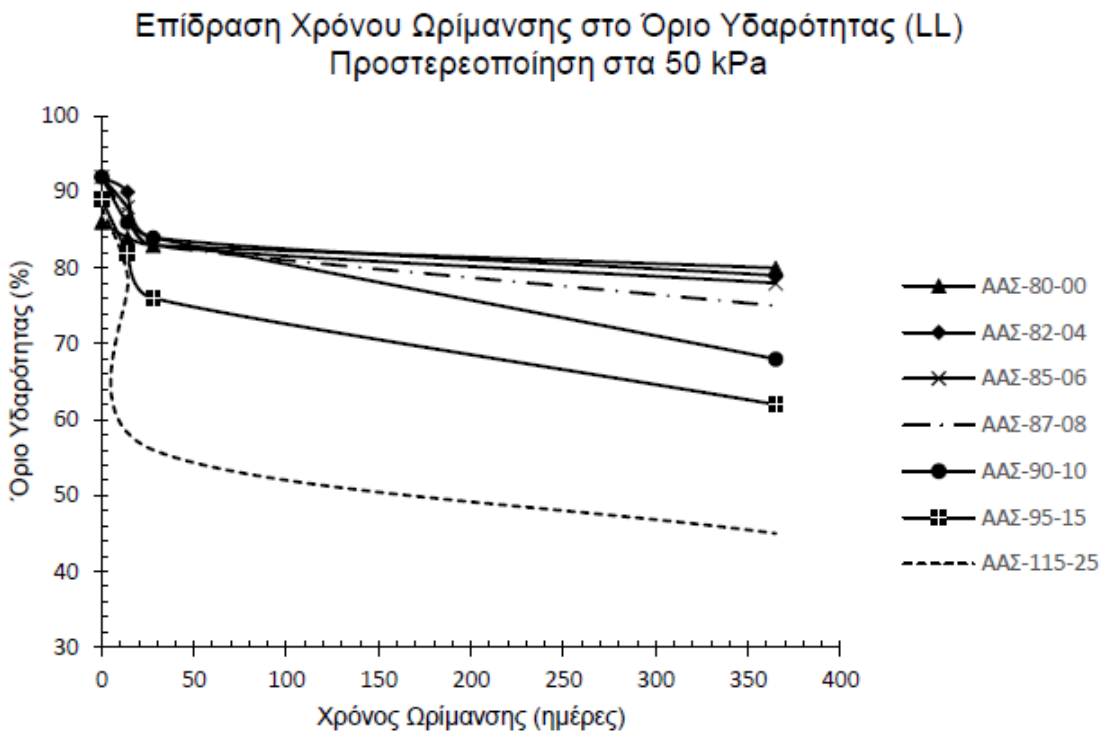
Σχήμα 4.5 – Επίδραση του χρόνου ωρίμανσης και ποσοστού τέφρας στο όριο υδαρότητας της βελτιωμένης αργίλου μετά από προστερεοποίηση των δειγμάτων στα 50kPa



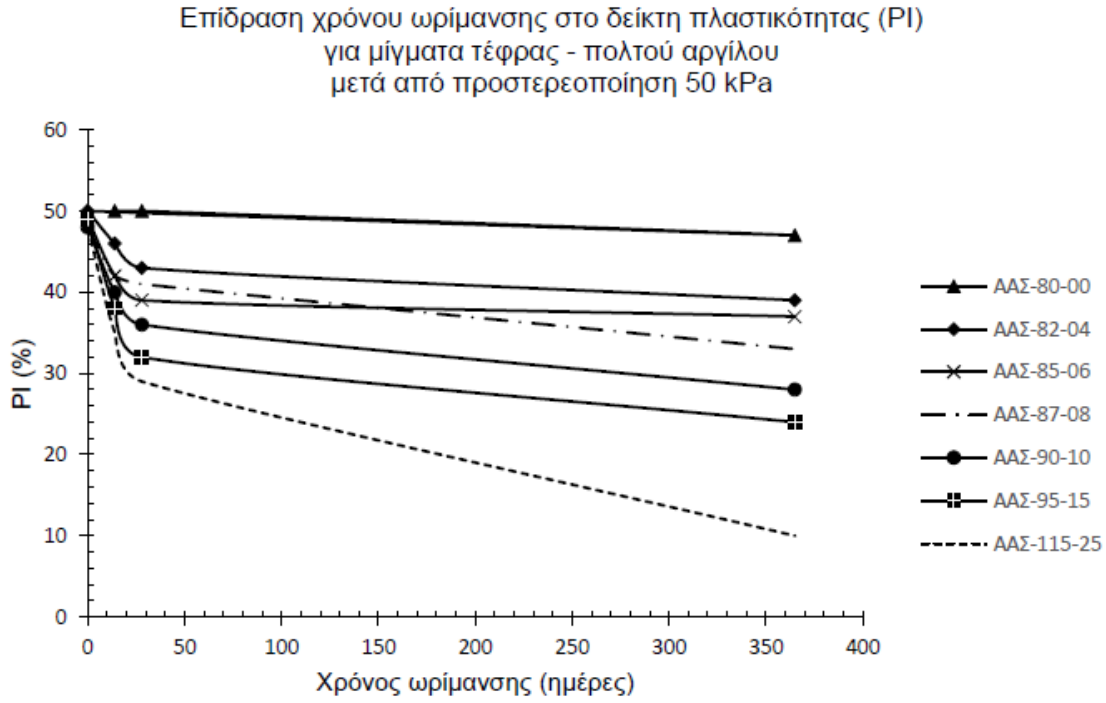
Σχήμα 4.6 – Επίδραση του χρόνου ωρίμανσης και ποσοστού τέφρας στο δείκτη πλαστικότητας της βελτιωμένης αργίλου μετά από προστερεοποίηση των δειγμάτων στα 50kPa



Σχήμα 4.7 – Επίδραση του χρόνου ωρίμανσης στη φυσική υγρασία αργίλου βελτιωμένης με τέφρα μετά από προστερεοποίηση των δειγμάτων στα 50 kPa



Σχήμα 4.8 – Επίδραση του χρόνου ωρίμανσης στο όριο υδαρότητας (LL) της αργίλου βελτιωμένης με τέφρα μετά από προστερεοποίηση των δειγμάτων στα 50 kPa



Σχήμα 4.9 – Επίδραση του χρόνου ωρίμανσης στο δείκτη πλαστικότητας (PI) της αργίλου βελτιωμένης με τέφρα και μετά από προστερεοποίηση του δείγματος στα 50 kPa

4.2 Χαρακτηριστικά Συμπιεστότητας της Βελτιωμένης Αργίλου

Οι μαλακές άργιλοι είναι γνωστές για τη χαμηλή τους αντοχή και την υψηλή τους συμπιεστότητα. Συνήθως, λόγω της διαδικασίας ιζηματογένεσης σε διαφορετικά περιβάλλοντα, τα φυσικά και μηχανικά χαρακτηριστικά των αργίλων (δηλαδή, λόγος κενών, υγρασία, κοκκομετρική διαβάθμιση, συμπιεστότητα και αντοχή) εμφανίζουν σημαντικές διαφορές ανάλογα με την ορυκτολογική τους σύνθεση. Επιπλέον, εμφανίζουν υψηλή συμπιεστότητα (περιλαμβανόμενης δευτερεύουσας στερεοποίησης), μειωμένη αντοχή, χαμηλή διαπερατότητα και συμπύκνωση, και συνεπώς χαμηλή ποιότητα χαρακτηριστικών για έργα πολιτικού μηχανικού.

Όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 2, η ανάμιξη ενός συνδετικού υλικού (π.χ. τέφρα) με ένα μαλακό αργιλικό εδάφους γίνεται με σκοπό τη βελτίωση των χαρακτηριστικών του εδάφους, σχετικά με τη συμπεριφορά του σε έργα μηχανικού. Σε αυτή την έρευνα, το έδαφος βελτιώθηκε με ανάμιξη ιπτάμενης τέφρας Πτολεμαΐδας. Οι κύριοι μηχανισμοί βελτίωσης της αργίλου επιτυγχάνονται με το σχηματισμό χημικών δεσμών μεταξύ των πλακιδίων της αργίλου. Όταν τα πλακίδια της αργίλου συνδεθούν, το έδαφος ενισχύεται σε κάποιο βαθμό και βελτιώνει τις φυσικές και μηχανικές του ιδιότητες.

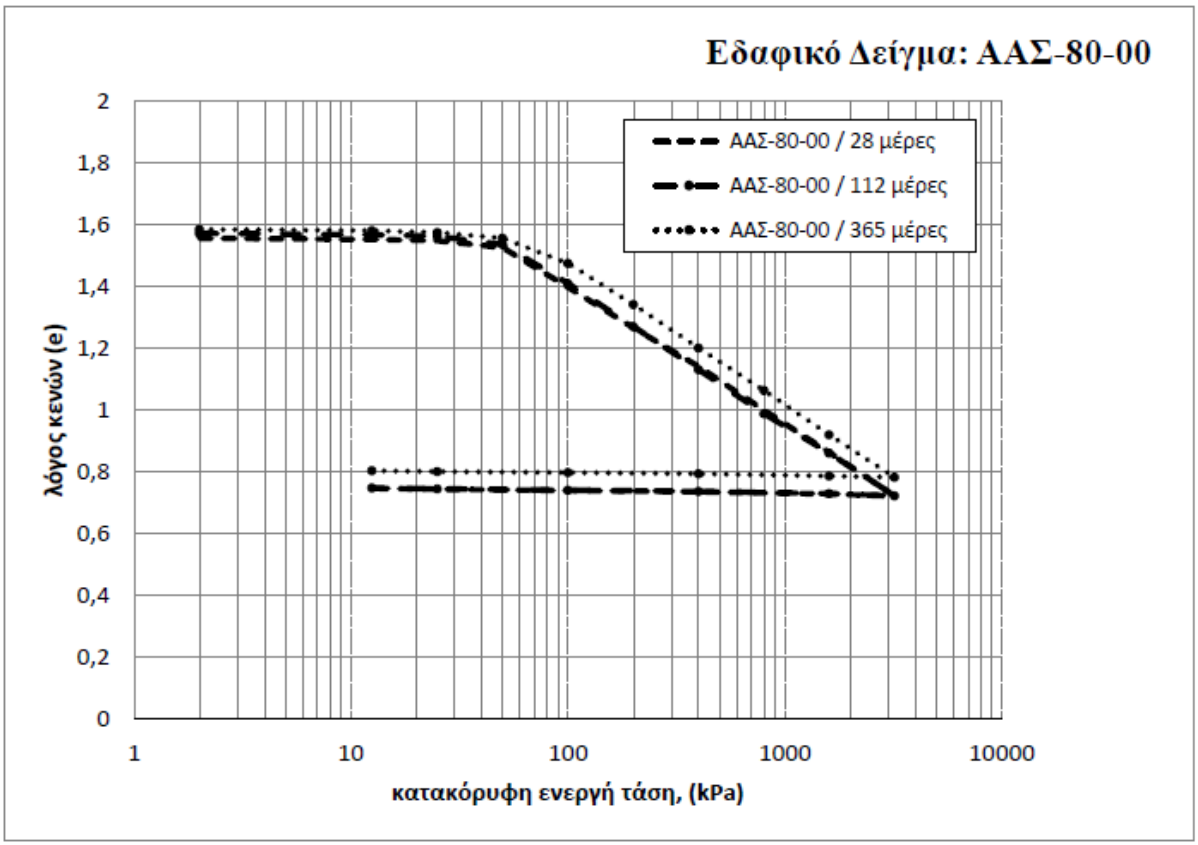
Στην ενότητα 4.3, παρουσιάσθηκαν και ερμηνεύθηκαν οι μεταβολές των φυσικών χαρακτηριστικών της βελτιωμένης αργίλου, και στη συνέχεια θα διερευνηθούν οι μηχανικές ιδιότητές της. Η διερεύνηση περιλαμβάνει δύο σκέλη (α) την επίδραση του ποσοστού της τέφρας στις μηχανικές ιδιότητες της αργίλου του Αγίου Στεφάνου και (β) την επίδραση του χρόνου ωρίμανσης σε αυτές τις ιδιότητες. Τέλος επιλέγονται δύο αναλογίες ανάμιξης με ποσοστό τέφρας 10% και 15% για τον καθορισμό ενός πλαισίου συμπεριφοράς των υπόψη μαλακών βελτιωμένων αργίλων. Έτσι, εκτελέστηκαν δύο τύποι δοκιμών, μονοδιάστατης συμπιεστότητας και ανεμπόδιστης θλίψης, σε δοκίμια αργίλου βελτιωμένης με τέφρα. Τα δοκίμια αυτά είχαν σταθεροποιηθεί ομογενώς με την εφαρμογή κατακόρυφου φορτίου 50 kPa. Όλα τα δοκίμια για την εκτέλεση των δοκιμών μορφοποιήθηκαν μετά το στάδιο της προστερεοποίησης, το οποίο διαρκούσε περί τις 20 ημέρες.

4.2.1 Σχέση Τάσης – Λόγου Κενών

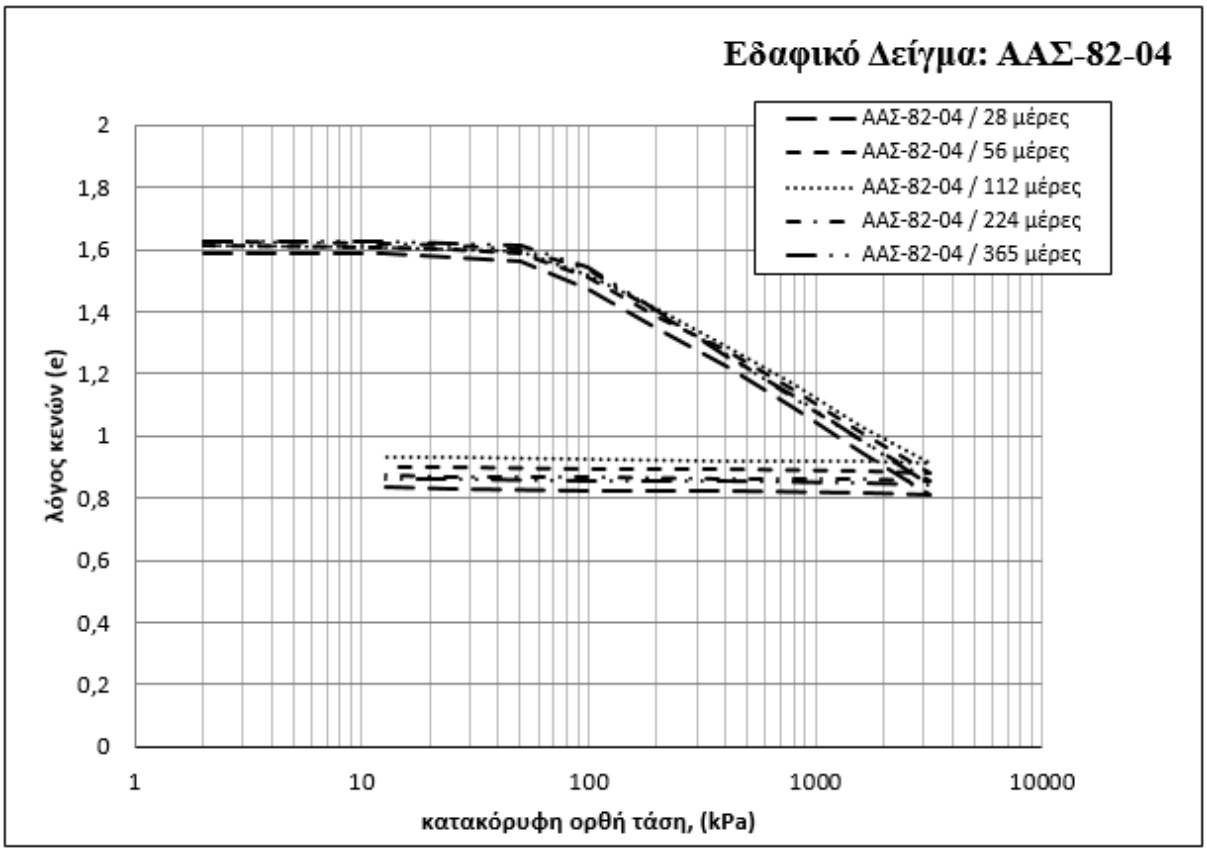
4.2.1.1 Επίδραση του Χρόνου Ωρίμανσης

Η επίδραση του χρόνου ωρίμανσης στη σχέση *e-logσ'*$_v$ της βελτιωμένης αργίλου φαίνεται στα Σχήματα 4.10 – 4.16. Στο Σχήμα 4.10 δεν παρατηρείται σημαντική μεταβολή στη συμπιεστότητα του εδάφους, καθώς δεν έχουν σχηματισθεί δεσμοί στη μάζα του εδάφους σε σύντομες περιόδους ωρίμανσης μέχρι το ένα έτος. Τα βελτιωμένα δείγματα εμφανίζουν υψηλότερη τάση προστερεοποίησης για μεγαλύτερους χρόνους ωρίμανσης. Αυτά τα αποτελέσματα δείχνουν μία συνεπή τάση μεταβολής συγκρινόμενα με εκείνα άλλων ερευνητών για διάφορες σιμεντωμένες βελτιωμένες αργίλους (π.χ. Uddin κ.ά., 1997, Miura κ.ά., 2001). Στα Σχήματα 4.11-4.16, το δείγμα με παρατεταμένο χρόνο ωρίμανσης (365 ημερών) εμφανίζει υψηλότερη φαινόμενη τάση προστερεοποίησης από εκείνη των δειγμάτων με ωρίμανσης 28 ημερών. Επιπλέον, η ογκομετρική συμπιεστότητα της βελτιωμένης αργίλου εμφανίζεται να είναι πολύ μικρή για τάσεις μικρότερες από την αρχικά εφαρμοζόμενη τάση προστερεοποίησης 50 kPa για ποσοστό τέφρας μικρότερο από 10% (≤10%). Αυτό υποδηλώνει ότι η ποζολανική αντίδραση συνεχίζεται και πέραν της περιόδου ωρίμανσης των 365 ημερών, και συνεπώς η διαδικασία δημιουργίας δομής (δεσμών σιμέντωσης) δεν είναι πολύ σημαντική.

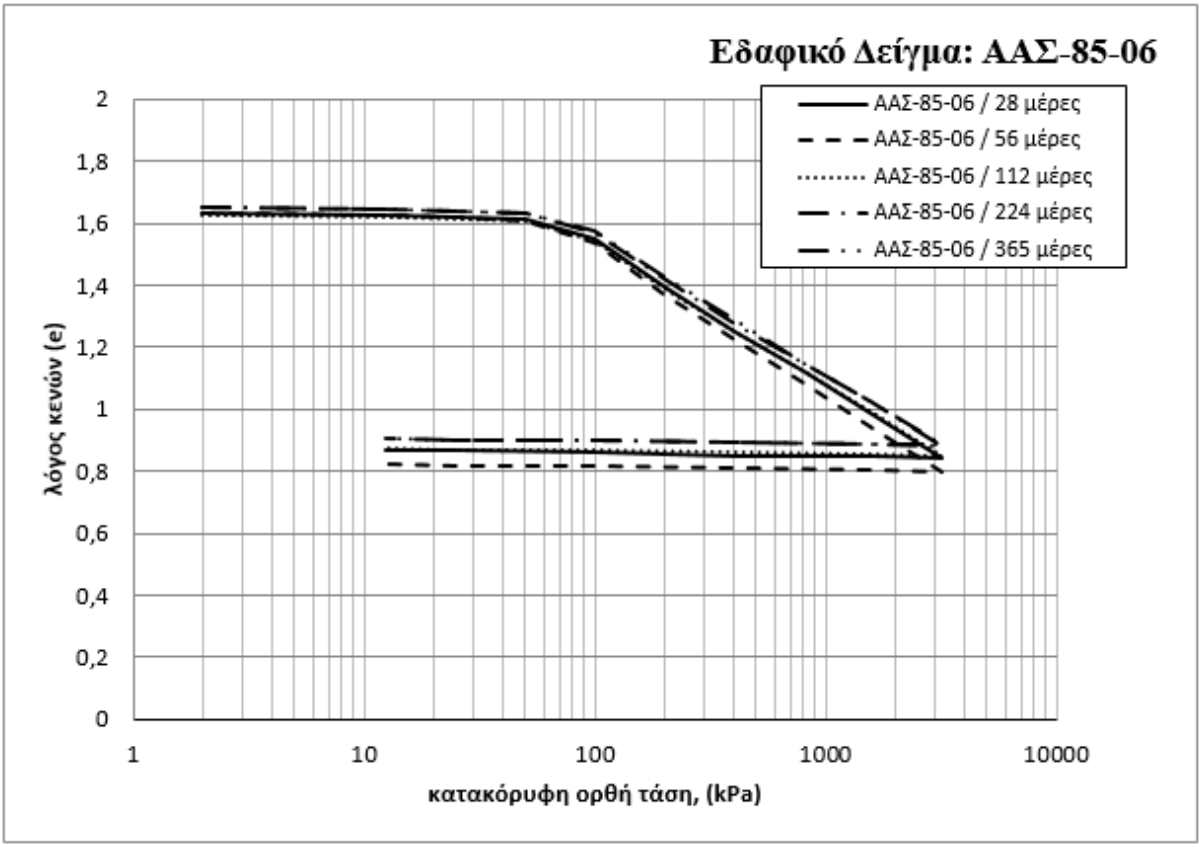
Όπως φαίνεται στον Πίνακα 4.1, η αρχική υγρασία αυξάνεται με την αύξηση της τέφρας, και παράλληλα μειώνεται με την αύξηση του χρόνου ωρίμανσης των δειγμάτων βελτιωμένης αργίλου. Η η αρχική υγρασία επηρεάζεται σημαντικά από την αρχική τάση προστερεοποίησης (όπως προσδιορίζεται από το διάγραμμα e-logσ'$_v$ ως τάση διαρροής) της βελτιωμένης αργίλου.



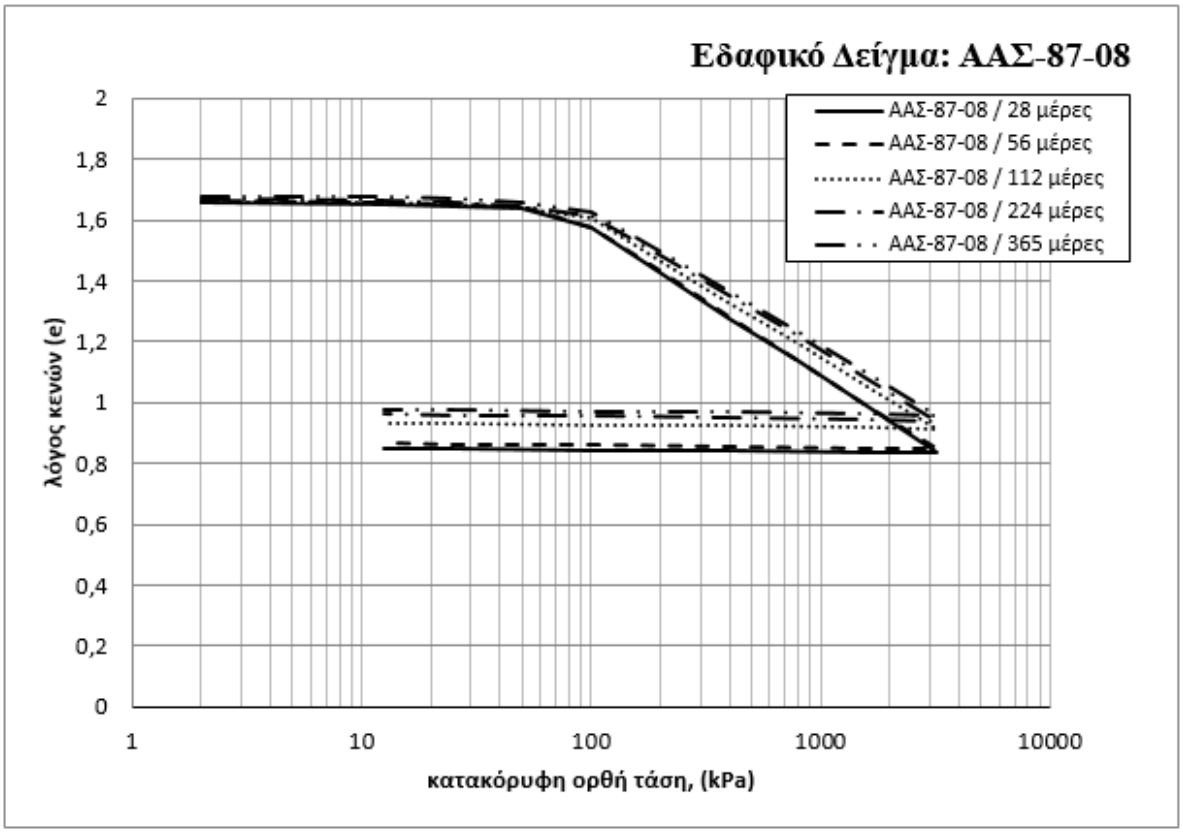
Σχήμα 4.10 Επίδραση ωρίμανσης στη σχέση e-logσ'ν μη βελτιωμένης αργίλου (0% τέφρα) σε μονοδιάστατη στερεοποίηση



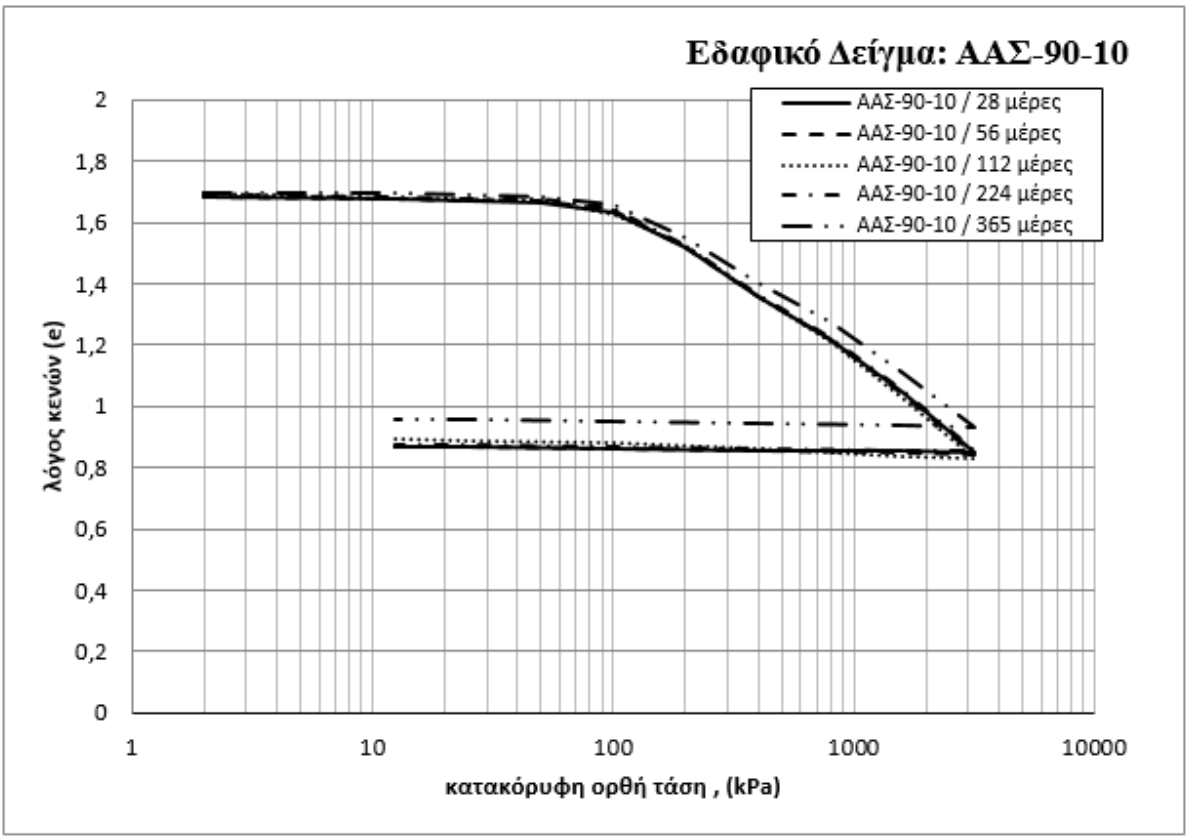
Σχήμα 4.11 Επίδραση ωρίμανσης στη σχέση e-logσ'ν βελτιωμένης αργίλου (4% τέφρα) σε μονοδιάστατη στερεοποίηση



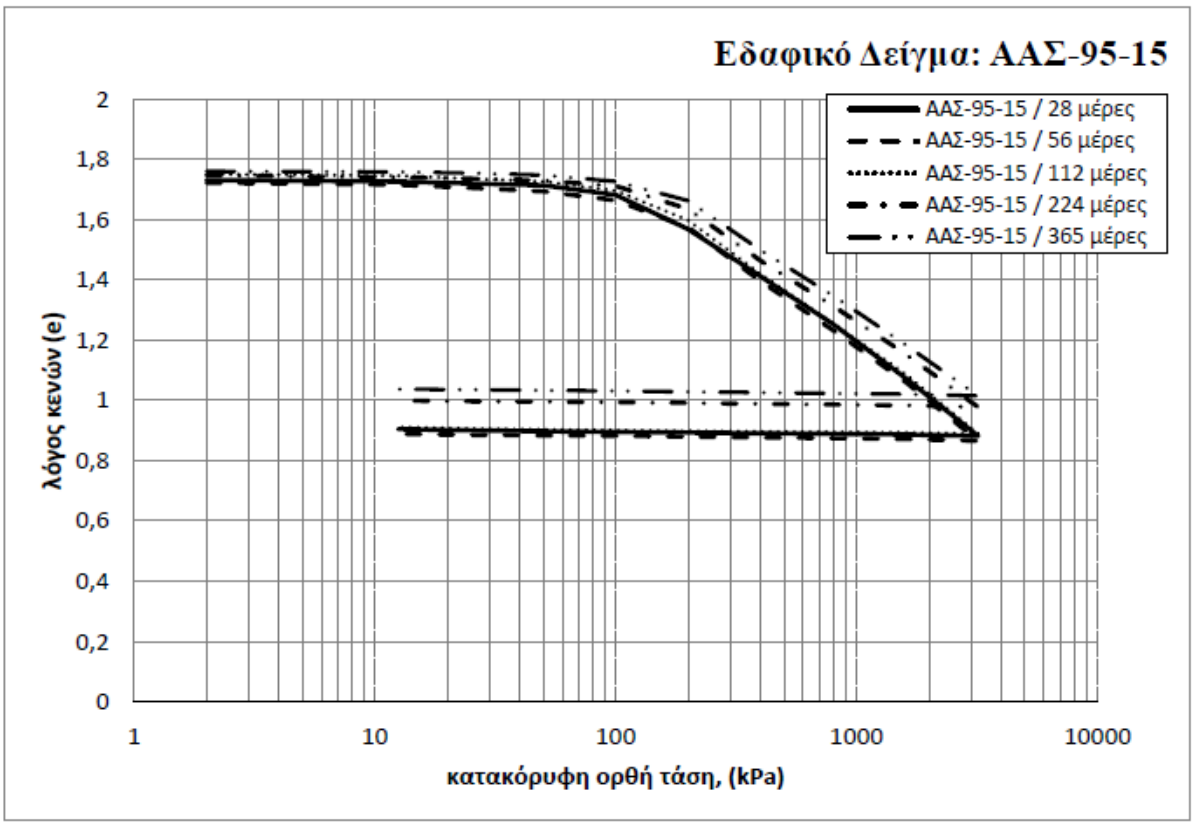
Σχήμα 4.12 Επίδραση ωρίμανσης στη σχέση e-logσ'ν βελτιωμένης αργίλου (6% τέφρα) σε μονοδιάστατη στερεοποίηση



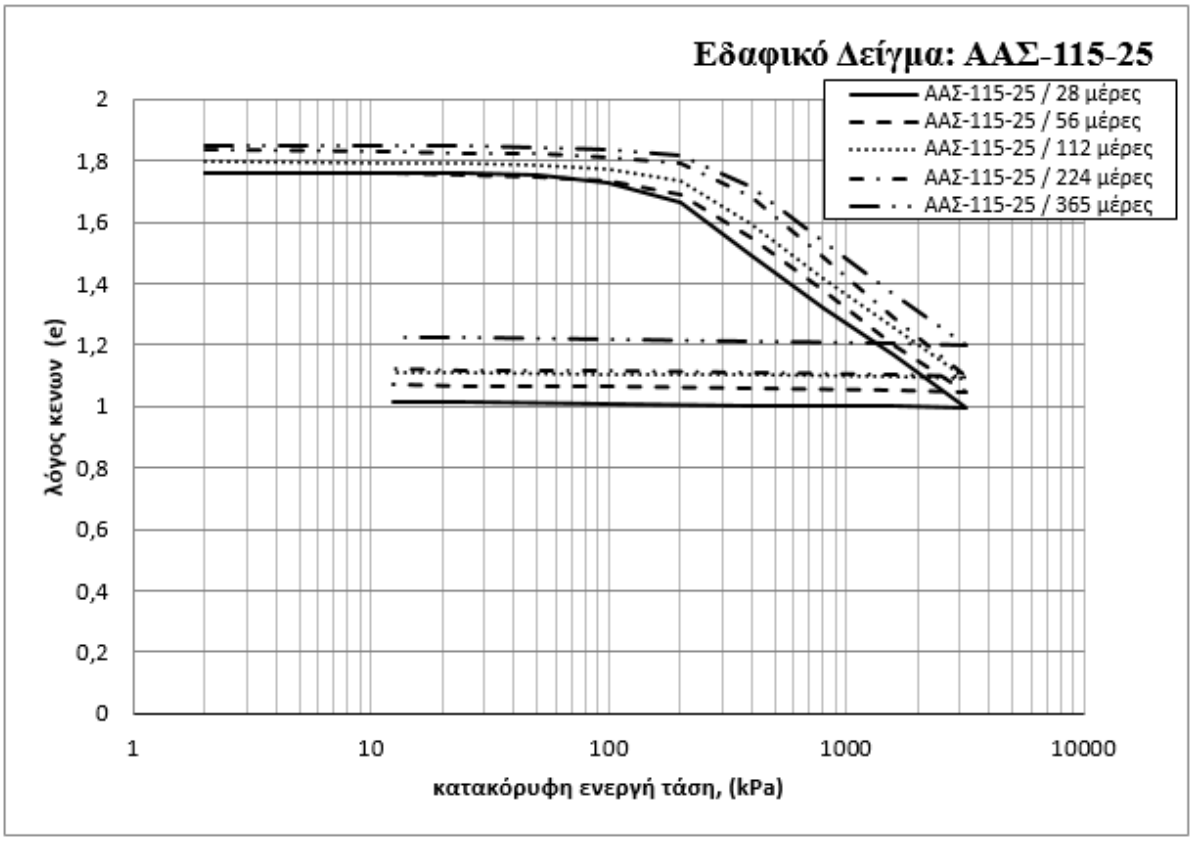
Σχήμα 4.13 Επίδραση ωρίμανσης στη σχέση e-logσ'ν βελτιωμένης αργίλου (8% τέφρα) σε μονοδιάστατη στερεοποίηση



Σχήμα 4.14 Επίδραση ωρίμανσης στη σχέση e-logσ'ν βελτιωμένης αργίλου (10% τέφρα) σε μονοδιάστατη στερεοποίηση



Σχήμα 4.15 Επίδραση ωρίμανσης στη σχέση e-logσ'ν βελτιωμένης αργίλου (15% τέφρα) σε μονοδιάστατη στερεοποίηση



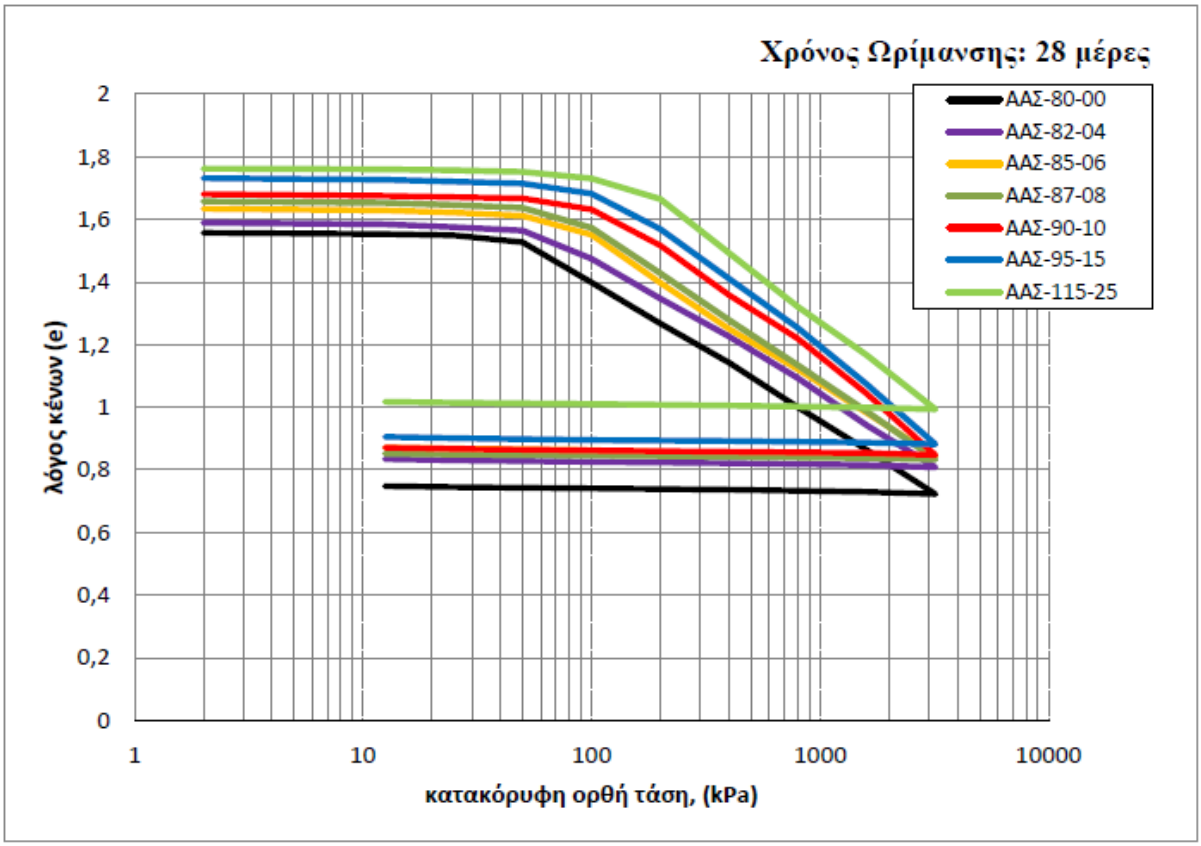
Σχήμα 4.16 Επίδραση ωρίμανσης στη σχέση e-logσ'$_v$ βελτιωμένης αργίλου (25% τέφρα) σε μονοδιάστατη στερεοποίηση

4.2.1.2 Επίδραση Ποσοστού Τέφρας

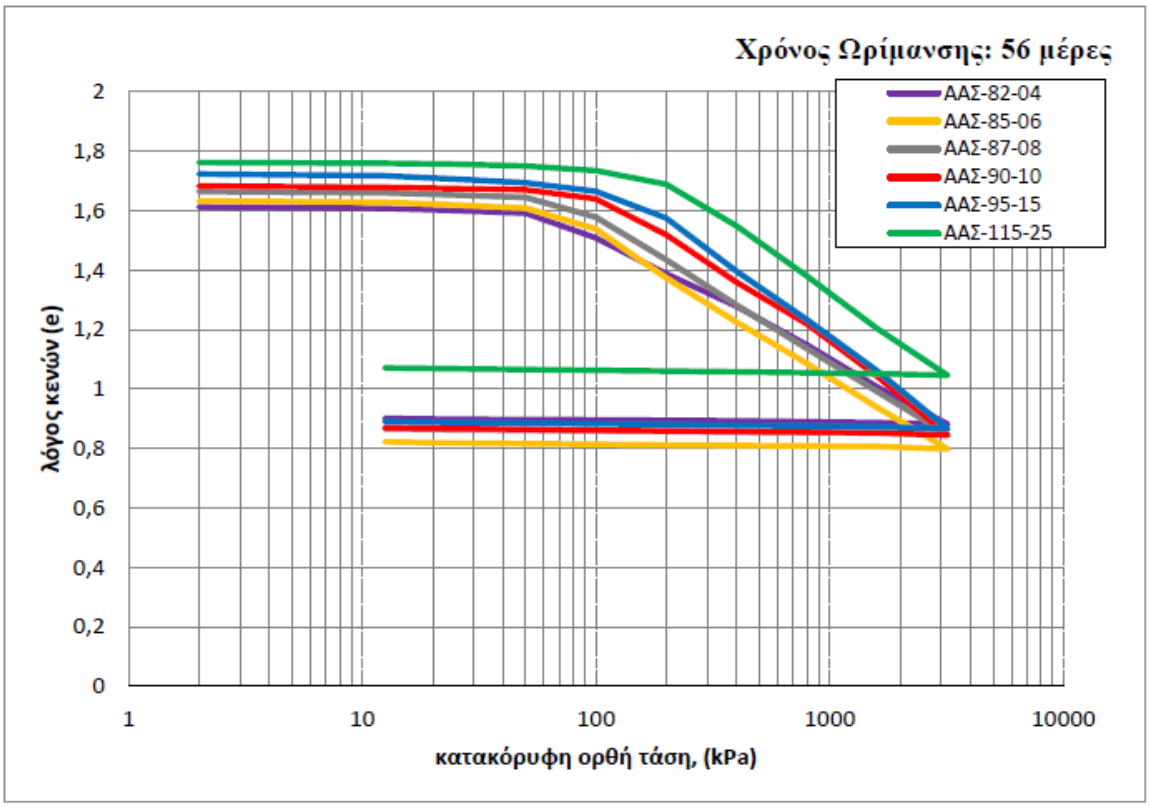
Δοκιμές στερεοποίησης σε συμπιεσόμετρο έγιναν σε δείγματα μη βελτιωμένης και βελτιωμένης αργίλου. Τα Σχήματα 4.17 – 4.21 εμφανίζουν τη σχέση *e-logσ'$_v$* για τα δείγματα αυτά. Παρατηρείται ότι η φαινόμενη τάση προστερεοποίησης (τάση διαρροής) αυξάνει σημαντικά σε σχέση με την εφαρμοσθείσα στα μίγματα αρχική τάση προστερεοποίησης των 50 kPa, όταν το ποσοστό της τέφρας είναι ≥10%, όμως έχοντας πάντα υπόψη ότι η τέφρα δεν είναι τόσο ισχυρό συνδετικό υλικό όσο το τσιμέντο ή η άσβεστος. Τα αποτελέσματα των δοκιμών δείχνουν επίσης ότι, για χαμηλό ποσοστό τέφρας στο μίγμα (π.χ. 4% ή 6%), υπήρχε ελάχιστο αποτέλεσμα σιμέντωσης στη μάζα της βελτιωμένης αργίλου. Αυτό υποδηλώνει ότι απαιτείται συγκεκριμένη ποσότητα τέφρας, για να ολοκληρωθεί η αλληλεπίδραση τέφρας και αργίλου, ώστε να σχηματισθούν τα υλικά σύνδεσης. Η αύξηση της φαινόμενης τάσης προστερεοποίησης οφείλεται στην επίδραση της δημιουργίας δομής (δηλαδή στη δημιορ γία δεσμών σιμέντωσης) στα παλκίδια της βελτιωμένης αργίλου.

Σε τάση στερεοποίησης μικρότερη από την αντίστοιχη τάση προστερεοποίησης, ο αρχικός λόγος κενών των δειγμάτων βελτιωμένης αργίλου αυξάνεται με την αύξηση του ποσοστού της τέφρας (Πίνακας 4.2). Επίσης παρατηρήθηκε ότι η μεταβολή του

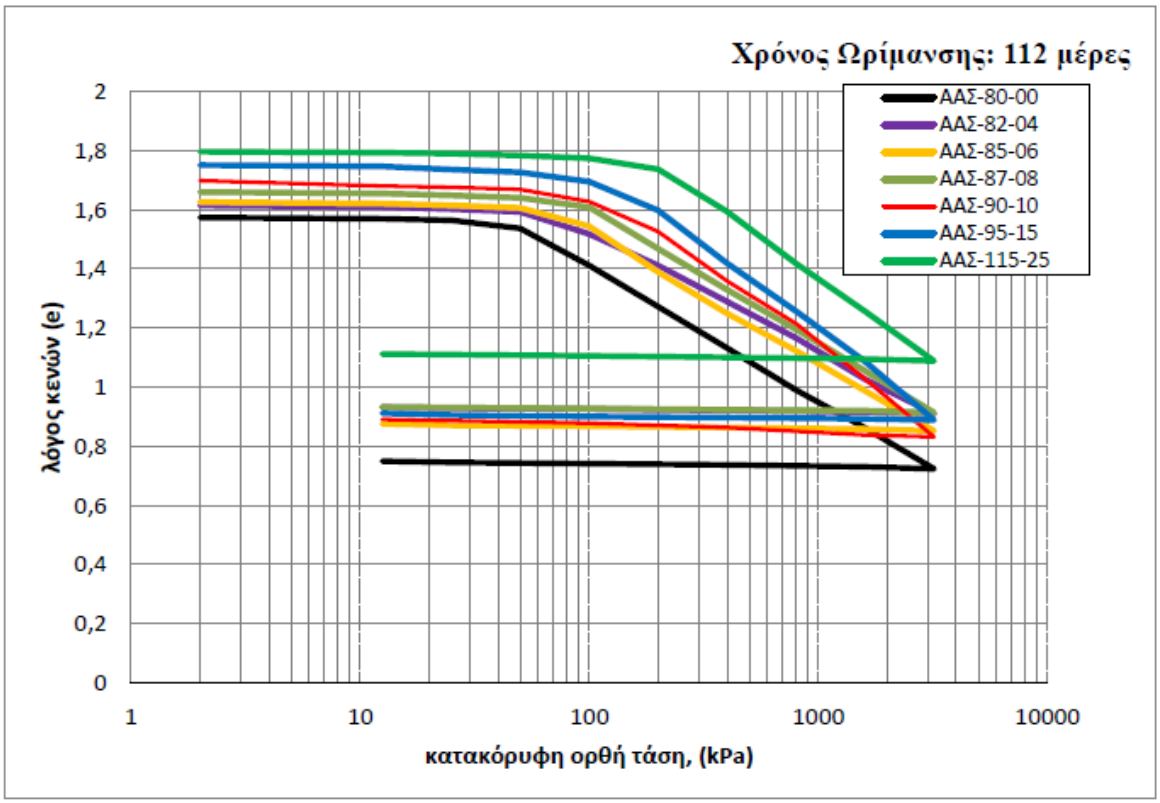
λόγου κενών ήταν πολύ μικρή για την περιοχή τάσεων πριν από την αντίστοιχη εφαρμοζόμενη τάση προστερεοποίησης των 50 kPa. Αυτό συνεπάγεται ότι υπάρχει μία επιδραση της δημιουργίας δομής στην περιοχή τάσεων μετά την εφαρμοσθείσα τάση προστερεοποίησης, και συνεπώς η συμπεριφορά του δείγματος είναι σχετικά όλκιμη. Επιπλέον, πέραν της εφαρμοζόμενης τάσης προστερεοποίησης των 50 kPa, η μείωση του λόγου κενών με την αύξηση της στερεοποίησης είναι αξιοσημείωτη για όλο το εύρος περιεκτικότητας σε τέφρα. Αυτό αποδίδεται στην εμφανή κατάρρευση της δομής (δηλαδή τη θραύση των δεσμών σιμέντωσης) της μάζας της βελτιωμένης αργίλου, όταν φορτίζεται πέραν της τάσης προστερεοποίησης. Σε αυτό το στάδιο, η επίδραση των δεσμών σιμέντωσης είναι ελάχιστη και η υφή της βελτιωμένης αργίλου παίζει τον κυρίαρχο ρόλο στα χαρακτηριστικά συμπιεστότητας. Τα αποτελέσματα έδειξαν επίσης ότι για πιέσεις πέραν της εφαρμοζόμενης τάσης προστερεοποίησης οι καμπύλες για τη βελτιωμένη άργιλο μετατοπίζονται παράλληλα, με αντίστοιχη αύξηση του λόγου κενών για αύξηση του ποσοστού της τέφρας. Αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η επιφάνεια διαρροής και η περιβάλλουσα θραύσης της βελτιωμένης αργίλου αυξάνουν με την αύξηση του ποσοστού συνδετικού υλικού.



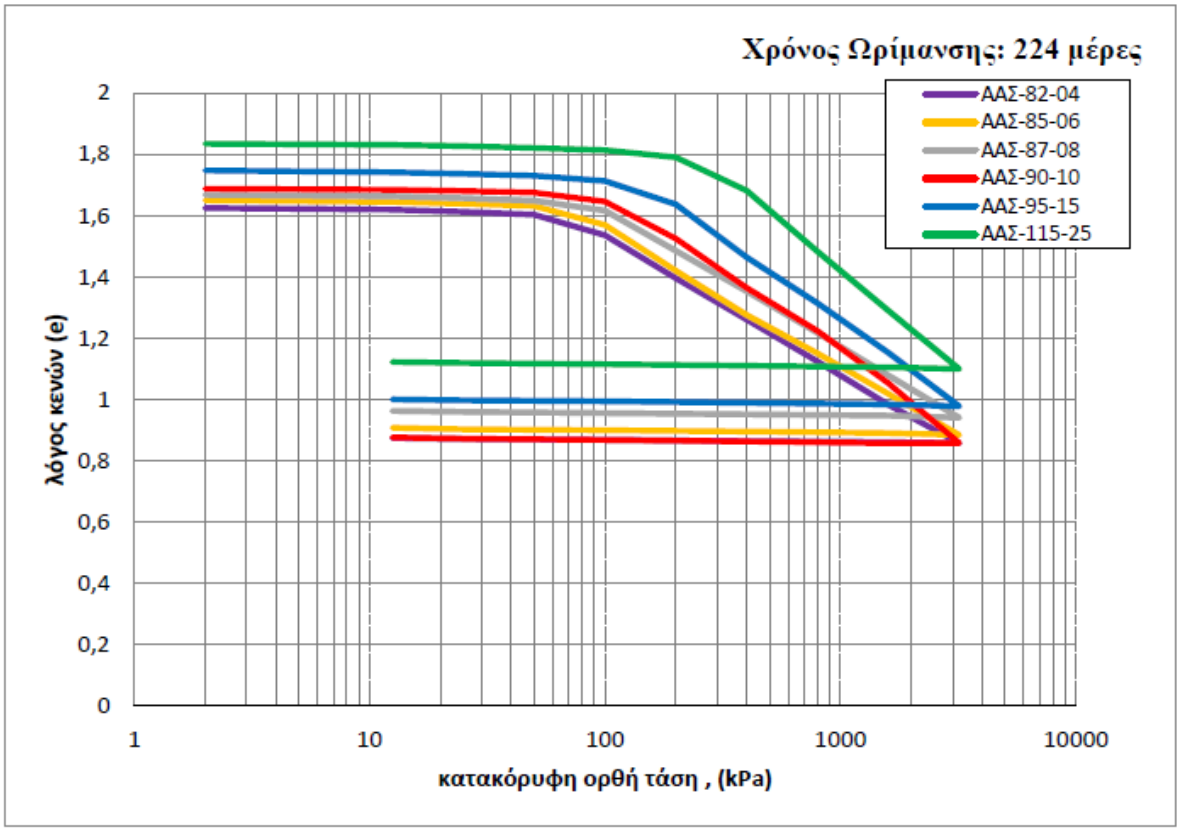
Σχήμα 4.17 Επίδραση ποσοστού τέφρας στη σχέση e-logσ'ν σε μονοδιάστατη στερεοποίηση, για ωρίμανση 28 ημερών.



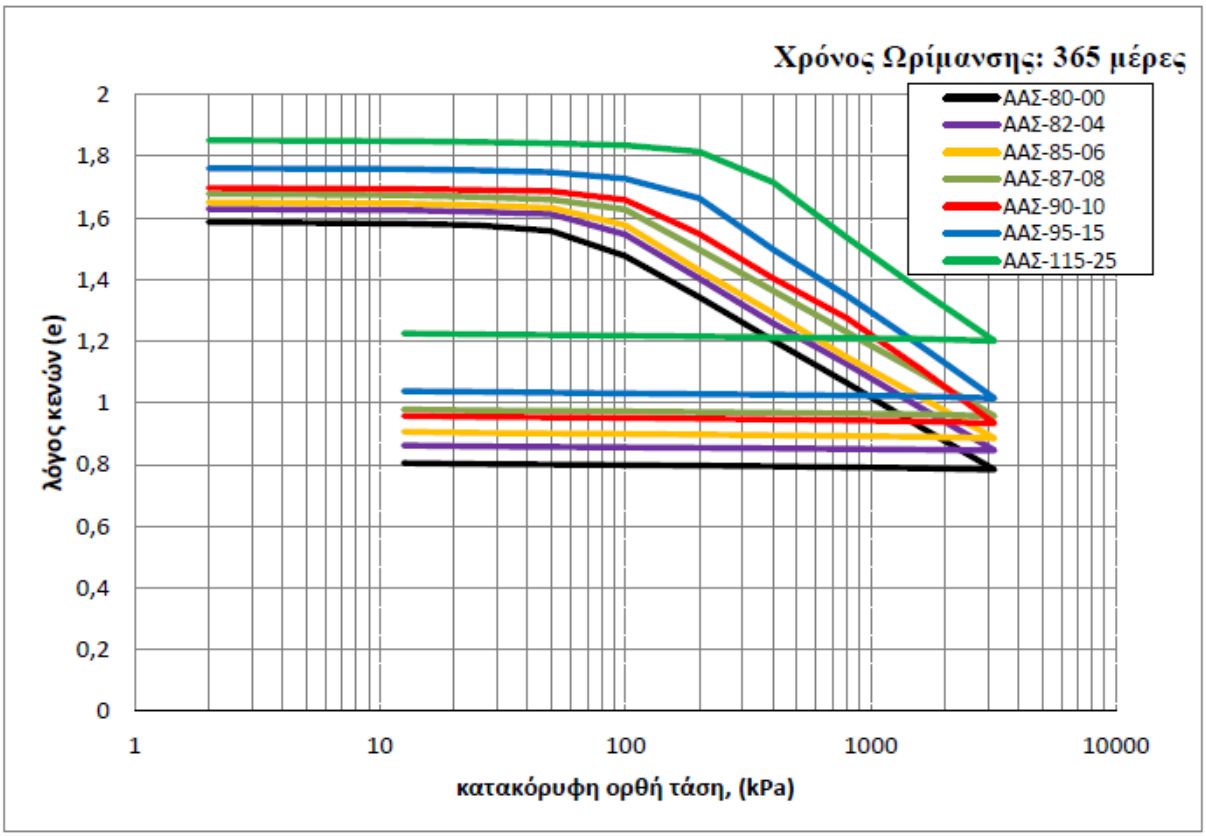
Σχήμα 4.18 Επίδραση ποσοστού τέφρας στη σχέση e-logσ'ν σε μονοδιάστατη στερεοποίηση, για ωρίμανση 56 ημερών.



Σχήμα 4.19 Επίδραση ποσοστού τέφρας στη σχέση e-logσ'ν σε μονοδιάστατη στερεοποίηση, για ωρίμανση 112 ημερών.



Σχήμα 4.20 Επίδραση ποσοστού τέφρας στη σχέση e-logσ'ν σε μονοδιάστατη στερεοποίηση, για ωρίμανση 224 ημερών.



Σχήμα 4.21 Επίδραση ποσοστού τέφρας στη σχέση e-logσ'ν σε μονοδιάστατη στερεοποίηση, για ωρίμανση 365 ημερών.

Δείγμα	Χρόνος Ωρίμανσης (μέρες)	w_o (%)	Gs	S_{ro}	σ'_y (kPa)	e_o	Es (Mpa)
ΑΑΣ-80-00	28	53.71	2.78	0.95	50	1.58	8.55
	112	53.69	2.78	0.95	50	1.57	8.57
	365	53.60	2.78	0.94	53	1.58	9.09
ΑΑΣ-82-04	28	55.63	2.78	0.97	55	1.60	9.09
	56	55.60	2.78	0.96	68	1.61	9.84
	112	55.32	2.78	0.95	75	1.61	10.22
	224	55.17	2.78	0.95	81	1.62	9.46
	365	55.09	2.78	0.95	85	1.62	9.31
ΑΑΣ-85-06	28	56.83	2.78	0.97	62	1.63	9.39
	56	56.01	2.78	0.96	74	1.63	8.89
	112	55.82	2.78	0.95	81	1.64	9.54
	224	55.73	2.78	0.94	89	1.65	9.73
	365	55.29	2.78	0.93	91	1.65	9.94
ΑΑΣ-87-08	28	57.87	2.80	0.98	68	1.66	9.58
	56	57.80	2.80	0.97	80	1.66	9.62
	112	57.25	2.80	0.96	88	1.67	10.55
	224	56.85	2.80	0.95	94	1.67	10.86
	365	56.76	2.80	0.95	100	1.67	11.44
ΑΑΣ-90-10	28	60.03	2.80	0.98	79	1.67	9.63
	56	58.90	2.80	0.97	90	1.68	9.54
	112	57.54	2.80	0.96	95	1.69	9.20
	224	56.98	2.80	0.95	100	1.70	9.93
	365	55.19	2.80	0.91	101	1.71	10.89
ΑΑΣ-95-15	28	62.32	2.80	0.98	89	1.72	9.71
	56	60.82	2.80	0.97	96	1.73	9.85
	112	59.18	2.80	0.94	105	1.75	9.94
	224	58,52	2.80	0,93	110	1.76	11.19
	365	56.89	2.80	0.90	112	1.76	11.53
ΑΑΣ-115-25	28	66.12	2.80	0.97	95	1.78	11.73
	56	64.35	2.80	0.96	140	1.80	12.74
	112	62.25	2.80	0.94	152	1.83	12.87
	224	59.05	2.80	0.90	187	1.87	12.54
	365	56.03	2.80	0.88	198	1.88	13.91

Πίνακας 4.2 Χαρακτηριστικά μη βελτιωμένης και βελτιωμένης αργίλου σε δοκιμή μονοδιάστατης στερεοποίησης (σ'_y είναι η φαινόμενη τάση προστερεοποίησης)

4.2.2 Δείκτες Συμπίεσης και Φαινόμενος Δείκτης Συμπίεσης

Οι δείκτες συμπίεσης με όρους C_c και C_r, ο συντελεστής συμπιεστότητας a_v και το μέτρο μονοδιάστατης συμπίεσης E_s, υπολογίζονται για διάφορες περιεκτικότητες σε τέφρα και περιόδους ωρίμανσης, όπως φαίνεται στους Πίνακες 4.2 και 4.3.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.23 η τιμή του C_r της βελτιωμένης αργίλου μειώνεται με την αύξηση του συνδετικού υλικού και παραμένει σχετικά σταθερή για ποσοστά τέφρας μεγαλύτερα του 10%. Για ποσοστά τέφρας ≤10%, η επακόλουθη μείωση των τιμών του C_r είναι πολύ οριακή και σχεδόν πλησιάζει το μηδέν για μακρά περίοδο ωρίμανσης (π.χ. 365 ημέρες). Αυτό οφείλεται στην επίδραση της σιμέντωσης της βελτιωμένης αργίλου, όπως εξηγήθηκε σε προηγούμενο εδάφιο. Η τιμή του δείκτη διόγκωσης C_r είναι σημαντική για τις βελτιωμένες αργίλους, καθώς στα περισσότερα έργα, οι επιτόπου τάσεις είναι συχνά χαμηλότερες από την τάση προστερεοποίησης (Ho and Chan, 2011).

Από την άλλη πλευρά, η αύξηση του δείκτη συμπίεσης C_c με την αύξηση του ποσοστού της τέφρας είναι ελάχιστη. Επίσης παρατηρήθηκε ότι ο C_c της βελτιωμένης αργίλου είναι αρκετά υψηλότερος από εκείνον της μη βελτιωμένης αργίλου (Πίνακας 4.3). Έτσι, σε υψηλότερη στάθμη τάσεων (πέραν της αρχικά εφαρμοσθείσας τάσης προστερεοποίησης), τα βελτιωμένα δείγματα φαίνεται να επιδεικνύουν συμπεριφορά κανονικά στερεοποιημένων αργίλων με μεγαλύτερο C_c. Όσον αφορά την επίδραση του χρόνου ωρίμανσης, λόγω του σχηματισμού ασθενών δεσμών σιμέντωσης στο τέλος της περιόδου ωρίμανσης 28 ημερών, οι δείκτες συμπίεσης βρέθηκαν μεγαλύτεροι από εκείνους για περιόδους ωρίμανσης ≥56 ημερών.

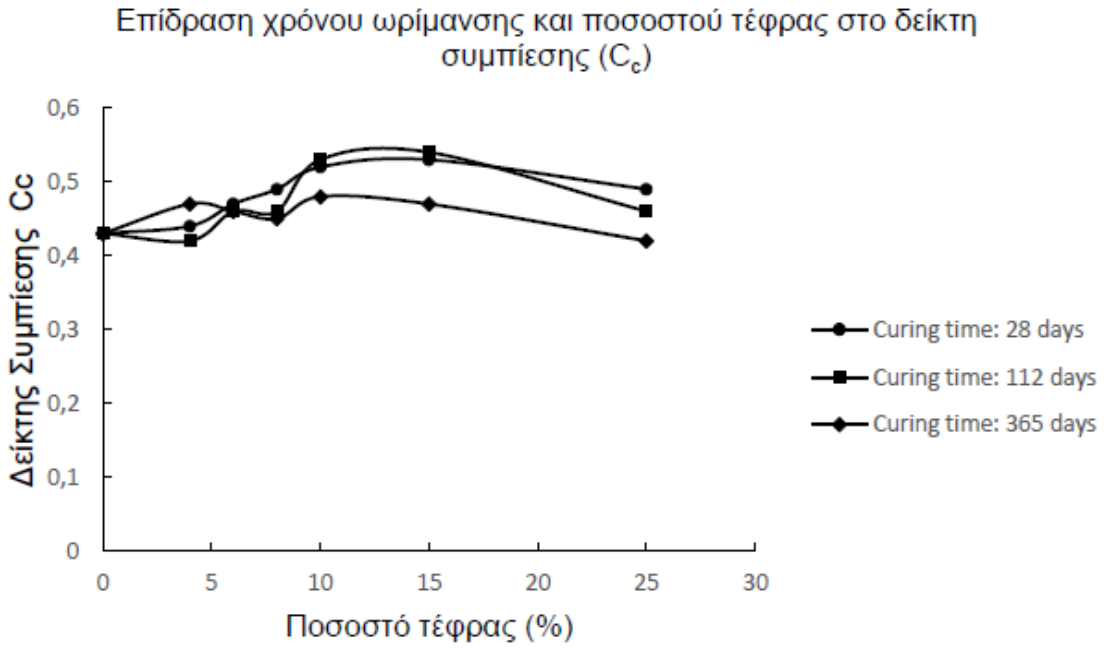
Περαιτέρω λεπτομερής ανάλυση των χαρακτηριστικών της σχέσης *e-logσ'*$_v$ για μη βελτιωμένες και βελτιωμένες αργίλους αποκαλύπτουν μία σταθερότητα των τιμών του συντελεστή συμπιεστότητας a_v, σε σχέση με την αύξηση τόσο του ποσοστού τέφρας όσο και του χρόνου ωρίμανσης. Επιπλέον στο Σχήμα 4.24 το μέτρο μονοδιάστατης συμπίεσης E_s, δείχνει παρόμοια τάση με εκείνη των τιμών του C_c, παρουσιάζοντας αύξηση των τιμών του καθώς αυξάνεται το ποσοστό της τέφρας και σχετικά σταθερές τιμές για ποσοστά τέφρας μεγαλύτερα του 10%. Μετά από μία περίοδο ωρίμανσης 365 ημερών είναι εύκολο να παρατηρηθεί μία αύξηση στην τιμή του E_s και αυτό λόγω του σχηματισμού ισχυρότερων δεσμών στη μάζα της βελτιωμένης αργίλου.

Επιπλέον τα χαρακτηριστικά της σχέσης *e-logσ'ν* των βελτιωμένων αργίλων δείχνουν ότι καθώς αυξάνεται το ποσοστό τέφρας και η περίοδος ωρίμανσης η καμπύλη συμπίεσης είναι της μορφής του Σχ. 4.25, ξεκινώντας με μία σχεδόν ευθεία γραμμή (AB), ακολουθούμενη από μία αρκετά ευθυτενή καπύλη BC. Έχει διαπιστωθεί ότι πέραν της ευθείας γραμμής (δηλαδή του σημείου B), πάνω από κάποια στάθμη τάσης, ο ρυθμός μείωσης του λόγου κενών αυξάνεται. Αυτό μπορεί να εξηγηθεί από το γεγονός ότι, η συμπεριφορά της βελτιωμένης αργίλου στα πρώτα στάδια συμπίεσης διέπεται από την δημιουργία δομής στα πλακίδιά της.

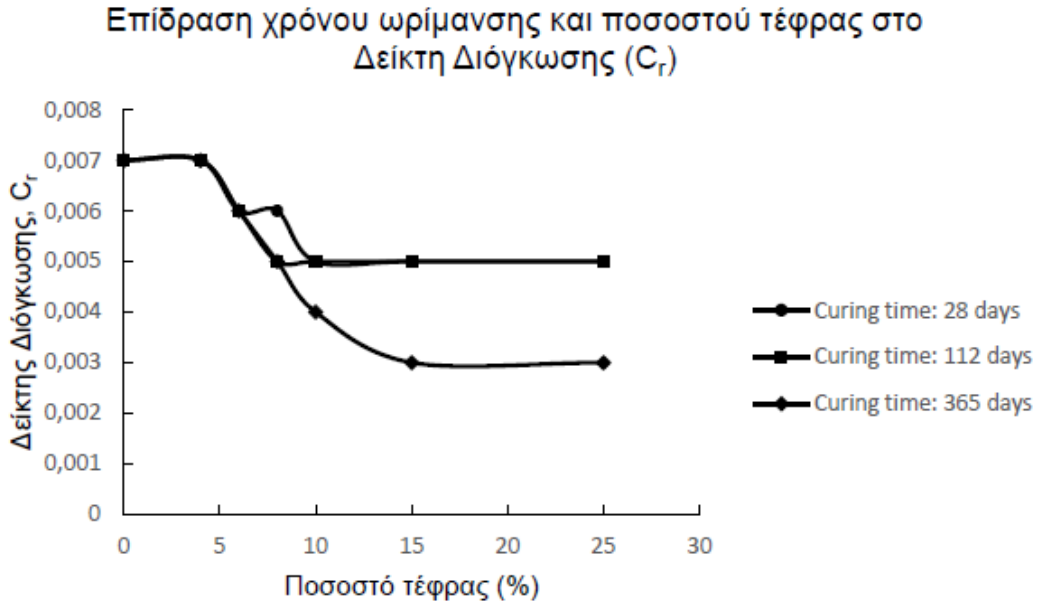
Όπως εξηγήθηκε ο κλάδος φόρτισης της καμπύλης *e-logσ'ν* έχει ευρεία περιοχή μη γραμμικότητας, συνεπώς η στιγμιαία κάμψη του κλάδου φόρτισης των βελτιωμένων αργίλων ορίζεται σύμφωνα με τους Μπαρδάνη και Καββαδά (2005) ως φαινόμενος δείκτης συμπίεσης C_{ac}. Τα Σχήματα 4.26(Α έως Γ) αποτυπώνουν τα χαρακτηριστικά της σχέσης C_{ac}-logσ'$_v$ μη βελτιωμένης και βελτιωμένης αργίλου του Αγίου Στεφάνου. Όπως φαίνεται, ο C_{ac} αυξάνει με την αύξηση της κατακόρυφης τάσης (περιοχή BC στο Σχ. 4.26Β). Τα μίγματα αργίλου με ποσοστό τέφρας μεγαλύτερο από 10% (≥10%) παρουσιάζουν περαιτέρω αύξηση για κατακόρυφη τάση πάνω από περίπου 200 kPa, οφειλόμενη στο σχηματισμό ισχυρότερων δεσμών στην εδαφική μάζα λόγω της προσθήκης τέφρας. Οι Uddin κ.ά. (1997) επίσης διαπίστωσαν παρόμοια αύξηση του φαινόμενου δείκτη συμπίεσης με την αύξηση της κατακόρυφης τάσης για άργιλο του Μπανγκόκ βελτιωμένη με τσιμέντο, καθώς και ο Kamruzzaman (2002) για άργιλο της Σιγκαπούρης βελτιωμένη με τσιμέντο. Σημειώνεται ότι ο ρυθμός αύξησης του C_{ac} μέχρι ένα χαμηλό επίπεδο τάσης (έως το σημείο B) είναι πολύ μικρός. Παρόμοια συμπεριφορά του C_{ac} με την αύξηση της κατακόρυφης τάσης λόγω μεταβολής του χρόνου ωρίμανσης μπορεί να παρατηρηθεί στα Σχήματα 4.24 (Α έως Ζ). Τα αποτελέσματα των δοκιμών αποκαλύπτουν ότι τα δείγματα με ωρίμανση 28 έως 365 ημέρες δεν παρουσιάζουν μεγάλη μεταβολή στις τιμές του C_{ac}σε σχέση με το χρόνο ωρίμανσης. Αυτό μπορεί να εξηγηθεί από το γεγονός ότι η τέφρα, ως συνδετικό υλικό, δεν σχηματίζει τόσο ισχυρή εδαφική μάζα όπως θα συνέβαινε με άλλο υλικό σύνδεσης (π.χ. τσιμέντο ή άσβεστος).

Δείγμα	**Χρόνος Ωρίμανσης (μέρες)**	**a_v**	**C_c**	**C_r**
ΑΑΣ-80-00	28	0,0002	0,43	0,008
	112	0,0002	0,43	0,008
	365	0,0002	0,43	0,008
ΑΑΣ-82-04	28	0,0002	0,44	0,009
	56	0,0002	0,42	0,007
	112	0,00019	0,4	0,007
	224	0,0002	0,45	0,006
	365	0,0002	0,47	0,006
ΑΑΣ-85-06	28	0,0002	0,47	0,011
	56	0,0002	0,49	0,008
	112	0,00021	0,46	0,009
	224	0,00019	0,45	0,009
	365	0,0002	0,46	0,008
ΑΑΣ-87-08	28	0,00022	0,49	0,007
	56	0,00022	0,49	0,007
	112	0,00023	0,46	0,006
	224	0,0002	0,45	0,007
	365	0,0002	0,45	0,005
ΑΑΣ-90-10	28	0,0002	0,52	0,008
	56	0,0003	0,53	0,009
	112	0,0003	0,53	0,005
	224	0,0003	0,52	0,008
	365	0,00028	0,48	0,008
ΑΑΣ-95-15	28	0,00024	0,53	0,009
	56	0,00025	0,53	0,008
	112	0,00025	0,54	0,009
	224	0,00023	0,49	0,008
	365	0,00022	0,47	0,008
ΑΑΣ-115-25	28	0,00025	0,49	0,008
	56	0,00026	0,46	0,009
	112	0,00022	0,46	0,008
	224	0,00023	0,47	0,009
	365	0,0002	0,42	0,009

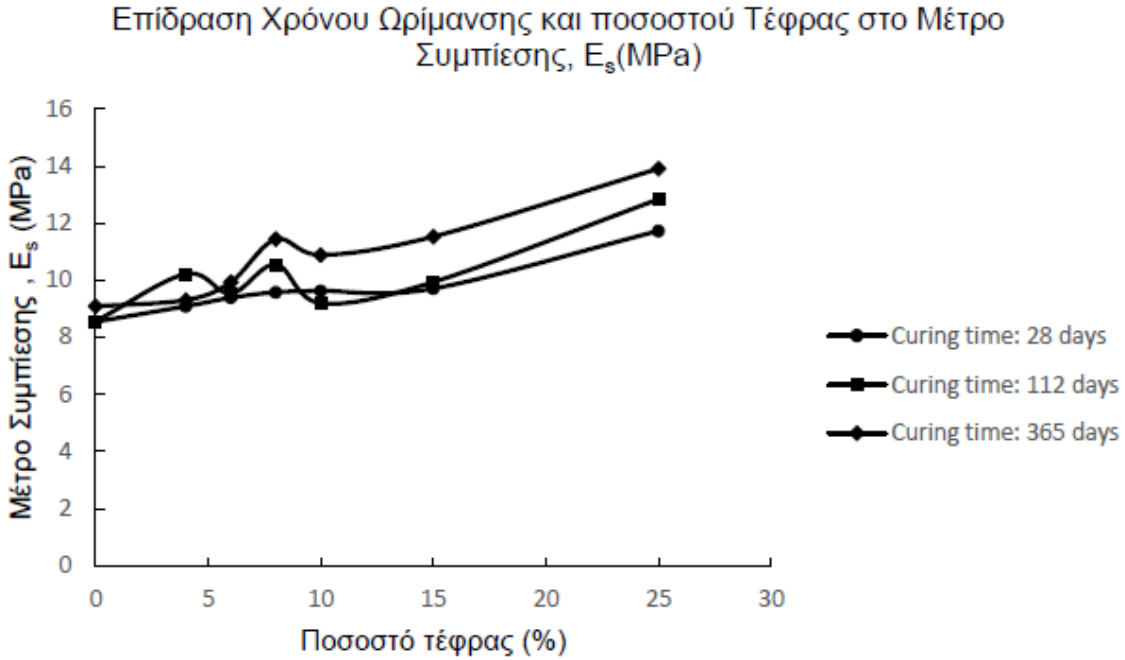
Πίνακας 4.3 Δείκτες συμπίεσης δοκιμής μονοδιάστατης στερεοποίησης μη βελτιωμένων και βελτιωμένων δειγμάτων αργίλου



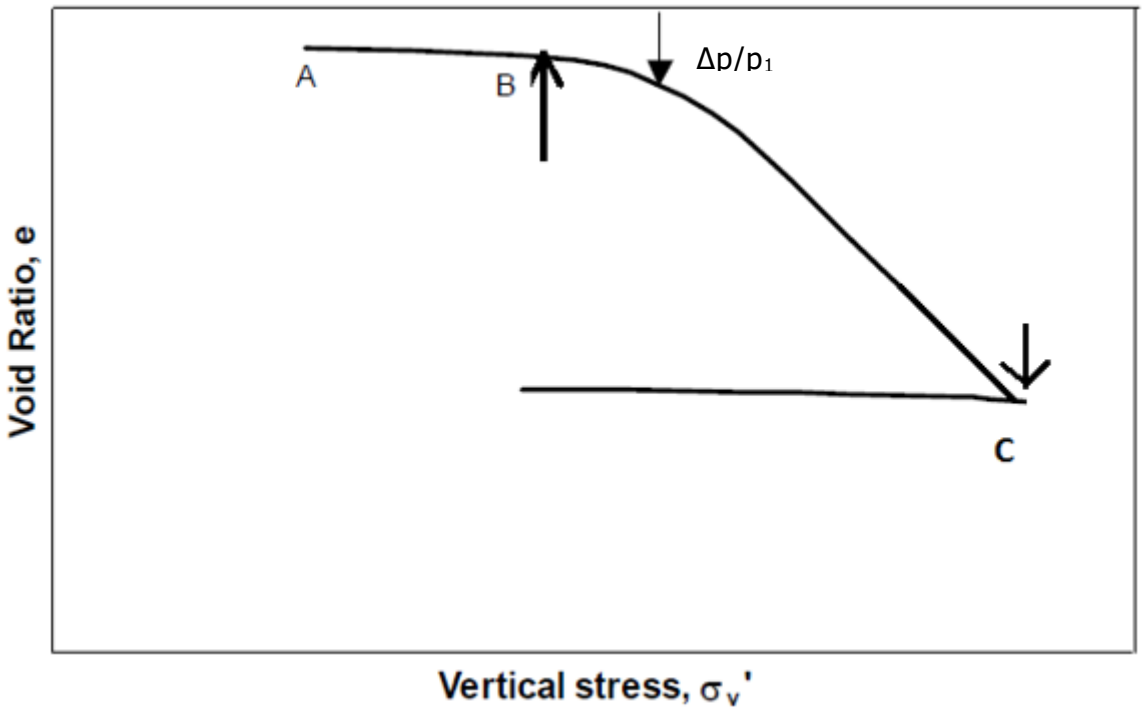
Σχήμα 4.22 Επίδραση χρόνου ωρίμανσης και ποσοστού τέφρας στο δείκτη συμπίεσης C_c δοκιμής μονοδιάστατης στερεοποίησης



Σχήμα 4.23 Επίδραση χρόνου ωρίμανσης και ποσοστού τέφρας στο δείκτη διόγκωσης C_r δοκιμής μονοδιάστατης στερεοποίησης

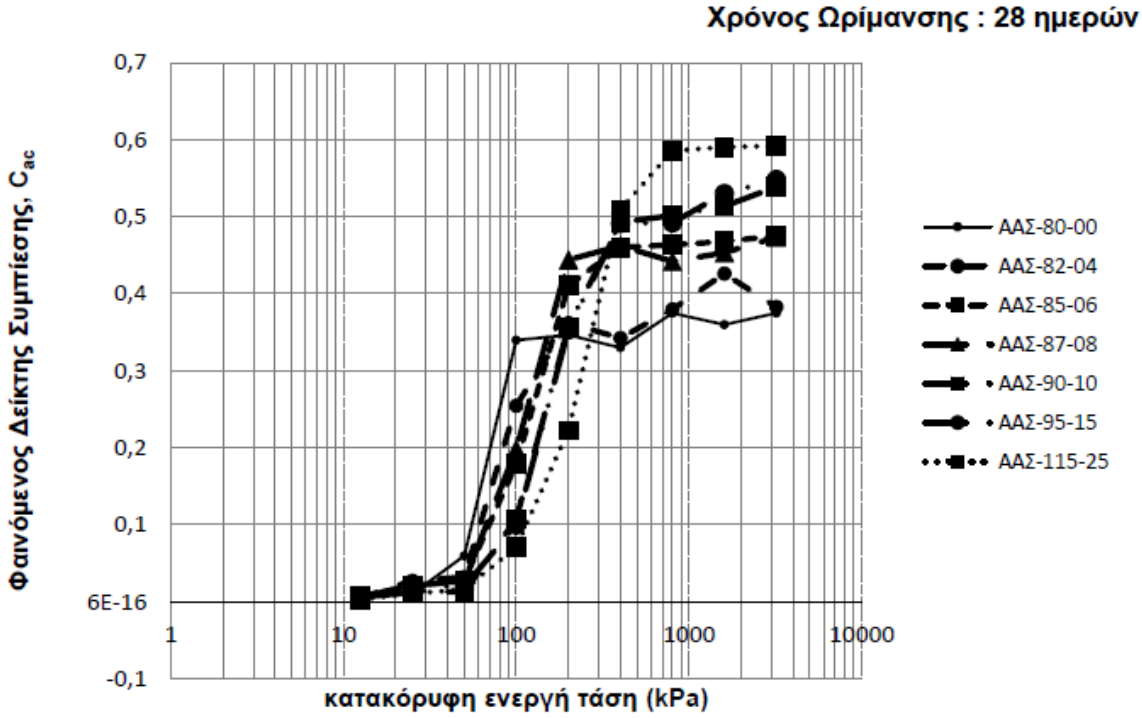


Σχήμα 4.24 Επίδραση χρόνου ωρίμανσης και ποσοστού τέφρας στο μέτρο συμπίεσης E_s δοκιμής μονοδιάστατης στερεοποίησης

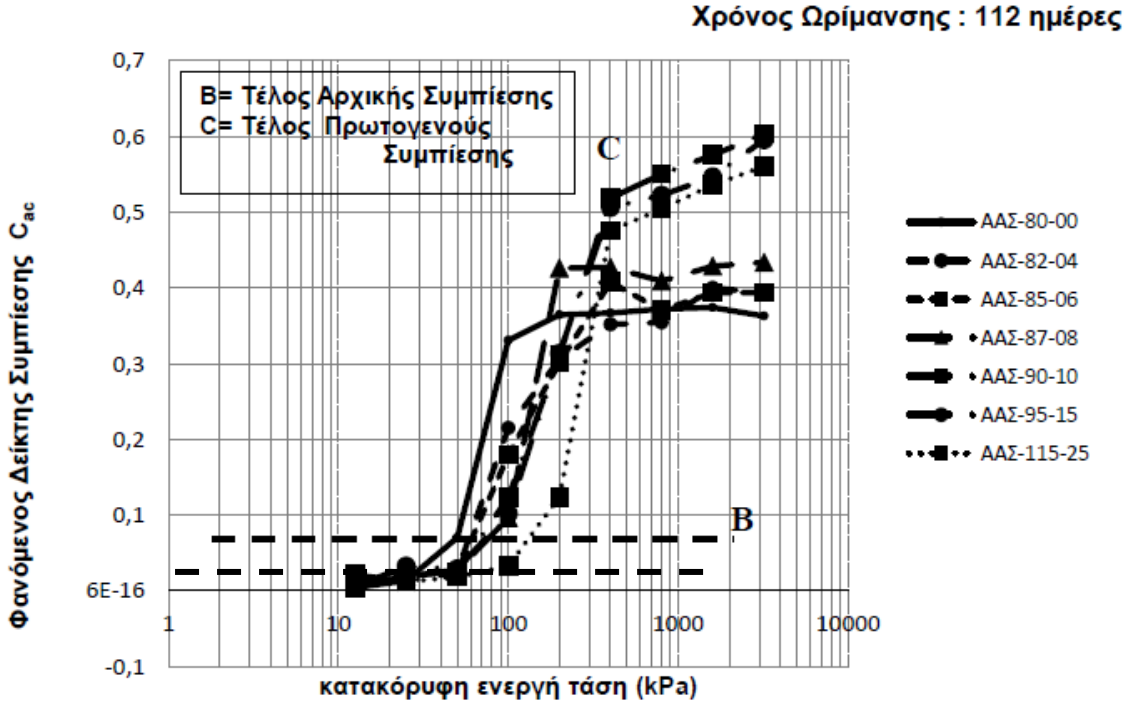


Σχήμα 4.25 Σχηματικό διάγραμμα της σχέσης e-logσ'$_v$ μονοδιάστατης στερεοποίησης για βελτιωμένες αργίλους

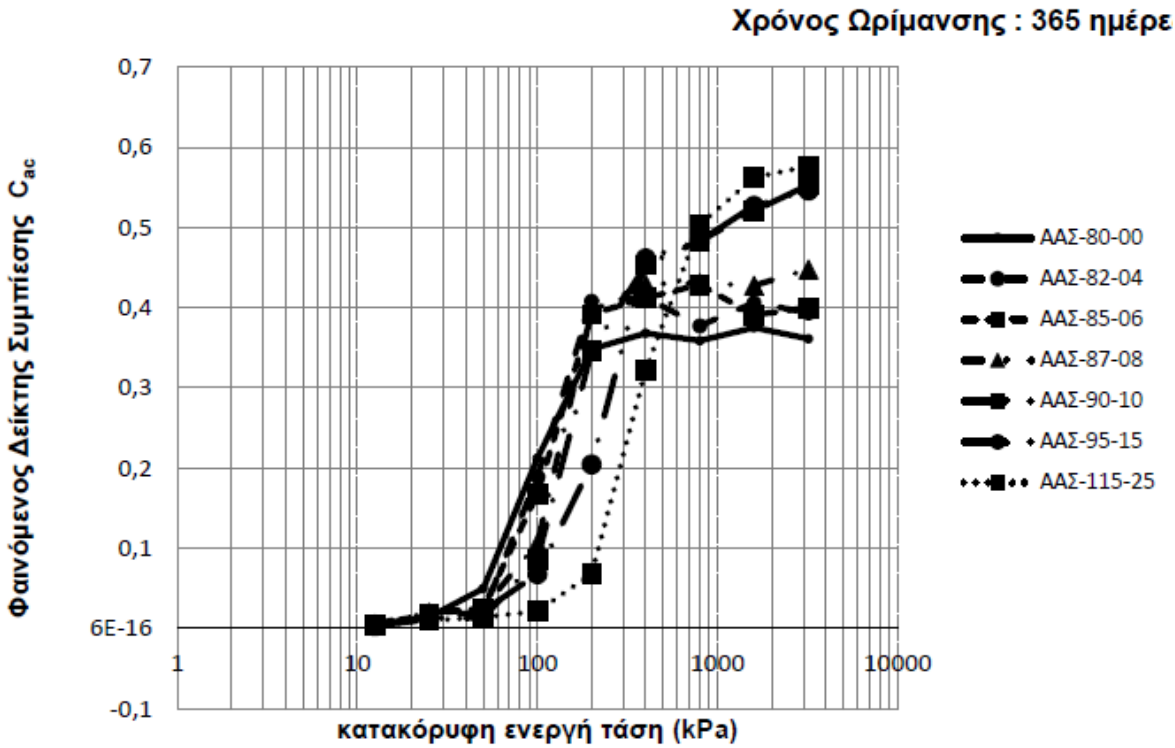
(I) Επίδραση ποσοστού τέφρας στη σχέση C_{ac}-logσ'$_v$ μονοδιάστατης στερεοποίησης βελτιωμένων αργίλων



Σχήμα 4.26(Α) Επίδραση ποσοστού τέφρας στη σχέση C_{ac}-logσ'$_v$ μονοδιάστατης στερεοποίησης βελτιωμένων αργίλων για ωρίμανση 28 ημερών

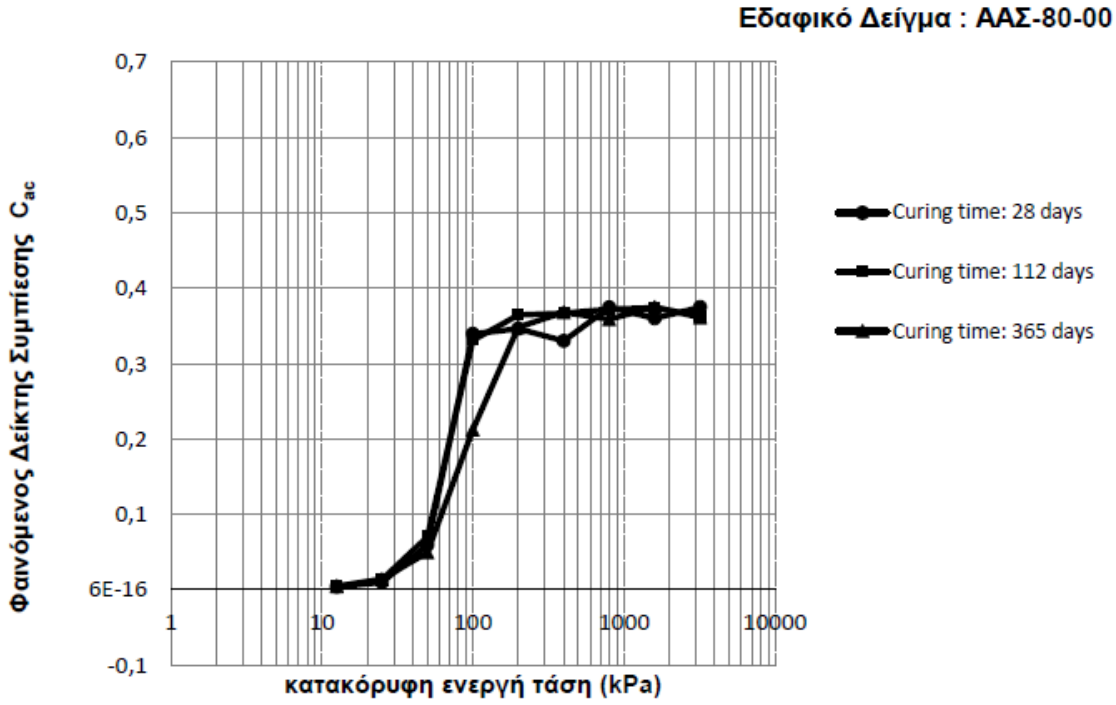


Σχήμα 4.26(Β) Επίδραση ποσοστού τέφρας στη σχέση C_{ac}-logσ'$_v$ μονοδιάστατης στερεοποίησης βελτιωμένων αργίλων για ωρίμανση 112 ημερών

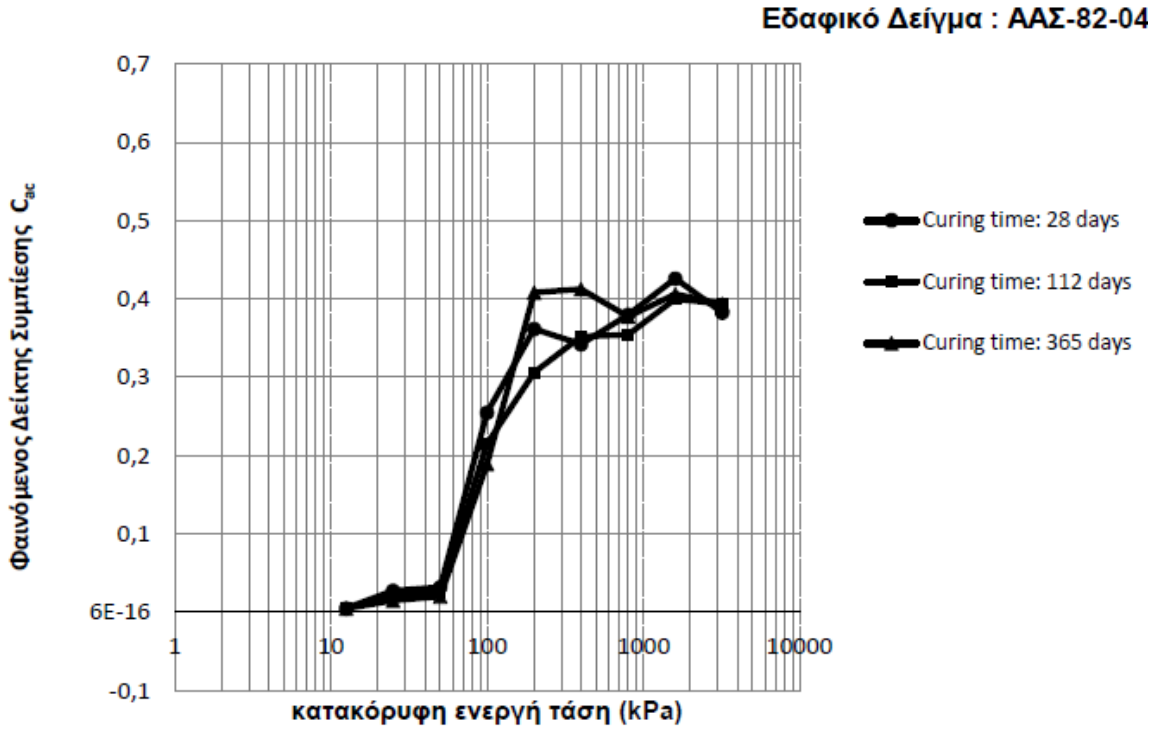


Σχήμα 4.26(Γ) Επίδραση ποσοστού τέφρας στη σχέση C_{ac}-logσ'$_v$ μονοδιάστατης στερεοποίησης βελτιωμένων αργίλων για ωρίμανση 365 ημερών

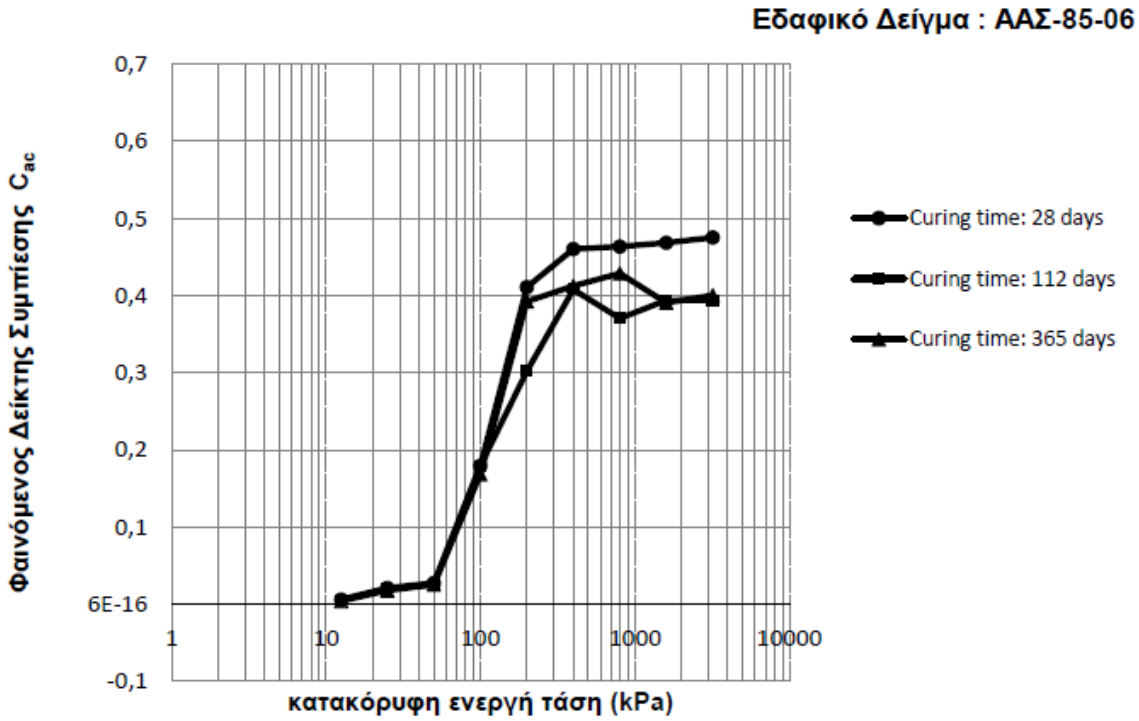
(ΙΙ) Επίδραση του Χρόνου Ωρίμανσης στη σχέση C_{ac}-logσ'$_v$ μονοδιάστατης στερεοποίησης βελτιωμένων αργίλων



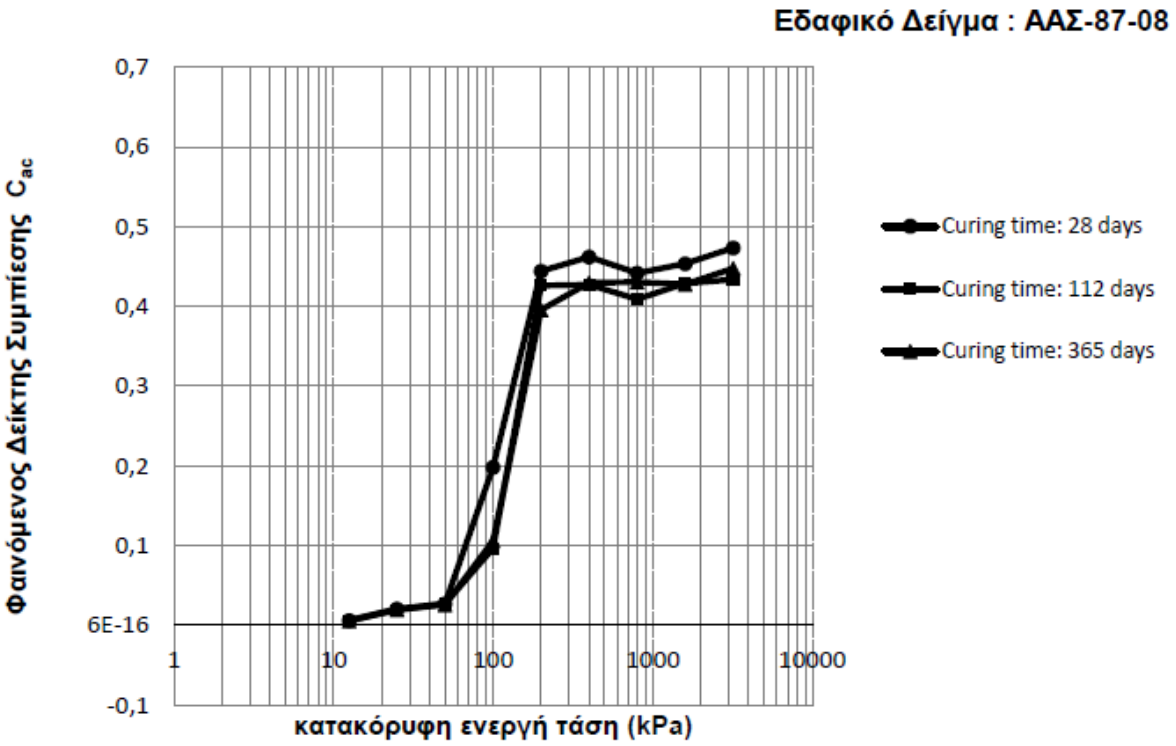
Σχήμα 4.27(Α) Επίδραση χρόνου ωρίμανσης στη σχέση C_{ac}-logσ'$_v$ μονοδιάστατης στερεοποίησης μη βελτιωμένης αργίλου



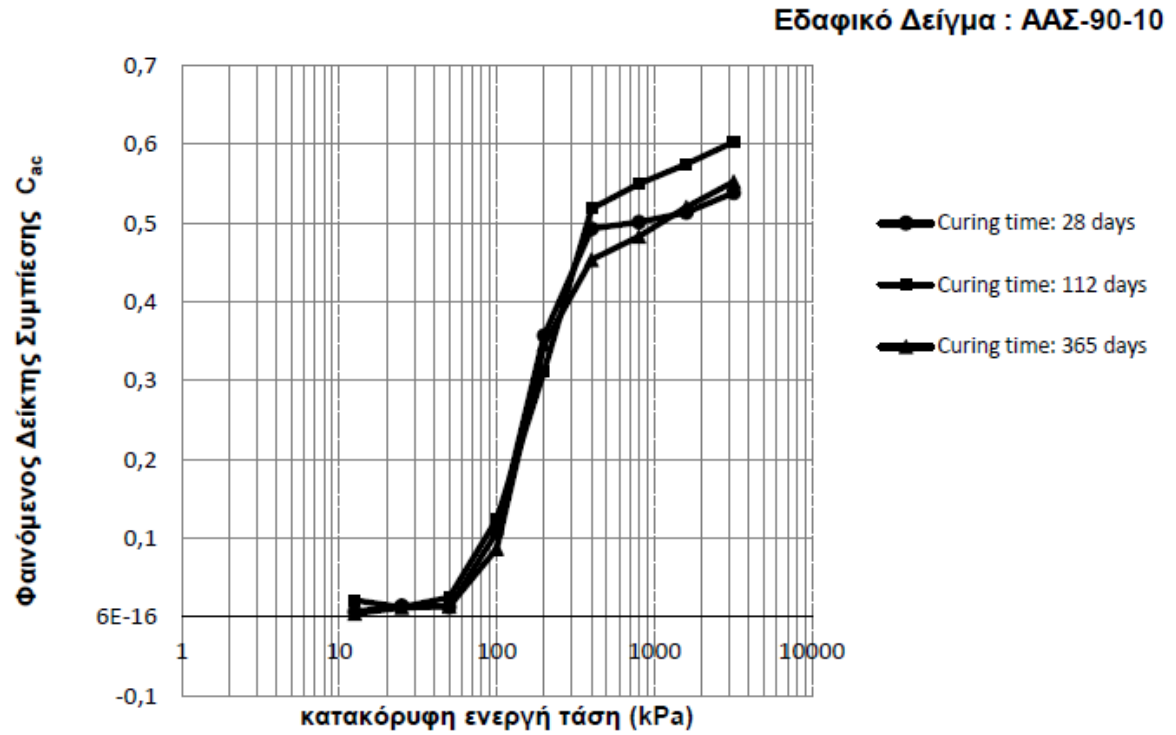
Σχήμα 4.27(Β) Επίδραση χρόνου ωρίμανσης στη σχέση C_{ac}-logσ'_v μονοδιάστατης στερεοποίησης βελτιωμένης αργίλου (4% τέφρα)



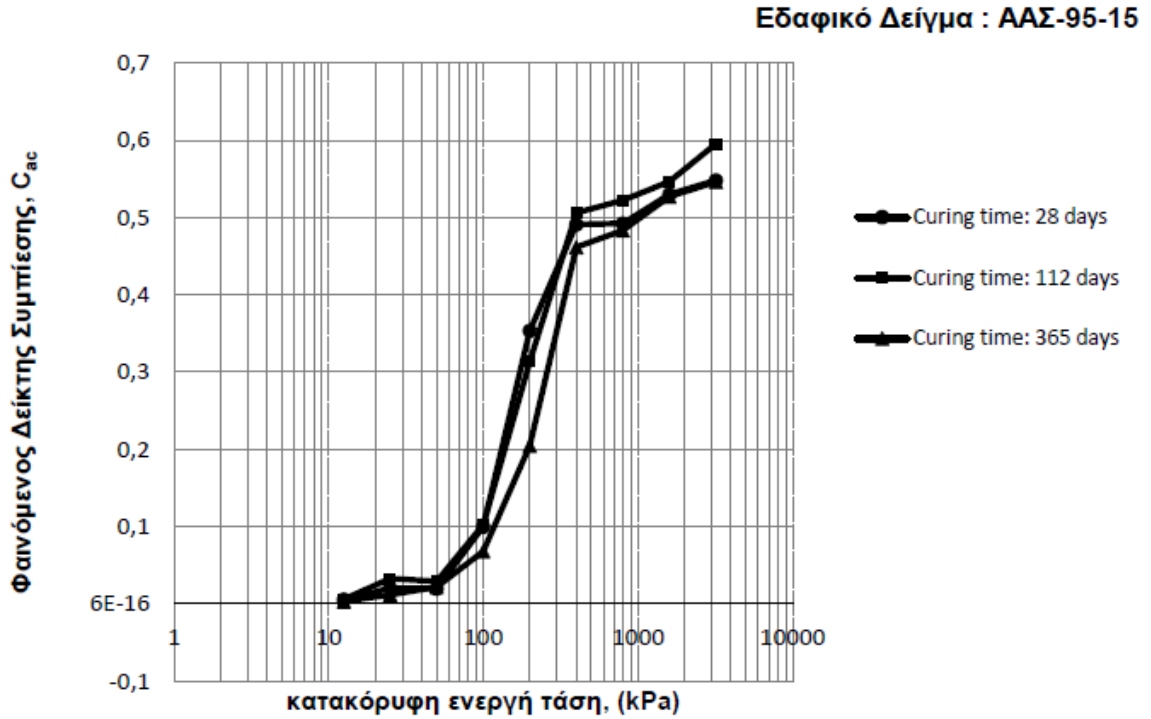
Σχήμα 4.27(Γ) Επίδραση χρόνου ωρίμανσης στη σχέση C_{ac}-logσ'_v μονοδιάστατης στερεοποίησης βελτιωμένης αργίλου (6% τέφρα)



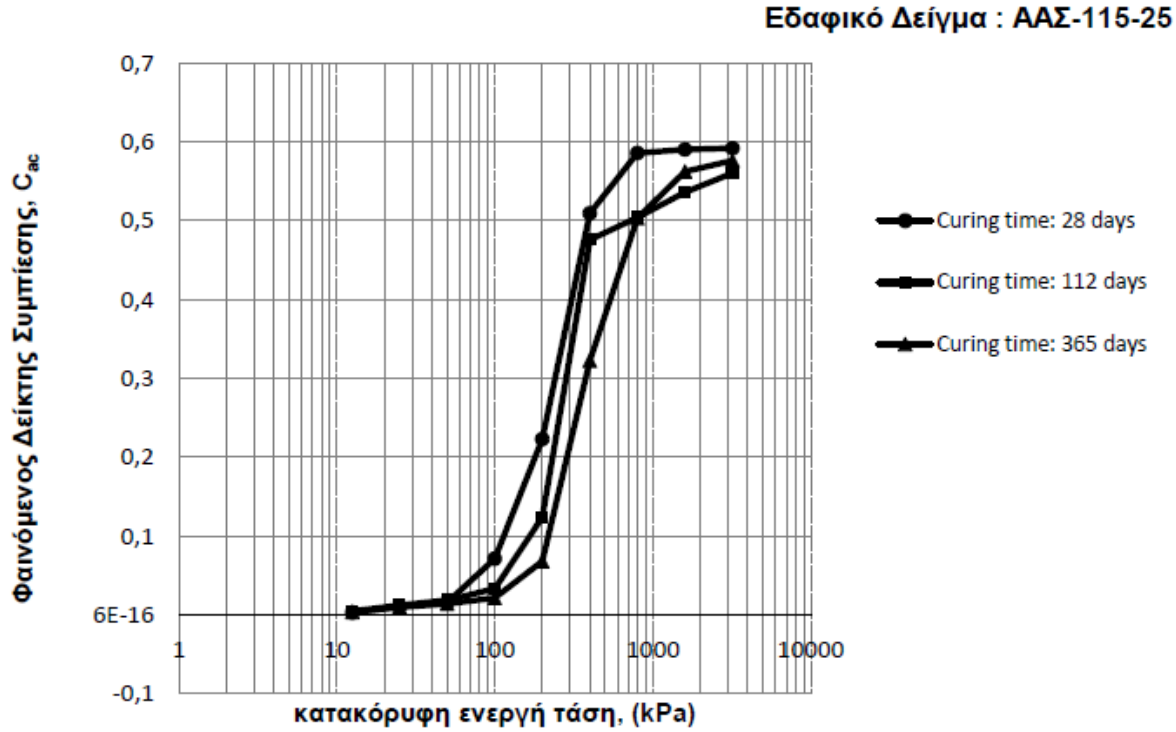
Σχήμα 4.27(Δ) Επίδραση χρόνου ωρίμανσης στη σχέση C_{ac}-logσ'$_v$ μονοδιάστατης στερεοποίησης βελτιωμένης αργίλου (8% τέφρα)



Σχήμα 4.27(Ε) Επίδραση χρόνου ωρίμανσης στη σχέση C_{ac}-logσ'$_v$ μονοδιάστατης στερεοποίησης βελτιωμένης αργίλου (10% τέφρα)



Σχήμα 4.27(ΣΤ) Επίδραση χρόνου ωρίμανσης στη σχέση C_{ac}-logσ'$_v$ μονοδιάστατης στερεοποίησης βελτιωμένης αργίλου (15% τέφρα)

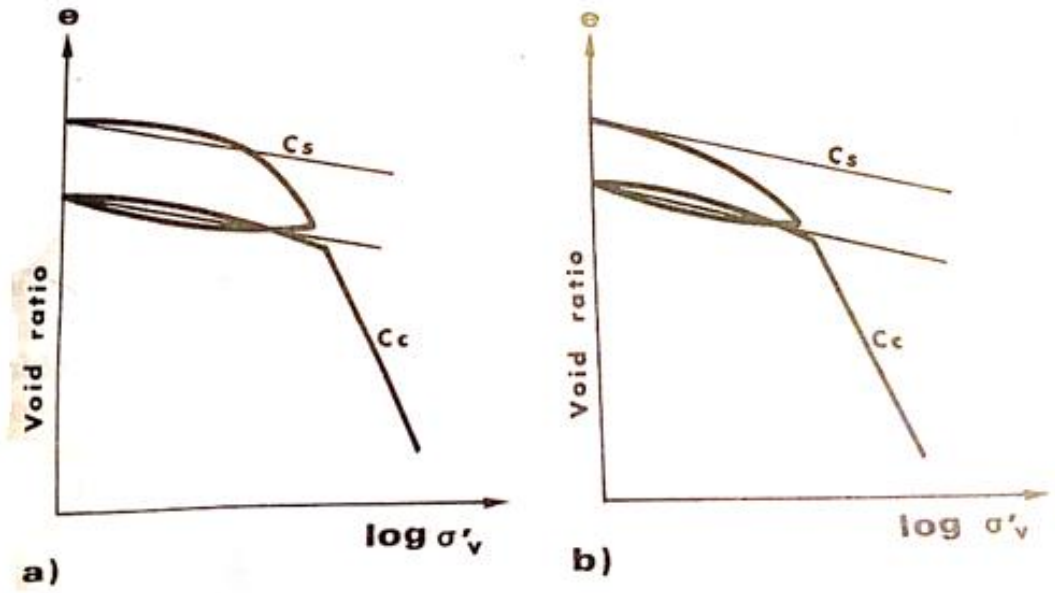


Σχήμα 4.27(Ζ) Επίδραση χρόνου ωρίμανσης στη σχέση C_{ac}-logσ'$_v$ μονοδιάστατης στερεοποίησης βελτιωμένης αργίλου (25% τέφρα)

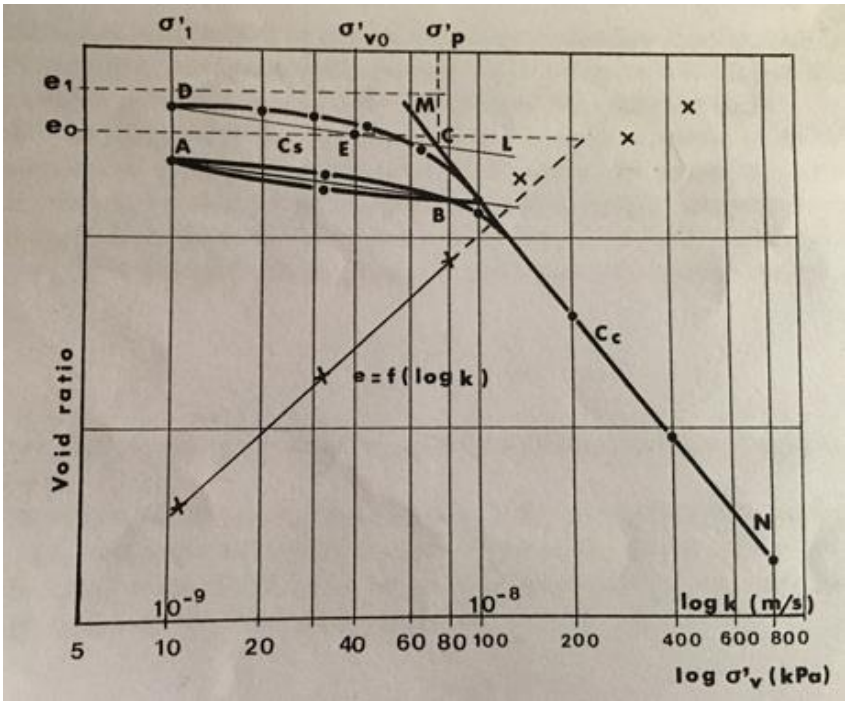
4.2.3 Ορισμός Κριτηρίου Αναζύμωσης

Στην παρούσα έρευνα εκτελέστηκαν δοκιμές συμπιεσομέτρου με 2 κύκλους φόρτισης και αποφόρτισης ώστε να διερευνηθεί η δημιουργία δομής στη μάζα της αργίλου με χρήση τέφρας. Όπως διετύπωσαν οι Ducasse κ.ά. (1986) με την εκτέλεση κυκλικής φόρτισης υπάρχει τρόπος προσδιορισμού των χαρακτηριστικών συμπιεστότητας ενός αναζυμωμένου εδάφους.

Η μέση κλίση του κύκλου αποφόρτισης-επαναφόρτισης είναι κριτήριοαναζύμωσης. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.28 η κλίση αυτή διαφέρει πολύ από την κλίση της καμπύλης μεταξύ σ'_{vo} και σ'_{p} (όπως φαίνονται στο Σχήμα 4.29), οπότε συμπεραίνεται ότι το δείγμα έχει αναζυμωθεί. Όταν η ευθεία γραμμή που διέρχεται από την αρχή της καμπύλης και είναι παράλληλη στον κύκλο φόρτισης αποφόρτισης, τέμνει την καμπύλη συμπίεσης, τότε το δείγμα είναι πρακτικά αδιατάρακτο (περίπτωση a στο Σχήμα 4.28).



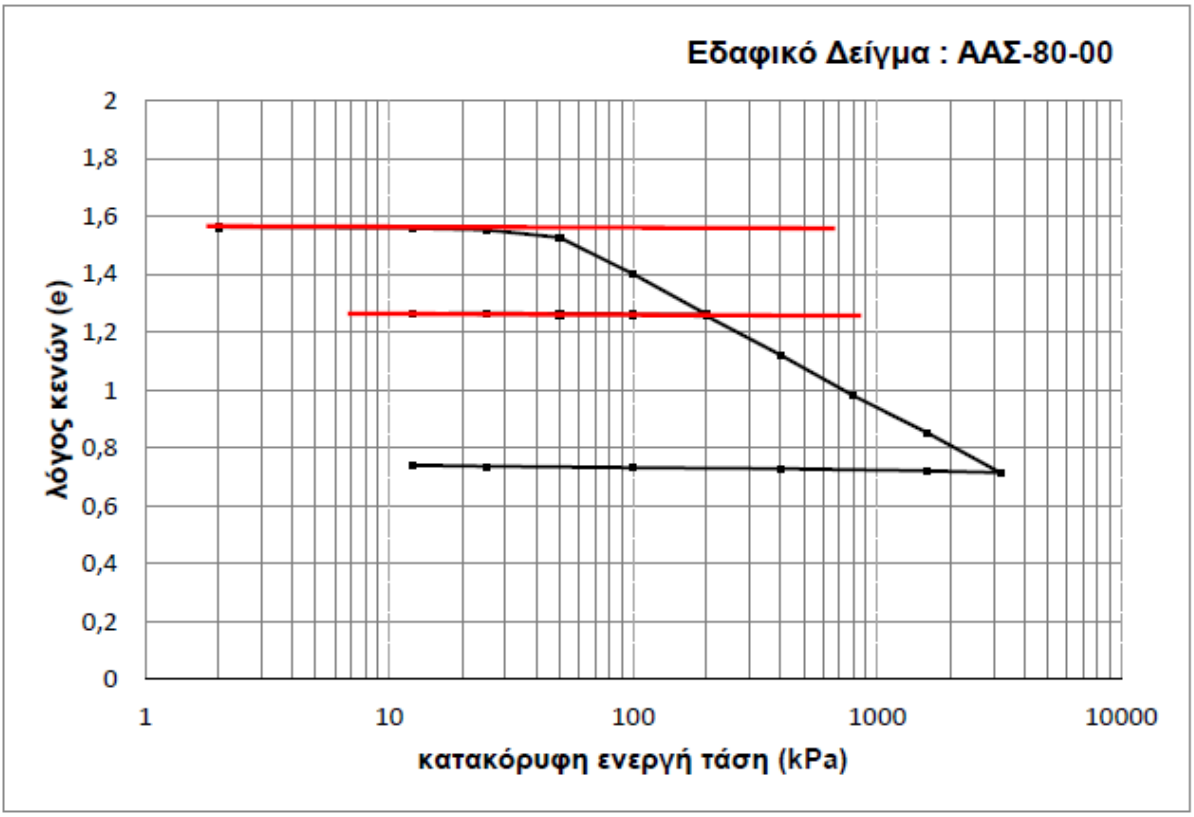
Σχήμα 4.28 Κριτήριο αναζύμωσης δοκιμίων στερεοποίησης με χρήση της καμπύλης συμπίεσης (a) άθικτο δείγμα (b) αναζυμωμένο δείγμα (Ducasse κ.ά. 1986)



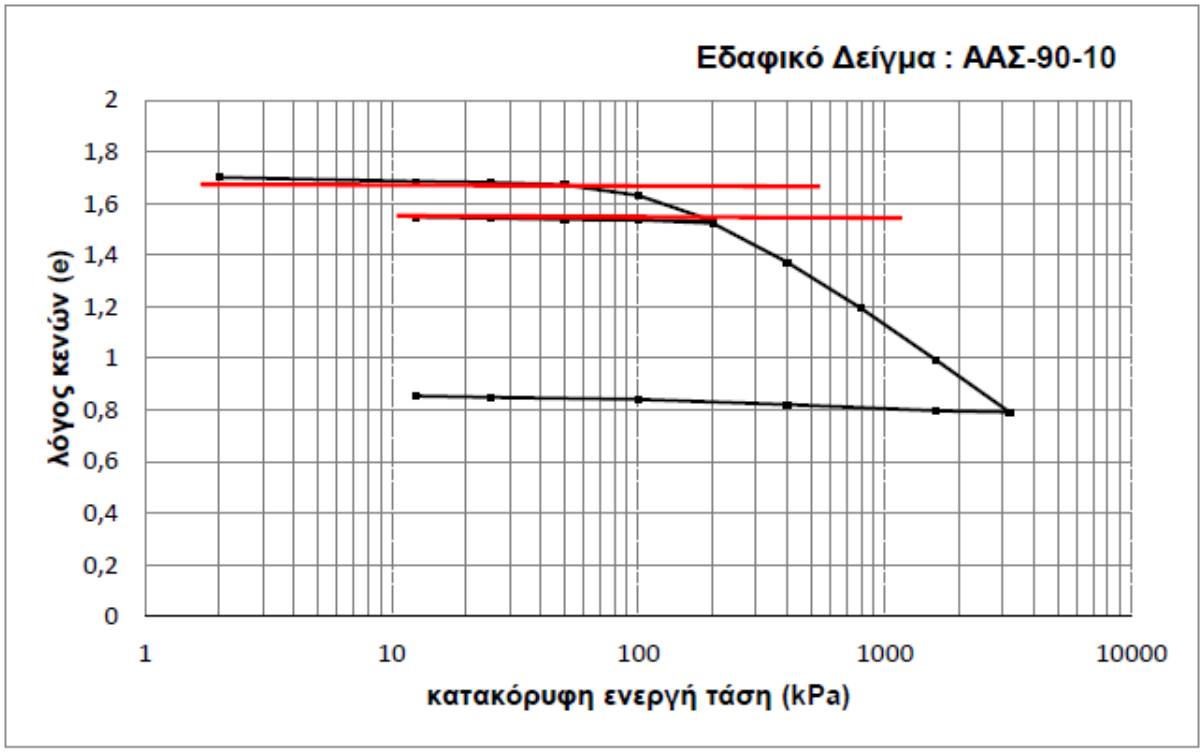
Σχήμα 4.29 Καμπύλη συμπίεσης δοκιμής συμπιεσομέτρου (Ducasse κ.ά. 1986)

Στα σχήματα 4.30, 4.31 και 4.32 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα φόρτισης-αποφόρτισης-επαναφόρτισης σε δοκιμή συμπιεσομέτρου, επιβάλλοντας στον πρώτο κύκλο φόρτισης κατακόρυφο φορτίο από τα 2 kPa έως τα 200 kPa και στον δεύτερο κύκλο φόρτισης κατακόρυφο φορτίο 12.5 kPa έως 3200 kPa. Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν σε μίγματα με ποσοστά τέφρας 0%, 10% και 15% και με ρυθμό φόρτισης $\Delta p/p_1=1.0$.

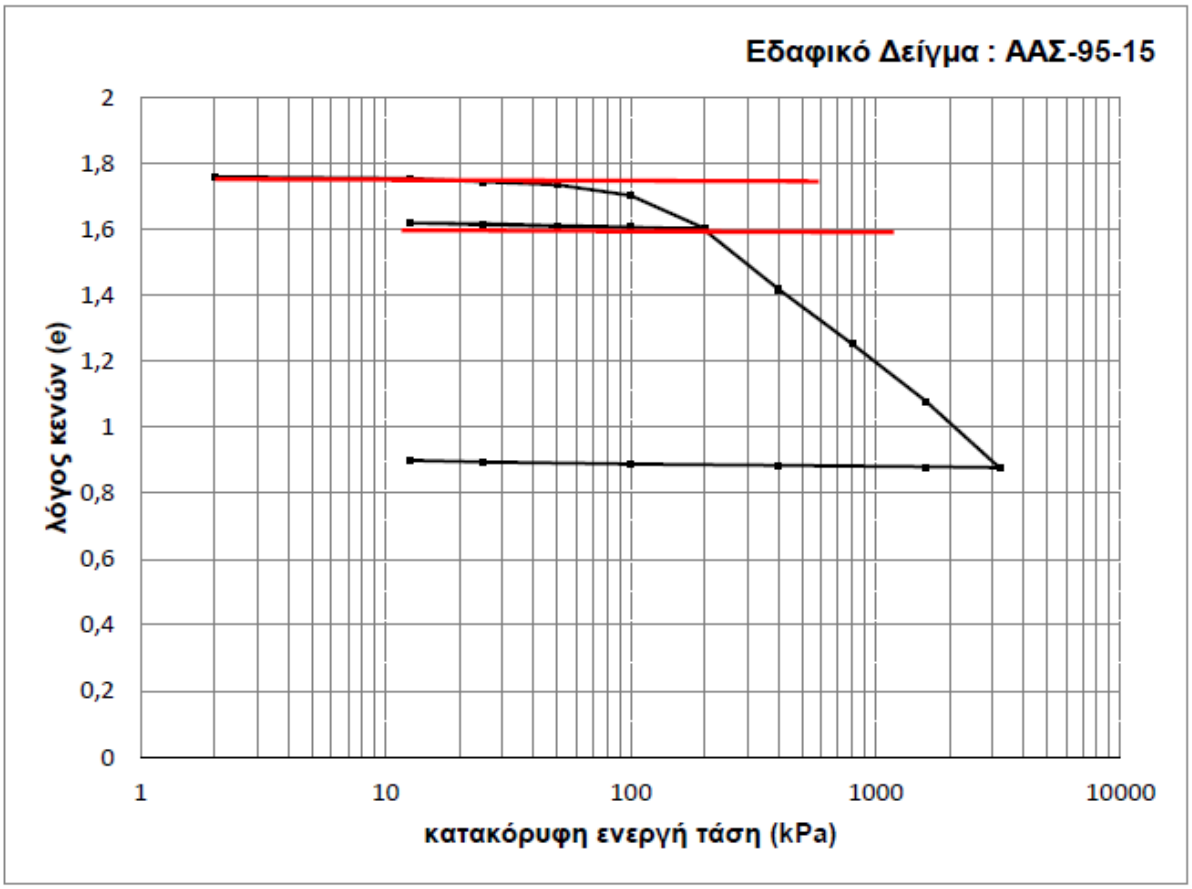
Τα διαγράμματα των παραπάνω δοκιμών και σύμφωνα με το κριτήριο αναζύμωσης κατά Ducasse et al. (1986) μαρτυρούν ότι τα εξετασθέντα μίγματα συμπεριφέρονται ως αναζυμωμένα εδάφη.



Σχήμα 4.30 ΑΑΣ-80-00 Καμπύλη συμπίεσης για κυκλική φόρτιση σε δοκιμή μονοδιάστατης στερεοποίησης



Σχήμα 4.31 ΑΑΣ-90-10 Καμπύλη συμπίεσης για κυκλική φόρτιση σε δοκιμή μονοδιάστατης στερεοποίησης



Σχήμα 4.32 ΑΑΣ-95-15 Καμπύλη συμπίεσης για κυκλική φόρτιση σε δοκιμή μονοδιάστατης στερεοποίησης

4.3 Διατμητική Συμπεριφορά Βελτιωμένης Αργίλου

4.3.1 Χαρακτηριστικά αντοχής και Παραμόρφωσης σε Δοκιμή Ανεμπόδιστης Θλίψης

Η συμπεριφορά αργίλων βελτιωμένων με τσιμέντο ως προς την αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη έχει ερευνηθεί εκτενώς. Στη σειρά δοκιμών της παρούσας έρευνας εξετάστηκε ευρύ φάσμα τιμών ποσοστού τέφρας και διάφοροι χρόνοι ωρίμανσης. Το ποσοστό τέφρας κυμαινόταν από 4% έως 25%, ενώ οι περίοδοι ωρίμανσης κυμαίνονταν από 28 έως 730 ημέρες. Ο Πίνακας 4.4 παρουσιάζει όλες τις δοκιμές οι οποίες εκτελέστηκαν για το πρώτο μέρος της έρευνας, καθώς και τα φυσικά και μηχανικά χαρακτηριστικά όλων των μιγμάτων με διαφορετικά ποσοστά τέφρας και διαφορετικούς χρόνους ωρίμανσης.

Ονομασία Δοκιμής	Δείγμα	Χρόνος ωρίμανσης (ημέρες)	e	w%	γ_{wet} (kN/cm3)	γ_{dry} (kN/cm3)	q_u (kPa)
UU801a	ΑΑΣ-80-00	28	1.58	53.25	18.2	13.0	46.70
UU801b	ΑΑΣ-80-00	28	1.57	53.58	18.4	12.9	43.10
UU802a	ΑΑΣ-80-00	112	1.57	53.84	18.4	12.9	44.90
UU802b	ΑΑΣ-80-00	112	1.57	53.41	18.3	12.8	46.30
UU803a	ΑΑΣ-80-00	365	1.58	53.54	17.9	12.7	49.70
UU803b	ΑΑΣ-80-00	365	1.58	53.24	18.0	12.7	50.94
UU821a	ΑΑΣ-82-04	28	1.6	55.82	17.5	12.2	42.38
UU821b	ΑΑΣ-82-04	28	1.59	55.28	17.6	12.4	46.30
UU822a	ΑΑΣ-82-04	56	1.61	55.85	17.5	12.2	47.18
UU822b	ΑΑΣ-82-04	56	1.61	55.23	17.4	12.3	56.50
UU823a	ΑΑΣ-82-04	84	1.61	55.1	17.4	12.3	56.50
UU823b	ΑΑΣ-82-04	84	1.62	55.04	17.4	12.3	52.70
UU824a	ΑΑΣ-82-04	112	1.61	55.13	17.1	12.1	58.64
UU824b	ΑΑΣ-82-04	112	1.61	55.07	17.0	12.1	59.04
UU825a	ΑΑΣ-82-04	168	1.62	55.03	17.1	12.3	60.30
UU825b	ΑΑΣ-82-04	168	1.62	55.25	17.1	12.3	61.90
UU826a	ΑΑΣ-82-04	224	1.62	55.23	17.0	12.2	62.34
UU826b	ΑΑΣ-82-04	224	1.61	55.09	16.8	12.2	62.18
UU827a	ΑΑΣ-82-04	365	1.62	55.07	16.9	12.3	63.74
UU827b	ΑΑΣ-82-04	365	1.62	55.01	1.68	12.5	63.84
UU851a	ΑΑΣ-85-06	28	1.63	56.25	17.8	12.0	42.70
UU851b	ΑΑΣ-85-06	28	1.63	56.87	17.9	11.9	41.46
UU852a	ΑΑΣ-85-06	56	1.63	56.23	17.6	12.0	49.10
UU852b	ΑΑΣ-85-06	56	1.63	56.41	17.8	12.0	48.50
UU853a	ΑΑΣ-85-06	84	1.63	56	17.5	12.0	64.34
UU853b	ΑΑΣ-85-06	84	1.64	55.98	17.7	12.1	64.38
UU854a	ΑΑΣ-85-06	112	1.64	55.41	17.7	12.0	66.30
UU854b	ΑΑΣ-85-06	112	1.63	55.81	17.7	12.0	67.08
UU855a	ΑΑΣ-85-06	168	1.65	55.87	17.9	11.9	68.04
UU855b	ΑΑΣ-85-06	168	1.65	55.87	17.9	11.9	69.74
UU856a	ΑΑΣ-85-06	224	1.65	55.99	17.7	12.0	70.38
UU856b	ΑΑΣ-85-06	224	1.65	55.73	17.9	11.8	70.52
UU857a	ΑΑΣ-85-06	365	1.65	55.26	17.4	11.8	72.34
UU857b	ΑΑΣ-85-06	365	1.64	55.49	17.7	11.9	73.66
UU871a	ΑΑΣ-87-08	28	1.66	57.46	17.0	11.4	49.70
UU871b	ΑΑΣ-87-08	28	1.67	57.69	17.2	11.5	50.74
UU872a	ΑΑΣ-87-08	56	1.66	57.8	17.1	11.4	58.34
UU872b	ΑΑΣ-87-08	56	1.66	57.8	17.1	11.4	56.96
UU873a	ΑΑΣ-87-08	84	1.66	57.11	17.1	11.4	73.56
UU873b	ΑΑΣ-87-08	84	1.66	57.03	17.4	11.6	74.16
UU874a	ΑΑΣ-87-08	112	1.67	56.99	17.4	11.6	78.34
UU874b	ΑΑΣ-87-08	112	1.68	57.24	17.4	11.6	78.50

Ονομασία Δοκιμής	Δείγμα	Χρόνος ωρίμανσης (ημέρες)	e	w%	γ_{wet} (kN/cm3)	γ_{dry} (kN/cm3)	q_u (kPa)
UU875b	ΑΑΣ-87-08	168	1.67	57.06	17.1	11.5	81.14
UU876a	ΑΑΣ-87-08	224	1.67	56.73	17.0	11.4	81.78
UU876b	ΑΑΣ-87-08	224	1.67	56.87	17.3	11.5	83.46
UU877a	ΑΑΣ-87-08	365	1.67	56.45	17.0	11.5	84.28
UU877b	ΑΑΣ-87-08	365	1.67	55.87	17.0	11.6	84.54
UU901a	ΑΑΣ-90-10	28	1.67	62.01	1.71	11.2	50.84
UU901b	ΑΑΣ-90-10	28	1.67	62.42	1.72	11.1	52.54
UU902a	ΑΑΣ-90-10	56	1.67	61.84	1.72	11.2	57.14
UU902b	ΑΑΣ-90-10	56	1.66	61.47	1.71	11.2	58.62
UU903a	ΑΑΣ-90-10	84	1.68	61.54	1.71	11.3	79.74
UU903b	ΑΑΣ-90-10	84	1.67	61.43	1.70	11.4	79.98
UU904a	ΑΑΣ-90-10	112	1.69	61.49	1.70	11.3	82.50
UU904b	ΑΑΣ-90-10	112	1.69	61.35	1.70	11.2	83.50
UU905a	ΑΑΣ-90-10	168	1.69	61.25	1.71	11.3	84.26
UU905b	ΑΑΣ-90-10	168	1.70	61.54	1.72	11.1	84.60
UU906a	ΑΑΣ-90-10	224	1.70	60.82	1.69	11.3	86.38
UU906b	ΑΑΣ-90-10	224	1.71	60.87	1.69	11.2	85.78
UU907a	ΑΑΣ-90-10	365	1.70	60.43	1.66	10.9	87.66
UU907b	ΑΑΣ-90-10	365	1.70	60.43	1.67	11.0	86.52
UU908a	ΑΑΣ-90-10	720	1.73	59.87	1.65	10.6	90.64
UU908b	ΑΑΣ-90-10	720	1.72	59.65	1.65	10.9	91.62
UU951a	ΑΑΣ-95-15	28	1.71	64.39	1.61	10.4	56.74
UU951b	ΑΑΣ-95-15	28	1.72	64.87	1.62	11.1	52.54
UU952a	ΑΑΣ-95-15	56	1.73	63.99	1.61	10.5	61.86
UU952b	ΑΑΣ-95-15	56	1.74	63.75	16.0	10.3	64.22
UU953a	ΑΑΣ-95-15	84	1.72	63.82	16.1	10.4	86.36
UU953b	ΑΑΣ-95-15	84	1.74	63.88	16.4	10.4	87.70
UU954a	ΑΑΣ-95-15	112	1.72	63.15	16.2	10.4	87.90
UU954b	ΑΑΣ-95-15	112	1.73	63.05	16.3	10.5	88.20
UU955a	ΑΑΣ-95-15	168	1.77	62.99	16.3	10.4	91.70
UU955b	ΑΑΣ-95-15	168	1.76	63.01	16.3	10.3	92.02
UU956a	ΑΑΣ-95-15	224	1.75	62.5	16.2	10.2	93.78
UU956b	ΑΑΣ-95-15	224	1.76	62.46	16.1	10.3	94.10
UU957a	ΑΑΣ-115-25	365	1.76	61.79	15.8	9.5	96.26
UU957b	ΑΑΣ-115-25	365	1.88	65.23	16.0	9.6	96.02
UU958a	ΑΑΣ-95-15	720	1.77	61.02	16.0	10.2	98.26
UU958b	ΑΑΣ-95-15	720	1.76	61.45	15.8	10.2	98.40
UU1151a	ΑΑΣ-115-25	28	1.78	70.58	16.3	9.9	64.38
UU1151b	ΑΑΣ-115-25	28	1.79	70.87	16.0	9.8	66.02
UU1152a	ΑΑΣ-115-25	56	1.78	69.11	16.1	9.8	72.30
UU1152b	ΑΑΣ-115-25	56	1.78	69.25	16.0	9.7	73.90
UU1153a	ΑΑΣ-115-25	84	1.79	68.54	16.0	9.7	100.38
UU1153b	ΑΑΣ-115-25	84	1.79	69.01	16.0	9.7	102.02

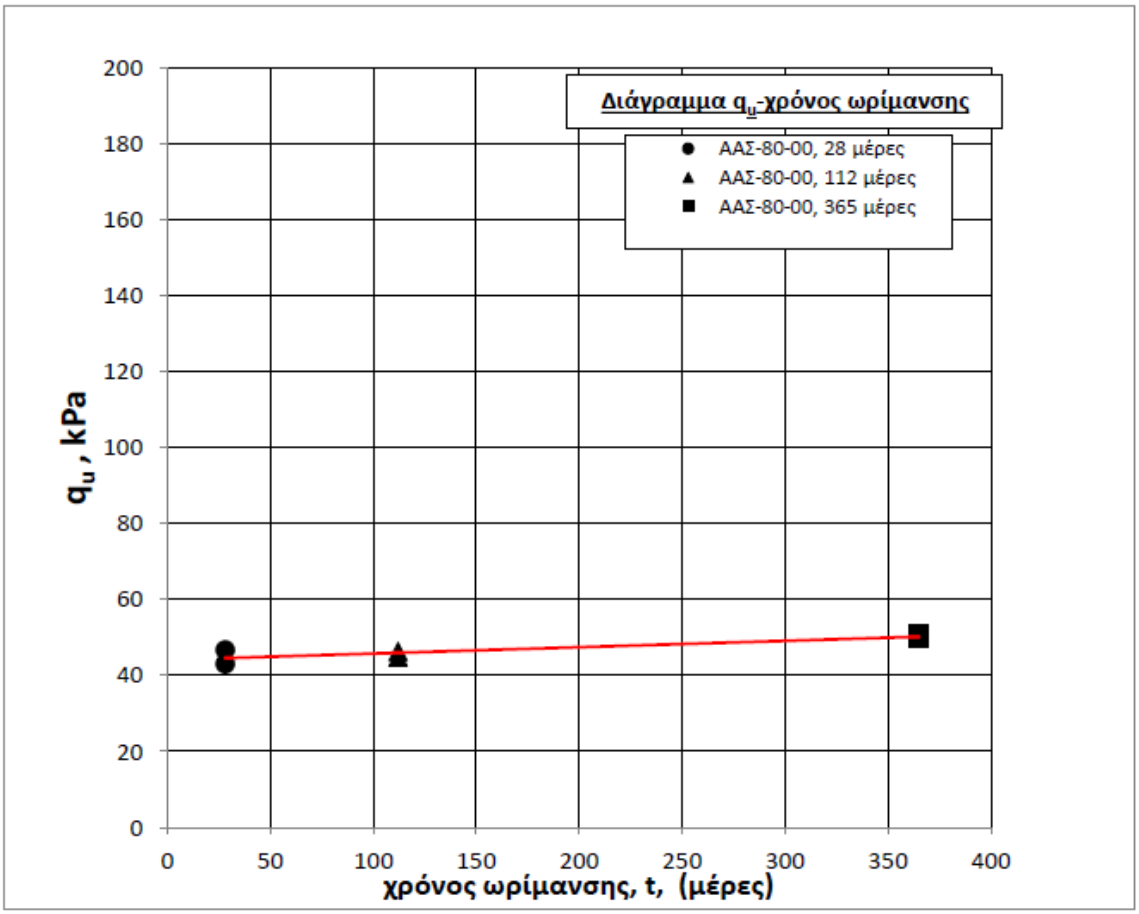
Ονομασία Δοκιμής	Δείγμα	Χρόνος ωρίμανσης (ημέρες)	e	w%	γ_{wet} (kN/cm3)	γ_{dry} (kN/cm3)	q_u (kPa)
UU1154b	ΑΑΣ-115-25	112	1.83	68.04	16.0	9.8	121.98
UU1155a	ΑΑΣ-115-25	168	1.84	67.54	16.0	9.7	142.34
UU1155b	ΑΑΣ-115-25	168	1.85	67.87	16.2	9.9	141.74
UU1156a	ΑΑΣ-115-25	224	1.88	66.08	16.1	9.7	160.74
UU1156b	ΑΑΣ-115-25	224	1.87	67.87	15.9	9.7	160.62
UU1157a	ΑΑΣ-115-25	365	1.88	65.23	15.8	9.5	171.98
UU1157b	ΑΑΣ-115-25	365	1.89	65.04	16.0	9.6	172.34
UU1158a	ΑΑΣ-115-25	720	1.9	58.99	15.8	9.4	192.70
UU1158b	ΑΑΣ-115-25	720	1.9	58.92	15.6	9.5	192.15

Πίνακας 4.4 Φυσικά και μηχανικά χαρακτηριστικά μη βελτιωμένης και βελτιωμένης αργίλου από δοκιμές ανεμπόδιστης θλίψης

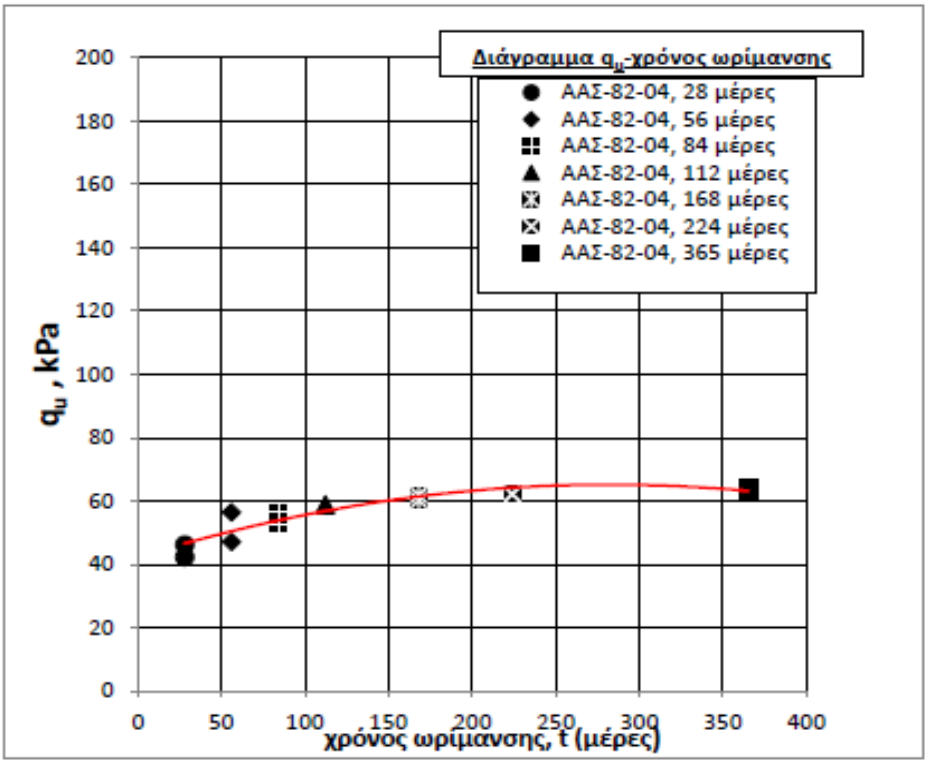
4.3.1.1 Επίδραση του Χρόνου Ωρίμανσης για Διάφορα Ποσοστά Τέφρας

Η επίδραση του χρόνου ωρίμανσης μελετήθηκε με βάση τα αποτελέσματα δοκιμών ανεμποδιστης θλίψης σε δείγματα μετά από ωρίμανση 28, 56, 84, 112, 168, 224, 365 και 730 ημερών. Όπως φαίνεται στα Σχήματα 4.30 έως 4.36, η αύξηση της αντοχής με την αύξηση του ποσοστού τέφρας είναι πολύ διαφορετική για χρόνους 28 και 56 ημερών, από την αύξηση για χρόνους 112, 168 και 224 ημερών. Οι αντοχές 28 και 56 ημερών αυξάνονταν σχεδόν αναλογικά με το ποσοστό της τέφρας, για όλο το φάσμα των ποσοστών που ερευνήθηκε. Αυτό συμβαδίζει με το γεγονός ότι στην αντοχή των 28 και 56 ημερών συμβάλλει κατά μεγάλο ποσοστό η βραχυπρόθεσμη αντίδραση ενυδάτωσης, η οποία εξαρτάται μόνο από το ποσοστό της τέφρας (Da κ.ά., 2013). Από την άλλη πλευρά, για μεγαλύτερες περιόδους ωρίμανσης, η αντοχή έδειξε μικρότερο ρυθμό μεταβολής σε συνάρτηση με την αύξηση του ποσοστού τέφρας, καθώς είναι πιθανότερη η μεγαλύτερη εξάρτησή της από την ποζολανική αντίδραση παρά από την ενυδάτωση. Για δείγματα με χρόνο ωρίμανσης μεγαλύτερο από 56 ημέρες, ο ρυθμός αύξησης της αντοχής με το χρόνο αυξανόταν με την αύξηση του ποσοστού της τέφρας. Ο ρυθμός αύξησης της αντοχής με το χρόνο μειώθηκε με την αύξηση του χρόνου και σχεδόν σταθεροποιήθηκε σε κάποιο χρόνο ωρίμανσης. Έτσι, για ποσοστά τέφρας ≤8% η σταθεροποίηση της αντοχής συνέβαινε σε χρόνο ωρίμανσης 56 ημερών, για ποσοστά τέφρας 10-15% η σταθεροποίηση συνέβαινε σε χρόνο ωρίμανσης 84 έως 224 ημερών, ενώ για ποσοστό 25% η αύξηση της αντοχής συνεχίστηκε έως και τις 730 ημέρες.

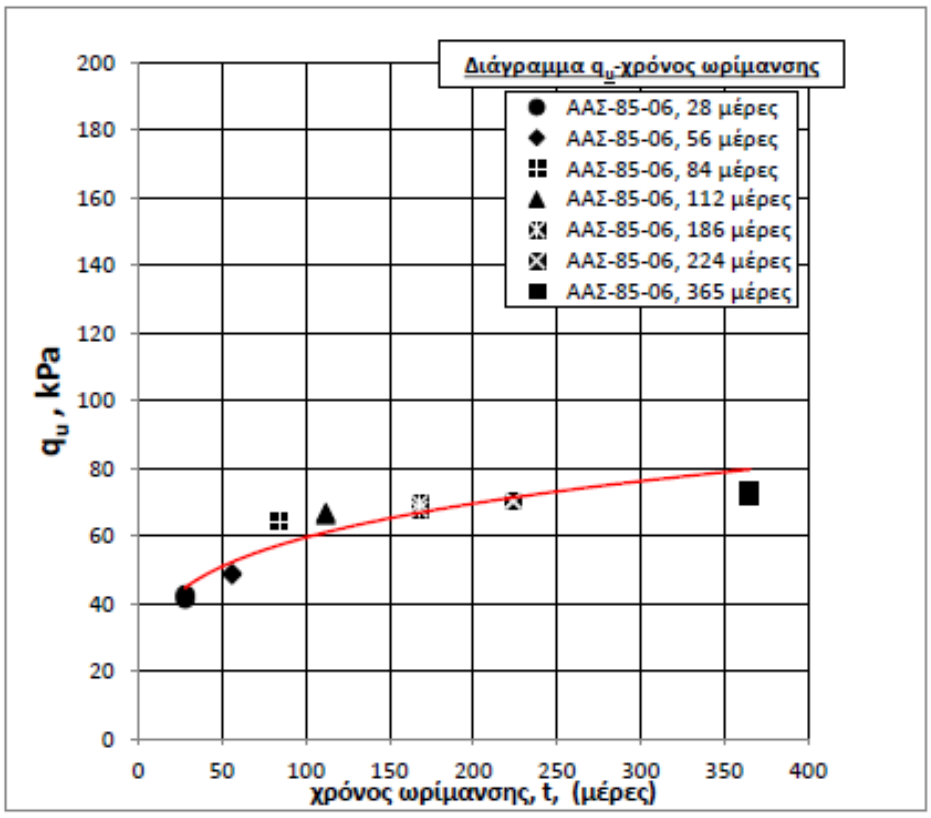
Ο σχηματισμός προϊόντος σιμέντωσης λόγω ποζολανικής αντίδρασης και ενυδάτωσης, αυξανόταν με την αύξηση του χρόνου ωρίμανσης, και συνεπώς αυξανόταν επίσης και ο ρυθμός ανάπτυξης της αντοχής. Αυτό ερμηνεύεται από τη σύγκριση της ανάπτυξης αντοχής τόσο βραχυπρόθεσμα όσο και για παρατεταμένους χρονους ωρίμανσης, όπως φαίνεται στα Σχήματα 4.33 έως 4.39. Τα αποτελέσματα δοκιμών υποδεικνύουν ότι η ποζολανική αντίδραση ήταν πολύ σημαντική για παρατεταμένους χρόνους ωρίμανσης και συνεχιζόταν ακόμη και μέχρι τα 2 έτη (730 ημέρες). Αυτό μπορεί να εξηγηθεί από το γεγονός ότι σε περίοδο ωρίμανσης 730 ημερών, σημαντικό ποσοστό ιόντων Ca^{2+} διαχέεται στην μάζα της βελτιωμένης αργίλου, ώστε να επιτρέψει την ποζολανική αντίδραση.



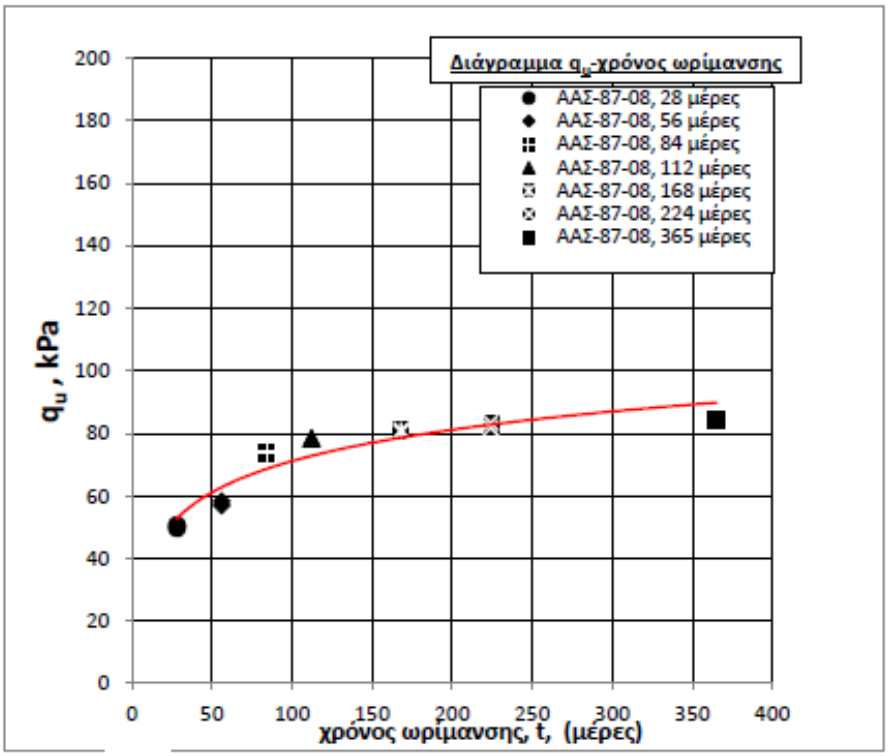
Σχήμα 4.33 Επίδραση χρόνου ωρίμανσης στην αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη μη βελτιωμένης αργίλου



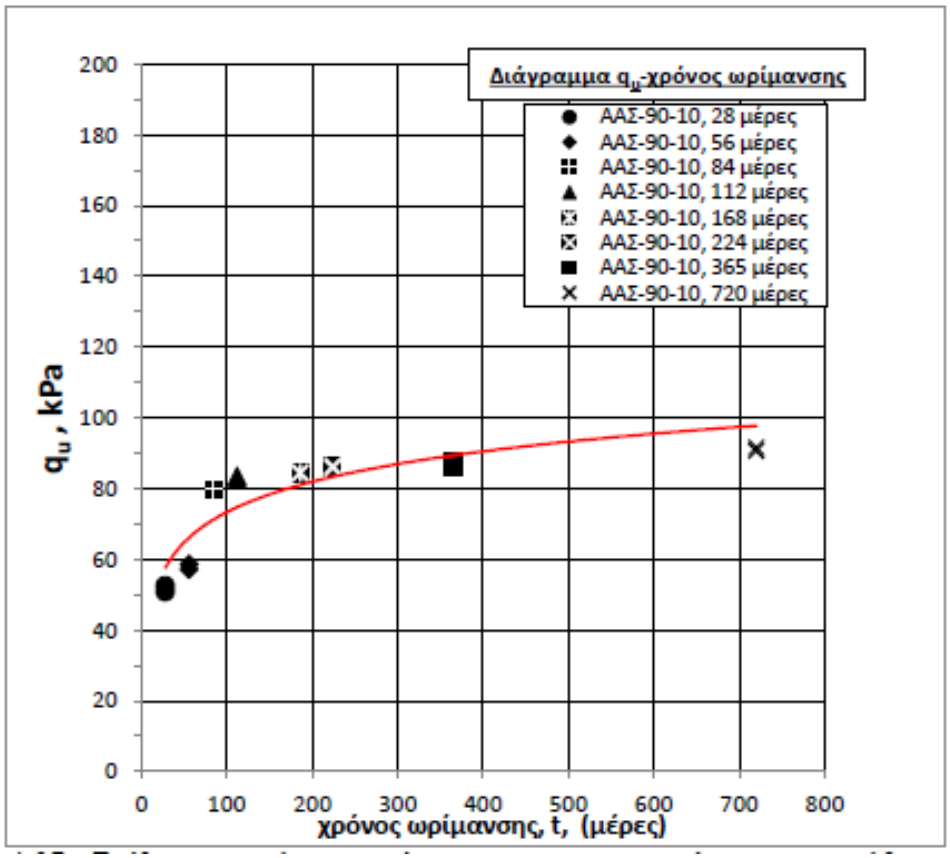
Σχήμα 4.34 Επίδραση χρόνου ωρίμανσης στην αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη βελτιωμένης αργίλου (4% τέφρα)



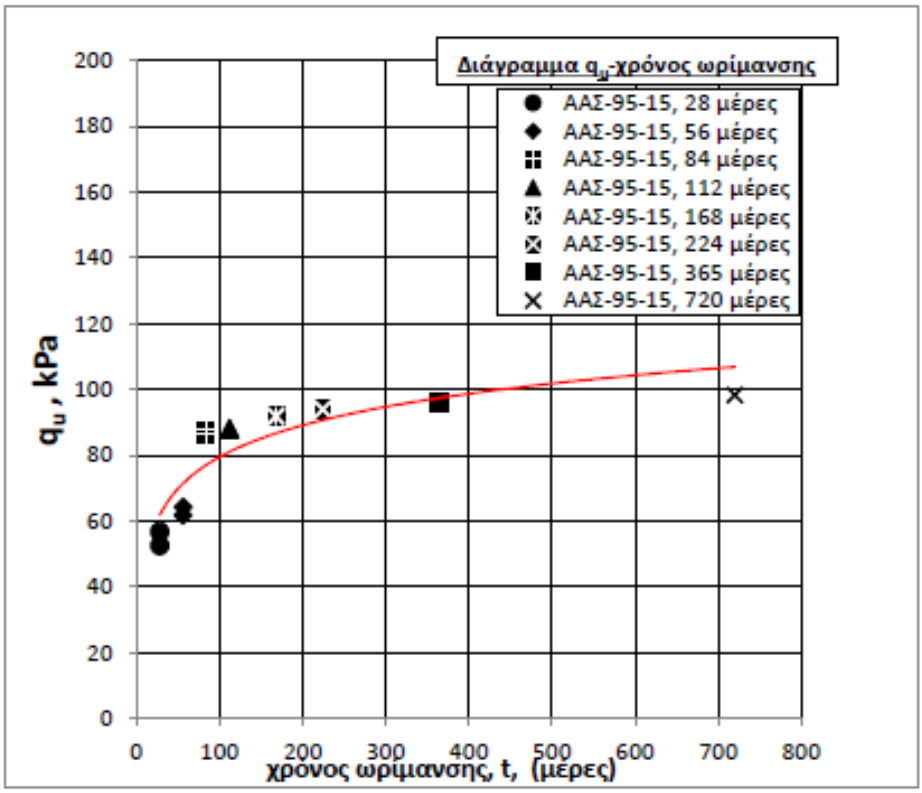
Σχήμα 4.35 Επίδραση χρόνου ωρίμανσης στην αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη βελτιωμένης αργίλου (6% τέφρα)



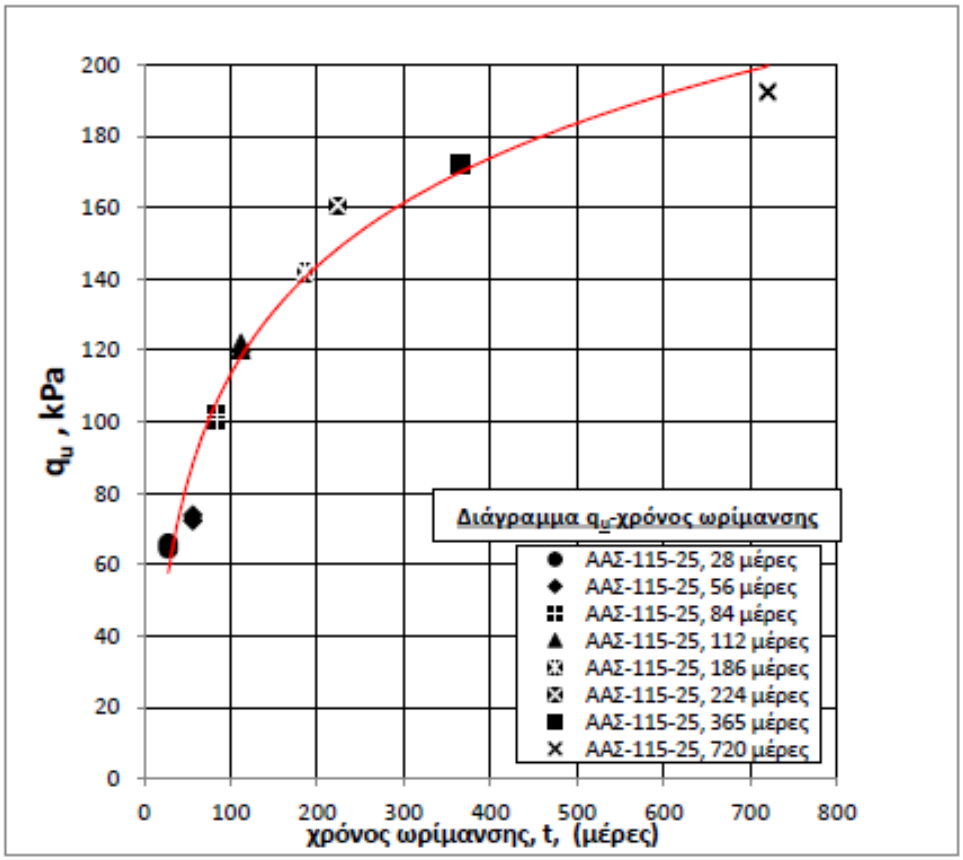
Σχήμα 4.36 Επίδραση χρόνου ωρίμανσης στην αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη βελτιωμένης αργίλου (8% τέφρα)



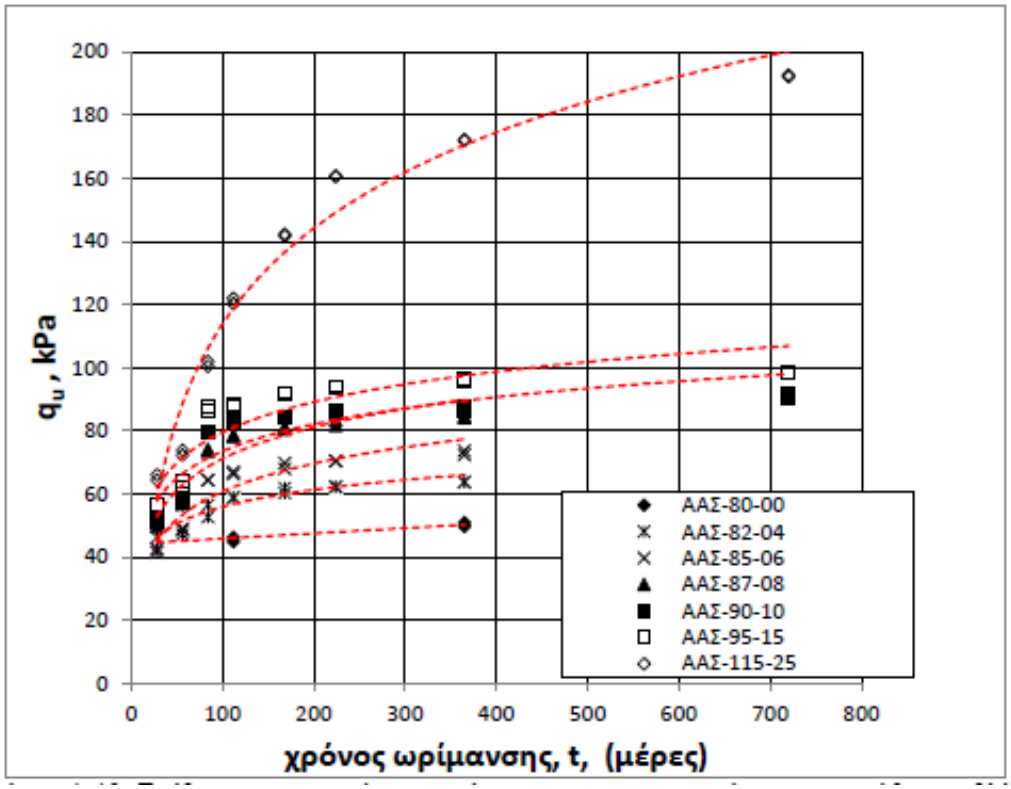
Σχήμα 4.37 Επίδραση χρόνου ωρίμανσης στην αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη βελτιωμένης αργίλου (10% τέφρα)



Σχήμα 4.38 Επίδραση χρόνου ωρίμανσης στην αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη βελτιωμένης αργίλου (15% τέφρα)



Σχήμα 4.39 Επίδραση χρόνου ωρίμανσης στην αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη βελτιωμένης αργίλου (25% τέφρα)



Σχήμα 4.40 Επίδραση του χρόνου ωρίμανσης στην αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη βελτιωμένης αργίλου για όλα τα μίγματα.

4.3.1.2 Επίδραση του Ποσοστού Τέφρας σε Διάφορους Χρόνους Ωρίμανσης

Όπως φαίνεται από τα Σχήματα 4.41 έως 4.43, ακόμη και για χαμηλά ποσοστά τέφρας είναι εμφανής κάποιος βαθμός βελτίωσης της αντοχής και της δυσκαμψίας. Για χαμηλά ποσοστά τέφρας (δηλ. ≤8%), παρατηρήθηκε όλκιμη συμπεριφορά, με την τάση μετά την επίτευξη της μέγιστης τιμής να μειώνεται βαθμιαία η αντοχή, με την αύξηση της παραμόρφωσης. Για μεγαλύτερα ποσοστά τέφρας (≥10%), τα βελτιωμένα δείγματα γίνονταν περισσότερο ψαθυρά, με απότομη πτώση της τάσης μετά τη μέγιστη τιμή, που προσομοιάζει περισσότερο με τη συμπεριφορά ευαίσθητων φυσικών εδαφών με υψηλά ανεπτυγμένη δομή (Leroueil and Vaughan, 1990). Αυτή η συμπεριφορά συμβαδίζει περισσότερο με τα ευρήματα άλλων ερευνητών για διάφορες αργίλους βελτιωμένες με τσιμέντο (π.χ. Uddin κ.ά., 1997; Miura κ.ά., 2001, Kamruzzaman, 2002).

Η διατμητική συμπεριφορά του βελτιωμένου εδάφους στη δοκιμή ανεμπόδιστης θλίψης, μέχρι τη μέγιστη αντοχή, εξαρτάται από τους δεσμούς σιμέντωσης. Για το λόγο αυτό η διατμητική συμπεριφορά στην περιοχή τάσεων πριν τη θραύση ήταν κυρίως ελαστικής φύσεως. Η ολκιμότητα ήταν πολύ περισσότερο αισθητή για μίγματα με χαμηλά ποσοστά τέφρας, όπως φαίνεται στα Σχήματα 4.41 έως 4.43.Παρατηρήθηκε ότι για ποσοστά τέφρας έως 8% και χρόνο ωρίμανσης 28 έως

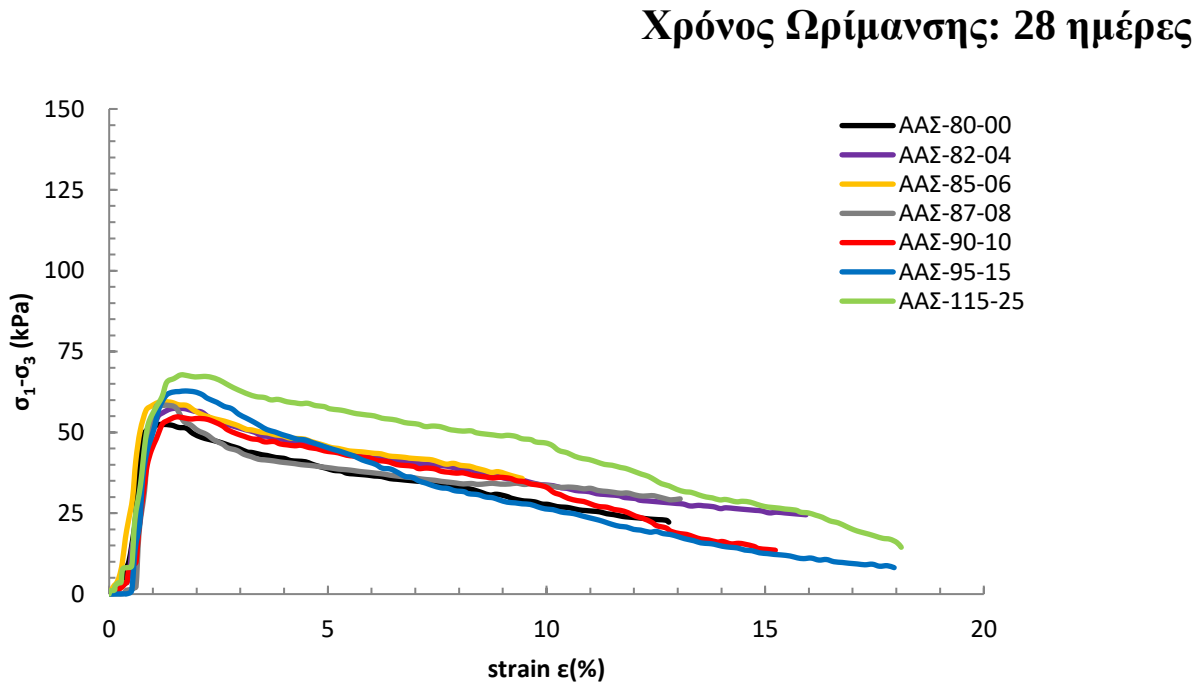
365 ημερών, η μορφή των διαγραμμάτων τάσεων παραμορφώσεων ήταν παρεμφερής. Για ποσοστά τέφρας 10%-15%, τα διαγράμματα τάσεων – παραμορφώσεων είχαν διαφορετικό ρυθμό ανάπτυξης μετά από 84 ημέρες χρόνο ωρίμανσης και στη συνέχεια ο ρυθμός αυτός σταθεροποιείται.

Όπως δείχνουν τα Σχήματα 4.44 έως 4.51, για υψηλότερα ποσοστά τέφρας (π.χ. 25%), η αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη αυξάνόταν συνεχώς σε συνδιασμό με μία αντίστοιχη μικρή παραμόρφωση, και ακολουθόταν από απότομη μείωση της τάσης μετά τη μέγιστη αντοχή (Σχ. 4.37). Η συμπεριφορά αυτού του βελτιωμένου δείγματος με υψηλότερο ποσοστό τέφρας είναι παρόμοια με ενός ψαθυρού υλικού, ενώ για χαμηλό ποσοστό τέφρας η συμπεριφορά φαίνεται να συμβαδίζει με εκείνη ενός φυσικού υλικού ελαφρά δομημένου. Συγκρίνοντας τα Σχ. 4.41 έως 4.43 διαπιστώνεται ότι η παραμόρφωση θραύσης γενικά ήταν μεγαλύτερη για δείγματα με ωρίμανση 28 ημερών από εκείνα με ωρίμανση 365 ημερών ακόμη και για υψηλότερα ποσοστά τέφρας, και η μείωση τάσης μετά τη μέγιστη τάση ήτανι πολύ πιο ήπια, όπως εξηγήθηκε προηγουμένως.

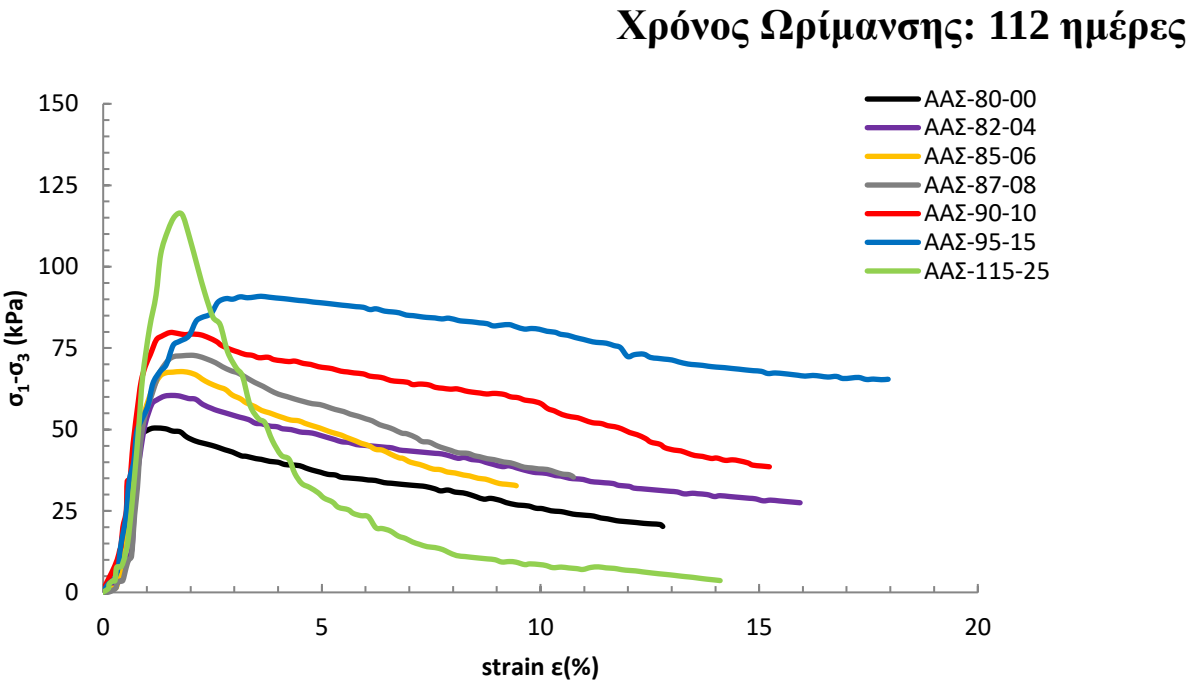
Με βάση την αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη, η περιεκτικότητα σε τέφρα μπορεί να διαιρεθεί σε δύο ζώνες: (α) Ανενεργή Ζώνη και (β) Ενεργή Ζώνη. Για ποσοστά τέφρας μέχρι 8% η βελτίωση της αντοχής σε ανεμπόδιστη θλίψη είναι πολύ οριακή ακόμη και για ωρίμανση 365 ημερών, και όλα τα ποσοστά τέφρας έως 8% ανήκουν στην ονομαζόμενη Ανενεργή Ζώνη. Αυτό φαίνεται να υποδηλώνει ότι απαιτείται ένα ελάχιστο ποσοστό τέφρας (≈10%) για να ολοκληρωθούν οι αντιδράσεις, ποζολανική και ενυδάτωσης, μεταξύ τέφρας και αργιλικών σωματιδίων. Το τελικό αποτέλεσμα της πλήρους σιμέντωσης είναι η αύξηση της διατμητικής αντοχής, και αυτή η περιοχή περιεκτικότητας, μεγαλύτερη από ≈10% σε τέφρα, ονομάζεται Ενεργή Ζώνη. Σε αυτή τη ζώνη, παρατηρήθηκε βελτίωση της αντοχής με αύξηση του ποσοστού τέφρας και επιμήκυνση του χρόνου ωρίμανσης. Η ταχεία αύξηση αντοχής αποδίδεται στο γεγονός ότι οι ποζολανικές αντιδράσεις επιτρέπουν την αποτελεσματική κατανομή στη μάζα της βελτιωμένης αργίλου των διαθέσιμων ιόντων Ca^{2+}. Συνεπώς το αποτέλεσμα ανάμιξης τέφρας σε ποσοστό >10% είναι σημαντικό. Αυτό επιβεβαιώνεται και από το Σχ. 4.3 το οποίο δείχνει ότι οι αντοχές σε ανεμπόδιστη θλίψη για ποσοστό 7.38% τσιμέντου και για 5% καθαρού CaO είναι ίδιες, αφού τα δύο ποσοστά έχουν την ίδια ποσότητα Ca^{++}. Συνεπώς και τα δύο δείγματα παράγουν την ίδια ποσότητα συγκολλητικών ουσιών, αφού έχουν την ίδια ποσότητα ιόντων Ca^{++} (Kamruzzaman, 2002).

Σε σχέση με το χρόνο ωρίμανσης, απαρτηρούμε ότι υπάρχει ένα όριο πέραν του οποίου η αντοχή σταθεροποιείται. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι, οι αντιδράσεις συνεχίζονται μεν, αλλά με μεγαλύτερη δυσκολία διάχυσης των ιόντων ασβεστίου μέσα στη μάζα της βελτιωμένης αργίλου και με αποτέλεσμα να μην παρατηρείται περαιτέρω αύξηση της αντοχής. Μεγαλύτερη δυσκολία μπορεί να προκύπτει λόγω της εξάντλησης των ποζολανικών ιδιοτήτων της τέφρας, που οδηγεί σε δυσαναλογία των ποσοστών ασβεστίου και πυριτικών/αργιλικών (Si/Al) συστατικών του εδάφους που συμμετέχουν στην αντίδραση (Indraratna κ.ά. 2015).

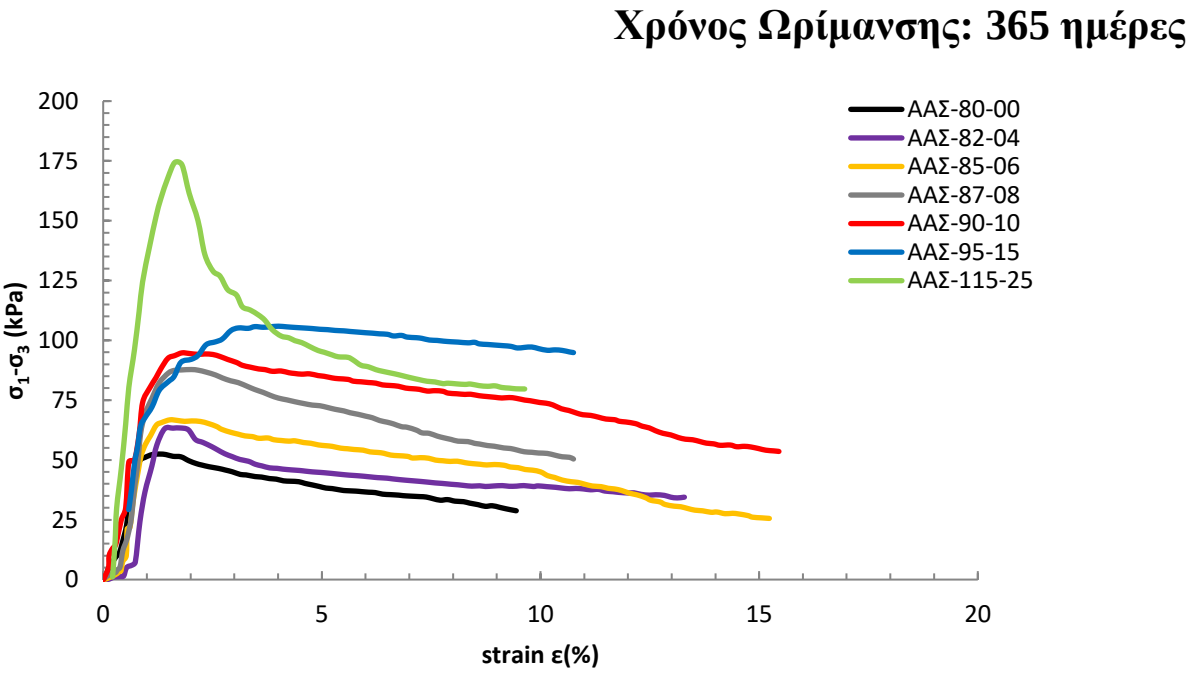
Τα Σχήματα 4.41 έως 4.48 απεικονίζουν την επίδραση του χρόνου ωρίμανσης στην αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη μη βελτιωμένης και βελτιωμένης αργίλου. Για χρόνους ωρίμανσης 28, 56 και 84 ημερών, η επίδραση του χρόνου ωρίμανσης δεν ήταν σημαντική για μίγματα αργίλου με ποσοστό τέφρας ≤8%. Παρόμοια συνεπής τάση αποτελεσμάτων παρατηρήθηκε επίσης από τους Yin και Lai (1998) για θαλάσσια άργιλο του Χονγκ Κονγκ βελτιωμένης με διάφορα ποσοστά τσιμέντου. Για άργιλο με υψηλή αρχική υγρασία και χαμηλό ποσοστό συνδετικού υλικού, επιτυγχάνεται χαμηλότερη αντοχή. Αυτό μπορεί να οφείλεται στα λιγότερα σωματίδια συνδετικού υλικού ανά μονάδα όγκου βελτιωμένου μίγματος. Η άλλη πιθανή αιτία είναι λόγω της αύξησης της μέσης απόστασης μεταξύ των αντιδρώντων σωματιδίων αργίλου και τέφρας.



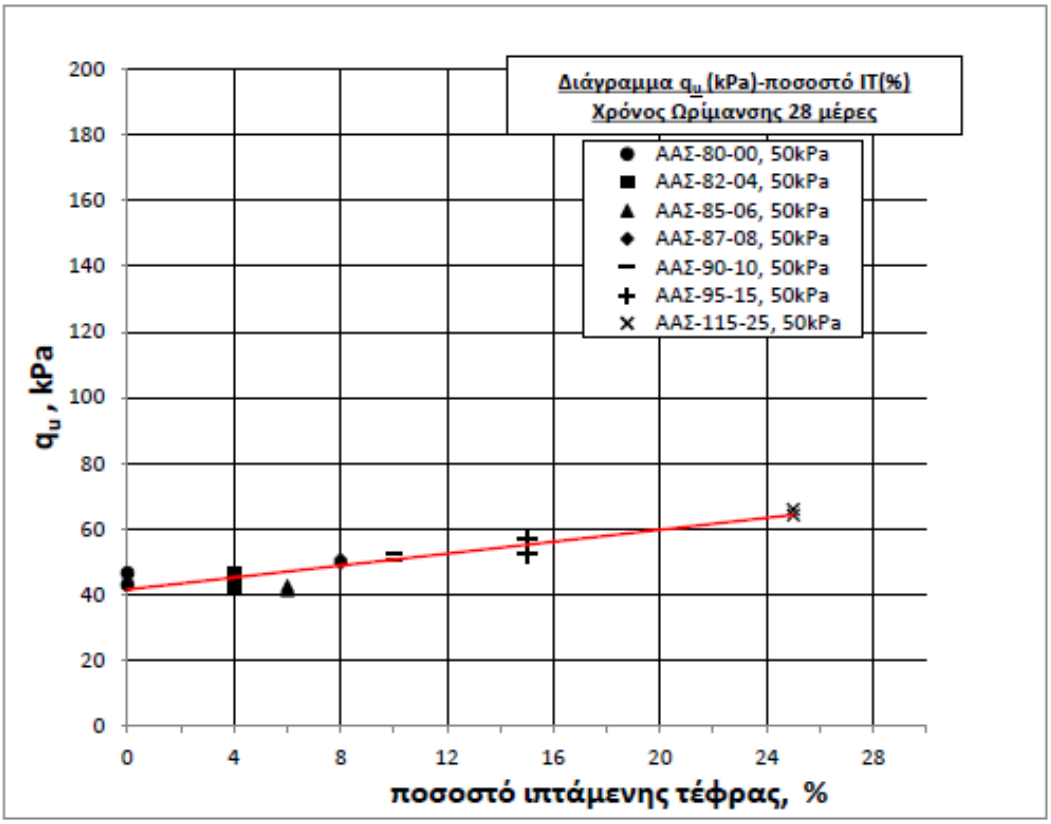
Σχήμα 4.41 Επίδραση ποσοστού τέφρας στη σχέση τάσεων παραμορφώσεων μη βελτιωμένης και βελτιωμένης αργίλου με ωρίμανση 28 ημερών.



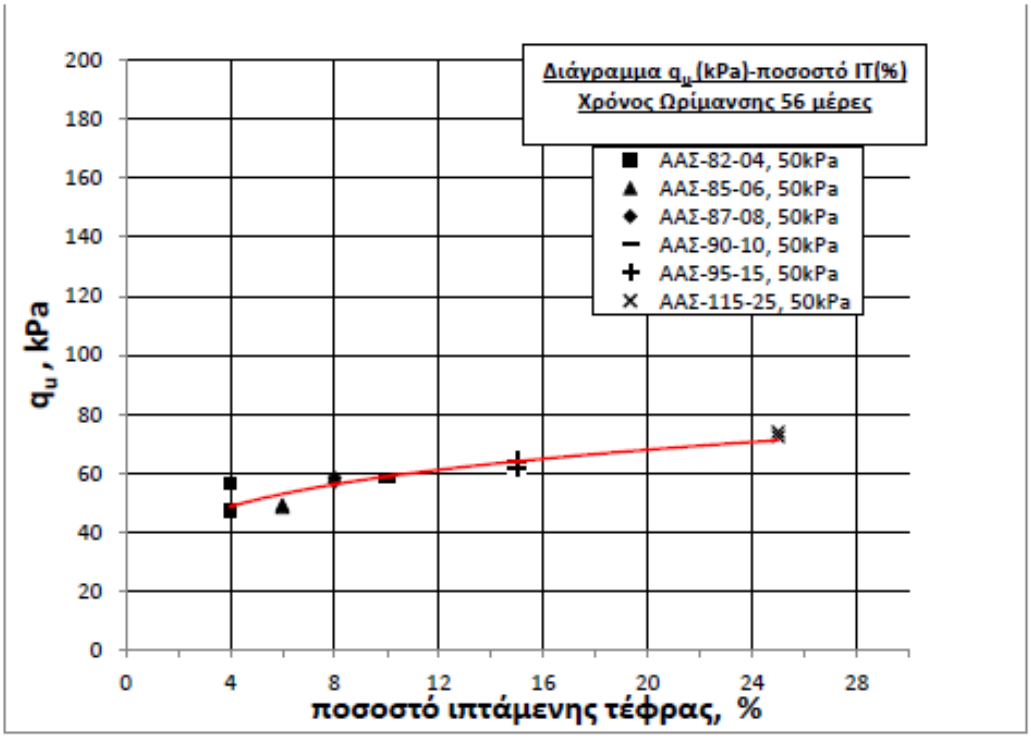
Σχήμα 4.42 Επίδραση ποσοστού τέφρας στη σχέση τάσεων παραμορφώσεων μη βελτιωμένης και βελτιωμένης αργίλου με ωρίμανση 112 ημερών.



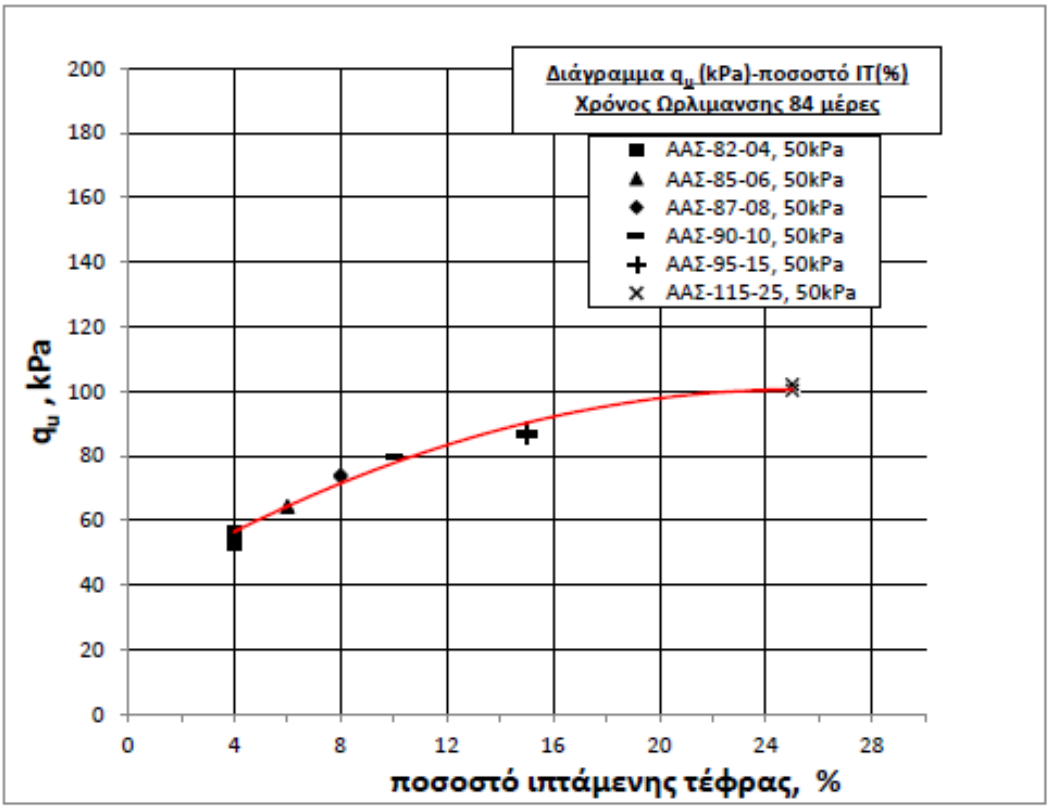
Σχήμα 4.43 Επίδραση ποσοστού τέφρας στη σχέση τάσεων παραμορφώσεων μη βελτιωμένης και βελτιωμένης αργίλου με ωρίμανση 365 ημερών.



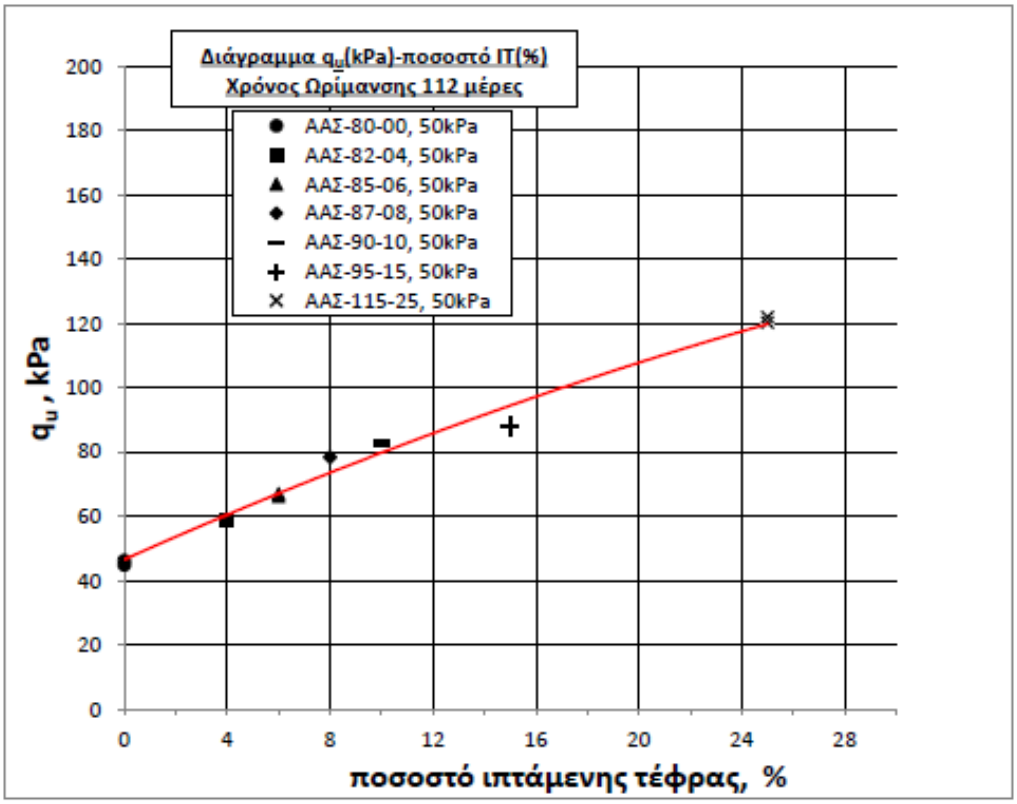
Σχήμα 4.44 Επίδραση ποσοστού τέφρας στην αντοχή ανεμπόδιστης θλίψης μη βελτιωμένης και βελτιωμένης αργίλου με ωρίμανση 28 ημερών.



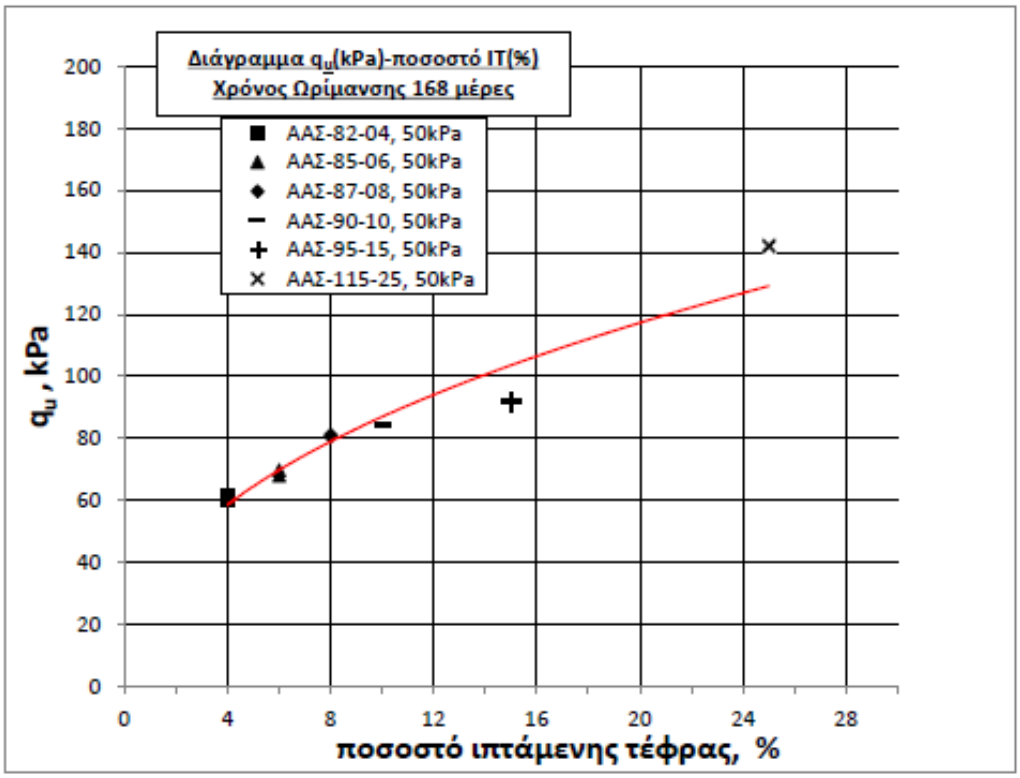
Σχήμα 4.45 Επίδραση ποσοστού τέφρας στην αντοχή ανεμπόδιστης θλίψης μη βελτιωμένης και βελτιωμένης αργίλου με ωρίμανση 56 ημερών.



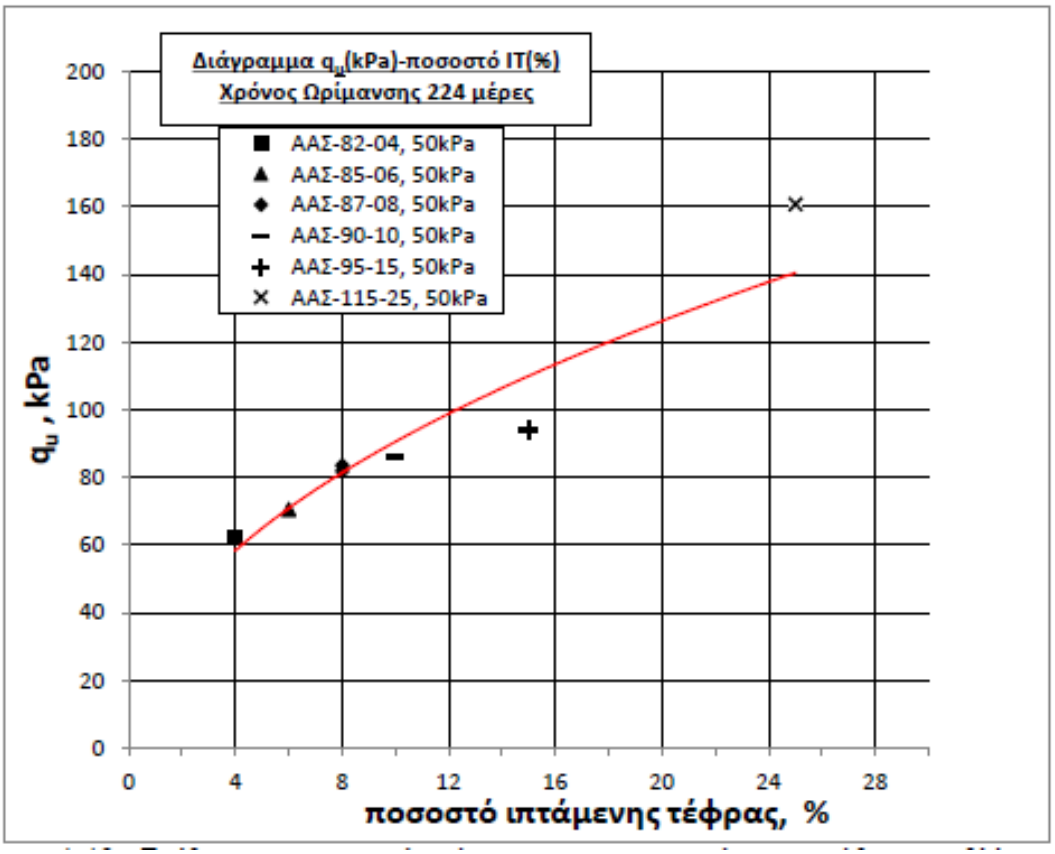
Σχήμα 4.46 Επίδραση ποσοστού τέφρας στην αντοχή ανεμπόδιστης θλίψης μη βελτιωμένης και βελτιωμένης αργίλου με ωρίμανση 84 ημερών.



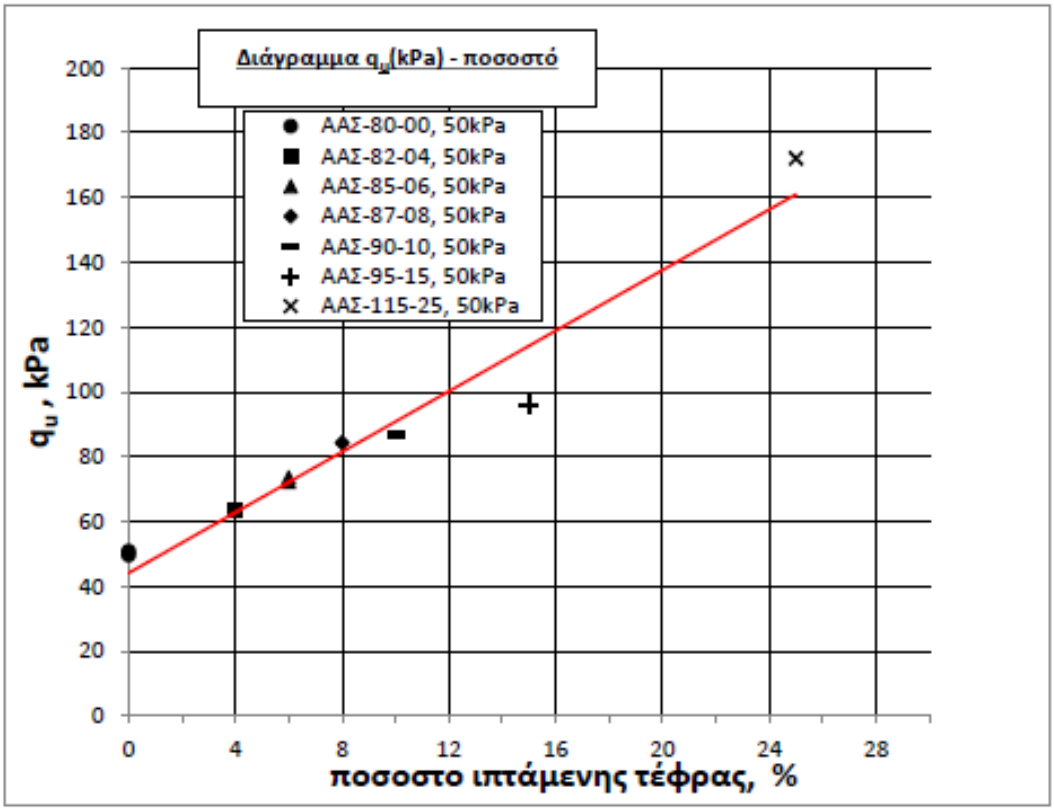
Σχήμα 4.47 Επίδραση ποσοστού τέφρας στην αντοχή ανεμπόδιστης θλίψης μη βελτιωμένης και βελτιωμένης αργίλου με ωρίμανση 112 ημερών.



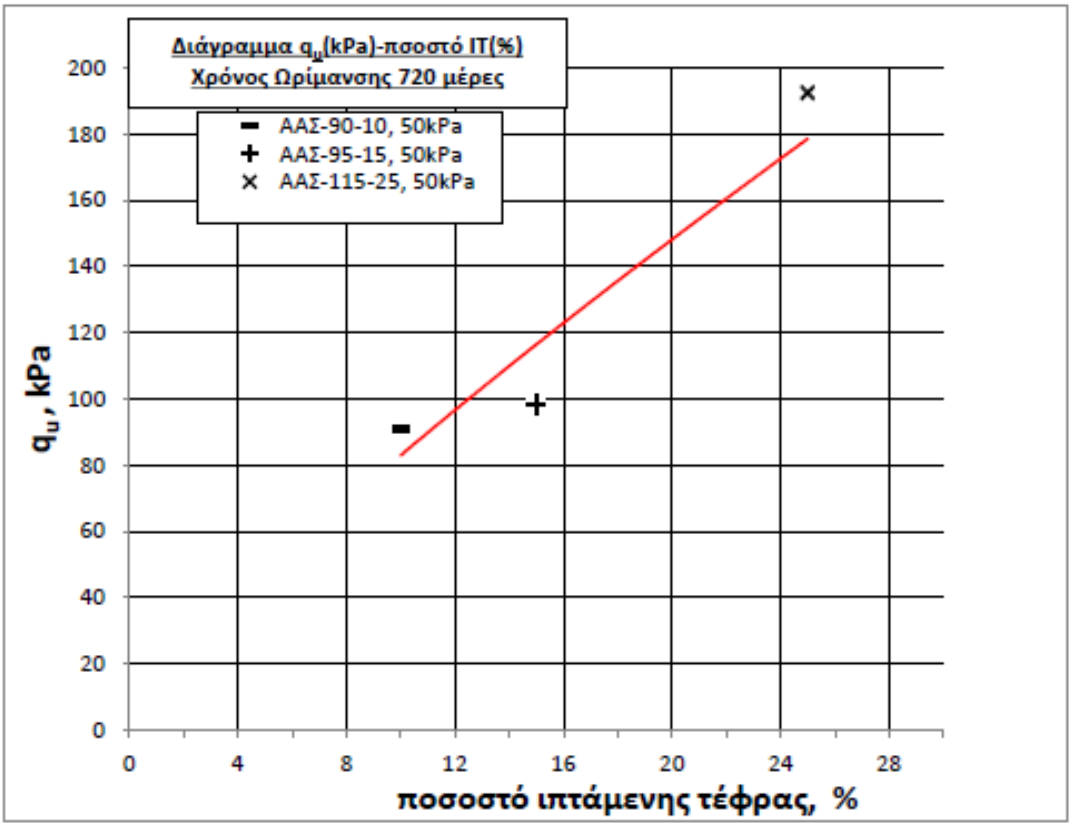
Σχήμα 4.48 Επίδραση ποσοστού τέφρας στην αντοχή ανεμπόδιστης θλίψης μη βελτιωμένης και βελτιωμένης αργίλου με ωρίμανση 168 ημερών.



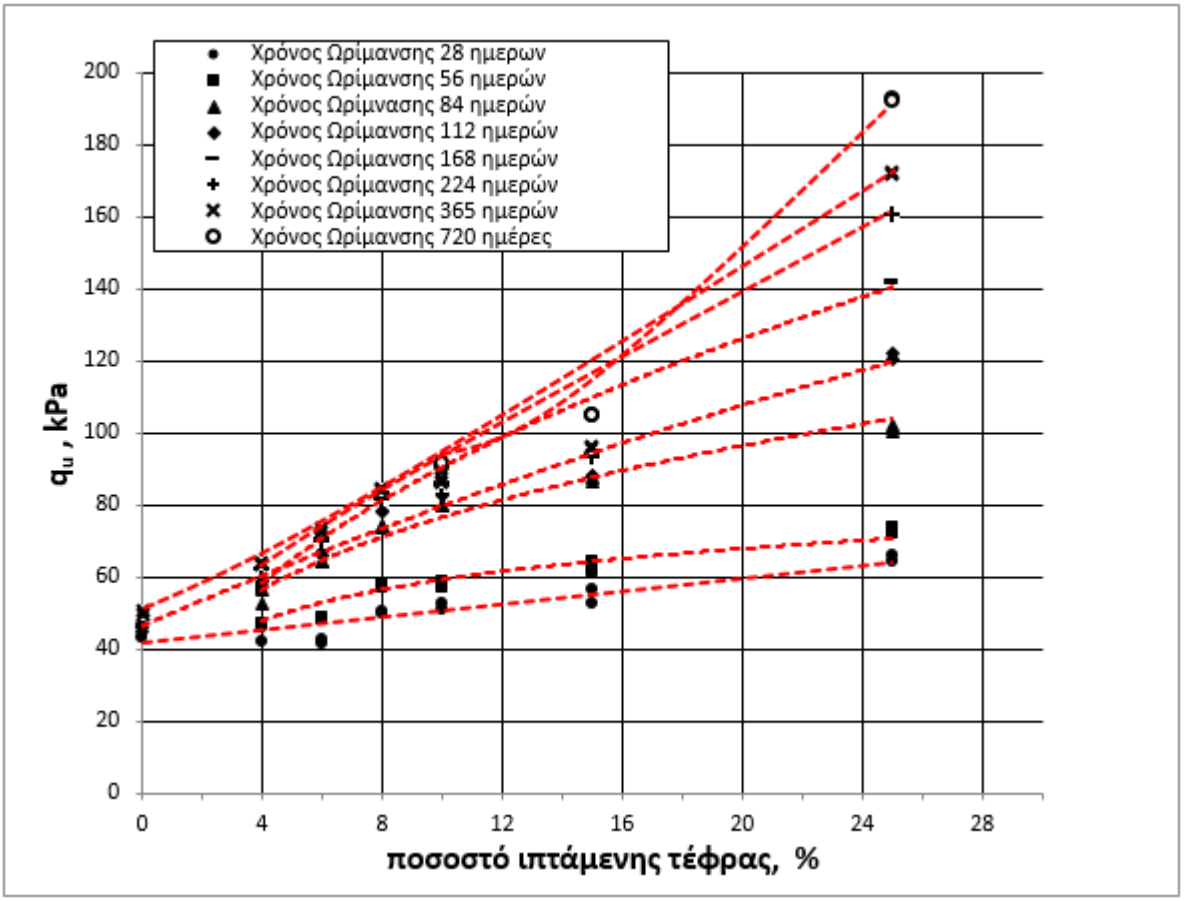
Σχήμα 4.49 Επίδραση ποσοστού τέφρας στην αντοχή ανεμπόδιστης θλίψης μη βελτιωμένης και βελτιωμένης αργίλου με ωρίμανση 224 ημερών.



Σχήμα 4.50 Επίδραση ποσοστού τέφρας στην αντοχή ανεμπόδιστης θλίψης μη βελτιωμένης και βελτιωμένης αργίλου με ωρίμανση 365 ημερών.



Σχήμα 4.51 Επίδραση ποσοστού τέφρας στην αντοχή ανεμπόδιστης θλίψης μη βελτιωμένης και βελτιωμένης αργίλου με ωρίμανση 730 ημερών.



Σχήμα 4.52 Επίδραση του ποσοστού τέφρας στην αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη της αργίλου για διαφορετικούς χρόνους ωρίμανσης

4.4 Επιλογή Μιγμάτων Βελτιωμένης Αργίλου για το Τελικό Στάδιο Έρευνας και τη Διατύπωση Πλαισίου Συμπεριφοράς

Ο κύριος στόχος της παρούσας έρευνας ήταν η παραγωγή επαρκώς λεπτομερούς ποσοτικής πληροφορίας για την ανάπτυξη πλαισίου συμπεριφοράς στην αρχική διαρροή ελαφρά σιμεντωμένων αργίλων υψηλής πλαστικότητας. Για την επιδίωξη αυτού του σκοπού και έχοντας εξετάσει διεξοδικά τα αποτελέσματα δοκιμών μονοδιάστατης στερεοποίησης σε συμπιεσόμετρο και αστράγγιστης ανεμπόδιστης θλίψης για διάφορες αναλογίες μίγματος αργίλου και τέφρας, όπως παρουσιάσθηκαν στις προηγούμενες παραγράφους αυτού του κεφαλαίου, η παρούσα έρευνα περιορίστηκε μόνο σε δύο αναλογίες μίξης για τη διερεύνηση της καταστατικής συμπεριφοράς ελαφρά σιμεντωμένων αργίλων.

Με βάση τα μηχανικά χαρακτηριστικά των δειγμάτων τα οποία παρουσιάστηκαν προηγουμένως, τα δύο μίγματα αργίλου τα οποία επέδειξαν πρακτικά σταθερή

αύξηση αντοχής μετά περίοδο ωρίμανσης 112 ημερών (λόγω ισορρόπησης της ποζολανικής αντίδρασης μέσα στη μάζα του εδάφους) και όλκιμη συμπεριφορά, ήταν τα μίγματα βελτιωμένης αργίλου με ποσοστά τέφρας 10% και 15%. Συνεπώς όλες οι περαιτέρω δοκιμές έγιναν μετά από περίοδο ωρίμανσης 112 ημερών και μόνο στα 2 αυτά δείγματα.

Για αυτά τα επιλεγέντα ποσοστά τέφρας και τις επιλεγμένες περιόδους ωρίμανσης, διερευνήθηκαν περαιτέρω οι βασικές ιδιότητες και η συμπεριφορά αντοχής και συμπιεστότητας των δειγμάτων βελτιωμένης τέφρας, τα οποία ωρίμασαν σε ομογενείς συνθήκες. Η ανωτέρω διερεύνηση είχε σκοπό τον καθορισμό επιφάνειας αρχικής διαρροής και της πιθανής σχέσης του με άλλα μηχανικά χαρακτηριστικά, όπως η αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη.

Επιπλέον διερευνήθηκε η εξέλιξη της επιφάνειας διαρροής στη διάρκεια της φάσης κράτυνσης (hardening) της διάτμησης, και ο τρόπος μεταβολής του σχήματος και του μεγέθους της επιφάνειας διαρροής μετά την αρχική διαρροή των δειγμάτων βελτιωμένης αργίλου τα οποία επέδειξαν όλκιμη συμπεριφορά, αντί της ψαθυρής που παρουσιάζουν τα περισσότερα σιμεντωμένα εδάφη. Επιπλέον έγινε σύγκριση των μηχανικών χαρακτηριστικών και της περιβάλλουσας αρχικής διαρροής των δειγμάτων αυτών με εκείνα της φυσικής αργίλου του Αγίου Στεφάνου, χωρίς την επίδραση του χρησιμοποιούμενου συνδετικού υλικού (δηλ. την τέφρα Πτολεμαΐδας).

5 ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΜΙΚΡΟΔΟΜΗΣ

5.1 Εισαγωγή

Ένας από τους στόχους αυτής της έρευνας ήταν να διερευνήσει την δημιουργία δομής σε αργίλους υψηλής πλαστικότητας με τέφρα ως πρόθετο υλικό βελτίωσης, και να κατανοήσει καλύτερα την επίδραση της ορυκτολογικής σύνθεσης και της δραστικότητας της αργίλου στην προκύπτουσα μικροδομή και σύνδεση των σωματιδίων.

Εκτελέστηκαν αναλύσεις PLM και XRD για τη διερεύνηση της δομής της αργίλου που επιλέχθηκε για την παρούσα έρευνα, όπως περιγράφηκαν στο Κεφάλαιο 2. Οι δοκιμές έγιναν σε δείγματα της μη βελτιωμένης και της βελτιωμένης αργίλου. Χρησιμοποίηθηκε Πολωτικό Μικροσκόπιο (PLM) στο Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών (ΙΓΜΕ), και Περίθλαση Ακτίνων Χ (XRD) στο Εργαστήριο Ορυκτολογίας του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου (ΕΜΠ). Οι περιγραφές της μικροδομής συσχετίσθηκαν με τη μηχανική συμπεριφορά της αργίλου.

5.2 Σχεδιασμός Προγράμματος Δοκιμών

5.2.1 Ιδιότητες Υλικών

Στην παρούσα έρευνα χρησιμοποίηθηκε ένας τύπος συνδετικού υλικού. Η τέφρα Πτολεμαΐδος (τύπου C, σύμφωνα με το ASTMC150) ως το κύριο συνδετικό υλικό για την ανάπτυξη δεσμών σιμέντωσης μέσα στα δείγματα.

Τα βασικά φυσικά και μηχανικά χαρακτηριστικά των επιλεγόντων μιγμάτων αργίλου και τέφρας φαίνονται στον Πίνακα 5.1.

Ιδιότητες	ΑΑΣ-80-00	ΑΑΣ-90-10	ΑΑΣ-95-15
Όριο Υδαρότητας, LL (%)	72	68	62
Όριο Πλαστικότητας, PL (%)	26	28	24
Δείκτης Πλαστικότητας, PI (%)	46	40	38
Υγρασία, w (%)	53	60	63
Υγρό Φαινόμενο Βάρος (kN/m^3)	17.9	16.5	16.0
Ξηρό Φαινόμενο Βάρος (kN/m^3)	12.7	10.9	10.2
Ειδικό Βάρος Στερεών, G_s	2.78	2.80	2.80
Δείκτης Συμπίεσης, C_c	0.36	0.46	0.46
Αστράγγιστη Διατμητική Αντοχή, S_u (kPa)	26	45	49
Αρχικός Λόγος Κενών, e_o	1.53	1.70	1.76
Τάση Προστερεοποίησης, p'_c (kPa)	50	90	100

Πίνακας 5.1 Χαρακτηριστικά μιγμάτων αργίλου και τέφρας που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα έρευνα

5.3 Αποτελέσματα και Ανάλυση

5.3.1 Ανάλυση με Περίθλαση Ακτίνων Χ (XRD)

Με σκοπό την καλύτερη κατανόηση των μηχανισμών βελτίωσης με τέφρα μίας αργίλου υψηλής πλαστικότητας, αυτή η έρευνα παρουσιάζει με τη βοήθεια αναλύσεων περίθλασης ακτίνων Χ την εξέλιξη της μικροδομής της βελτιωμένης αργίλου του Αγίου Στεφάνου σε περίοδο ωρίμανσης 112 ημερών.

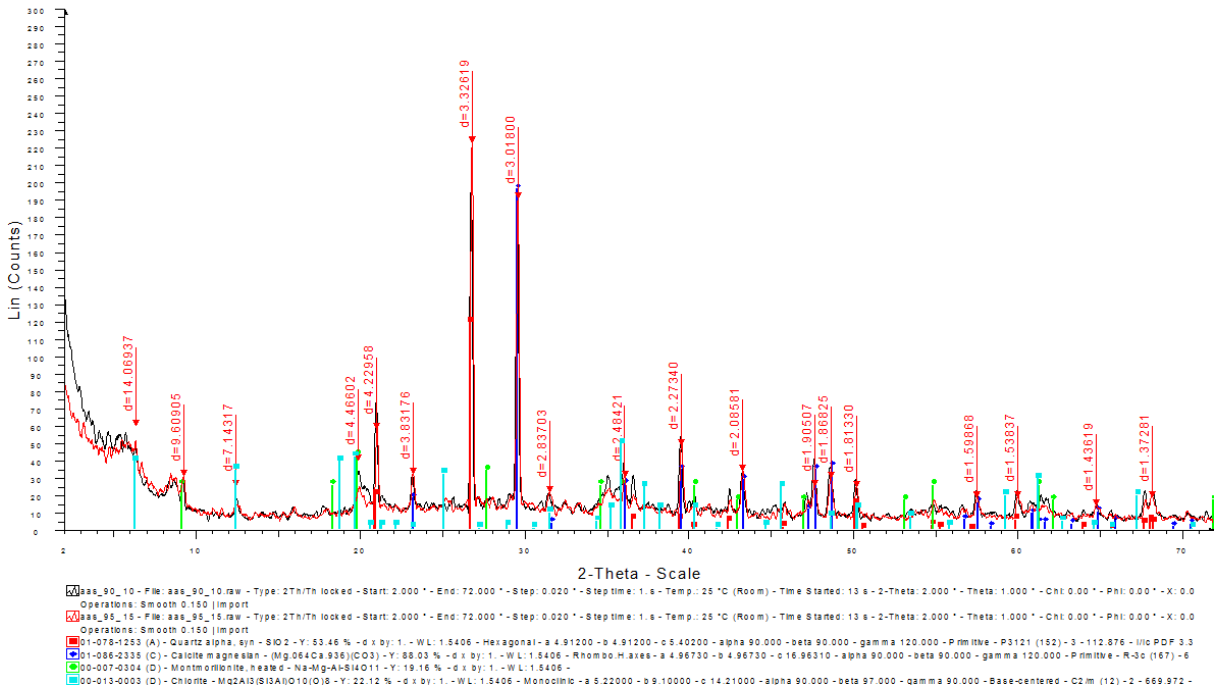
Το Σχήμα 5.1 δείχνει διάγραμμα ανάλυσης XRD βελτιωμένης αργίλου του Αγίου Στεφάνου με ποσοστά τέφρας Πτολεμαΐδας 10% και 15%. Σε αυτό το σχήμα, το ποσοστό τέφρας ορίζεται ως το βάρος της ξηρής τέφρας προς το βάρος του εδάφους μαζί με το σύνολο του πρόσθετου ύδατος που αναμίχθηκε, όπως περιγράφεται με λεπτομέρεια στο Κεφάλαιο 3. Όπως φαίνεται ευκρινώς στο Σχήμα 5.1, στη βελτιωμένη άργιλο εμφανίζεται χαλαζίας (53.46%), μαγνησιακός ασβεστίτης (88.03%) και χλωρίτης (22.12%). Η παρουσία αργιλικών ορυκτών επιβεβαιώνεται επίσης από την παρουσία μοντμοριλλονίτη (19.16%) στην εδαφική μάζα.

Οι σχετικές αναλογίες των αργιλικών ορυκτών στα δείγματα εδάφους, οι οποίες δεν μπορούν να καθορισθούν με σαφήνεια στην ανάλυση XRD, δείχνουν ότι ο μοντμοριλονίτης είναι το κυρίαρχο αργιλικό ορυκτό.

Τα διαγράμματα ανάλυσης XRD και για τα δύο δείγματα (ΑΑΣ-90-10, ΑΑΣ-95-15) εμφανίζουν πολλές κορυφές χαλαζία και ασβεστίτη. Είναι επίσης ενδιαφέρον να

σημειωθεί ότι ο ρυθμός αύξησης αυτών των συστατικών είναι σχετικά ίδιος και για τα δύο δείγματα. Αυτή η παρατήρηση προκαλεί κάποια αβεβαιότητα για την ανάπτυξη έντονης ποζολανικής συμπεριφοράς καθώς αυξάνεται το ποσοστό τέφρας μέσα στην εδαφική μάζα. Παρ' όλα αυτά, η σταθερότητα της τάσης των δύο δειγμάτων είναι σημαντική και υποδηλώνει ότι η επίδραση της τέφρας μπορεί να είναι καθοριστική.

Επίσης διαπιστώνεται η απουσία καολινίτη, καθώς φαίνεται ότι έχει εξαντληθεί από την ποζολανική αντίδραση, όπως αναφέρουν οι Eades & Grim (1960). Στα χαμηλά ποσοτά τέφρας (10% ή 15%), σχηματίζονται προϊόντα σιμέντωσης από την αντίδραση ενυδάτωσης και την ποζολανική, με την δεύετη να εξαντλεί τον καολινίτη. Σε υψηλότερα ποσοστά τέφρας, η εξάντληση του καολινίτη οδηγεί στην παύση της ποζολανικής αντίδρασης, και έτσι τα πρόσθετα προϊόντα σχηματίζονται μόνο από την αντίδραση ενυδάτωσης (Eades & Grim, 1960, Kamruzzaman, 2006).



Σχήμα 5.1 Διαγράμματα ανάλυσης με περίθλαση ακτίνων X (a) ΑΑΣ-90-10, (b) ΑΑΣ-95-15

5.3.2 Ανάλυση με Πολωτικό Μικροσκόπιο (PLM)

Η ανάλυση με πολωτικό μικροσκόπιο έγινε για να μελετηθούν οι επιδράσεις στη μικροδομή της προσθήκης στην άργιλο 10%, 15% και 25% τέφρας Πτολεμαΐδας. Όπως φαίνεται στα Σχήματα 5.2 έως 5.5, η πολωτική μικροσκοπία επιτρέπει τον

προσδιορισμό των σχέσεων υφής και ορυκτολογικών φάσεων για τα αργιλικά ορυκτά.

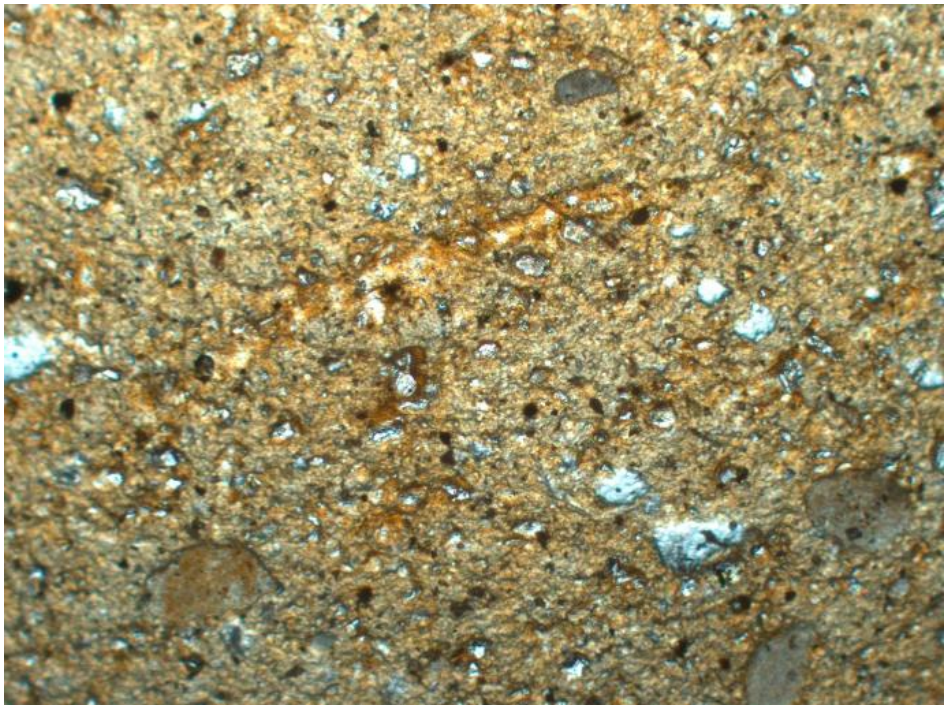
Η μικροφωτογραφία της μη βελτιωμένης αργίλου (Σχ. 5.6) δείχνει την παρουσία αργιλικών σωματιδίων και συσσωματωμάτων, με μη ομογενές μέγεθος σωματιδίων και μορφολογία σωματιδίων η οποία κυμαίνεται μεταξύ παντελούς έλλειψης κρυσταλλικών εδρών και καλά σχηματισμένων εδρών. Η ορυκτολογική σύνθεση παρουσιάζει αφθονία χαλαζία, χλωρίτη και οξειδίων σιδήρου.

Η ανάλυση PLM αργίλου βελτιωμένης με 10% τέφρα (Σχήμα 5.3) εμφανίζει έναν αρκετά ανοικτό τύπο μικροδομής, με τα σωματίδια τέφρας σε διεσπαρμένη διάταξη να εμφανίζουν χαμηλό βαθμό δικτύωσης. Τα Σχήματα 5.4 και 5.5 δείχνουν τις μικροφωτογραφίες αργίλου βελτιωμένης με 15% και 25% τέφρα αντίστοιχα. Παρατηρείται ότι καθώς αυξάνεται το ποσοστό της τέφρας, ο βαθμός δικτύωσης φαίνεται να αυξάνεται, η κροκιδωμένη δομή γίνεται περισσότερο εμφανής με σχηματισμό συσσωματωμάτων αργίλου – τέφρας. Όταν το ποσοστό της τέφρας είναι χαμηλότερο, τα συσσωματώματα αργίλου – τέφρας χωρίζονται από μεγαλύτερα μεσοδιαστήματα που περιέχουν μικρότερο ποσοστό τέφρας.

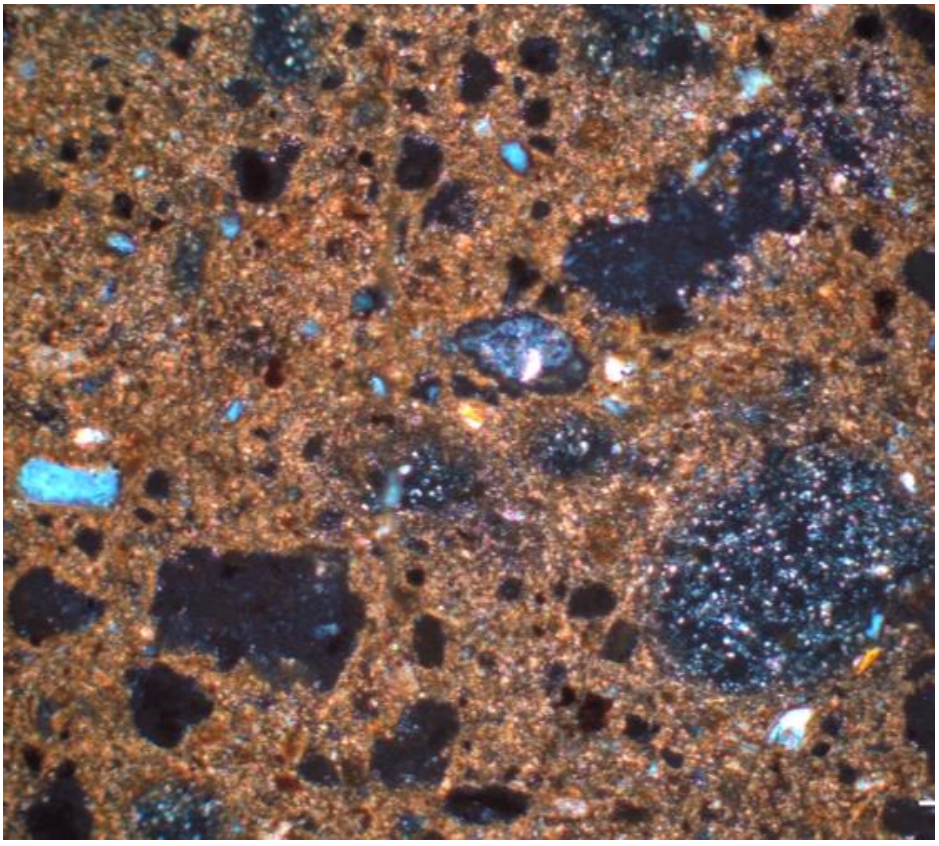
Η αύξηση του βαθμού δικτυωτής διάταξης μπορεί να αποδοθεί στην αύξηση της ποσότητας ασβεστίτη (Local κ.ά., 1990). Αυτό είναι αρκετά συμβατό με τα αποτελέσματα των αναλύσεων XRD τα οποία εξετάστηκαν πιο πάνω, καθώς και με τα αποτελέσματα SEM σε αργίλους βελτιωμένες με άσβεστο (Rao and Rajasekaran, 1996; Berut κ.ά., 1990; Kamruzzaman, 2006).

Οι μικροφωτογραφίες της βελτιωμένης αργίλου με 25% τέφρα παρουσιάζουν σαφείς ενδείξεις σχηματισμού συσσωματωμάτων αργίλου – τέφρας. Τα σωματίδια τέφρας εμφανίζουν δικτυωτή υφή, και με την πάροδο του χρόνου είναι πιθανό να σχηματίσουν συσσωματώματα αργίλου – τέφρας, όταν το ποσοστό τέφρας είναι υψηλότερο.

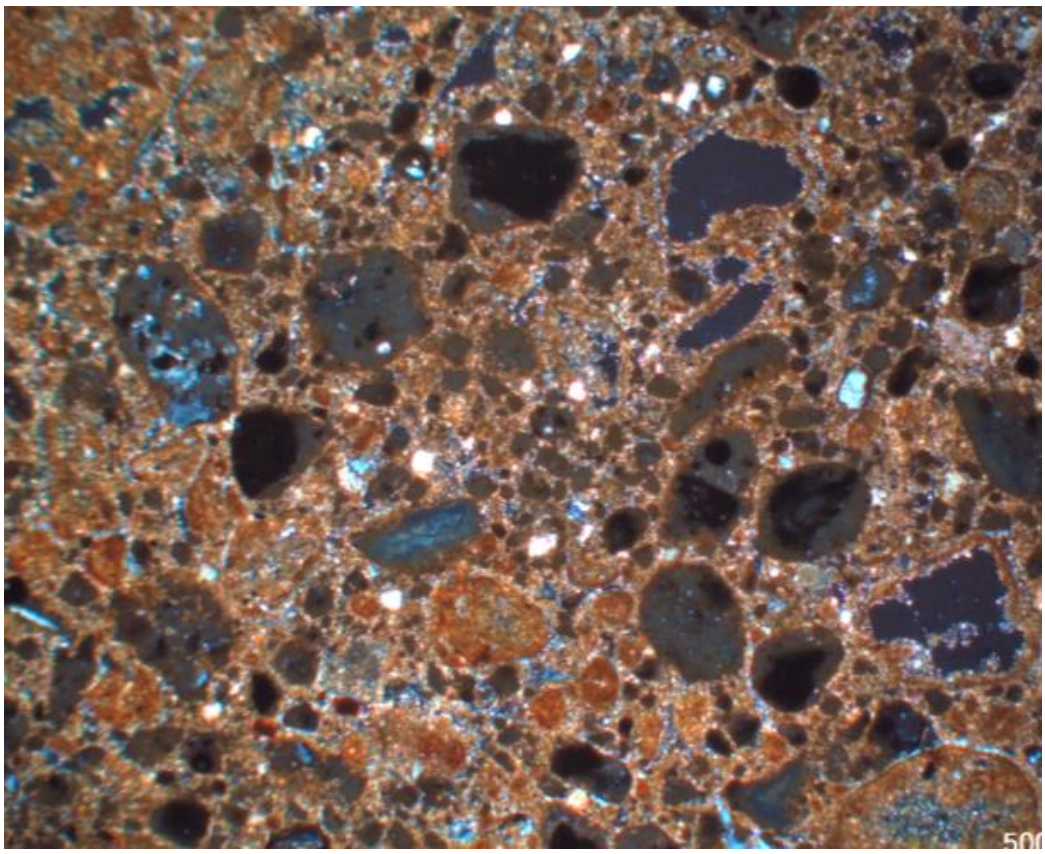
Αυτό προκαλεί επίσης τη βελτίωση της αντοχής αλλά και της συμπιεστότητας της βελτιωμένης με τέφρα αργίλου. Όμως αυτό το θέμα έχει επεξηγηθεί και θα επεξηγηθεί περαιτέρω σε άλλα κεφάλαια αυτής της διατριβής.



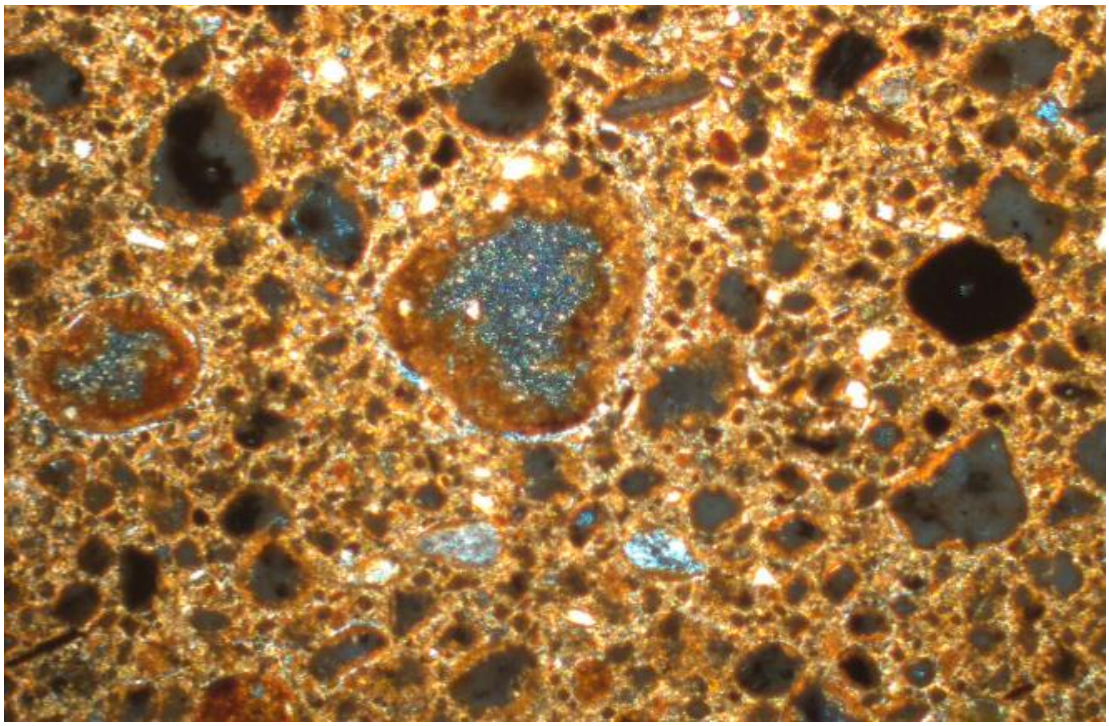
Σχήμα 5.2 Εικόνες PLM μη βελτιωμένης αργίλου (ΑΑΣ-80-00)



Σχήμα 5.3 Εικόνες PLM βελτιωμένης αργίλου με 10% τέφρα (ΑΑΣ-90-10)



Σχήμα 5.4 Εικόνες PLM βελτιωμένης αργίλου με 15% τέφρα (ΑΑΣ-95-15)



Σχήμα 5.5 Εικόνες PLM βελτιωμένης αργίλου με 25% τέφρα (ΑΑΣ-115-25)

5.3.3 Η επίδραση της Αναπτυσσόμενης Μικροδομής στη Μηχανική Συμπεριφορά Αργίλων Βελτιωμένων με Τέφρα

Η τέφρα περιέχει ρομβοεδρικούς μικροκρυστάλλους ασβεστίτη με καλή κρυστάλλωση, πλούσιους σε ασβέστιο (Ca). Η μικροδομή της τέφρας η οποία περιέχει μεγάλο ποσοστό ασβεστίτη, είναι το αποτέλεσμα της θραύσης των συσσωματωμάτων της.

Η εμφάνιση τέφρας σε μικρές ποσότητες, μεταξύ των σωματιδίων της αργίλου, υποδεικνύει ότι το μίγμα θα αναπτύξει όχι καλά δομημένη δικτύωση, ως αποτέλεσμα της μικρής συμμετοχής συσσωματωμάτων στη μάζα.

Ωστόσο, στη μάζα τη αργίλου εντοπίστηκαν μικροπόροι σφαιρικού σχήματος και διαμέτρου έως 10μm, οι οποίοι μπορεί να προέκυψαν από μικροαπολιθώματα (Sasanian, 2011). Στη μάζα εντοπίζονται επίσης άμορφα συσσωματώματα. Αυτό υποδεικνύει ότι, η βελτιωμένη με τέφρα άργιλος, δεν έχει αναπτύξει σε μεγάλο βαθμό τα ποζολανικά χαρακτηριστικά της τέφρας, με τελικό αποτέλεσμα μικρότερη αύξηση της αντοχής του τελικού προϊόντος. Όσον αφορά τη θλιπτική αντοχή της βελτιωμένης με τέφρα αργίλου, όπως παρουσιάστηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο, με μικρή αύξηση του ποσοστού της τέφρας, η θλιπτική αντοχή αυξάνεται για χρόνους ωρίμανσης μεγαλύτερους από 112 ημέρες.

6 ΠΛΑΙΣΙΟ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΣΤΗ ΔΙΑΡΡΟΗ ΚΑΙ ΣΧΕΣΗ ΤΑΣΕΩΝ-ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΓΙΑ ΑΡΓΙΛΟ ΒΕΛΤΙΩΜΕΝΗ ΜΕ ΤΕΦΡΑ

6.1 Εισαγωγή

Η τεχνητή σιμέντωση εφαρμόζεται στην πρακτική των έργων Πολιτικού Μηχανικού ως μία αποτελεσματική μέθοδος σταθεροποίησης μαλακών εδαφών, όπως περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 2. Κατά τις προηγούμενες δεκαετίες έχουν αναπτυχθεί τεχνικές βαθειάς και αβαθούς σταθεροποίησης ώστε να βελτιωθούν τα μηχανικά χαρακτηριστικά των εδαφών, όπως η αντοχή και η συμπιεστότητα, και να «στερεοποιηθούν» μαλακές και πολτώδεις άργιλοι (π.χ. Bergado κ.ά., 1996, Nagaraj και Miura, 2001).

Πολλοί ερευνητές έχουν μελετήσει εργαστηριακά τη συμπεριφορά διαρροής φυσικών δομημένων μαλακών αργίλων, και έχει αναπτυχθεί ένα πλήθος προσομοιωμάτων για την πρόβλεψη της συμπεριφοράς τέτοιων υλικών σε διάτμηση και συμπίεση (π.χ. Mitchell, 1970; Wong και Mitchell, 1975; Graham κ.ά., 1983; Clausen κ.ά., 1984; Folks και Crookes, 1985). Οι φυσικές ευαίσθητες σιμεντωμένες άργιλοι τείνουν να παραμένουν σε μετασταθή κατάσταση. Μόλις η τάση υπερβεί τη φαινόμενη «τάση προστερεοποίησης», η οποία οφείλεται στη φυσική σιμέντωση, επέρχεται θραύση των δεσμών μεταξύ των σωματιδίων με αποτέλεσμα την απότομη αύξηση της συμπιεστότητας (π.χ. Mitchell, 1970). Καθώς το υλικό έχει ανισότροπη δομή πριν τη σιμέντωση, η ένδειξη αυτής της υφής είναι εμφανής στη μηχανική απόκριση του εδάφους (π.χ. Lo και Morin, 1972; Tavenas και Leroueil, 1977). Αντιθέτως, πολλές τεχνικές τεχνητής σιμέντωσης εμπεριέχουν σημαντική επιτόπου αναμόχλευση του υλικού, αντικαθιστώντας τη μετασταθή υφή του εδάφους με μία σχεδόν ομοιόμορφη ισότροπη μάζα συνδεδεμένων μεταξύ τους σωματιδίων και συσσωματωμάτων (Nagaraj και Miura, 2001).

Αν και το υλικό με τεχνητή σιμέντωση έχει περιγραφεί στο παρελθόν ως «δομημένο» (π.χ. Horpibulsukk κ.ά. 2010), η διαρροή και πλαστική ροή τεχνητά σιμεντωμένων αργίλων δείχνει να είναι ουσιαστικά διαφορετική από εκείνη των φυσικά σιμεντωμένων αργιλικών εδαφών. Στην παρουσίαση που ακολουθεί, ο όρος

«τεχνητή εδαφική δομή» θα χρησιμοποιείται για να ορίσει την εδαφική δομή που προκύπτει από την ανάμιξη, στη μάζα του εδάφους, ξηρής τέφρας.

Αρκετές εργασίες έχουν δημοσιευθεί για τη συμπεριφορά τεχνητά σιμεντωμένων αργίλων σε συμπίεση και αστράγγιστη/στραγγιζόμενη διάτμηση, βασισμένες σε δοκιμές συμπιεσομέτρου και τριαξονικές δοκιμές. Όμως, πολύ λίγα δεδομένα είναι διαθέσιμα σχετικά με τη διαρροή και πλαστική ροή αυτού του υλικού. Τέτοιες πληροφορίες, θα βοηθούσαν τους ερευνητές να αναπτύξουν πιο ρελιστικά καταστατικά προσομοιώματα, με αποτέλεσμα τη βελτιωμένη πρόβλεψη της συμπεριφοράς των εδαφών και καλύτερα προσομοιώματα για γεωτεχνικά συστήματα.

Ο κύριος στόχος αυτής της έρευνας ήταν να διερευνήσει εργαστηριακά τη συμπεριφορά διαρροής και τάσεων-παραμορφώσεων μίας τεχνητά ελαφρά σιμεντωμένης αργίλου υψηλής πλαστικότητας, βελτιωμένης με ιπτάμενη τέφρα τύπου C. Η συμπεριφορά αυτής της αργίλου έχει παρόμοια χαρακτηριστικά με εκείνη μίας αναζυμωμένης αργίλου (όπως εξηγήθηκε στα Κεφάλια 4 και 5).

6.2 Εκτελεσθείσες Δοκιμές

Το πρόγραμμα εργαστηριακών δοκιμών για αυτή τη φάση της έρευνας περιελάμβανε τριάντα τριαξονικές δοκιμές σε δοκίμια τόσο της ανασυνεστημένης (χωρίς προσθήκη τέφρας) όσο και της τεχνητά ελαφρά σιμεντωμένης αργίλου με προσθήκη ιπτάμενης τέφρας 10% και 15%. Καθώς και τα δύο είδη δειγμάτων είχαν σχετικά υψηλή ευαισθησία, η προετοιμασία των δοκιμίων έγινε με ιδιαίτερη φροντίδα ώστε να μη διαταραχθεί η δομή του υλικού.

Οι περισσότερες δοκιμές θλίψης με στερεοποίηση και στράγγιση (CD) καθώς και οι τριαξονικές δοκιμές ισότροπης στερεοποίησης έγιναν στην τριαξονική διάταξη της Wykeham Farrance (WF) ενώ όλες οι υπόλοιπες τριαξονικές δοκιμές CD, και οι τριαξονικές δοκιμές ισότροπης στερεοποίησης σε συνθήκες θλίψης και εφελκυσμού έγιναν στην αυτόματα ελεγχόμενη τριαξονική διάταξη της GDS. Και οι δύο διατάξεις WF και GDS, όπως έχει περιγραφεί στο Κεφάλαιο 3, είχαν συνδεθεί με υδραυλικούς ρυθμιστές, οι οποίοι επιτρέπουν την εκτέλεση συμβατικών δοκιμών και σύνθετων δοκιμών ελεγχόμενης διαδρομής τάσεων.

Όλα τα δοκίμια για την τριαξονική διάταξη της WF είχαν ύψος 70 mm και διάμετρο 35 mm, ενώ τα δοκίμια για τη διάταξη Bishop &Wesley της GDS είχαν ύψος 76 mm και διάμετρο 38 mm.

Σε όλες τις δοκιμές εφαρμόστηκε αντιπίεση τουλάχιστον 390 kPa, και έγινε έλεγχος της τιμής του συντελεστή B μετά τη φάση κορεσμού ώστε να διασφαλιστεί ο επαρκής κορεσμός των δειγμάτων (≈95%). Η ισότροπη συμπίεση όλων των δοκιμίων έγινε με την εφαρμογή διαδοχικών αυξήσεων της τάσης με λόγο Δp/p=1.0. Για την ελαχιστοποίηση τυχόν επιδράσεων της ταχύτητας (Lo και Morin, 1972; Graham κ.ά., 1983) η φάση στραγγιζόμενης διάτμησης σε κάθε τριαξονική δοκιμή εκτελέστηκε σε χαμηλές ταχύτητες των 0.003-0.006 mm/min. Η διάτμηση εφαρμόστηκε αρκετά αργά, ώστε να διασφαλιστεί ότι οι μεταβολές πίεσης πόρων στη διάρκεια της διάτμησης ήταν πρακτικά αμελητέες, και συνεπώς ίσχυαν συνθήκες πλήρους στράγγισης τη χρονική στιγμή που συμβαίνει η θραύση. Οι παραπάνω ταχύτητες καθορίστηκαν με βάση τις μεθόδους που πρότεινε ο Head (1986) όπου η μέγιστη ταχύτητα αξονικής μετακίνησης για στραγγιζόμενες δοκιμές δίνεται από την σχέση 6.1.

$$\frac{\varepsilon_f \%L}{100 t_f} \text{mm/minute} \qquad (6.1)$$

όπου, L (mm) είναι το ύψος/μήκος του δοκιμίου, και

$t_f = 8.5\ xt_{100}$ (min) είναι ο χρόνος δοκιμής μέχρι τη θραύση

Επιπλέον εκτελέστηκαν, για τις τρεις σειρές δειγμάτων, είκοσι δύο στραγγιζόμενες τριαξονικές δοκιμές σε συνθήκες θλίψης και εφελκυσμού, καθώς και δοκιμές ισότροπης στερεοποίησης. Για την περιγραφή της κατάστασης τάσεων-παραμορφώσεων του υλικού χρησιμοποιήθηκαν οι μεταβλητές μορφής “Cambrigde” (Schofield και Wroth, 1968):

$$q = \sigma'_{\alpha} - \sigma'_{r} \qquad (6.2)$$

$$p' = \frac{\sigma'_{\alpha} + 2\sigma'_{r}}{3} \qquad (6.3)$$

$$\varepsilon_q = \frac{2(\varepsilon_{\alpha} - \varepsilon_r)}{3} \qquad (6.4)$$

$$\varepsilon_p = \varepsilon_{\alpha} + 2\varepsilon_r \qquad (6.5)$$

Όπου q και p΄ είναι η αποκλίνουσα και μέση ενεργή τάση, ενώ ε_q και ε_p είναι η διατμητική και ογκομετρική παραμόρφωση αντίστοιχα. Οι δείκτες α και r υποδηλώνουν την αξονική και ακτινική διεύθυνση στον τριαξονικό χώρο. Ο Πίνακας 6.1 συνοψίζει τις εργαστηριακές τριαξονικές δοκιμές και τις τασικές συνθήκες στις οποίες εκτελέστηκαν για όλους τους τύπους δειγμάτων.

Προσδιορίστηκε επίσης, η σταθερά«η» (=q/p΄) σε συνθήκες στράγγισης, με την εκτέλεση στραγγιζόμενων τριαξονικών δοκιμών θλίψης και εφελκυσμού σε ισότροπα στερεοποιημένα δοκίμια. Το πρώτο βήμα αποτελεί μία σειρά τριαξονικών δοκιμών με ισότροπα στερεοποιημένα δοκίμια που δίνουν η=0 σε στραγγιζόμενες συνθήκες. Σε αυτή την έρευνα οι διαδρομές τάσεων στο διάγραμμα p-q΄ με η>0, θα αποκαλούνται «θλιπτικές φορτίσεις», ενώ εκείνες με η<0 «εφελκυστικές φορτίσεις».

Αριθμος Δοκιμής	**Τριαξονική Διάταξη[1]**	**Τύπος Δοκιμής[2]**	**Ονομασία Μίγματος**	**Αρχική Υγρασία w_i(%)**	**IC (kPa)**	**Περιγραφή μεταβολής τάσεων**
TX1	WF	I-C	ΑΑΣ-80-00	53.50	0-1600	Ισότροπη αύξηση τάσης (πλευρ. & αξονικ.)
TX2	BW	I-C	ΑΑΣ-80-00	54.02	0-1600	Ισότροπη αύξηση τάσης (πλευρ. & αξονικ.)
TX3	WF	CD	ΑΑΣ-80-00	52.92	10	Πλευρ.τάση σταθερή, Αύξηση κατακ. τάσης
TX4	WF	CD	ΑΑΣ-80-00	53.85	20	Πλευρ.τάση σταθερή, Αύξηση κατακ. τάσης
TX5	WF	CD	ΑΑΣ-80-00	52.17	30	Πλευρ.τάση σταθερή, Αύξηση κατακ. τάσης
TX6	WF	CD	ΑΑΣ-80-00	53.43	40	Πλευρ.τάση σταθερή, Αύξηση κατακ. τάσης
TX7	WF	I-C	ΑΑΣ-90-10	61.65	0-3200	Ισότροπη αύξηση τάσης (πλευρ. & αξονικ.)
TX8	BW	I-C	ΑΑΣ-90-10	61.24	0-3200	Ισότροπη αύξηση τάσης (πλευρ. & αξονικ.)
TX9	WF	CD	ΑΑΣ-90-10	61.67	10	Πλευρ.τάση σταθερή, Αύξηση κατακ. τάσης
TX10	WF	CD	ΑΑΣ-90-10	62.25	30	Πλευρ.τάση σταθερή, Αύξηση κατακ. τάσης
TX11	WF	CD	ΑΑΣ-90-10	62.42	50	Πλευρ.τάση σταθερή, Αύξηση κατακ. τάσης
TX12	WF	CD	ΑΑΣ-90-10	61.67	70	Πλευρ.τάση σταθερή, Αύξηση κατακ. τάσης
TX13	BW	CD	ΑΑΣ-90-10	62.35	90	Πλευρ.τάση σταθερή, Αύξηση κατακ. τάσης
TX14	BW	ED	ΑΑΣ-90-10	61.50	10	Πλευρ.τάση σταθερή, Μείωση κατακ. τάσης
TX15	BW	ED	ΑΑΣ-90-10	62.14	50	Πλευρ.τάση σταθερή, Μείωση κατακ. τάσης
TX16	BW	ED	ΑΑΣ-90-10	62.09	70	Πλευρ.τάση σταθερή, Μείωση κατακ. τάσης
TX17	BW	ED	ΑΑΣ-90-10	61.87	90	Πλευρ.τάση σταθερή, Μείωση κατακ. τάσης
TX18	WF	I-C	ΑΑΣ-95-15	63.87	0-3200	Ισότροπη αύξηση τάσης (πλευρ. & αξονικ.)
TX19	BW	I-C	ΑΑΣ-95-15	63.57	0-3200	Ισότροπη αύξηση τάσης (πλευρ. & αξονικ.)
TX20	WF	CD	ΑΑΣ-95-15	63.87	10	Πλευρ.τάση σταθερή, Αύξηση κατακ. τάσης
TX21	WF	CD	ΑΑΣ-95-15	63.57	30	Πλευρ.τάση σταθερή, Αύξηση κατακ. τάσης
TX22	WF	CD	ΑΑΣ-95-15	63.64	50	Πλευρ.τάση σταθερή, Αύξηση κατακ. τάσης
TX23	WF	CD	ΑΑΣ-95-15	64.06	90	Πλευρ.τάση σταθερή, Αύξηση κατακ. τάσης
TX24	BW	CD	ΑΑΣ-95-15	63.24	110	Πλευρ.τάση σταθερή, Αύξηση κατακ. τάσης
TX25	BW	ED	ΑΑΣ-95-15	63.81	10	Πλευρ.τάση σταθερή, Μείωση κατακ. τάσης
TX26	BW	ED	ΑΑΣ-95-15	63.72	30	Πλευρ.τάση σταθερή, Μείωση κατακ. τάσης
TX27	BW	ED	ΑΑΣ-95-15	63.64	50	Πλευρ.τάση σταθερή, Μείωση κατακ. τάσης
TX28	BW	ED	ΑΑΣ-95-15	63.45	90	Πλευρ.τάση σταθερή, Μείωση κατακ. τάσης
TX29	BW	ED	ΑΑΣ-95-15	63.62	110	Πλευρ.τάσησταθερή, Μείωσηκατακ. τάσης

[1]WF- Wykeham Farrance, BW-Bishop & Wesley

[2]I-C-ΙσότροπηΣτερεοποίηση, CD-ΣτραγγιζόμενηΘλίψη, ED-ΣτραγγιζόμενοςΕφελκυσμός

Πίνακας 6.1 – Λεπτομέρειες εκτελεσθέντωνδοκιμών και δειγμάτων

6.3 Διορθώσεις Μετρήσεων Τριαξονικής Δοκιμής

Σε όλες τις τριαξονικές δοκιμές του προγράμματος που περιγράφηκε στην προηγούμενη ενότητα έγιναν διορθώσεις επιφάνειας και μεμβράνης. Χρησιμοποιήθηκε τυπική διόρθωση επιφάνειας, θεωρώντας ότι το δοκίμιο παραμορφώθηκε διατηρώντας τη μορφή ορθού κυκλικού κυλίνδρου.

Για το θέμα διόρθωσης του αξονικού φορτίου, η επίδραση της τριβής του εμβόλου μπορεί να εξαλειφθεί εντελώς, εφόσον μπορεί να τοποθετηθεί μέσα στην τριαξονική κυψέλη εμβαπτιζόμενη συσκευή μέτρησης φορτίου (Γεωργόπουλος και Βαρδουλάκης, 2005). Η τριαξονική διάταξη Bishop & Wesley χρησιμοποιεί ηλεκτρικές συσκευές τέτοιου τύπου, γνωστές ως εμβαπτιζόμενοι μετατροπείς φορτίου. Αντίθετα, το πλαίσιο τριαξονικής φόρτισης της Wykeham Farrance, έχει εξωτερικά τοποθετημένο δυναμομετρικό δακτύλιο. Συνεπώς η διάταξη Bishop & Wesley εξαλείφει τα σφάλματα, τα οποία και αγνοήθηκαν χάρις στο αυτόματο σύστημα καταγραφής και επεξεργασίας δεδομένων.

Οι διορθώσεις επιφάνειας και μεμβράνης που έγιαναν σε αυτή την έρευνα έλαβαν υπόψη τις διάφορες διορθώσεις που αναφέρονται στη βιβλιογραφία (Bishop & Henkel, 1957; Head, 1986; ASTMD7181).

6.3.1 Διόρθωση Επιφάνειας

Γενικά η αξονική τάση υπολογίζεται διαιρώντας την αξονική δύναμη με την επιφάνεια της διατομής του δοκιμίου. Ιδανικά, ο υπολογισμός της επιφάνειας γίνεται με την παραδοχή ότι, στη διάρκεια της διάτμησης, το δοκίμιο παραμορφώνεται διατηρώντας το σχήμα ορθού κυκλικού κυλίνδρου. Το αρχικά κυλινδρικό δοκίμιο παραμορφώνεται αρκετά στη διάρκεια της δοκμής, και στη θλίψη διογκώνεται σημαντικά περίπου στο μέσον του ύψους του. Αυτή η διόγκωση δυσκολεύει τον υπολογισμό της επιφάνειας της διατομής και δίνει σφάλματα στον υπολογισμό της αποκλίνουσας τάσης, και συνεπώς και στην κρίσιμη αντοχή των αργίλων.

Συνεπώς, είναι αναγκαίο να θεωρηθεί μία ενεργή επιφάνεια διατομής, η οποία θα λαμβάνει υπόψη το διογκωμένο σχήμα του δοκιμίου, με την κατάλληλη μορφή παραμόρφωσης. Έχουν αναπτυχθεί πολλές μέθοδοι για τον υπολογισμό της ενεργής επιφάνειας διατομής (A_e) του δοκιμίου στη διάρκεια της διάτμησης. Η επιλογή της

μεθόδου διόρθωσης επιφάνειας πρέπει να γίνεται με βάση την παρατηρούμενη μορφή παραμόρφωσης του δοκιμίου, κατά και μετά τη διάτμηση. Στη διόρθωση για κυλινδρική παραμόρφωση του δοκιμίου που προτείνεται από την πρότυπη μέθοδο δοκιμής κατά ASTM D7181 (2011), το δοκίμιο θεωρείται ότι κατά τη διάτμηση παραμορφώνεται ως ορθός κύλινδρος.

Η επιφάνεια διατομής του δοκιμίου διορθώθηκε και στις δύο φάσεις, στερεοποίησης και διάτμησης. Αυτή η διόρθωση χρησιμοποιείται από την πρότυπη μέθοδο δοκιμής ASTM D7181 για δοκιμές CD και προτείνεται από τους LaRochelle κ.ά. (1988) για αστοχία με μορφή διογκούμενου κυλίνδρου. Όλα τα δοκίμια των δοκιμών θλίψης εμφάνισαν διογκούμενης μορφής θραύση, και η διόρθωση έγινε σύμφωνα με την εξίσωση 6.5 :

$$A_c = \frac{Ao(1-\varepsilon_{vol})}{1-\varepsilon_{\alpha}} \quad (6.5)$$

Όπου :

A_c = διορθωμένη επιφάνεια διατομής δοκιμίου
A_o = αρχική επιφάνεια διατομής δοκιμίου
ε_{vol}= ογκομετρική παραμόρφωση δοκιμίου
ε_{α} = αξονική παραμόφωση δοκιμίου

6.3.2 Διόρθωση Μεμβράνης

Γενικά είναι επαρκώς καθιερωμένο από τη βιβλιογραφία ότι η μεμβράνη προβάλλει αντίσταση στα επιβαλλόμενα φορτία, και ότι μπορεί να είναι αναγκαίο να γίνει διόρθωση για τη συμβολή της. Η προδιαγραφή ASTM D4767 δίνει μία διόρθωση για την αντοχή της μεμβράνης. Επίσης, προτείνει να γίνεται η διόρθωση εφόσον το σφάλμα στην αποκλίνουσα τάση, λόγω αντοχής μεμβράνης, είναι μεγαλύτερο από 5%. Το σφάλμα στην αποκλίνουσα τάση των τυπικών δοκιμών CD της παρούσας έρευνας ήταν περί το 2%, αλλά ήταν υψηλή μέχρι και 6% για δοκιμές σε πραγματικά χαμηλές τάσεις (10 kPa). Για το λόγο αυτό, η διόρθωση του σφάλματος έγινε μόνο στις τελευταίες δοκιμές. Πολλές διορθώσεις μεμβράνης, όπως αυτή της ATSM D7181 (2011), αγνοούν τις παραμορφώσεις της μεμβράνης που συμβαίνουν στη διάρκεια της φάσης στερεοποίησης.

Η διόρθωση που προτείνει η ASTM, μειώνει την αξονική τάση στο δοκίμιο λόγω της συμβολής της μεμβράνης στη διάρκεια της διάτμησης.

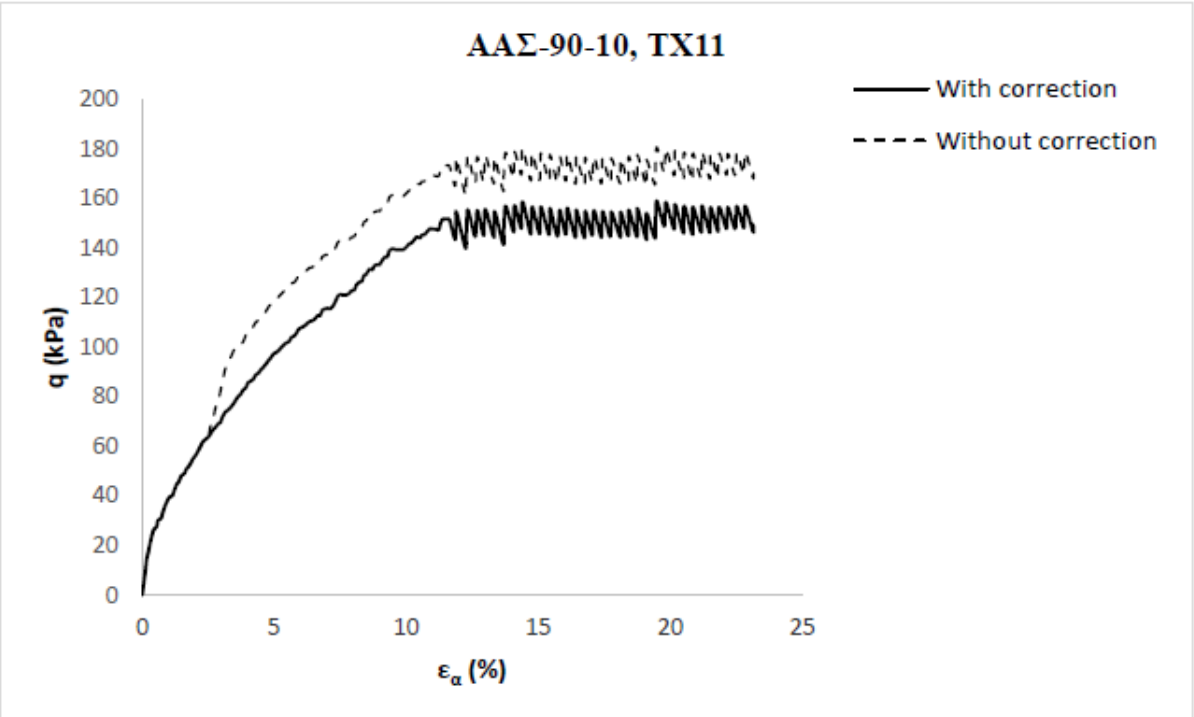
Σύμφωνα με το ASTM D7181-11, η διατμητική τάση που αναλαμβάνει η μεμβράνη Δq_m (kPa) υπολογίζεται από την εξίσωση 6.6:

$$\Delta q = 4\frac{E_m * t_m * \varepsilon_\alpha}{D_c} \quad (6.6)$$

Όπου :

E_m (kPa) = μέτρο ελαστικότητας του υλικού της μεμβράνης
t_m (mm) = πάχος της μεμβράνης
D_c (mm) = διάμετρος δοκιμίου μετά τη στερεοποίηση

Η διόρθωση για την αντίσταση της μεμβράνης εφαρμόστηκε, σύμφωνα με την πρότυπη μέθοδο ASTM D7181 (2011), σε όσες δοκιμές εμφάνισαν σφάλμα >2%. Για την ακριβή εκτίμηση της αντίστασης της μεμβράνης, το μέτρο ελαστικότητας του ελαστικού υλικού της μεμβράνης προσδιορίστηκε από μία δοκιμή εφελκυσμού σύμφωνα με την πρότυπη δαδικασία της προδιαγραφής ASTM D7181-11. Ο δοκιμή συνίσταται στην επιμήκυνση ενός τμήματος της κυλινδρικής μεμβράνης πλάτους 25.4 mm με χρήση βαρών, και μέτρηση της ασκούμενης δύναμης ανά μονάδα παραμόρφωσης. Το μέτρο ελαστικότητας (E_m) βρέθηκε ίσο με περίπου 120 kPa. Το Σχήμα 6.1 δείχνει την επιρροή της αντίστασης της μεμβράνης στη σχέση τάσεων-παραμορφώσεων του δοκιμίου των 35 mm. Όπως δείχνει το Σχ. 6.1, η συμβολή της αντίστασης της μεμβράνης αυξάνεται με την αξονική παραμόρφωση.



Σχήμα 6.1- Επίδραση της αντίστασης της μεμβράνης στη σχέση τάσεων-παραμορφώσεων δοκιμίου (35 mm) αργίλου βελτιωμένης με τέφρα 10%, κατά τη δοκιμή στραγγιζόμενης τριαξονικής θλίψης.

6.4 Τριαξονική Δοκιμή Ισότροπης Στερεοποίησης με η=0

Στο σημείο αυτό, είναι σκόπιμη η διευκρίνιση, ότι όταν αναφέρεται η έννοια «***θλίψη***», *εννοείται η τριαξονική δοκιμή κατά την οποία αυξάνεται η κατακόρυφη ενεργή τάση*, ενώ όταν αναφέρεται η έννοια «***εφελκυσμός***», *εννοείται η δοκιμή κατά την οποία αυξάνεται η οριζόντια ενεργή τάση*.

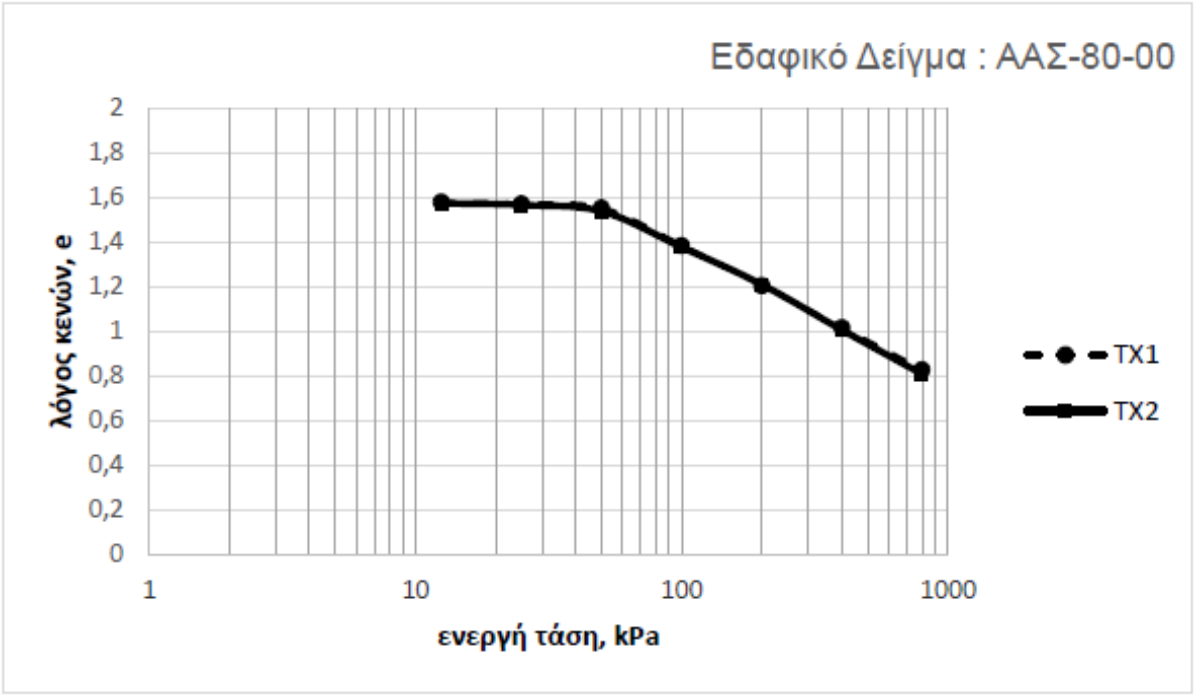
Εκτελέστηκαν από δύο δοκιμές ισότροπης θλίψης, για καθένα από τους τύπους δειγμάτων (ΑΑΣ-80-00, ΑΑΣ-90-10, ΑΑΣ-95-15, βλ. Πίν. 6.2). Για να προκύψει η καμπύλη ισότροπης κανονικής συμπίεσης (INCL) με η = 0 σε συνθήκες στράγγισης, χρησιμοποιήθηκε βαθμιδωτή φόρτιση.

Στην απλούστερη μορφή τριαξονικής στερεοποίησης, οι συνθήκες είναι ισότροπες. Η πλευρική πίεση ασκήθηκε βαθμιδωτά. Το φορτίο κάθε βαθμίδας φόρτισης διατηρήθηκε σταθερό μέχρι την πρακτικά ολική εκτόνωση της υπερπίεσης πόρων, η οποία προκλήθηκε από τη συγκεκριμένη βαθμίδα. Κατά τη στερεοποίηση της μη βελτιωμένης αργίλου (0% τέφρα), λόγω της υψηλής της πλαστικότητας, απαιτήθηκαν ορισμένες ημέρες για την εκτόνωση της πίεσης πόρων.

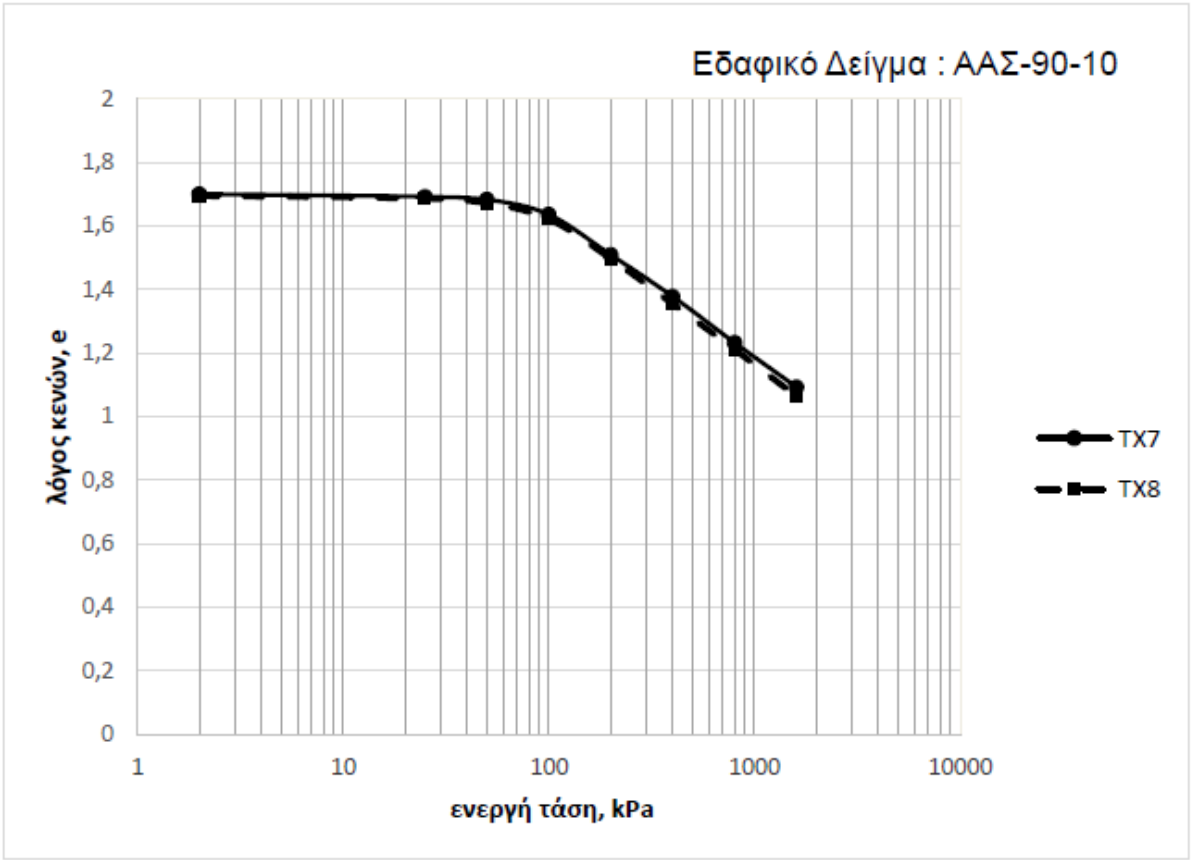
Για όλα τα δείγματα, ο ρυθμός αύξησης ενεργής τάσης κάθε βαθμίδας ήταν με λόγο φόρτισης Δp/p=1.0 (όμοιος με των δοκιμών στερεοποίησης σε συμπιεσόμετρο, βλ. Κεφάλαιο 4) φθάνοντας την τελική τιμή σ'_3 = 1600 kPa. Τα δοκίμια ήταν διαμέτρου D=35 mm και ύψους h=70 mm για δοκιμές στη διάταξη της Wykeham Farrance και D=38 mm και h=75 mm για την κυψέλη τύπου Bishop & Wesley.

Πριν την ισότροπη στερεοποίηση όλα τα δείγματα κορέσθηκαν, μέχρι το B να πλησιάσει ή να υπερβεί το 0.95 (Black & Lee,1973, Head, 1992). Αυτό απαιτούσε αντιπίεση 390 kPa, για να εκδιωχθεί όλος ο παγιδευμένος στη μάζα της αργίλου αέρας.

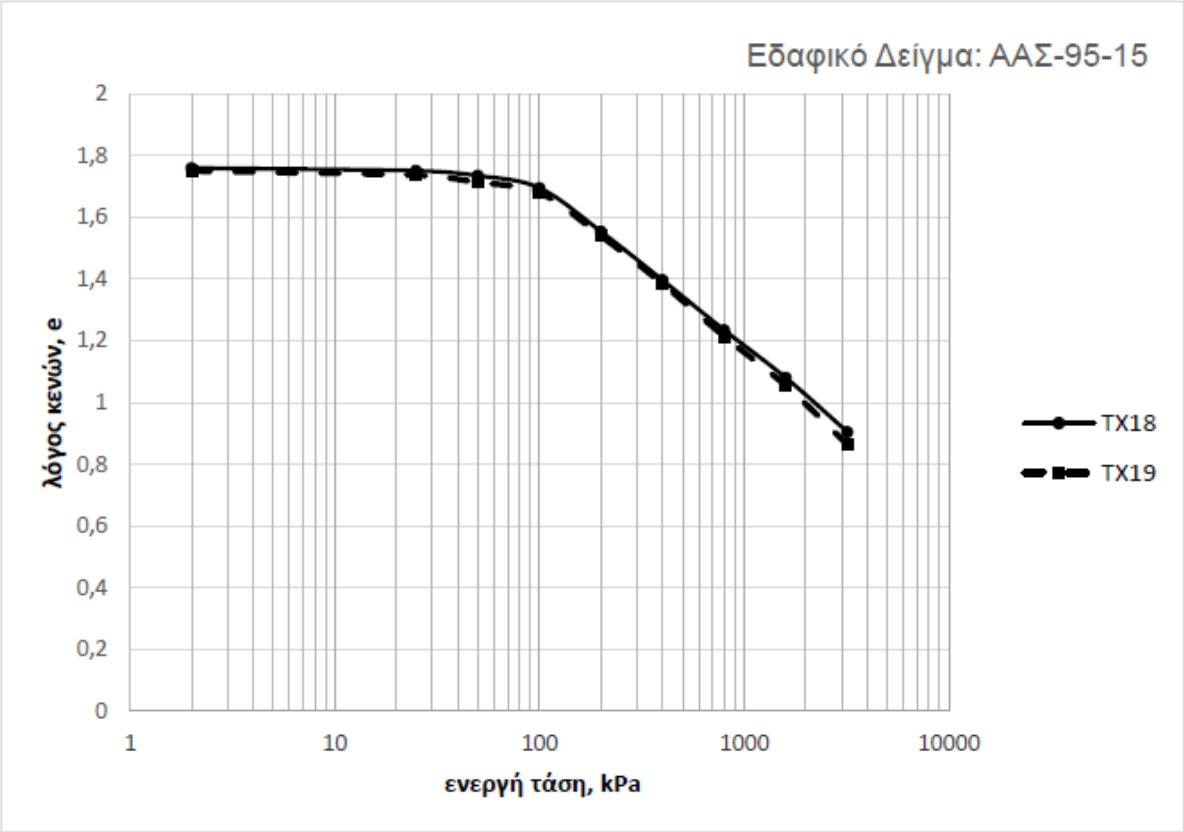
Για τη διευκόλυνση της εκτόνωσης της πίεσης πόρων εφαρμόστηκε και πλευρική στράγγιση μέσω μίας σωλήνωσης συνδεδεμένης με την πλάκα κεφαλής του δοκιμίου. Στη διάρκεια κάθε δοκιμής, μετατροπείς πίεσης και μεταβολής όγκου παρακολουθούσαν αντίστοιχα τις μεταβολές πίεσης και όγκου του δοκιμίου. Με αυτόν τον τρόπο προσδιορίστηκαν οι ενεργές τάσεις και ο λόγος κενών. Τα αποτελέσματα των δοκιμών συνοψίζονται στα Σχ.6.2 – 6.4 και τον Πίνακα 6.2.



Σχήμα 6.2- Δοκιμή ισότροπης στερεοποίησης (η=0) σε δείγμα ΑΑΣ-80-00



Σχήμα 6.3- Δοκιμή ισότροπης στερεοποίησης (η=0) σε δείγμα ΑΑΣ-90-10



Σχήμα 6.4- Δοκιμή ισότροπης στερεοποίησης (η=0) σε δείγμα ΑΑΣ-95-15

Δοκιμή	Ποσοστό ΙΤ (%)	η=q/p'	p'_{prco}	p'_{cur}	e_o	Αρχική Υγρασία, w_i(%)	G_s	γ_{wet} (kN/cm3)
TX1	0	0	50	50	1.580	53.50	2.78	18.4
TX2	0	0	50	50	1.572	54.02	2.78	18.2
TX7	10	0	50	90	1.699	61.65	2.80	17.1
TX8	10	0	50	90	1.694	61.24	2.80	17.2
TX18	15	0	50	110	1.759	63.87	2.80	16.1
TX19	15	0	50	110	1.750	63.57	2.80	16.0

p'_{prco}: αρχικά επιβληθείσα τάση προστερεοποίησης, **p'_{cur}**: φαινόμενη τάση προστερεοποίησης λόγω ωρίμανσης

Πίνακας 6.2 – Βασικά φυσικά και μηχανικά χαρακτηριστικά από δοκιμή ισότροπης στερεοποίησης (η=0)

Από τα Σχήματα 6.2-6.4 παρατηρείται ότι και για τα τρία δείγματα (ΑΑΣ-80-00, ΑΑΣ-90-10 και ΑΑΣ-95-15) η συμπεριφορά πριν τη διαρροή χαρακτηρίζεται από μικρή συμπιεστότητα, με τη δομή του εδάφους να περιορίζει την παραμόρφωση μέχρι την τάση διαρροής σε στερεοποίηση. Ενώ η μεταβατική συμπεριφορά χαρακτηρίζεται από ήπια και βαθμιαία καταστροφή της δομής, όταν η ενεργή τάση είναι μεταξύ τάσης διαρροής στερεοποίησης και μεταβατικής τάσης. Αυτή είναι η τυπική συμπεριφορά ενός αναζυμωμένου εδάφους, αποδεικνύοντας την ασθενή

επίδραση της τέφρας ως βελτιωτικού πρόσθετου, το οποίο αδυνατεί να σχηματίσει ισχυρή δομή στη μάζα της αργίλου.

6.5 Τριαξονική Δοκιμή Θλίψης και Εφελκυσμού με η≠0

6.5.1 Πρόγραμμα και Διαδικασία Δοκιμών

Εκτελέστηκε μία σειρά στραγγιζόμενων τριαξονικών δοκιμών (Πίν. 6.1) στους τρεις τύπους δειγμάτων (0%, 10%, 15% τέφρα) της υψηλής πλαστικότητας αργίλου Αγίου Στεφάνου. Όλα τα δείγματα αρχικά στερεοποιήθηκαν ισότροπα σε εύρος ενεργής πίεσης κυψέλης σ'_r = 10 έως 110 kPa. Πριν το στάδιο στερεοποίησης, τα δείγματα κορέσθηκαν δίνοντας B>0.95. Η πίεση στερεοποίησης εφαρμόσθηκε στα δείγματα με αργό ρυθμό, και διατηρήθηκε για 24 ώρες για πλήρη εκτόνωση της πίεσης πόρων.

Όλες οι δοκιμές εκτελέστηκαν με ελεγχόμενο ρυθμό παραμόρφωσης. Καθώς η παρούσα έρευνα αφορά τη συμπεριφορά μίας τεχνητής αργίλου υψηλής πλαστικότητας σε χαμηλές ενεργές τάσεις, ήταν αναγκαίο να υιοθετηθεί μία τεχνική κατάλληλη για επιβολή εφελκυστικής τάσης στο δοκίμιο μέσω μίας αποκλίνουσας τάσης, προκαλούμενης από τη μείωση της αξονικής τάσης στο δοκίμιο, ενώ συγχρόνως η πλευρική πίεση διατηρείται σταθερή. Όλα τα δοκίμια είχαν κυκλική διατομή με D=35 ή 38 mm ανάλογα με την τριαξονική διάταξη, WF ή B&W αντίστοιχα. Στη βιβλιογραφία, πολλοί ερευνητές εκτέλεσαν δοκιμές εφελκυσμού σε δοκίμια μειωμένης μεσαίας διατομής και περιστραμμένης ελαστικής μεμβράνης, ώστε να προκύψει ψαθυρή θραύση, κάθετα στη μέγιστη κύρια τάση (Bishop και Carga, 1969; Jarret, 1971; Iyer, 1974). Αυτή η μέθοδος δεν ήταν δυνατόν να εφαρμοσθεί σε πολύ πλαστικά δείγματα, λόγω της ήδη πολύ ασθενούς δέσης τους (bonding). Μετά την παρασκευή των δοκιμίων, προσδιορίστηκε το βάρος, οι αρχικές διαστάσεις και η αρχική υγρασία.

6.5.2 Αποτελέσματα Δοκιμών

Τα αποτελέσματα και οι λεπτομέρειες όλων των τριαξονικών δοκιμών στα στάδια διαρροής και θραύσης συνοψίζονται στους Πίνακες 6.3 και 6.4.

Αρ. Δοκιμής	Ποσοστό ΙΤ (%)	Τριαξονκή Διάταξη	Τύπος Δοκιμής	e_y	η	σ'_{1y} (kPa)	σ'_{3y} (kPa)	qy (kPa)	p'y (kPa)	Αξονική Παραμορφωση, ε_y (%)
TX3	0	WF	CD	1.571661	0.94	414	400	14.27	14.76	0.51
TX4	0	WF	CD	1.56594	0.75	418	400	15.84	25.27	0.37
TX5	0	WF	CD	1.5611739	0.71	429	399	24.19	38.06	0.43
TX6	0	WF	CD	1.55196	0.57	427	400	22.43	47.47	0.41
TX9	10	WF	CD	1.69612	1.15	421	400	22.35	19.32	0.39
TX10	10	WF	CD	1.68093	1.10	468	420	49.46	46.48	1.25
TX11	10	WF	CD	1.67083	1.09	524	439	85.72	78.57	2.02
TX12	10	WF	CD	1.65021	1.05	552	460	93.80	101.27	1.39
TX13	10	BW	CD	1.63001	0.81	573	479	94.09	121.36	1.49
TX14	10	BW	ED	1.68429	1.27	375	397	21.27	17.38	1.32
TX15	10	BW	ED	1.66913	0.72	401	438	36.77	61.89	2.42
TX16	10	BW	ED	1.64909	0.52	403	450	46.32	85.24	3.01
TX17	10	BW	ED	1.62825	0.50	449	475	8.92	94.47	0.91
TX20	15	WF	CD	1.74584	1.38	424	400	16.92	15.64	0.20
TX21	15	WF	CD	1.73201	1.29	454	419	55.60	48.53	0.97
TX22	15	WF	CD	1.71010	1.25	491	441	92.23	80.74	1.12
TX23	15	WF	CD	1.67924	1.22	633	476	156.87	142.29	1.39
TX24	15	BW	CD	1.66001	1.08	673	502	175.08	168.36	1.19
TX25	15	BW	ED	1.75018	1.14	378	397	18.27	19.59	0.16
TX26	15	BW	ED	1.73248	0.93	390	422	31.09	40.04	1.71
TX27	15	BW	ED	1.710334	0.75	395	440	45.00	64.69	3.01
TX28	15	BW	ED	1.681430	0.30	449	475	25.93	99.37	0.72
TX29	15	BW	ED	1.662334	0.12	485	496	11.37	114.39	0.39

Πίνακας 6.3- Σύνοψη δεδομένων από τριαξονικές δοκιμές στο στάδιο διαρροής.

Αρ. Δοκιμής	Ιπτάμενη Τέφρα	Τριαξονική Διάταξη	Τύπος Δοκιμής	Αρχική Υγρασία	e_i	e_f	IC[1]	σ'_{1f} (kPa)	σ'_{3f} (kPa)	$q_{f(kPa)}$	$p'_{f(kPa)}$	Αξονική Παραμόρφωση	Διάρκεια Δοκιμής
	(%)			w_i(%)			(kPa)					ε_f(%)	ημ.
TX3	0	WF	CD	54.54	1.571683	1.571640	10	432	400	31.48	20.49	14.47	3.1
TX4	0	WF	CD	54.68	1.56596	1.56587	20	446.2	398	60.04	40.01	19.33	1.5
TX5	0	WF	CD	54.02	1.56141	1.560936	30	464	399	65.39	51.79	15.92	2.4
TX6	0	WF	CD	53.64	1.55198	1.55187	40	475	400	75.06	65.02	13.81	3.8
TX9	10	WF	CD	61.74	1.685059	1.674561	10	448	400	47.07	29.61	8.12	1.2
TX10	10	WF	CD	61.64	1.68098	1.68085	30	515	420	94.35	61.45	13.60	3.1
TX11	10	WF	CD	61.58	1.67431	1.67654	50	596	441	155.41	101.80	11.02	2.4
TX12	10	WF	CD	60.98	1.65329	1.65754	70	662	462	200.05	136.68	15.33	3.4
TX13	10	BW	CD	61.46	1.636547	1.63234	90	715	479	237.38	169.13	12.63	1.0
TX14	10	BW	ED	61.12	1.684306	1.68413	10	360	397	35.71	23.62	12.70	10hrs
TX15	10	BW	ED	61.87	1.669120	1.66823	50	388	437	49.37	65.47	9.55	19hrs
TX16	10	BW	ED	61.22	1.652354	1.64854	70	391	450	56.89	89.63	10.98	14hrs
TX17	10	BW	ED	61.36	1.628364	1.62736	90	410	475	64.73	111.34	7.76	17hrs
TX20	15	WF	CD	63.85	1.74585	1.74578	10	445	399	46.20	25.40	12	1.6
TX21	15	WF	CD	63.04	1.73214	1.73200	30	524	420	103.21	64.41	13.09	3.0
TX22	15	WF	CD	63.47	1.71021	1.71864	50	603	439	162.98	104.33	14.64	3.0
TX23	15	WF	CD	62.87	1.67987	1.67764	90	737	478	258.07	176.02	10.83	3.3
TX24	15	BW	CD	62.99	1.66014	1.65899	110	805	499	305.78	211.93	11.02	4.4
TX25	15	BW	ED	63.12	1.75024	1.74897	10	361	398	36.67	27.17	15.70	16hrs
TX26	15	BW	ED	63.34	1.73254	1.730576	30	369	421	51.11	47.15	12.60	20hrs
TX27	15	BW	ED	63.47	1.710354	1.70846	50	376	440	63.73	68.79	16.21	13hrs
TX28	15	BW	ED	63.64	1.681464	1.6801167	90	399	475	75.91	112.35	10.57	18hrs
TX29	15	BW	ED	63.25	1.662344	1.652001	110	405	496	90.43	137.12	21.33	23hrs

[1] e_i *Αρχικός λόγος κενών μετά τη στερεοποίηση,*

[2] **IC***τάση ισότροπης στερεοποίησης των δοκιμίων πριν την έναρξη της φάσης διάτμησης*

Πίνακας 6.4- Σύνοψη δεδομένων από τριαξονικές δοκιμές στο στάδιο θραύσης.

6.6 Συμπεριφορά Διαρροής και Αστοχίας του Εδαφικού Υλικού

6.6.1 Γραφικές Μέθοδοι Εκτίμησης Τάσεων Διαρροής και Αστοχίας

Η τάση στην οποία συμβαίνει η διαρροή πρέπει να εκτιμηθεί με βάση εμπειρικές διαδικασίες. Όπως επεσήμαναν οι Graham κ.ά. (1982), οι διαδικασίες αυτές ιδανικά πρέπει να είναι κατά το δυνατό γενικές, και όσο γίνεται ανεξάρτητες από υποκειμενικές επιρροές από αυτόν που τις εφαρμόζει. Για το λόγο αυτό, όπως περιγράφηκε εκτενώς στο Κεφάλαιο 2, τυπικά υπάρχει μία περιοχή μεταβατικής συμπεριφοράς μεταξύ παραμορφώσεων πριν και μετά τη διαρροή. Συνεπώς, η επιλογή της τάσης διαρροής πρέπει να γίνεται με κρίση. "*Παράδειγμα αυτού αποτελεί η ευρέως διαδεδομένη χρήση της γεωμετρικής κατασκευής για την τάση προστερεοποίησης σε συμπιεσόμετρο, την οποία ο Casagrande συνιστούσε για προσδιορισμό πιθανής περιοχής τιμών της* σ'_{vc} *παρά για προσδιορισμό μίας μοναδικής τιμής*" – Graham κ.ά. (1988).

Τα σχήματα 6.5 – 6.16 για το εδαφικό δείγμα χωρίς προσθήκη τέφρας (ΑΑΣ-80-00), 6.17- 6.43για το εδαφικό δείγμα με 10% προσθήκη τέφρας (ΑΑΣ-90-10) και 6.44-6.73 για το εδαφικό δείγμα με 15% προσθήκη τέφρας (ΑΑΣ-95-15) παρουσιάζουν τα σημεία διαρροής, χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των Coop και Atkinson καθώς και τα σημεία αστοχίας όπως αυτά προέκυψαν από τις τριαξονικές δοκιμές θλίψης και εφελκυσμού σε στραγγιζόμενες συνθήκες που εκτελέστηκαν σε αυτή την έρευνα. Τα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζουν τις καμπύλες τάσεων – αξονικών παραμορφώσεων (q(kPa)-ε%), μεταβολής όγκου – αξονικής παραμόρφωσης ($\Delta V(cm^3)$-ε%) και ειδικού ογκού – ενεργής τάσης (ν-p'(kPa)) οπώς αυτές προκύπτουν σε κάθε εκετελεσμένη δοκιμή και για τα τρία εδαφικά μείγματα.

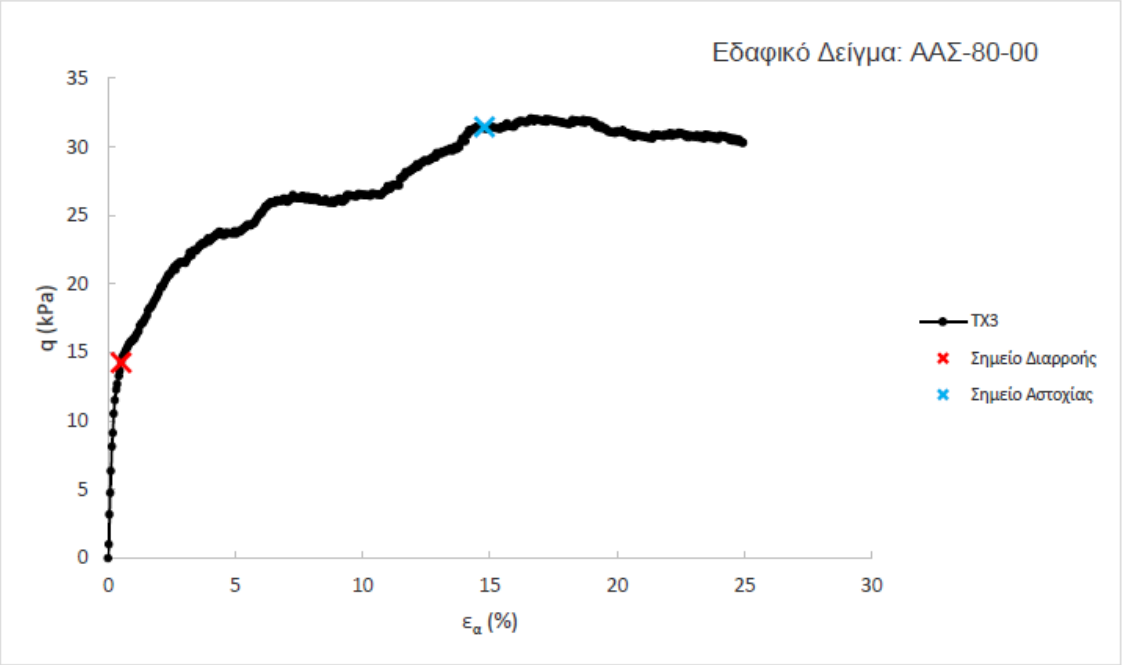
Η εξέταση όλων των τιμών διαρροής σε θλίψη και εφελκυσμό στον Πίνακα 6.3 υποδεικνύει ότι ο αρχικός λόγος κενών μειούται με την αύξηση του ποσοστού τέφρας και της τάσης στερεοποίησης. Τα δείγματα επέδειξαν επίσης πλέον δύσκαμπτη συμπεριφορά σε συνθήκες θλίψης, ενώ μειώνεται η δυσκαμψία τους με την αύξηση της αποκλίνουσας τάσης σε συνθήκες εφελκυσμού. Αυτή η συμπεριφορά είναι παρόμοια με αυτήν που αναφέρεται στη βιβλιογραφία, για τεχνητά ή φυσικά δομημένα σιμεντωμένα εδάφη (π.χ. Leroueil και Vaughan, 1990).

Το δείγμα μη βελτιωμένης αργίλου στα Σχήματα 6.5, 6.8, 6.11 και 6.14 έδωσε σαφέστερη ένδειξη διαρροής από τα δείγματα βελτιωμένης αργίλου στα Σχήματα

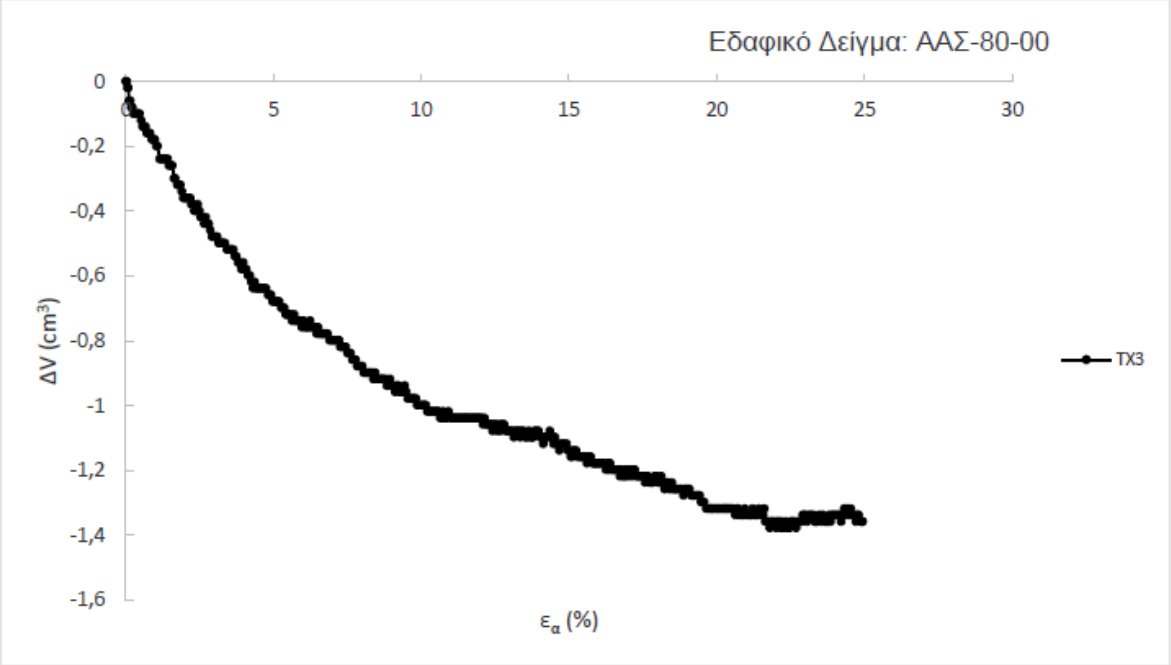
6.17, 6.20, 6.23, 6.26, 6.29, 6.32, 6.35, 6.38 και 6.41 (για το μίγμα ΑΑΣ-90-10) καθώς και στα Σχήματα 6.44, 6.47, 6.50, 6.53, 6.56, 6.59, 6.62, 6.65, 6.68 και 6.71 (για το μίγμα ΑΑΣ-95-15) και ταχύτερη παραμόρφωση μετά τη διαρροή πριν να παρατηρηθεί η κράτυνση.

A. <u>Εδαφικό Δείγμα: ΑΑΣ-80-00</u>
<u>ΔΟΚΙΜΕΣ ΘΛΙΨΗΣ</u>

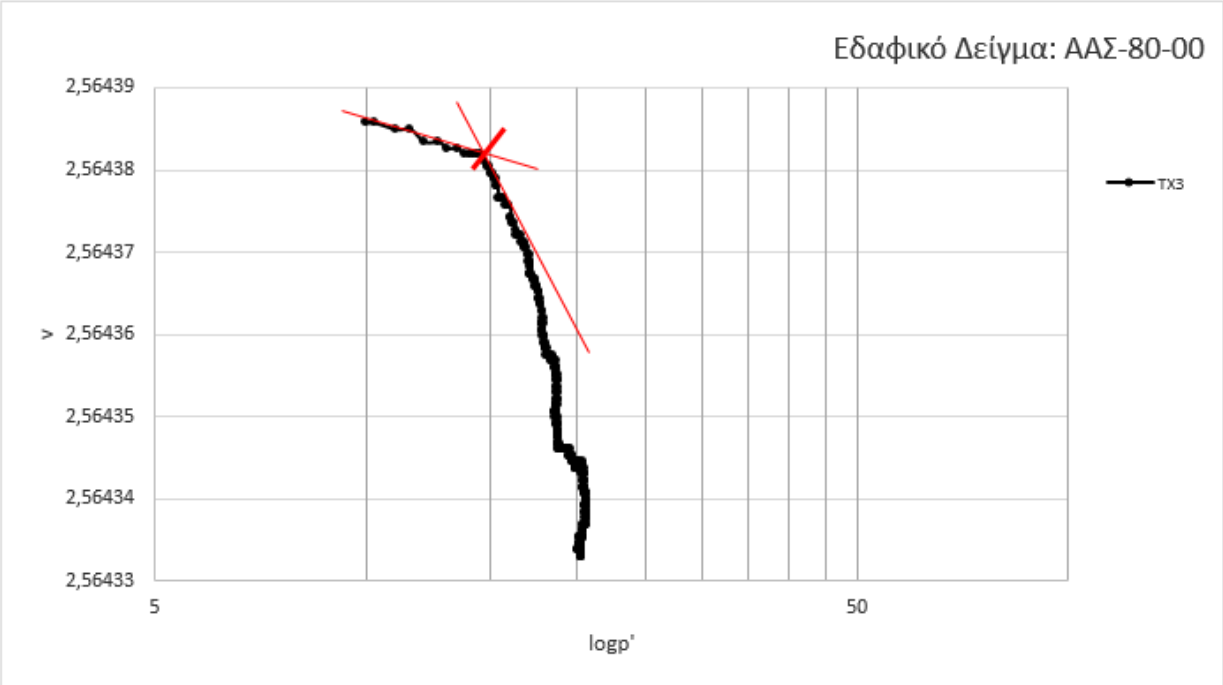
1. ΙΣΟΤΡΟΠΗ ΣΤΕΡΕΟΠΟΙΗΣΗ : 10 kPa



Σχήμα 6.5 - ΑΑΣ-80-00 Προσδιορισμός σημείων διαρροής και αστοχίας σε διάγραμμα αποκλίνουσας τάσης–αξονικής παραμόρφωσηςαπό τριαξονική δοκιμή θλίψης σε στραγγιζόμενες συνθήκες με IC=10 kPa

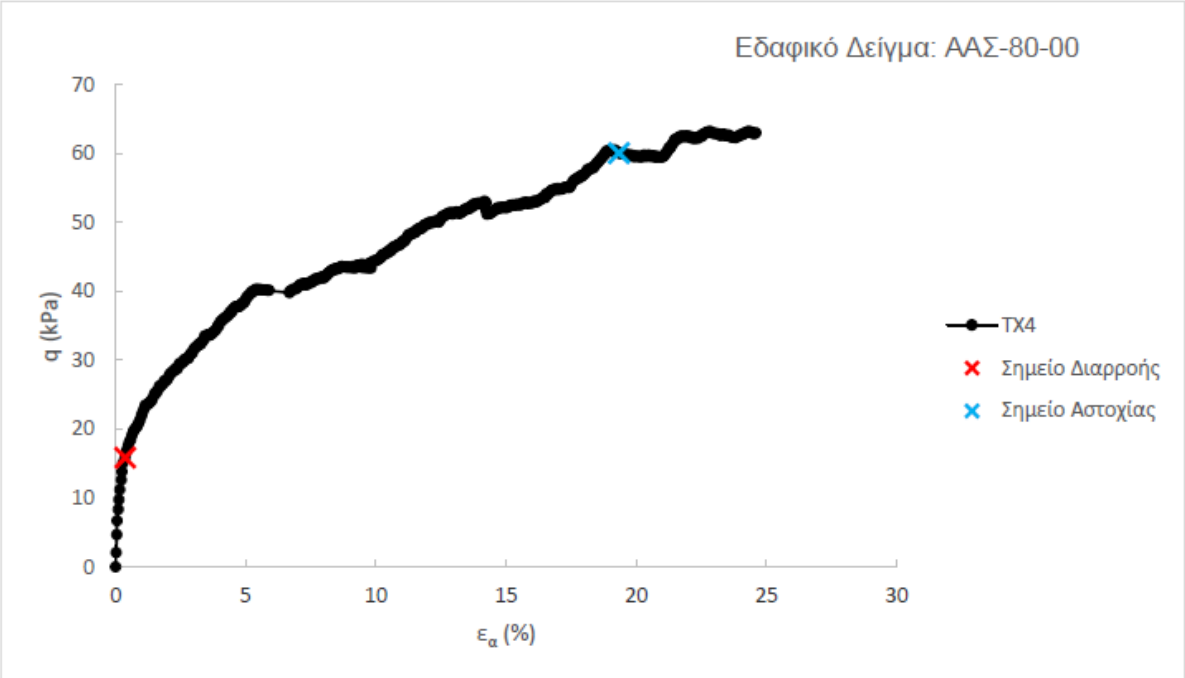


Σχήμα 6.6 - ΑΑΣ-80-00 – Καμπύλες μεταβολής όγκου – αξονικής παραμόρφωσης από τριαξονική δοκιμή θλίψης σε στραγγιζόμενες συνθήκες με IC=10 kPa

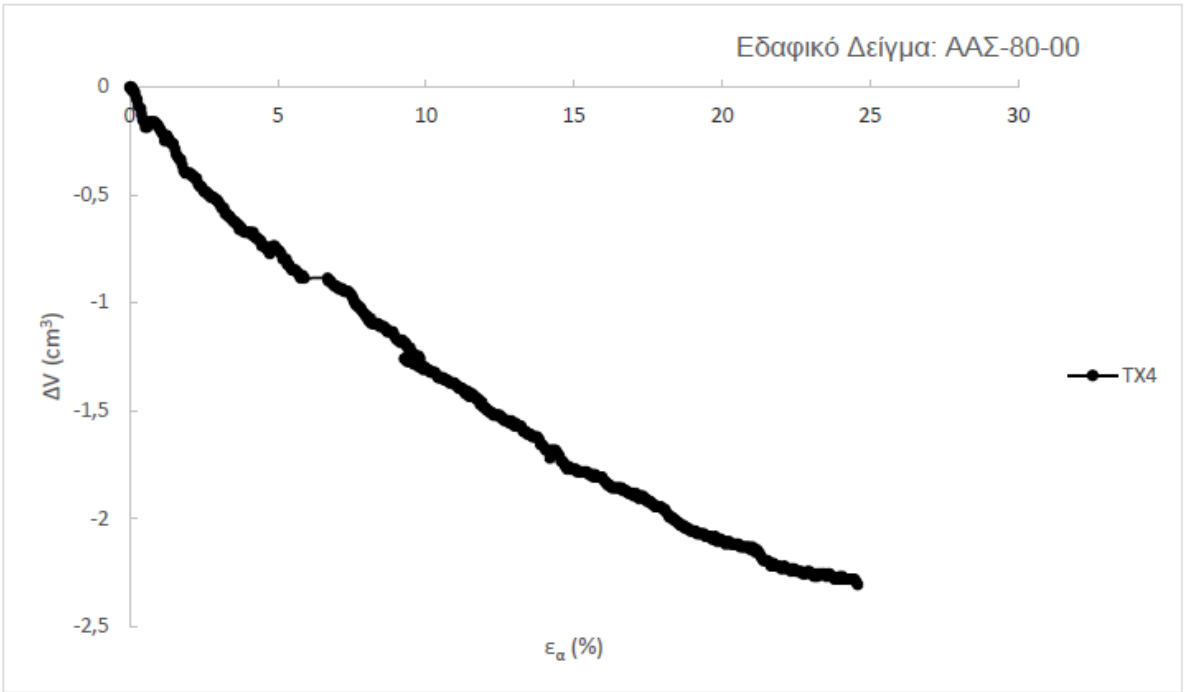


Σχήμα 6.7 - ΑΑΣ-80-00 Προσδιορισμός σημείου διαρροής σε διάγραμμα ειδικού όγκου–ενεργής τάσης από τριαξονική δοκιμή θλίψης σε στραγγιζόμενες συνθήκες με IC=10 kPa

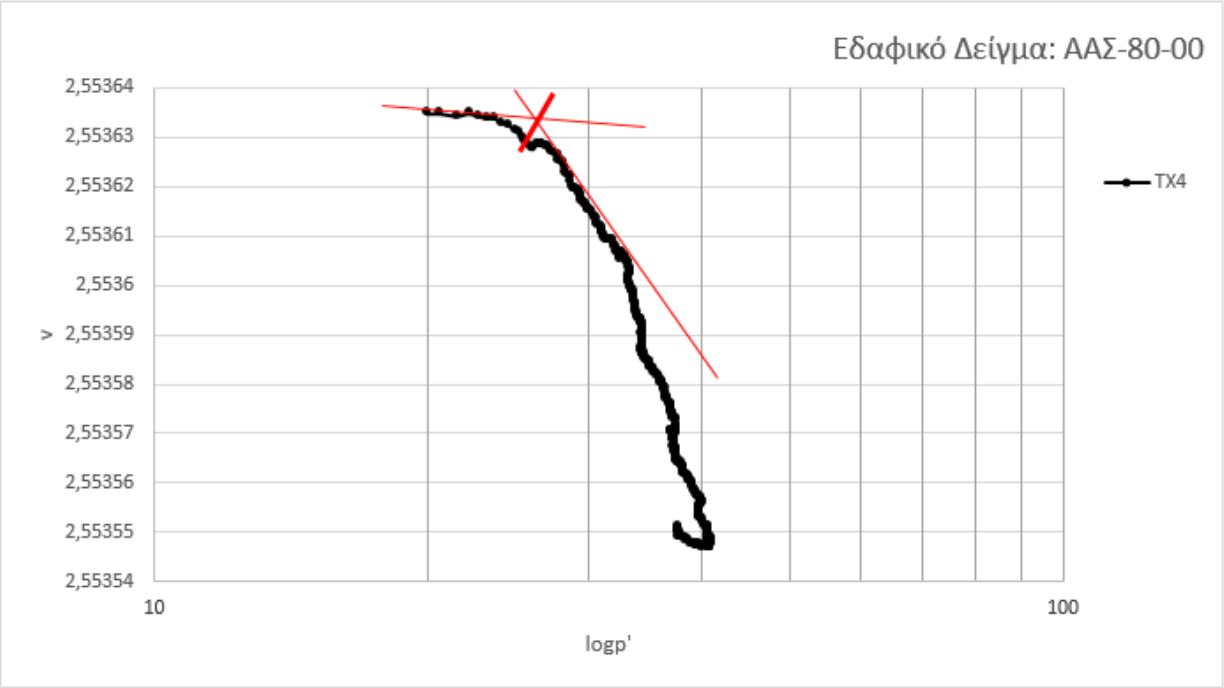
2. *ΙΣΟΤΡΟΠΗ ΣΤΕΡΕΟΠΟΙΗΣΗ : 20 kPa*



Σχήμα 6.8 - ΑΑΣ-80-00 Προσδιορισμός σημείων διαρροής και αστοχίας σε διάγραμμα αποκλίνουσας τάσης–αξονικής παραμόρφωσης από τριαξονική δοκιμή θλίψης σε στραγγιζόμενες συνθήκες με IC=20 kPa

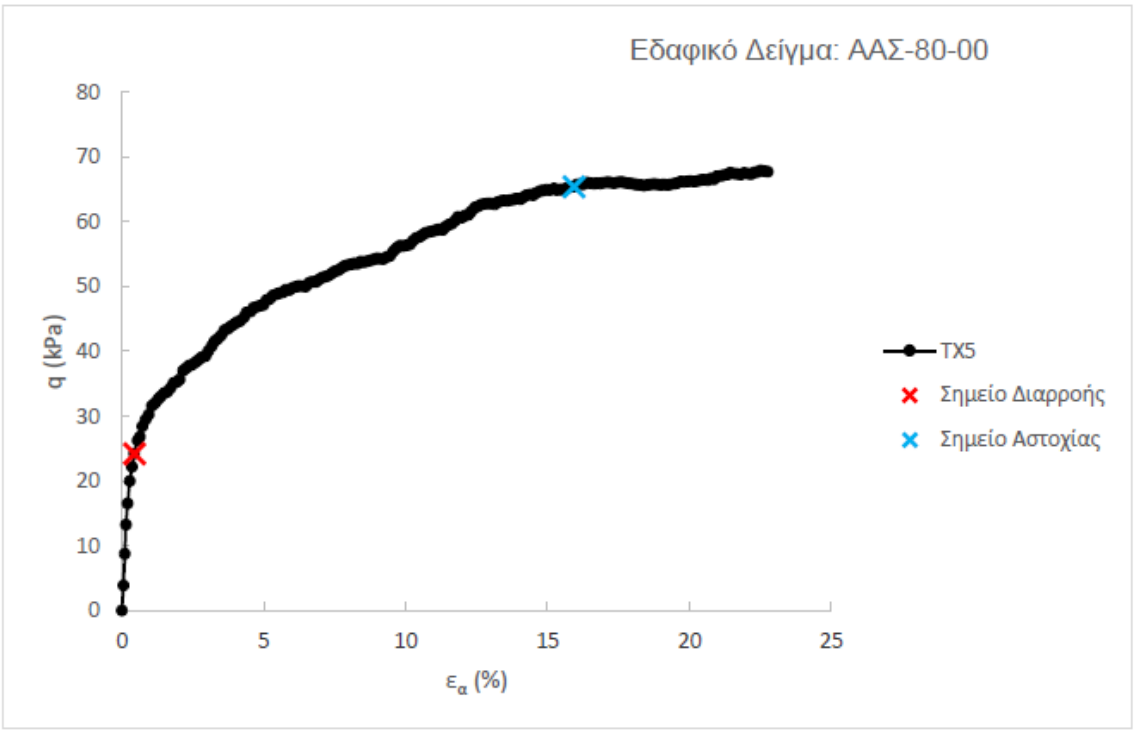


Σχήμα 6.9 - ΑΑΣ-80-00 – Καμπύλες μεταβολής όγκου – αξονικής παραμόρφωσης από τριαξονική δοκιμή θλίψης σε στραγγιζόμενες συνθήκες με IC=20 kPa

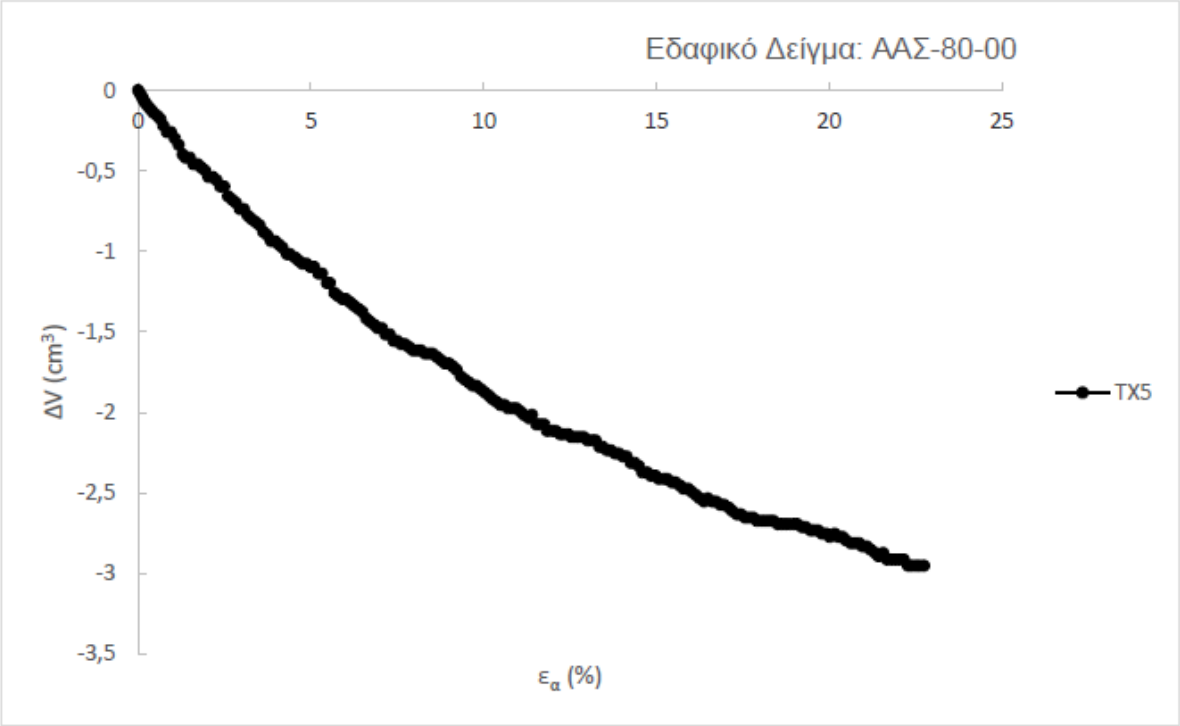


Σχήμα 6.10 - ΑΑΣ-80-00 Προσδιορισμός σημείου διαρροής σε διάγραμμα ειδικού όγκου–ενεργής τάσης από τριαξονική δοκιμή θλίψης σε στραγγιζόμενες συνθήκες με IC=20 kPa

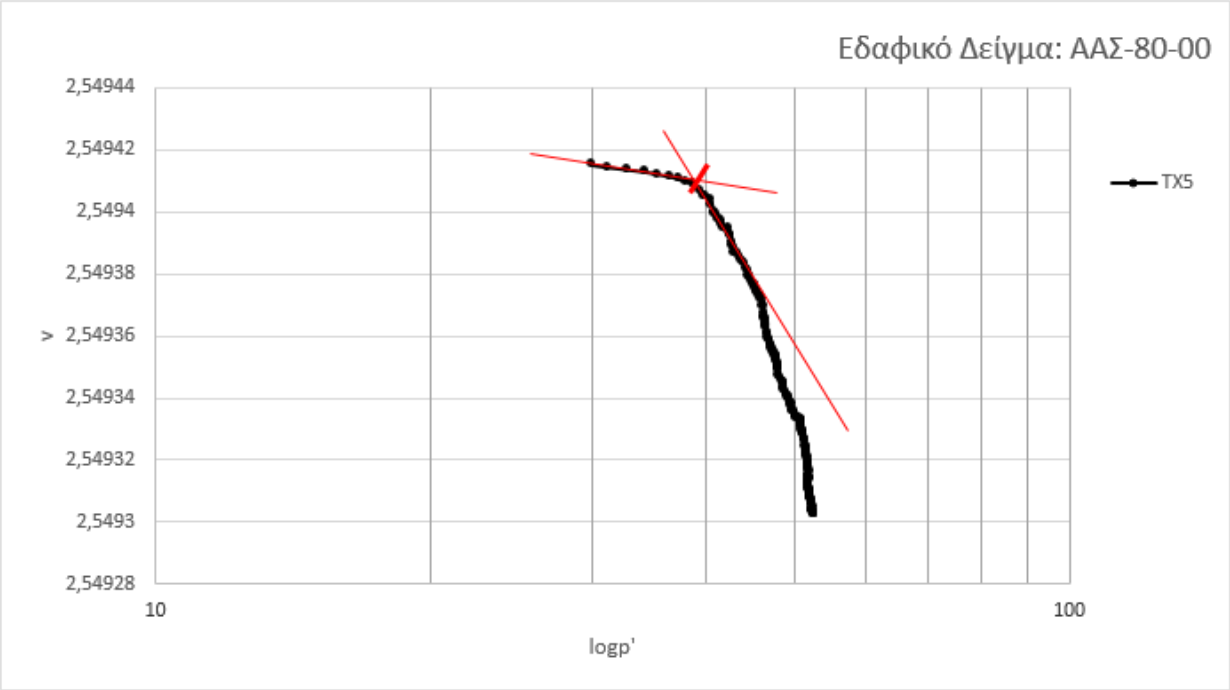
3. ΙΣΟΤΡΟΠΗ ΣΤΕΡΕΟΠΟΙΗΣΗ : 30 kPa



Σχήμα 6.11 - ΑΑΣ-80-00 Προσδιορισμός σημείων διαρροής και αστοχίας σε διάγραμμα αποκλίνουσας τάσης–αξονικής παραμόρφωσης από τριαξονική δοκιμή θλίψης σε στραγγιζόμενες συνθήκες με IC=30 kPa

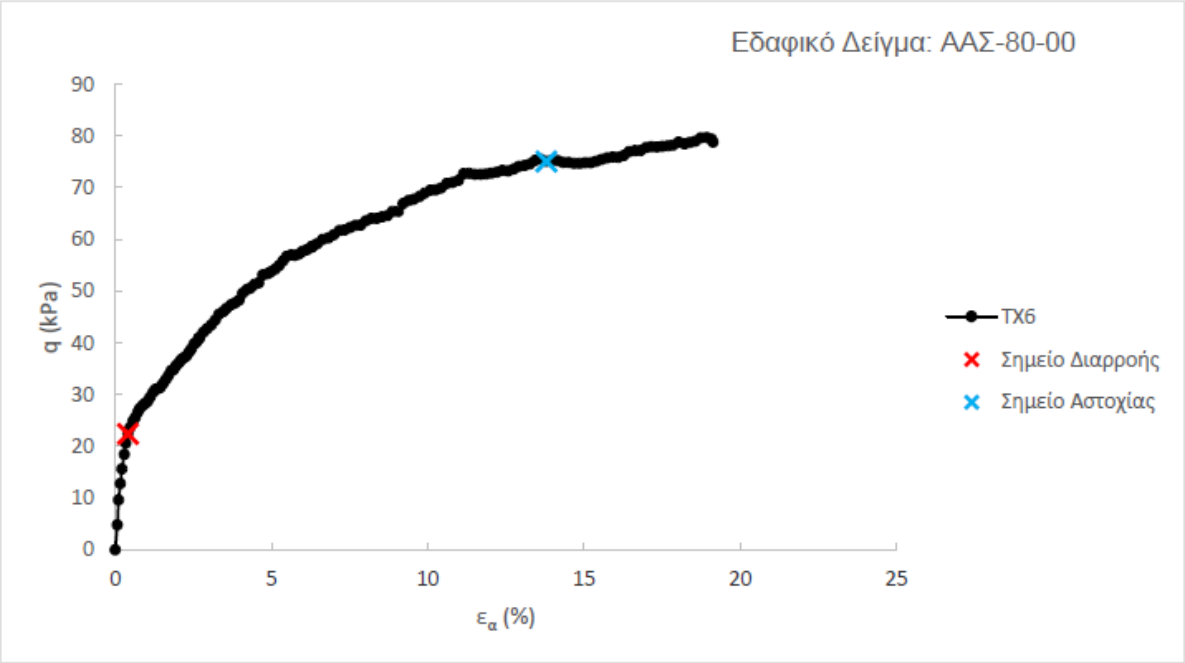


Σχήμα 6.12 - ΑΑΣ-80-00 – Καμπύλες μεταβολής όγκου – αξονικής παραμόρφωσης από τριαξονική δοκιμή θλίψης σε στραγγιζόμενες συνθήκες με IC=30 kPa

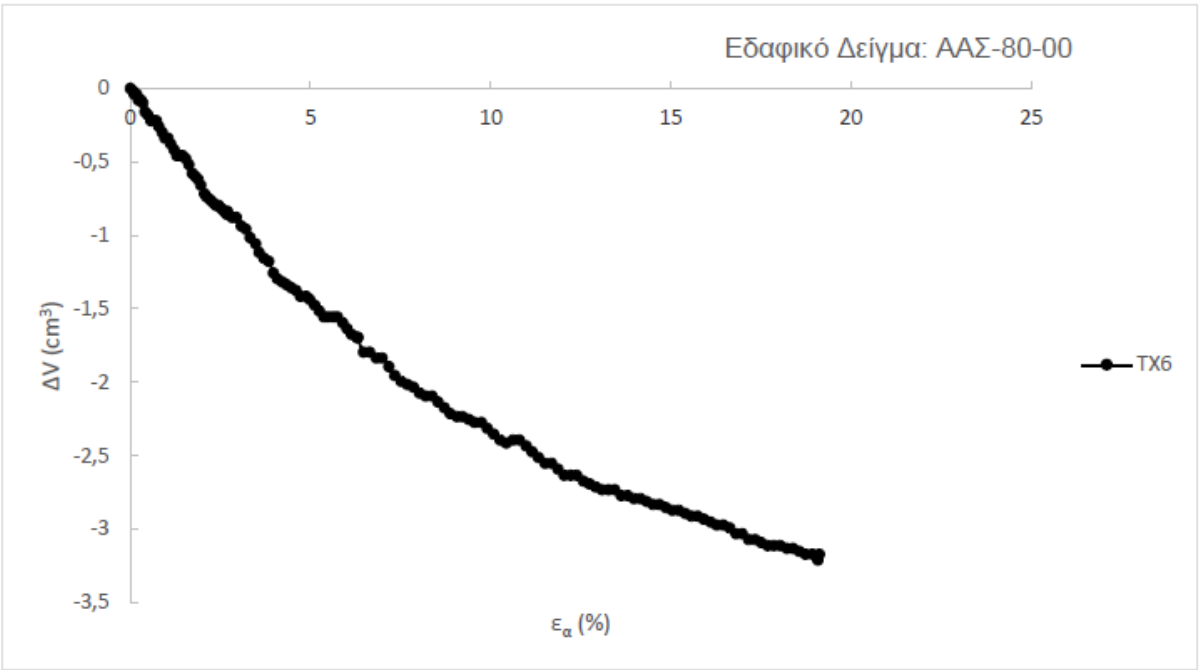


Σχήμα 6.13 - ΑΑΣ-80-00 Προσδιορισμός σημείου διαρροής σε διάγραμμα ειδικού όγκου–ενεργής τάσης από τριαξονική δοκιμή θλίψης σε στραγγιζόμενες συνθήκες με IC=30 kPa

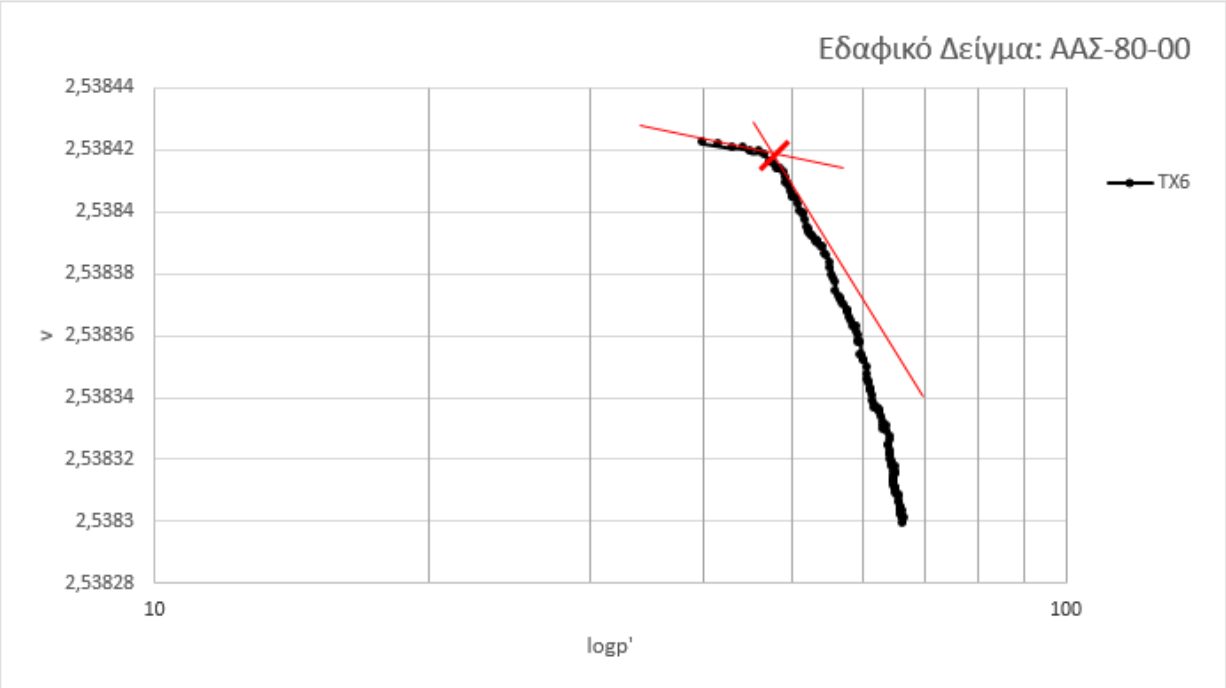
4. *ΙΣΟΤΡΟΠΗ ΣΤΕΡΕΟΠΟΙΗΣΗ : 40 kPa*



Σχήμα 6.14 - ΑΑΣ-80-00 Προσδιορισμός σημείων διαρροής και αστοχίας σε διάγραμμα αποκλίνουσας τάσης–αξονικής παραμόρφωσης από τριαξονική δοκιμή θλίψης σε στραγγιζόμενες συνθήκες με IC=40 kPa



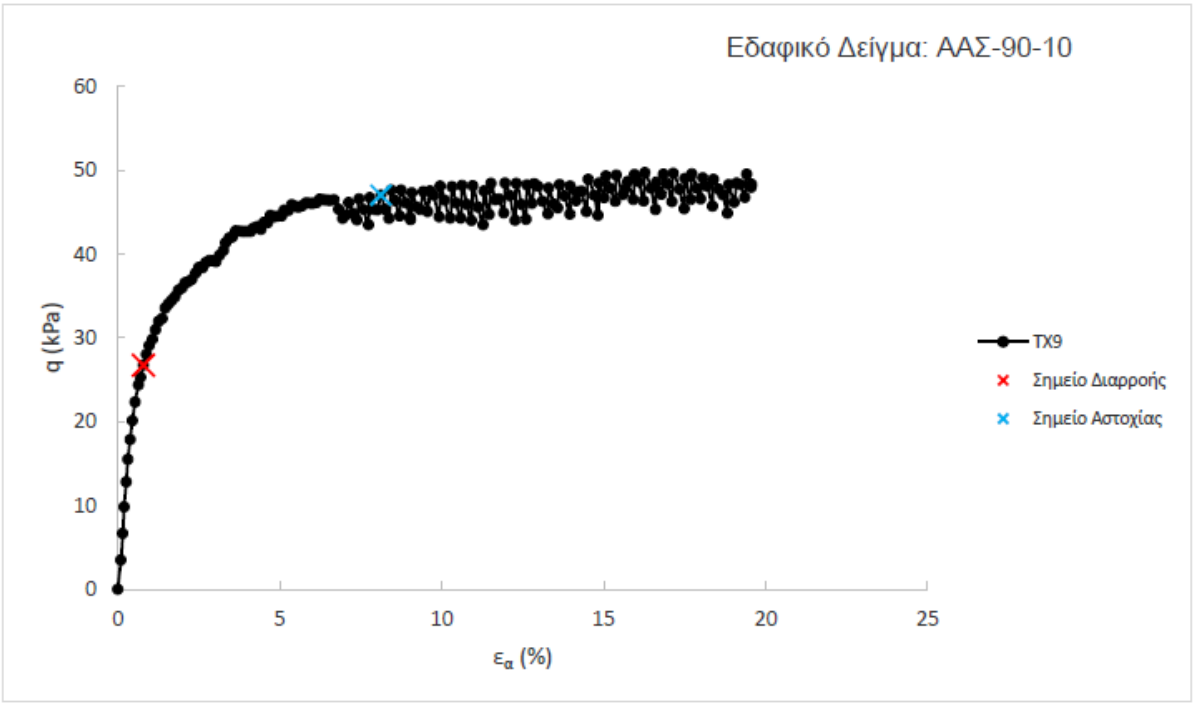
Σχήμα 6.15 - ΑΑΣ-80-00 – Καμπύλες μεταβολής όγκου – αξονικής παραμόρφωσης από τριαξονική δοκιμή θλίψης σε στραγγιζόμενες συνθήκες με IC=40 kPa



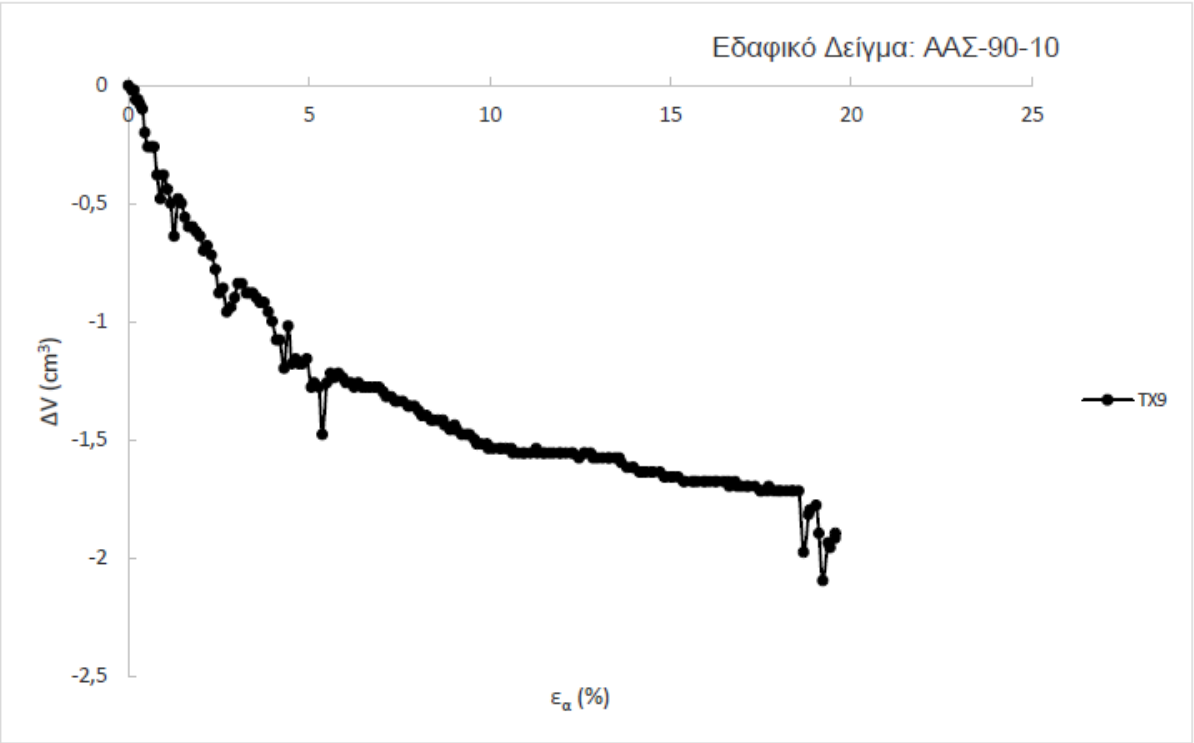
Σχήμα 6.16 - ΑΑΣ-80-00 Προσδιορισμός σημείου διαρροής σε διάγραμμα ειδικού όγκου–ενεργής τάσης από τριαξονική δοκιμή θλίψης σε στραγγιζόμενες συνθήκες με IC=40 kPa

B. <u>Εδαφικό Δείγμα: ΑΑΣ-90-10</u>
<u>ΔΟΚΙΜΕΣ ΘΛΙΨΗΣ</u>

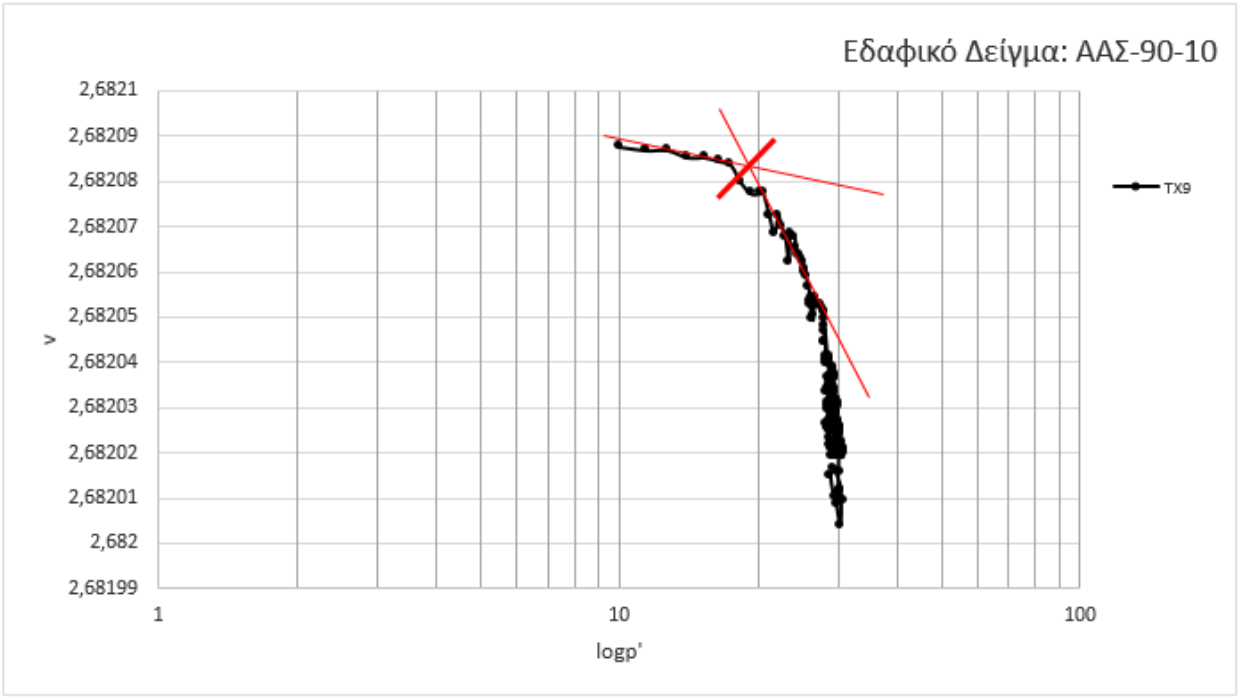
1. ΙΣΟΤΡΟΠΗ ΣΤΕΡΕΟΠΟΙΗΣΗ : 10 kPa



Σχήμα 6.17 - ΑΑΣ-90-10 Προσδιορισμός σημείων διαρροής και αστοχίας σε διάγραμμα αποκλίνουσας τάσης–αξονικής παραμόρφωσης από τριαξονική δοκιμή θλίψης σε στραγγιζόμενες συνθήκες με IC=10 kPa

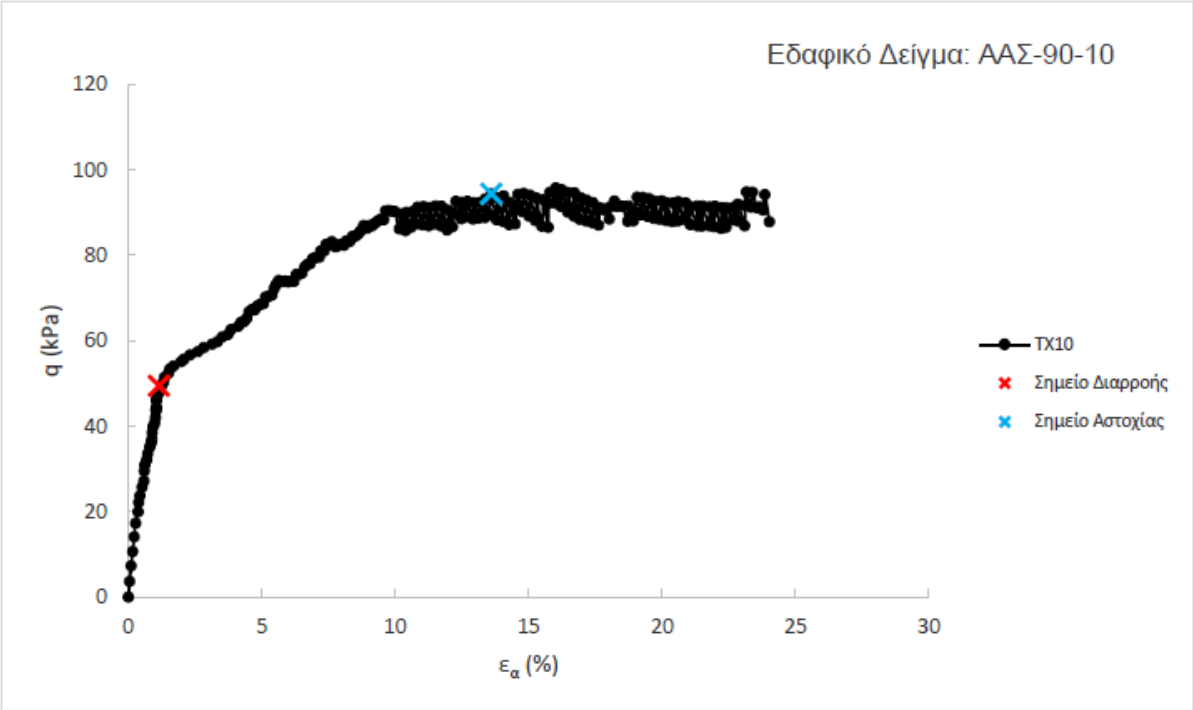


Σχήμα 6.18 - ΑΑΣ-90-10 – Καμπύλες μεταβολής όγκου – αξονικής παραμόρφωσης από τριαξονική δοκιμή θλίψης σε στραγγιζόμενες συνθήκες με IC=10 kPa

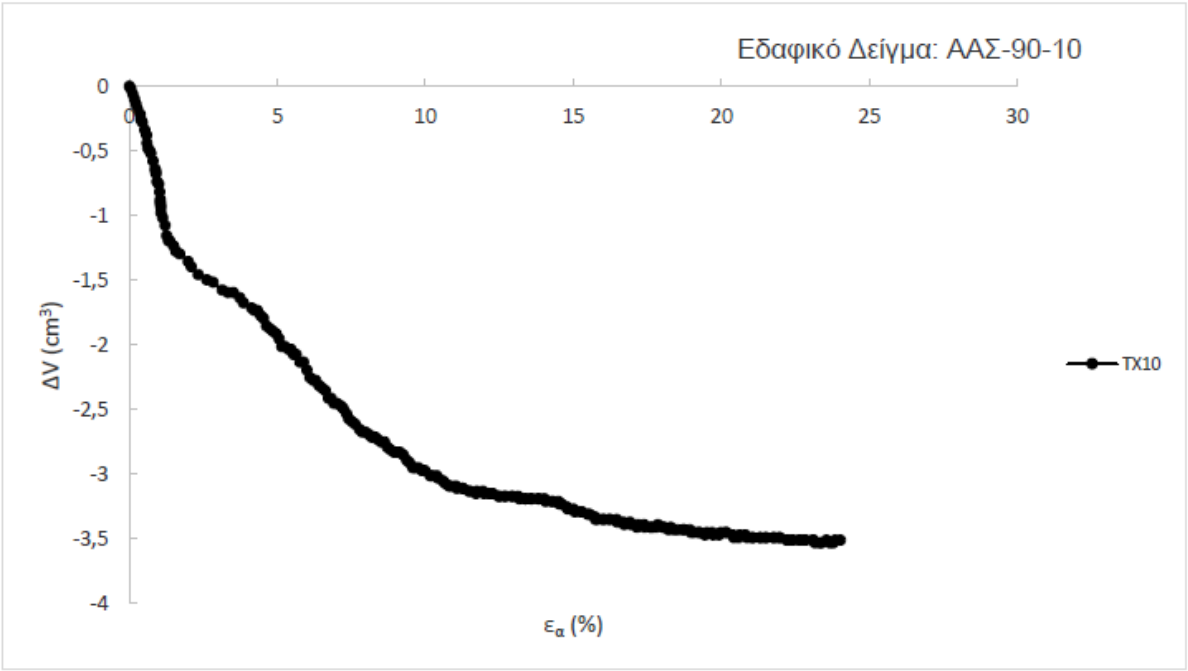


Σχήμα 6.19 - ΑΑΣ-90-10 Προσδιορισμός σημείου διαρροής σε διάγραμμα ειδικού όγκου–ενεργής τάσης από τριαξονική δοκιμή θλίψης σε στραγγιζόμενες συνθήκες με IC=10 kPa

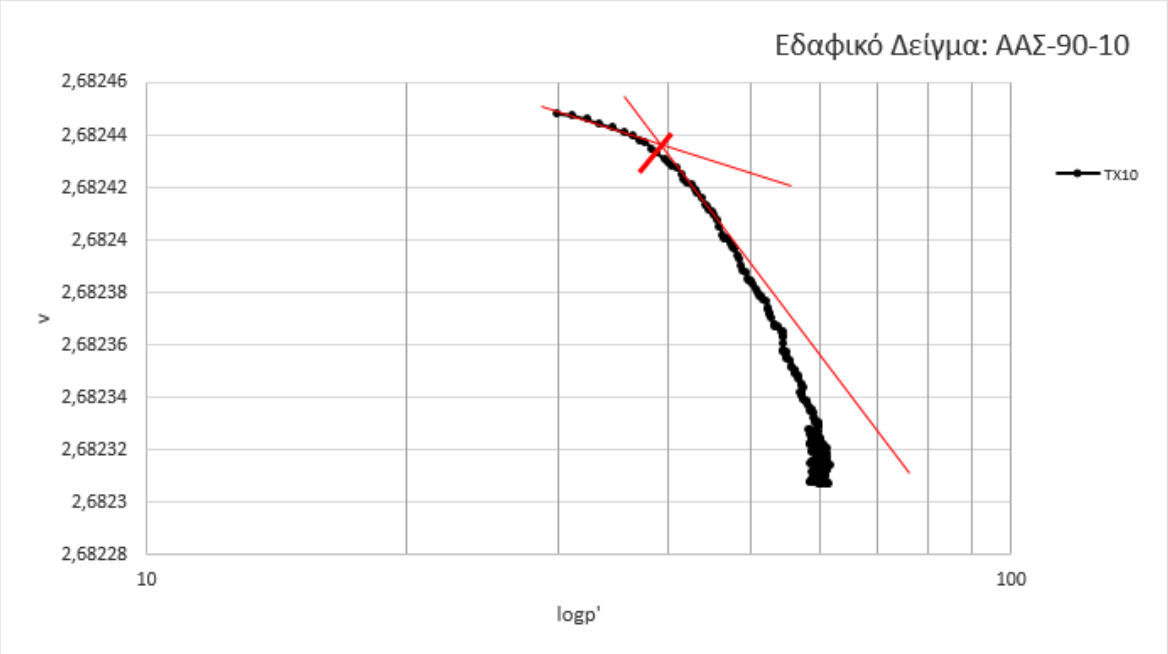
2. ΙΣΟΤΡΟΠΗ ΣΤΕΡΕΟΠΟΙΗΣΗ : 30 kPa



Σχήμα 6.20 - ΑΑΣ-90-10 Προσδιορισμός σημείων διαρροής και αστοχίας σε διάγραμμα αποκλίνουσας τάσης–αξονικής παραμόρφωσης από τριαξονική δοκιμή θλίψης σε στραγγιζόμενες συνθήκες με IC=30 kPa

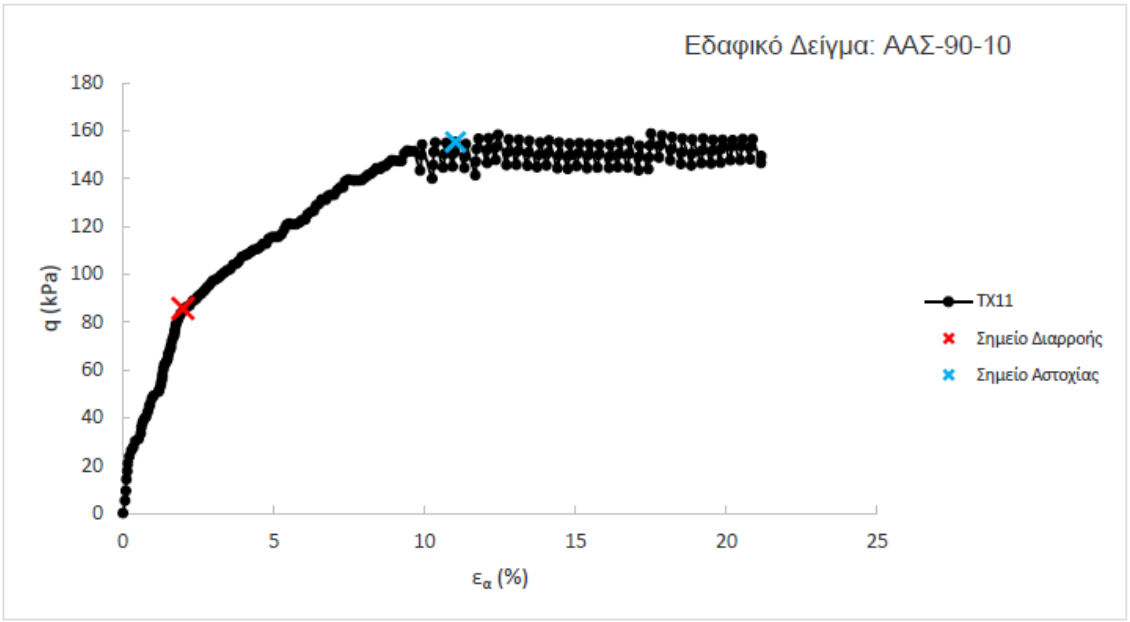


Σχήμα 6.21 - ΑΑΣ-90-10 – Καμπύλες μεταβολής όγκου – αξονικής παραμόρφωσης από τριαξονική δοκιμή θλίψης σε στραγγιζόμενες συνθήκες με IC=30 kPa

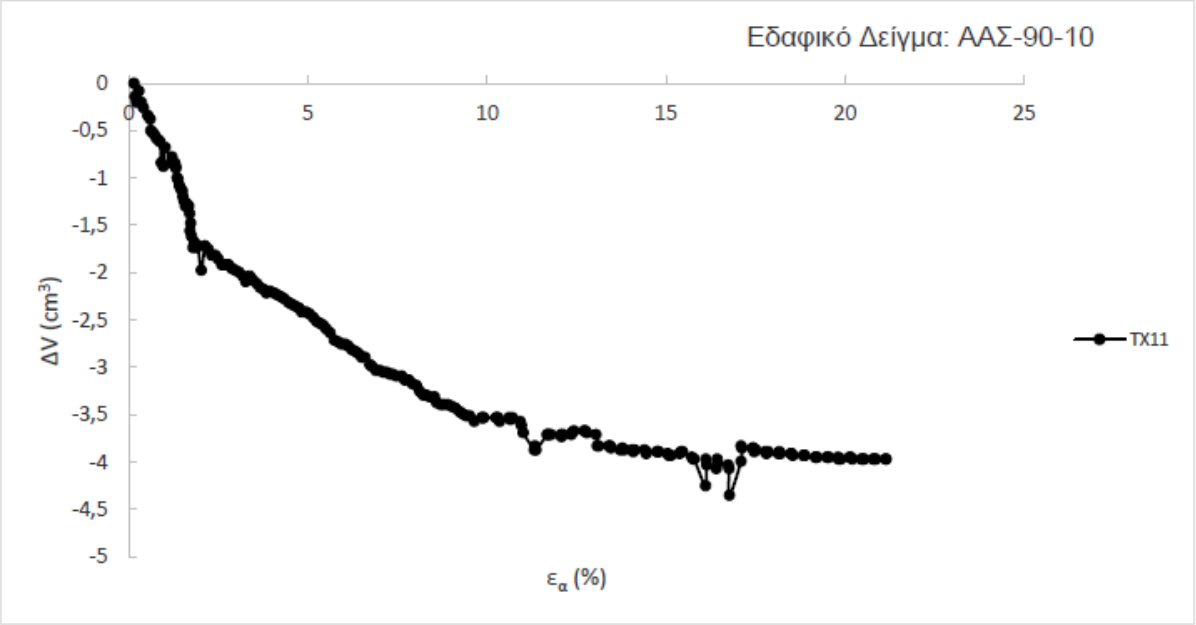


Σχήμα 6.22 - ΑΑΣ-90-10 Προσδιορισμός σημείου διαρροής σε διάγραμμα ειδικού όγκου–ενεργής τάσης από τριαξονική δοκιμή θλίψης σε στραγγιζόμενες συνθήκες με IC=30 kPa

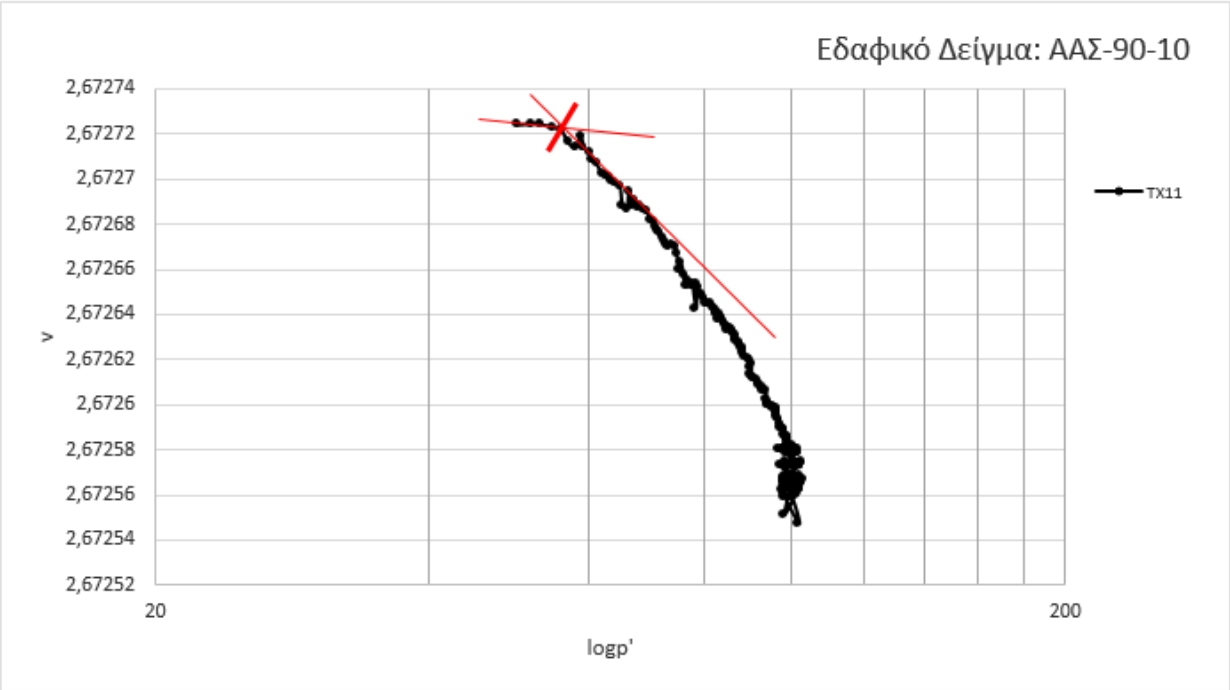
3. *ΙΣΟΤΡΟΠΗ ΣΤΕΡΕΟΠΟΙΗΣΗ : 50 kPa*



Σχήμα 6.23 - ΑΑΣ-90-10 Προσδιορισμός σημείων διαρροής και αστοχίας σε διάγραμμα αποκλίνουσας τάσης–αξονικής παραμόρφωσης από τριαξονική δοκιμή θλίψης σε στραγγιζόμενες συνθήκες με IC=50 kPa

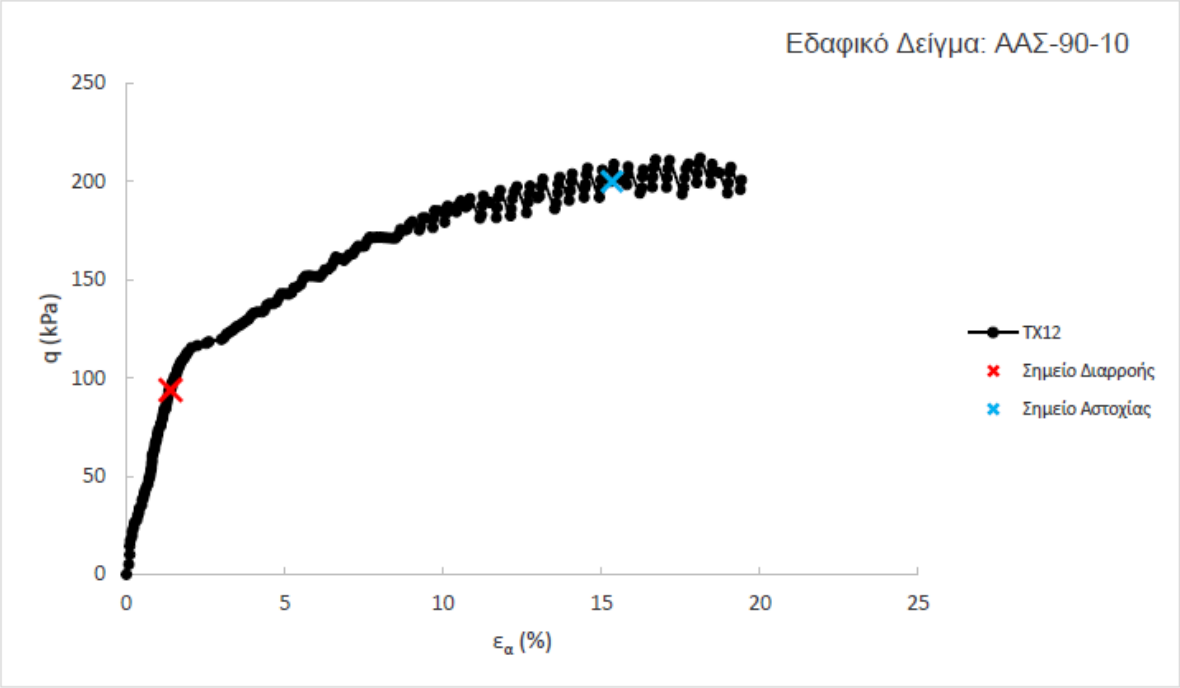


Σχήμα 6.24 - ΑΑΣ-90-10 – Καμπύλες μεταβολής όγκου – αξονικής παραμόρφωσης από τριαξονική δοκιμή θλίψης σε στραγγιζόμενες συνθήκες με IC=50 kPa

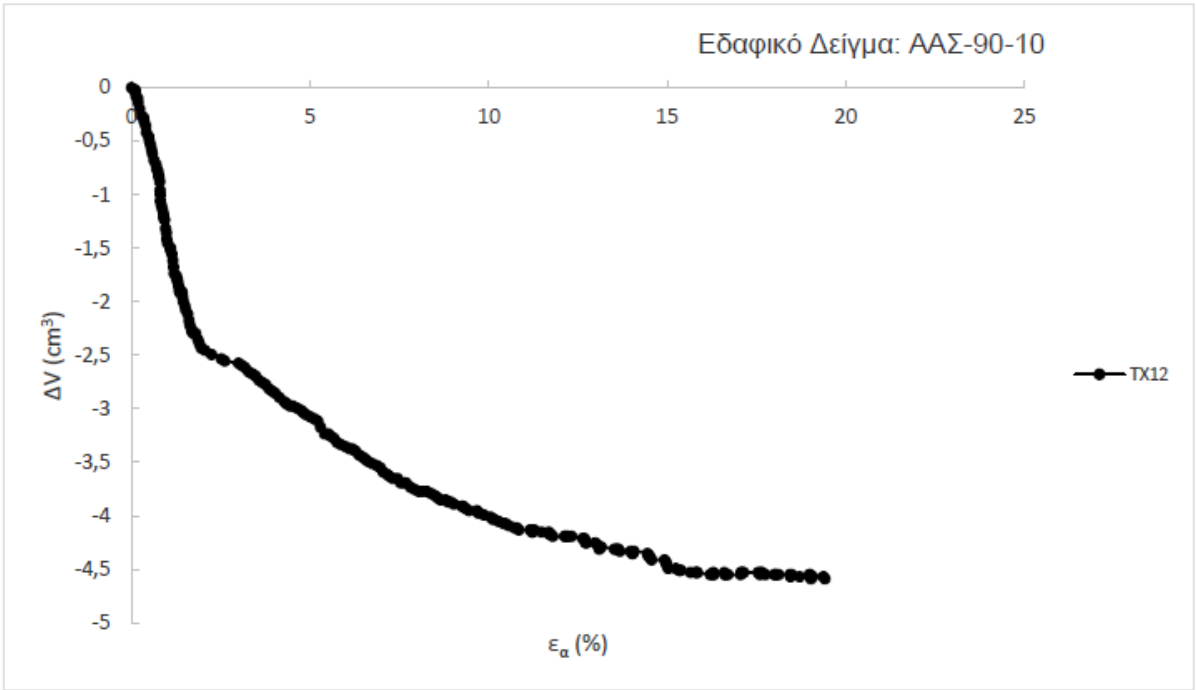


Σχήμα 6.25 - ΑΑΣ-90-10 Προσδιορισμός σημείου διαρροής σε διάγραμμα ειδικού όγκου–ενεργής τάσης από τριαξονική δοκιμή θλίψης σε στραγγιζόμενες συνθήκες με IC=50 kPa

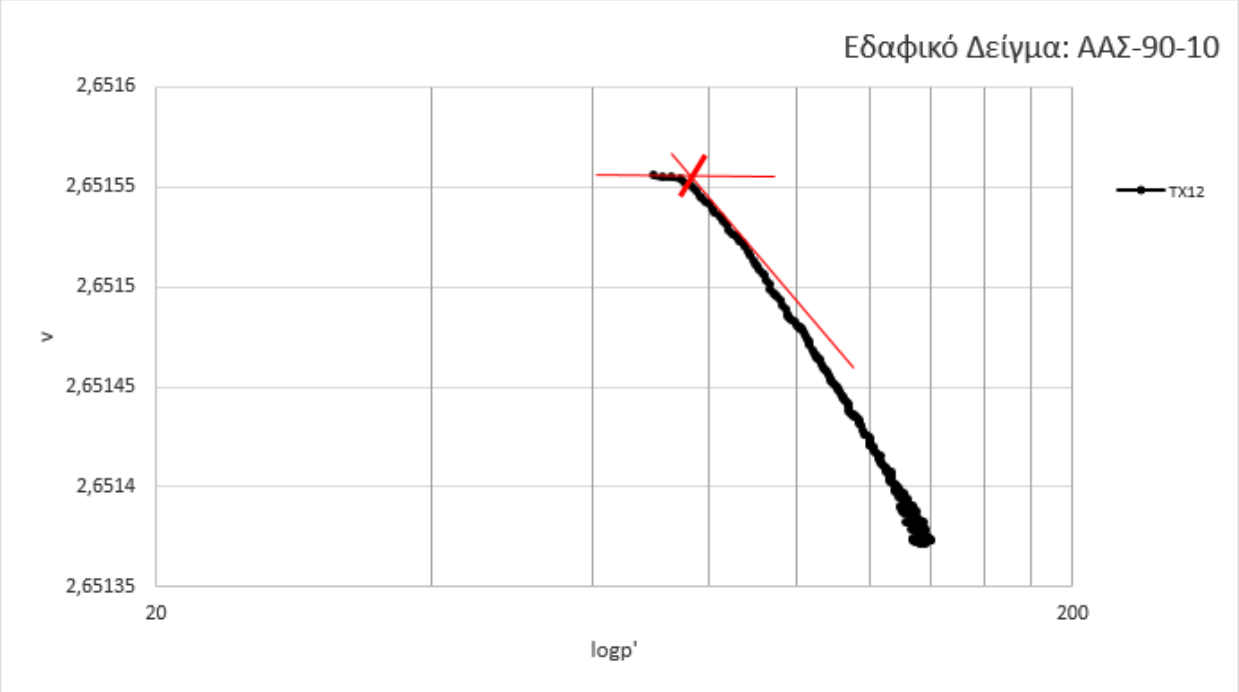
4. *ΙΣΟΤΡΟΠΗ ΣΤΕΡΕΟΠΟΙΗΣΗ : 70 kPa*



Σχήμα 6.26 - ΑΑΣ-90-10 Προσδιορισμός σημείων διαρροής και αστοχίας σε διάγραμμα αποκλίνουσας τάσης–αξονικής παραμόρφωσης από τριαξονική δοκιμή θλίψης σε στραγγιζόμενες συνθήκες με IC=70 kPa

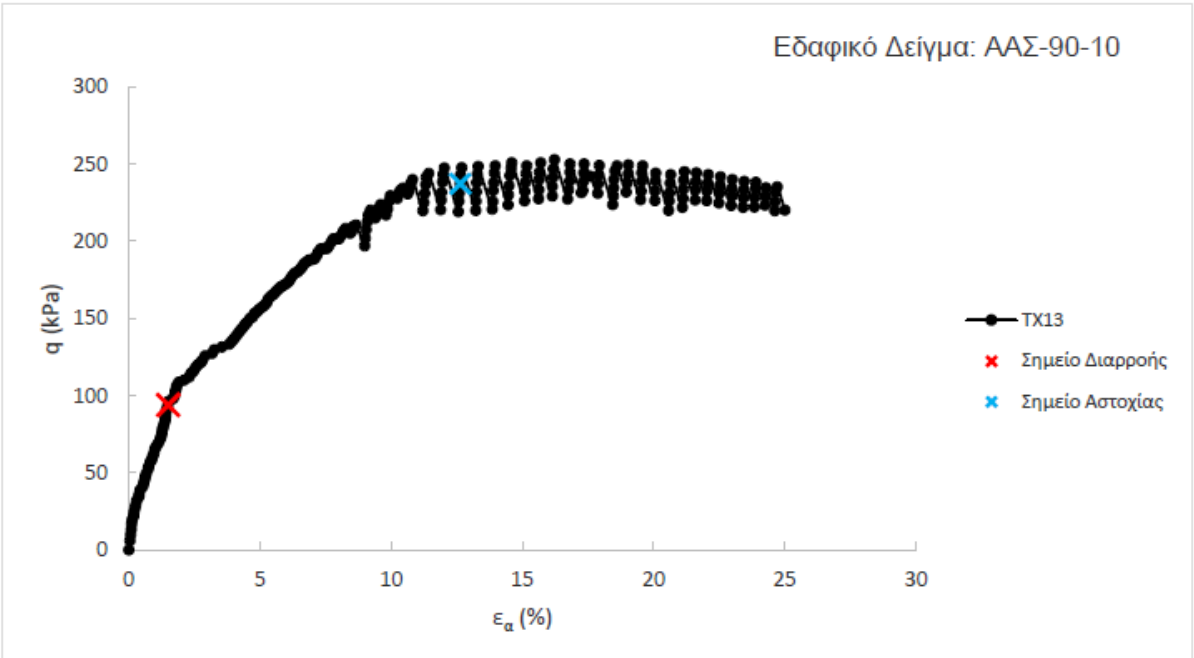


Σχήμα 6.27 - ΑΑΣ-90-10 – Καμπύλες μεταβολής όγκου – αξονικής παραμόρφωσης από τριαξονική δοκιμή θλίψης σε στραγγιζόμενες συνθήκες με IC=70 kPa

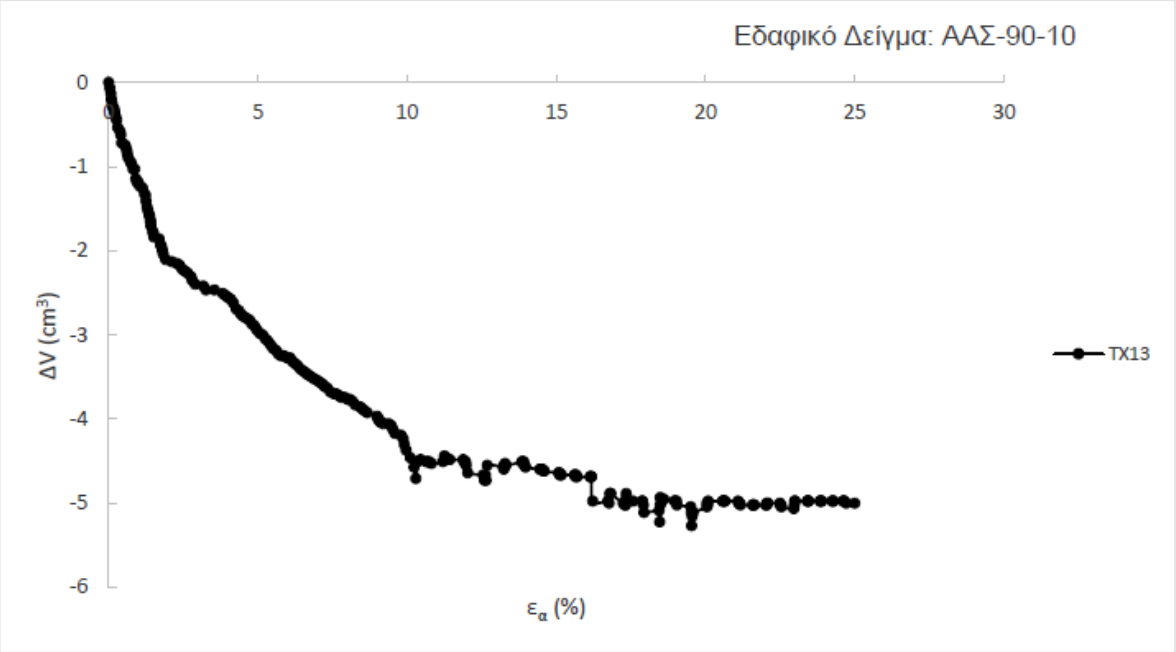


Σχήμα 6.28 - ΑΑΣ-90-10 Προσδιορισμός σημείου διαρροής σε διάγραμμα ειδικού όγκου–ενεργής τάσης από τριαξονική δοκιμή θλίψης σε στραγγιζόμενες συνθήκες με IC=70 kPa

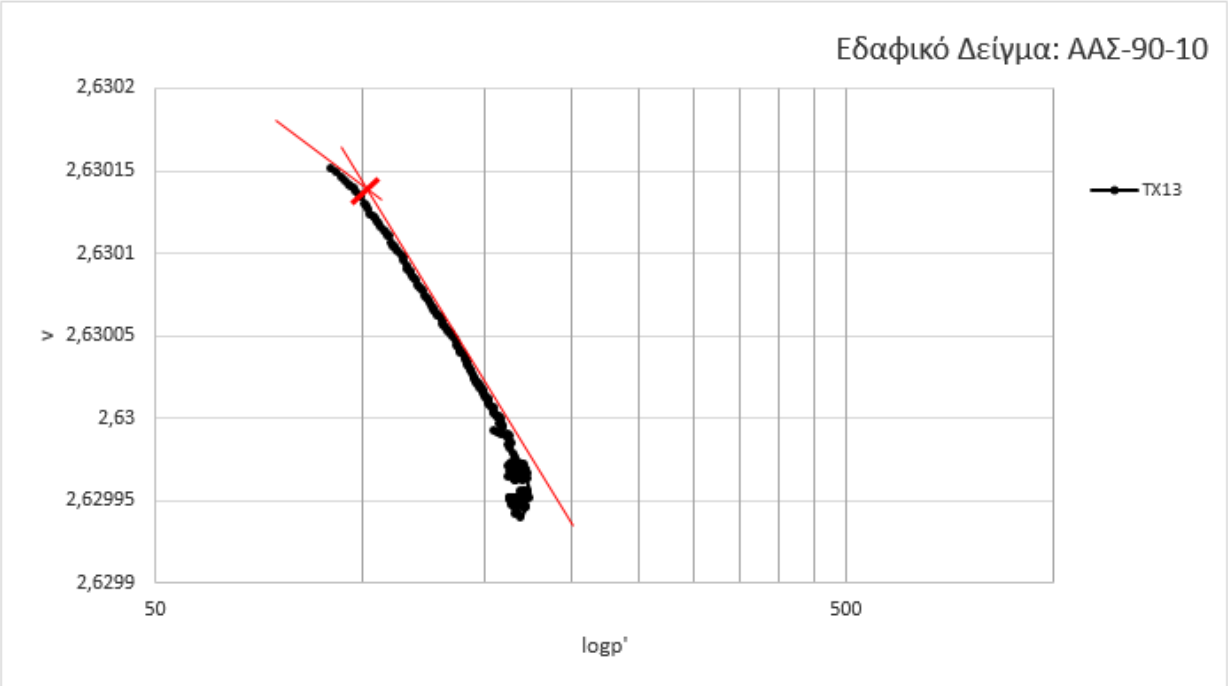
5. ΙΣΟΤΡΟΠΗ ΣΤΕΡΕΟΠΟΙΗΣΗ : 90 kPa



Σχήμα 6.29 - ΑΑΣ-90-10 Προσδιορισμός σημείων διαρροής και αστοχίας σε διάγραμμα αποκλίνουσας τάσης–αξονικής παραμόρφωσης από τριαξονική δοκιμή θλίψης σε στραγγιζόμενες συνθήκες με IC=90 kPa



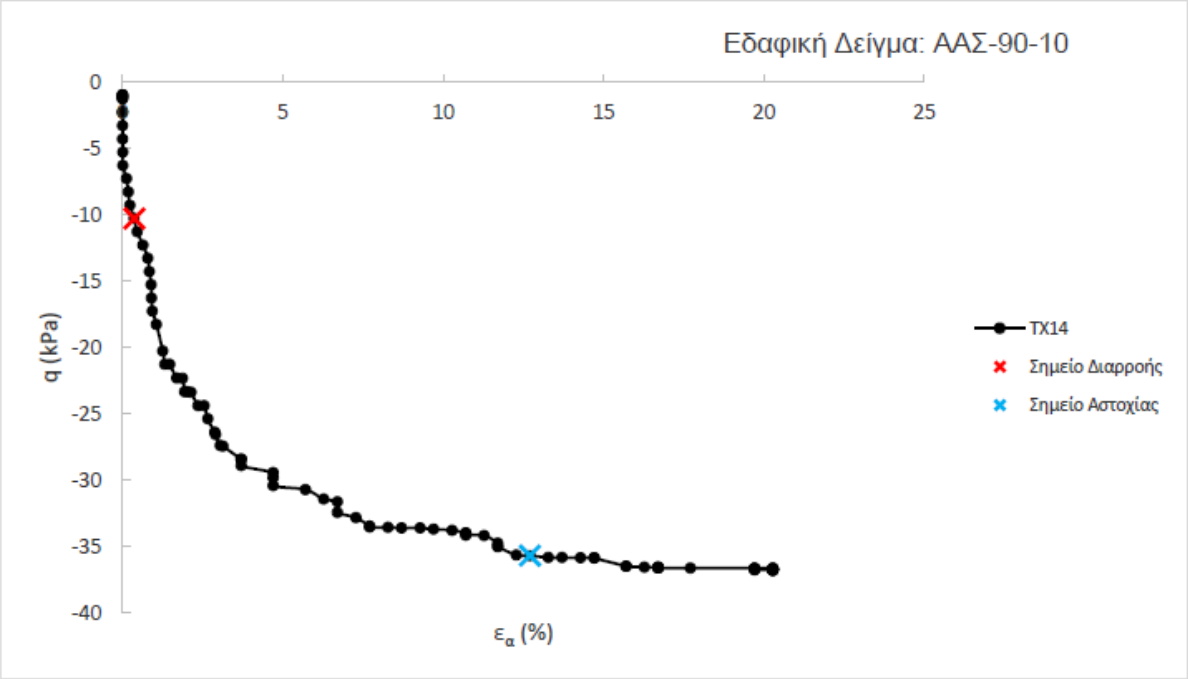
Σχήμα 6.30 - ΑΑΣ-90-10 – Καμπύλες μεταβολής όγκου – αξονικής παραμόρφωσης από τριαξονική δοκιμή θλίψης σε στραγγιζόμενες συνθήκες με IC=90 kPa



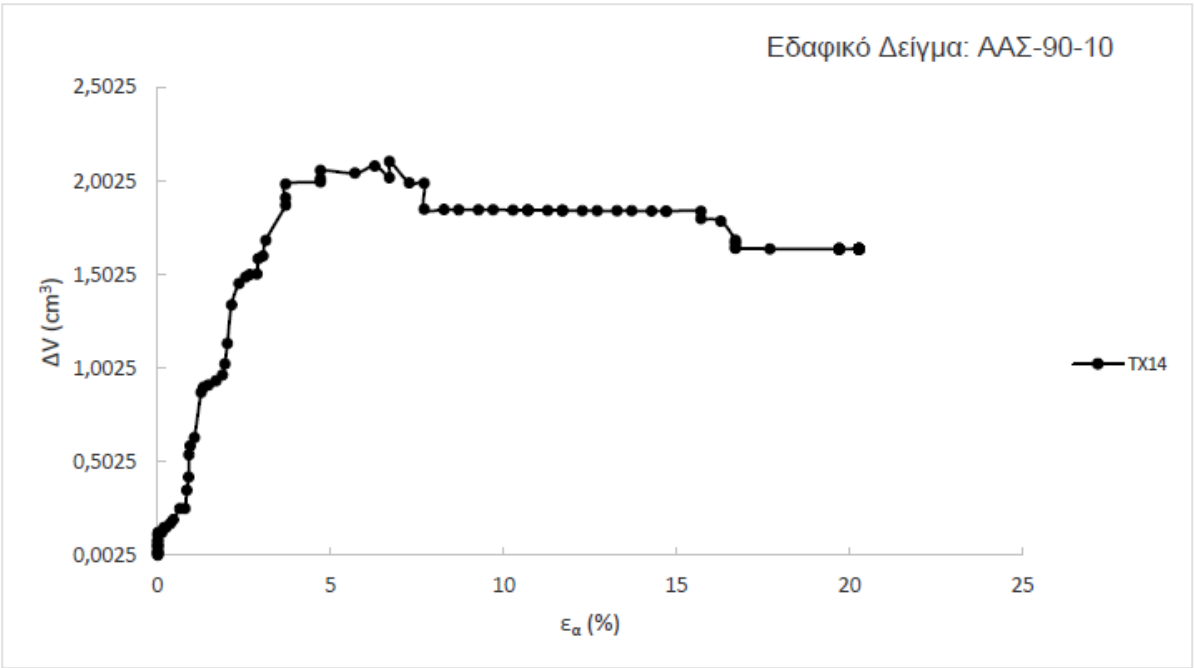
Σχήμα 6.31 - ΑΑΣ-90-10 Προσδιορισμός σημείου διαρροής σε διάγραμμα ειδικού όγκου–ενεργής τάσης από τριαξονική δοκιμή θλίψης σε στραγγιζόμενες συνθήκες με IC=90 kPa

ΔΟΚΙΜΕΣ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΥ

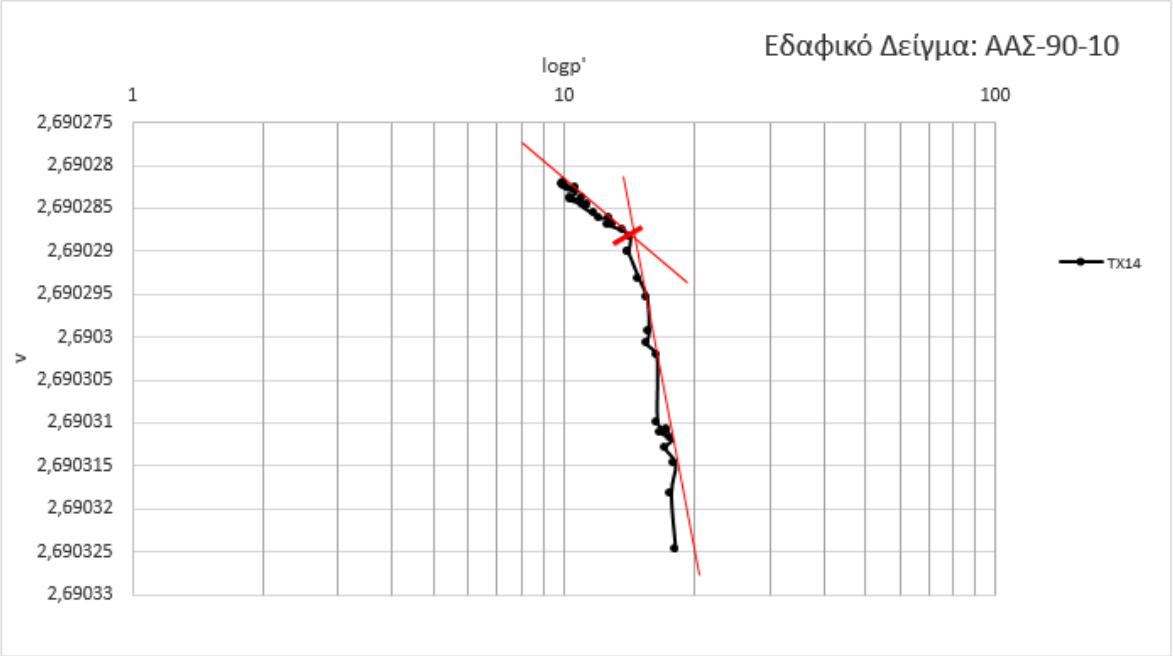
1. *ΙΣΟΤΡΟΠΗ ΣΤΕΡΕΟΠΟΙΗΣΗ : 10 kPa*



Σχήμα 6.32 - ΑΑΣ-90-10 Προσδιορισμός σημείων διαρροής και αστοχίας σε διάγραμμα αποκλίνουσας τάσης–αξονικής παραμόρφωσης από τριαξονική δοκιμή εφελκυσμού σε στραγγιζόμενες συνθήκες με IC=10 kPa

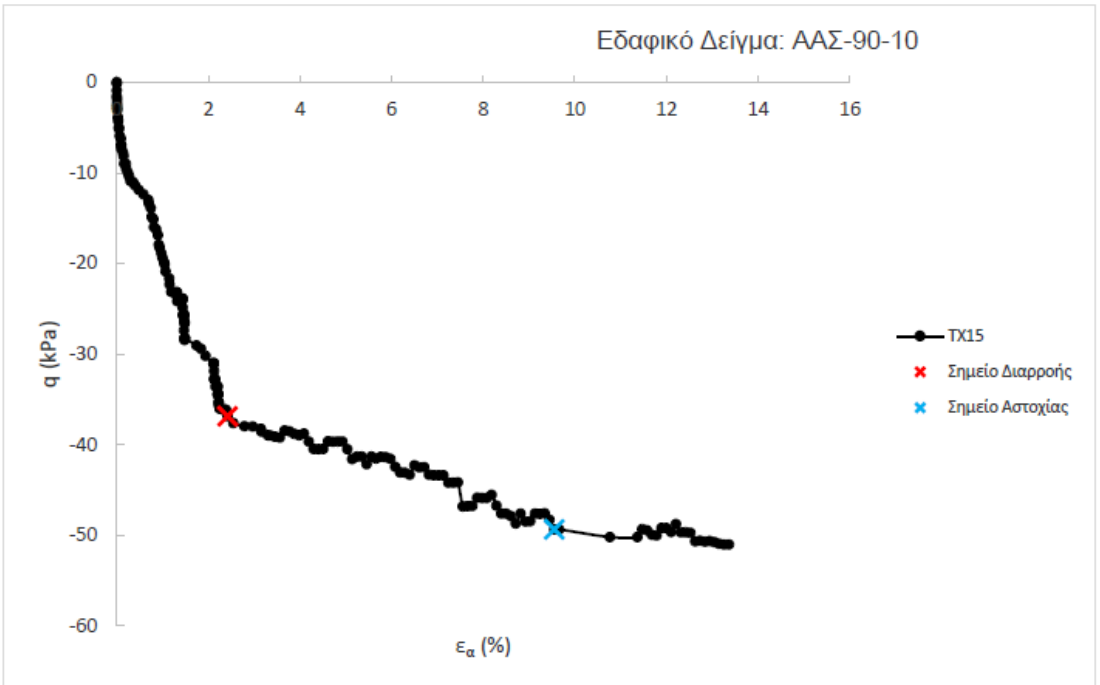


Σχήμα 6.33 - ΑΑΣ-90-10 – Καμπύλες μεταβολής όγκου – αξονικής παραμόρφωσης από τριαξονική δοκιμή εφελκυσμού σε στραγγιζόμενες συνθήκες με IC=10 kPa

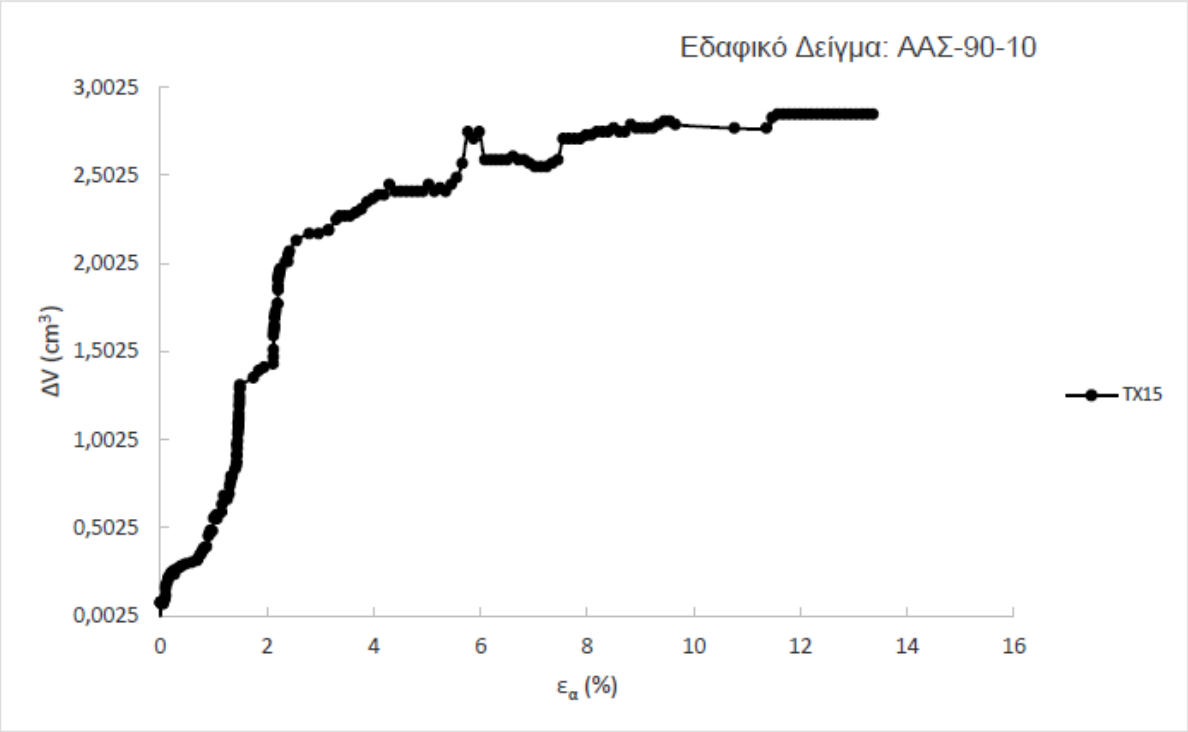


Σχήμα 6.34 - ΑΑΣ-90-10 Προσδιορισμός σημείου διαρροής σε διάγραμμα ειδικού όγκου–ενεργής τάσης από τριαξονική δοκιμή εφελκυσμού σε στραγγιζόμενες συνθήκες με IC=10 kPa

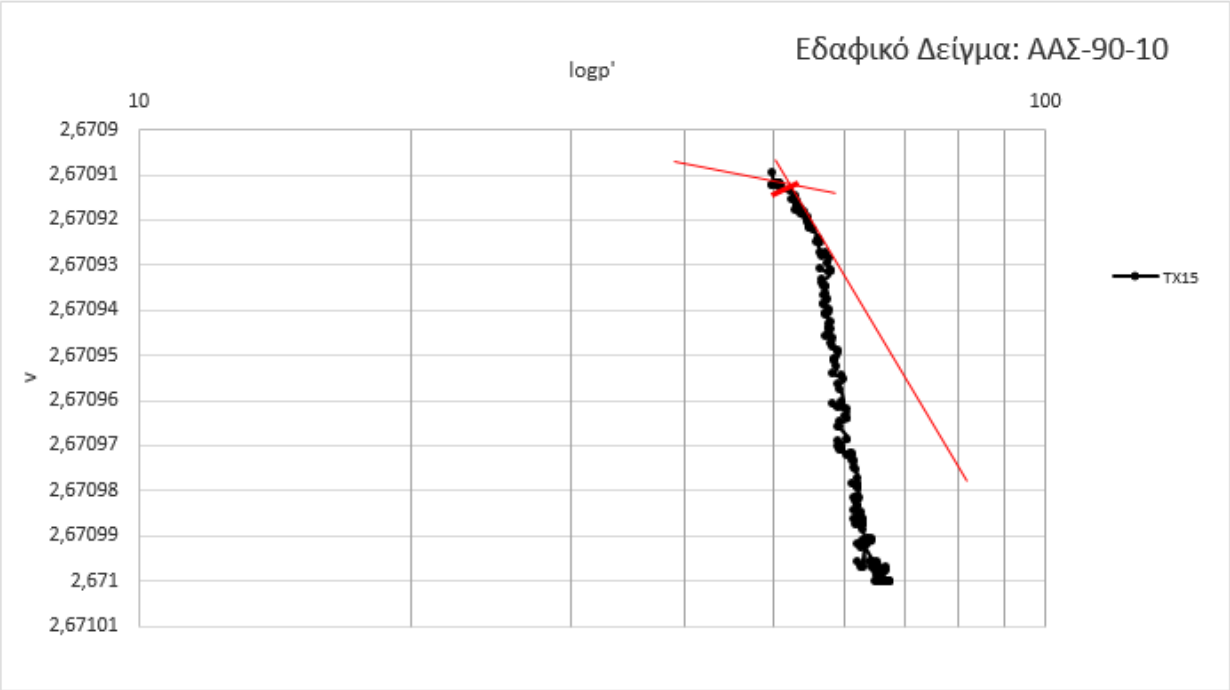
2. ΙΣΟΤΡΟΠΗ ΣΤΕΡΕΟΠΟΙΗΣΗ : 50 kPa



Σχήμα 6.35 - ΑΑΣ-90-10 Προσδιορισμός σημείων διαρροής και αστοχίας σε διάγραμμα αποκλίνουσας τάσης–αξονικής παραμόρφωσης από τριαξονική δοκιμή εφελκυσμού σε στραγγιζόμενες συνθήκες με IC=50 kPa

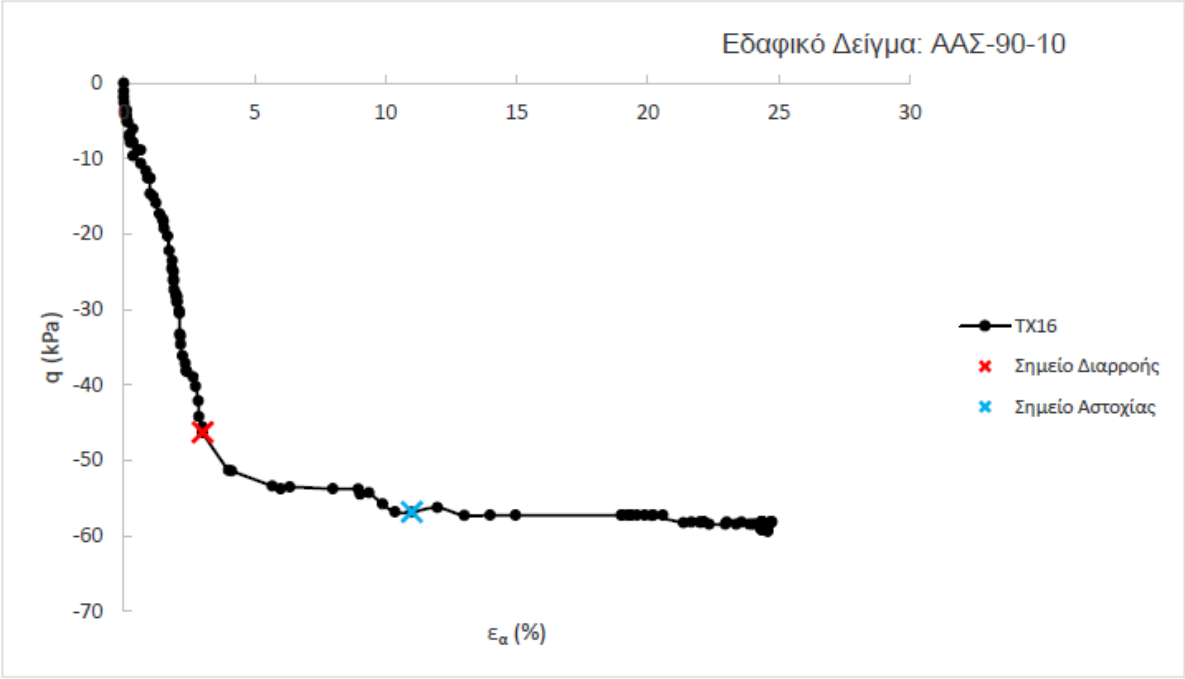


Σχήμα 6.36 - ΑΑΣ-90-10 – Καμπύλες μεταβολής όγκου – αξονικής παραμόρφωσης από τριαξονική δοκιμή εφελκυσμού σε στραγγιζόμενες συνθήκες με IC=50 kPa

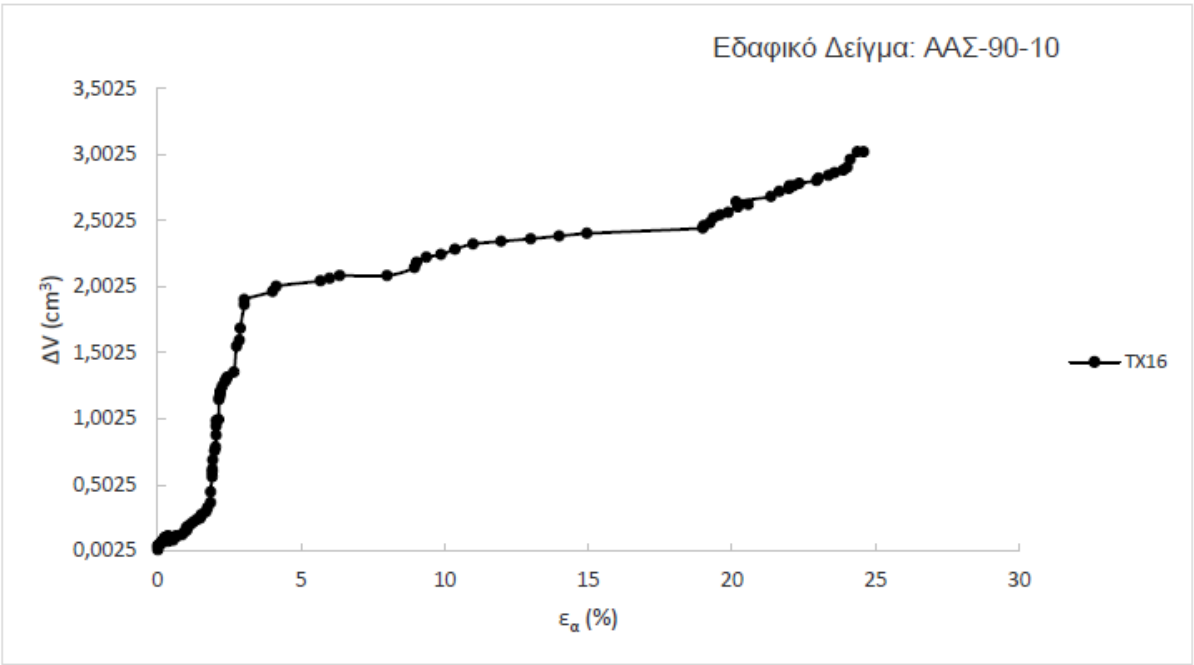


Σχήμα 6.37 - ΑΑΣ-90-10 Προσδιορισμός σημείου διαρροής σε διάγραμμα ειδικού όγκου–ενεργής τάσης από τριαξονική δοκιμή εφελκυσμού σε στραγγιζόμενες συνθήκες με IC=50 kPa

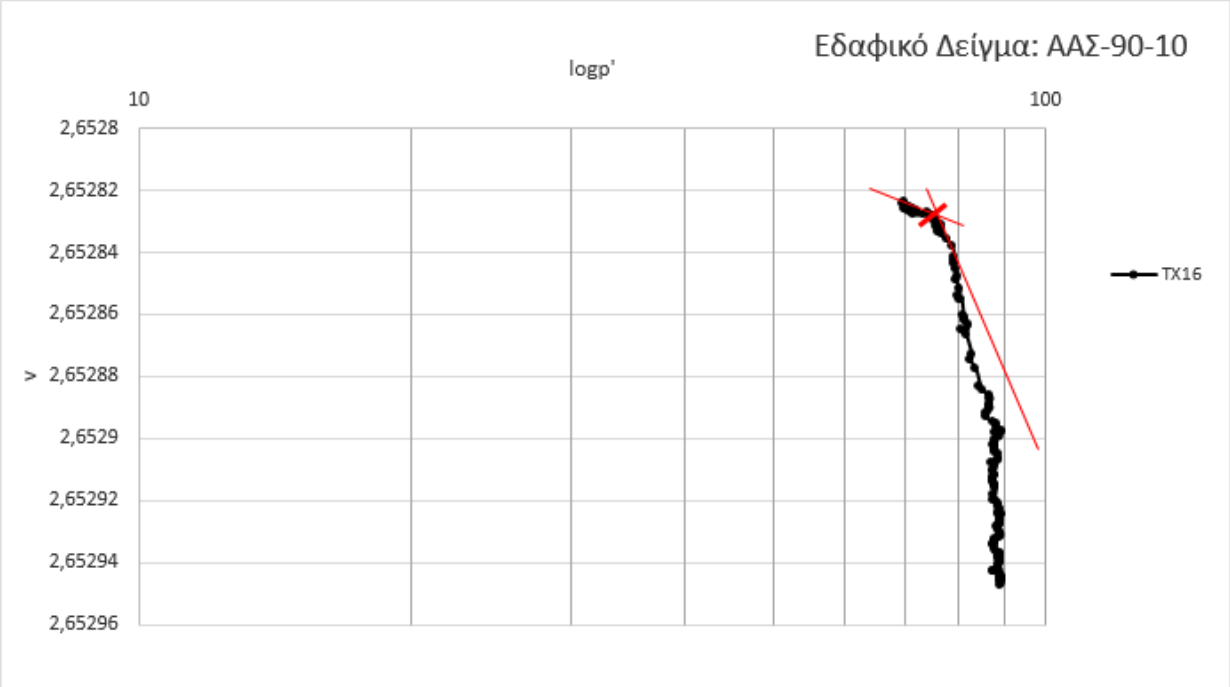
3. *ΙΣΟΤΡΟΠΗ ΣΤΕΡΕΟΠΟΙΗΣΗ : 70 kPa*



Σχήμα 6.38 - ΑΑΣ-90-10 Προσδιορισμός σημείων διαρροής και αστοχίας σε διάγραμμα αποκλίνουσας τάσης–αξονικής παραμόρφωσης από τριαξονική δοκιμή εφελκυσμού σε στραγγιζόμενες συνθήκες με IC=70 kPa

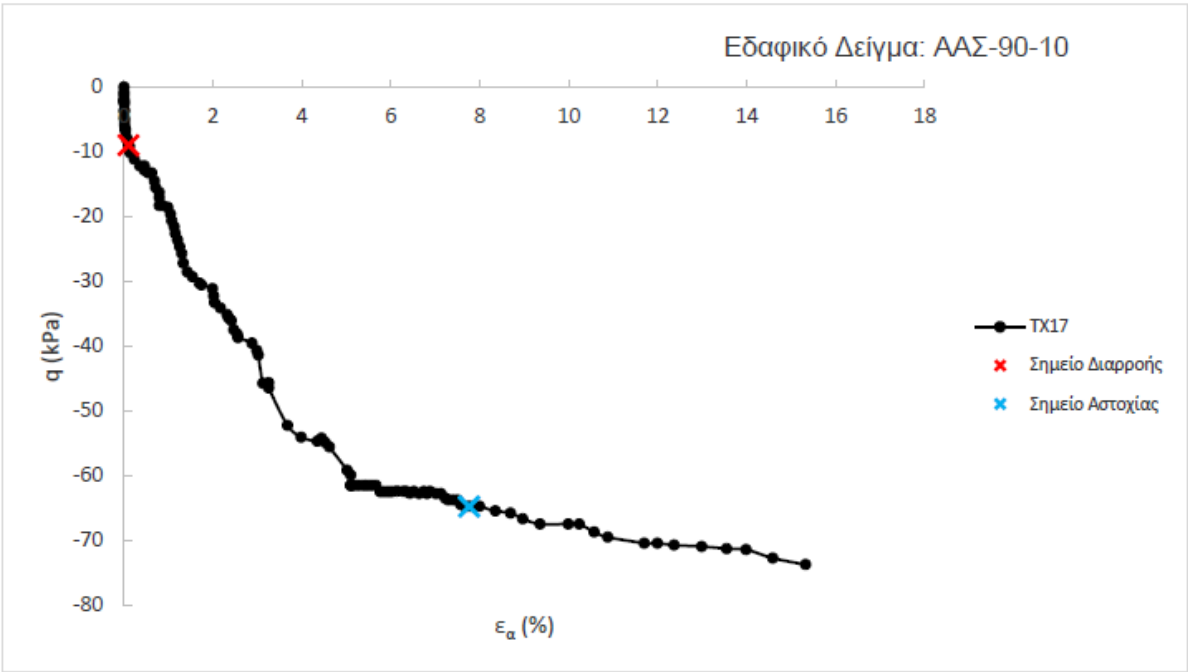


Σχήμα 6.39- ΑΑΣ-90-10 – Καμπύλες μεταβολής όγκου – αξονικής παραμόρφωσης από τριαξονική δοκιμή εφελκυσμού σε στραγγιζόμενες συνθήκες με IC=70 kPa

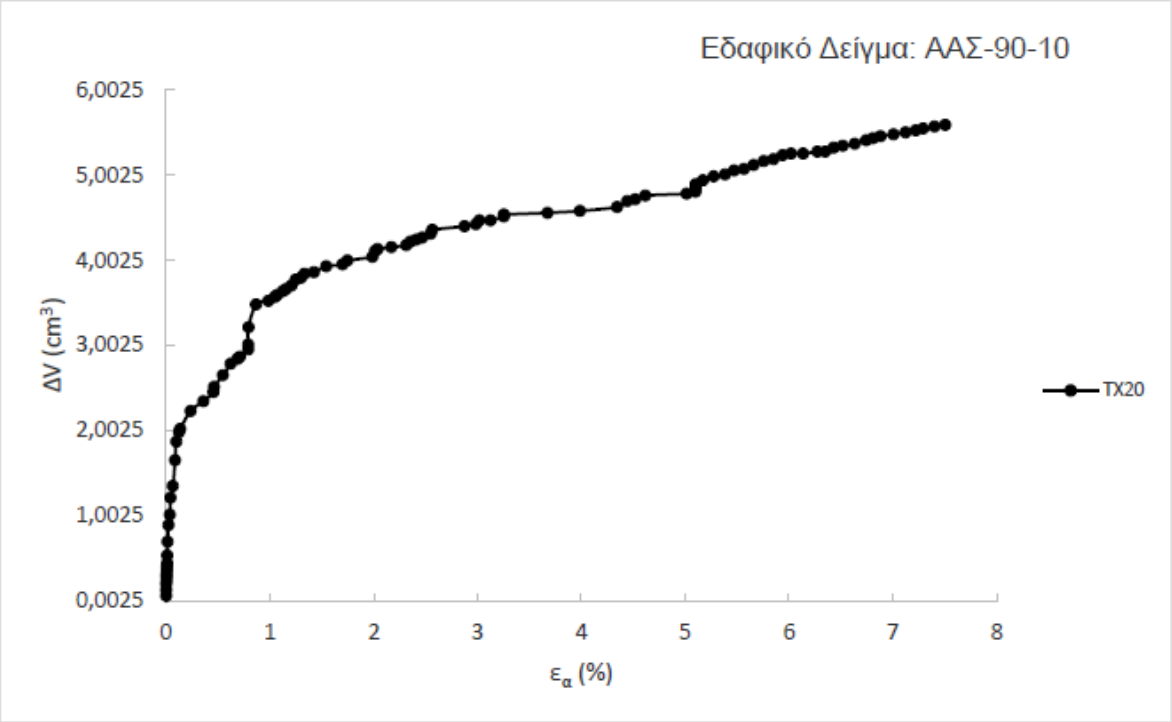


Σχήμα 6.40 - ΑΑΣ-90-10 Προσδιορισμός σημείου διαρροής σε διάγραμμα ειδικού όγκου–ενεργής τάσης από τριαξονική δοκιμή εφελκυσμού σε στραγγιζόμενες συνθήκες με IC=70 kPa

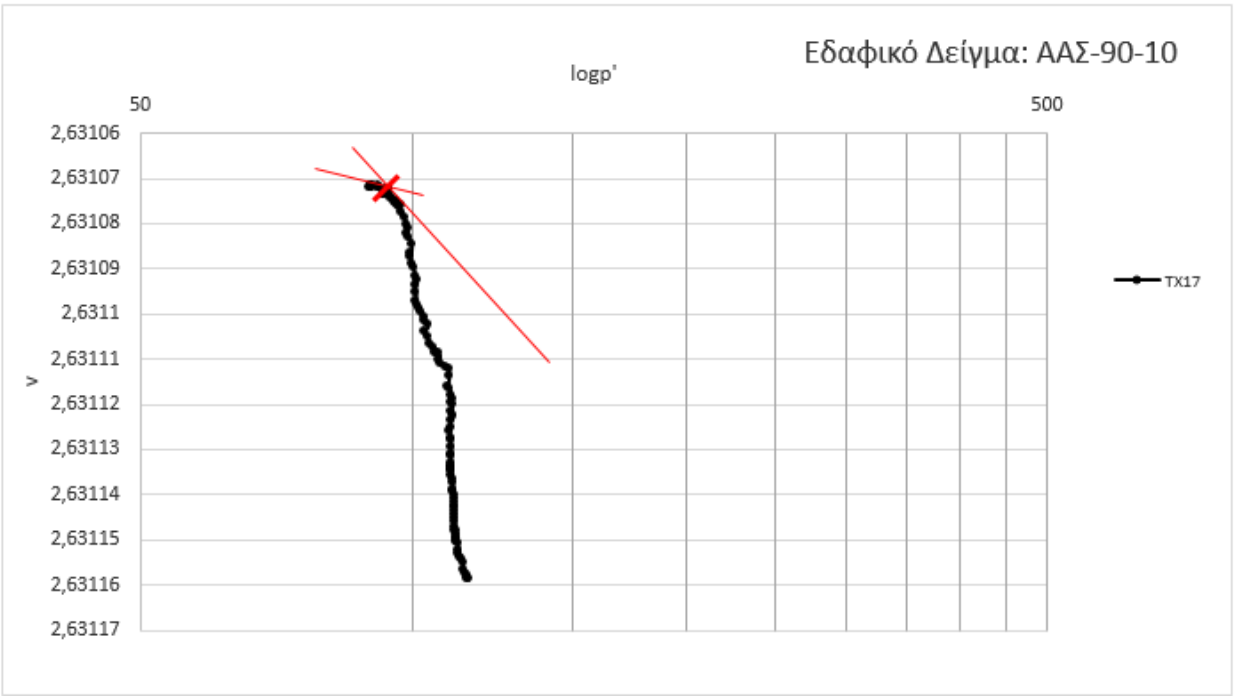
4. ΙΣΟΤΡΟΠΗ ΣΤΕΡΕΟΠΟΙΗΣΗ : 90 kPa



Σχήμα 6.41 - ΑΑΣ-90-10 Προσδιορισμός σημείων διαρροής και αστοχίας σε διάγραμμα αποκλίνουσας τάσης–αξονικής παραμόρφωσης από τριαξονική δοκιμή εφελκυσμού σε στραγγιζόμενες συνθήκες με IC=90 kPa



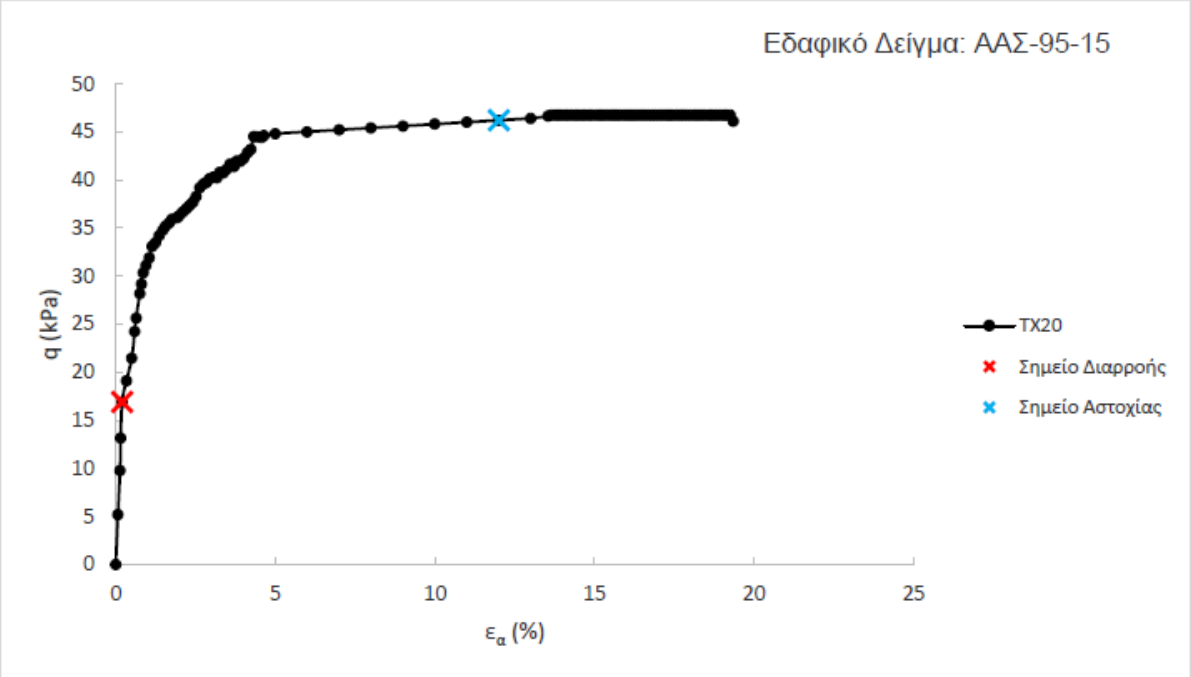
Σχήμα 6.42 - ΑΑΣ-90-10 – Καμπύλες μεταβολής όγκου – αξονικής παραμόρφωσης από τριαξονική δοκιμή εφελκυσμού σε στραγγιζόμενες συνθήκες με IC=90 kPa



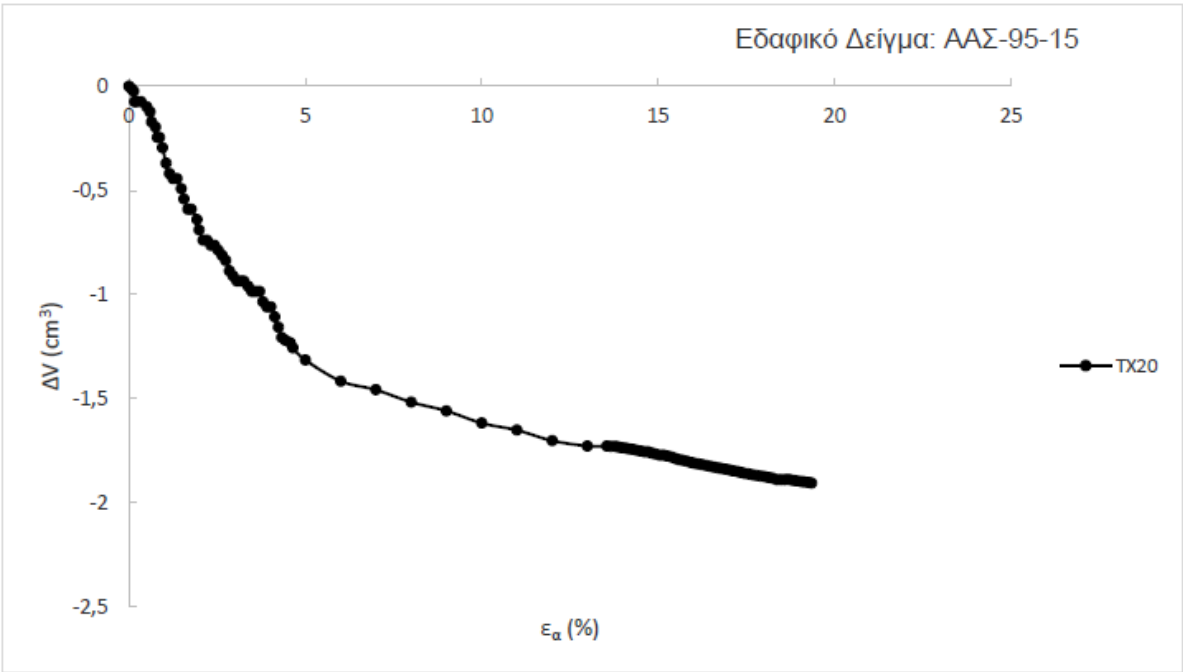
Σχήμα 6.43 - ΑΑΣ-90-10 Προσδιορισμός σημείου διαρροής σε διάγραμμα ειδικού όγκου–ενεργής τάσης από τριαξονική δοκιμή εφελκυσμού σε στραγγιζόμενες συνθήκες με IC=90 kPa

C. <u>Εδαφικό Δείγμα: ΑΑΣ-95-15</u>
<u>ΔΟΚΙΜΕΣ ΘΛΙΨΗΣ</u>

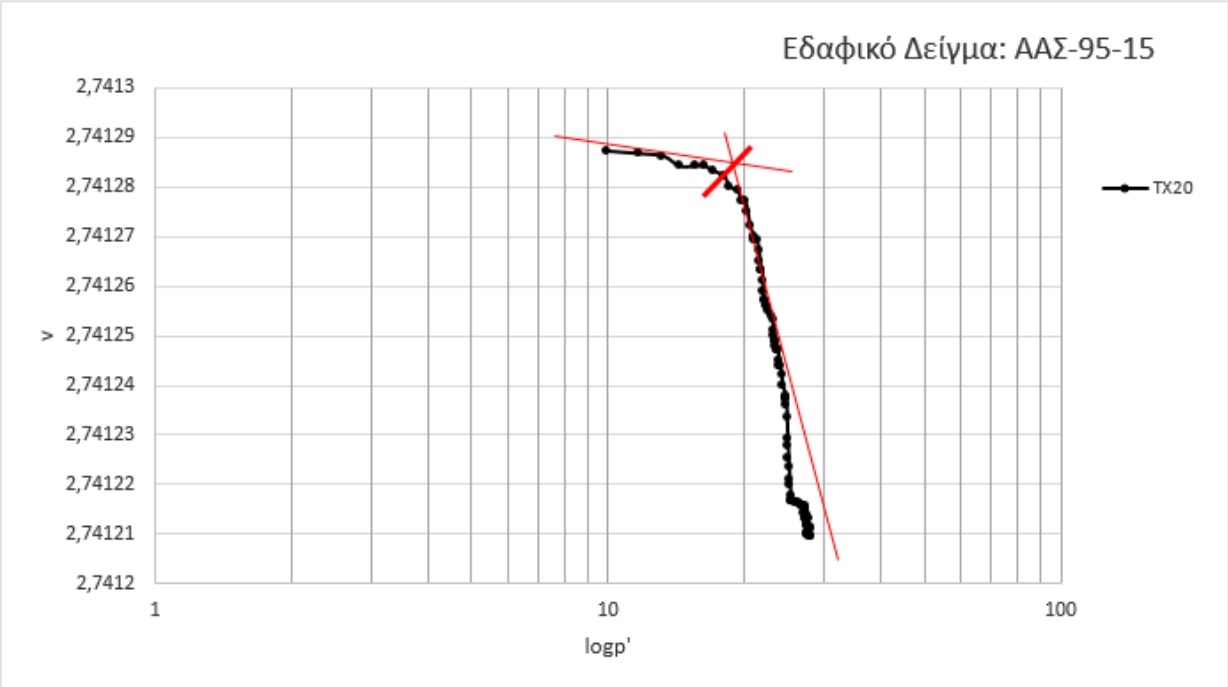
1. ΙΣΟΤΡΟΠΗ ΣΤΕΡΕΟΠΟΙΗΣΗ : 10 kPa



Σχήμα 6.44 - ΑΑΣ-95-15 Προσδιορισμός σημείων διαρροής και αστοχίας σε διάγραμμα αποκλίνουσας τάσης–αξονικής παραμόρφωσης από τριαξονική δοκιμή θλίψης σε στραγγιζόμενες συνθήκες με IC=10 kPa

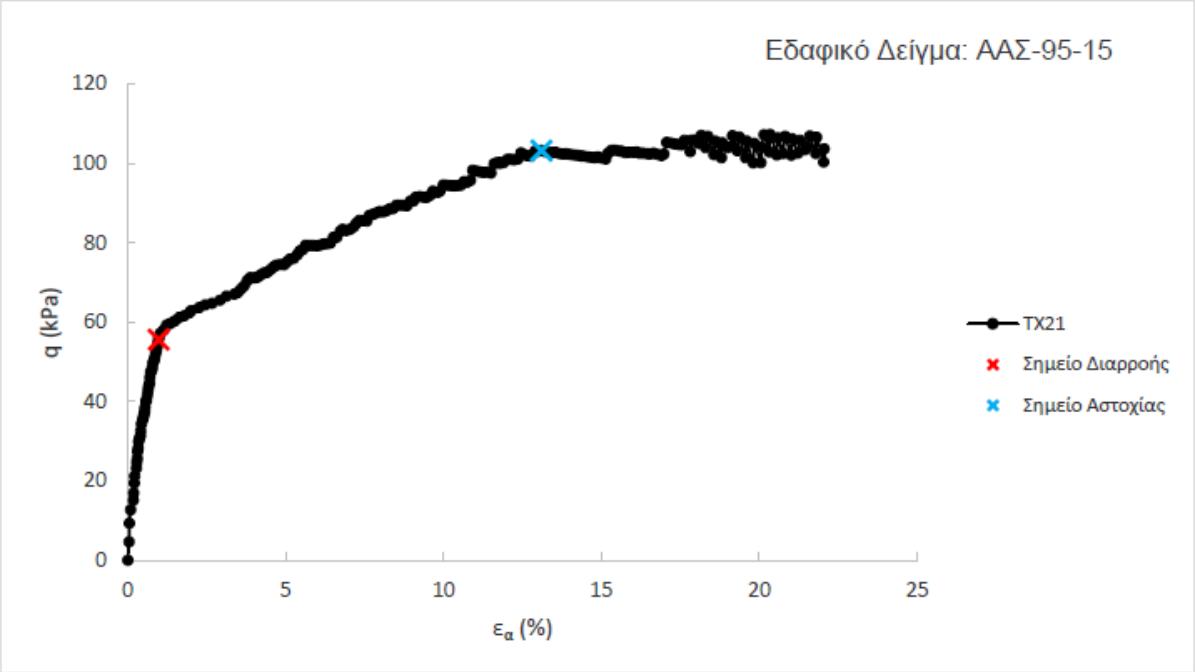


Σχήμα 6.45 - ΑΑΣ-95-15 – Καμπύλες μεταβολής όγκου – αξονικής παραμόρφωσης από τριαξονική δοκιμή θλίψης σε στραγγιζόμενες συνθήκες με IC=10 kPa

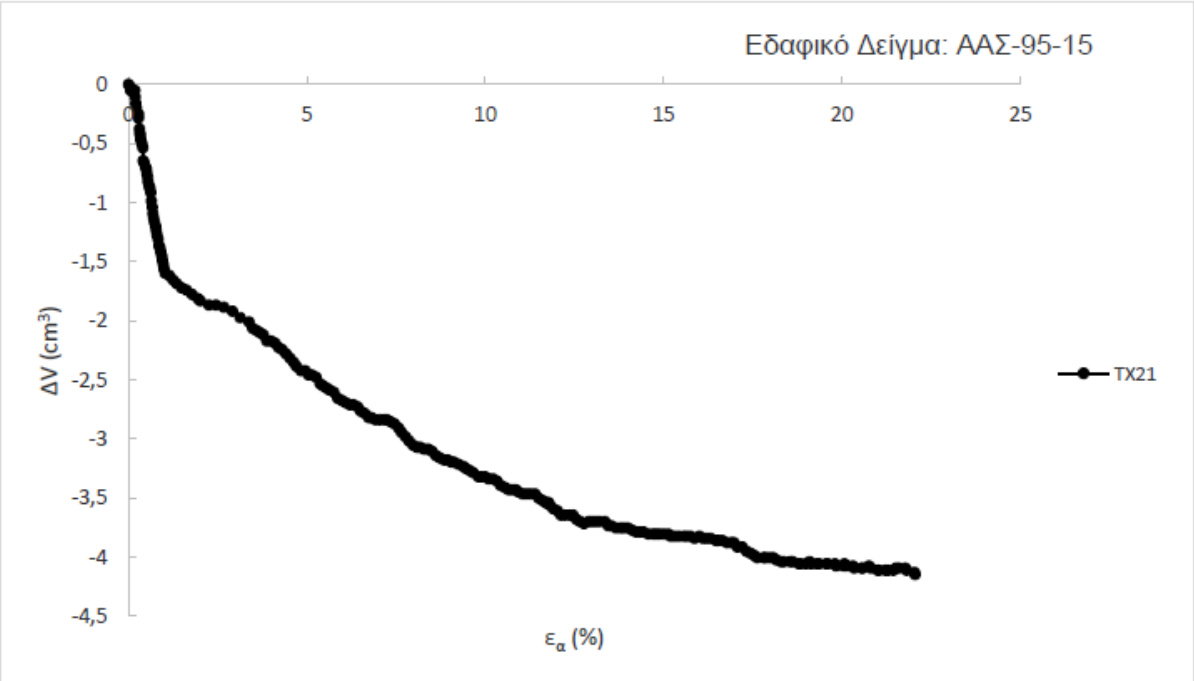


Σχήμα 6.46 - ΑΑΣ-95-15 Προσδιορισμός σημείου διαρροής σε διάγραμμα ειδικού όγκου–ενεργής τάσης από τριαξονική δοκιμή θλίψης σε στραγγιζόμενες συνθήκες με IC=10 kPa

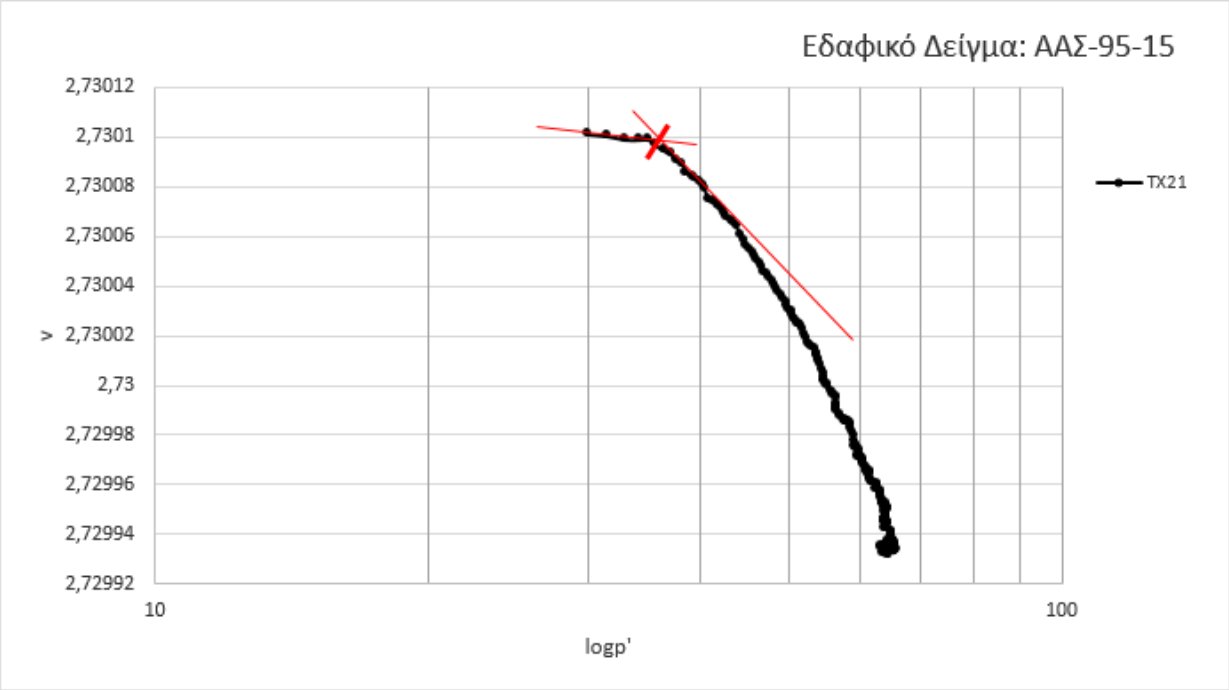
2. ΙΣΟΤΡΟΠΗ ΣΤΕΡΕΟΠΟΙΗΣΗ : 30 kPa



Σχήμα 6.47 - ΑΑΣ-95-15 Προσδιορισμός σημείων διαρροής και αστοχίας σε διάγραμμα αποκλίνουσας τάσης–αξονικής παραμόρφωσης από τριαξονική δοκιμή θλίψης σε στραγγιζόμενες συνθήκες με IC=30 kPa

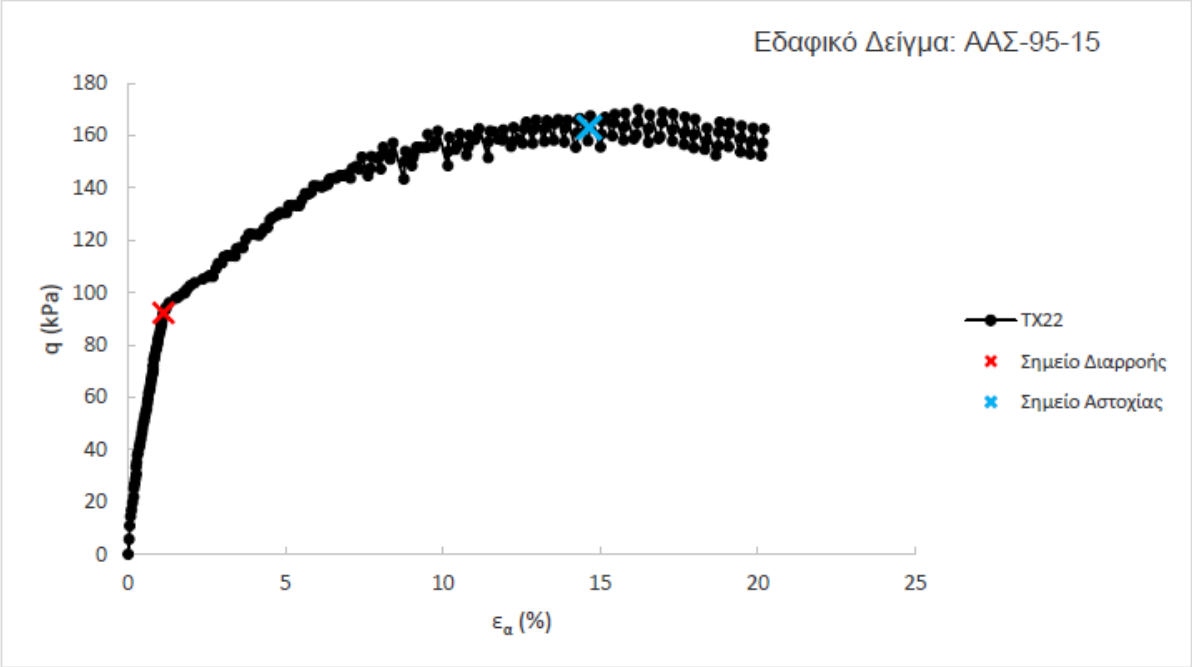


Σχήμα 6.48 - ΑΑΣ-95-15 – Καμπύλες μεταβολής όγκου – αξονικής παραμόρφωσης από τριαξονική δοκιμή θλίψης σε στραγγιζόμενες συνθήκες με IC=30 kPa

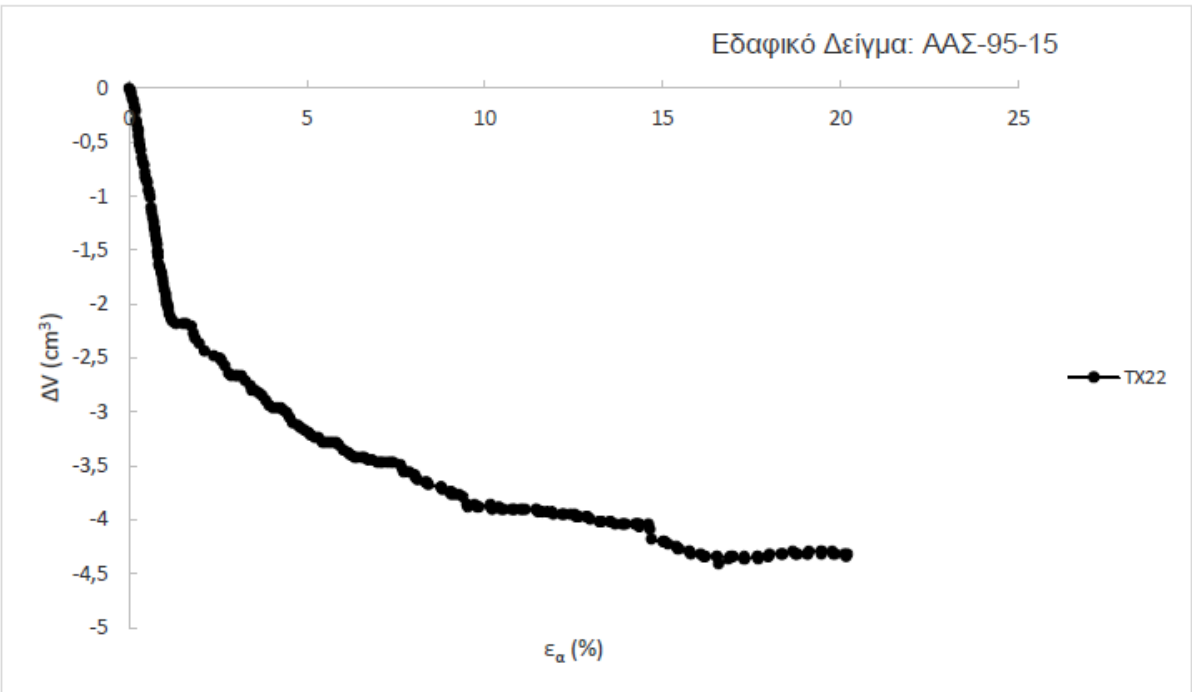


Σχήμα 6.49 - ΑΑΣ-95-15 Προσδιορισμός σημείου διαρροής σε διάγραμμα ειδικού όγκου–ενεργής τάσης από τριαξονική δοκιμή θλίψης σε στραγγιζόμενες συνθήκες με IC=30 kPa

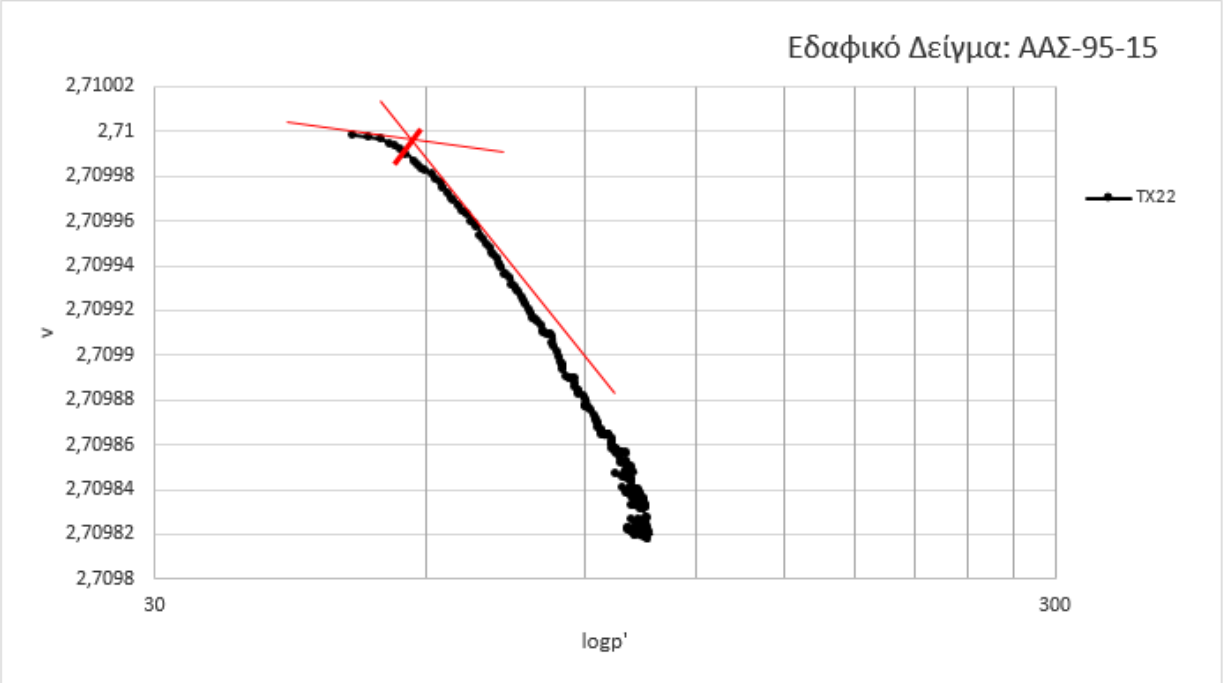
3. ΙΣΟΤΡΟΠΗ ΣΤΕΡΕΟΠΟΙΗΣΗ : 50 kPa



Σχήμα 6.50 - ΑΑΣ-95-15 Προσδιορισμός σημείων διαρροής και αστοχίας σε διάγραμμα αποκλίνουσας τάσης–αξονικής παραμόρφωσης από τριαξονική δοκιμή θλίψης σε στραγγιζόμενες συνθήκες με IC=50 kPa

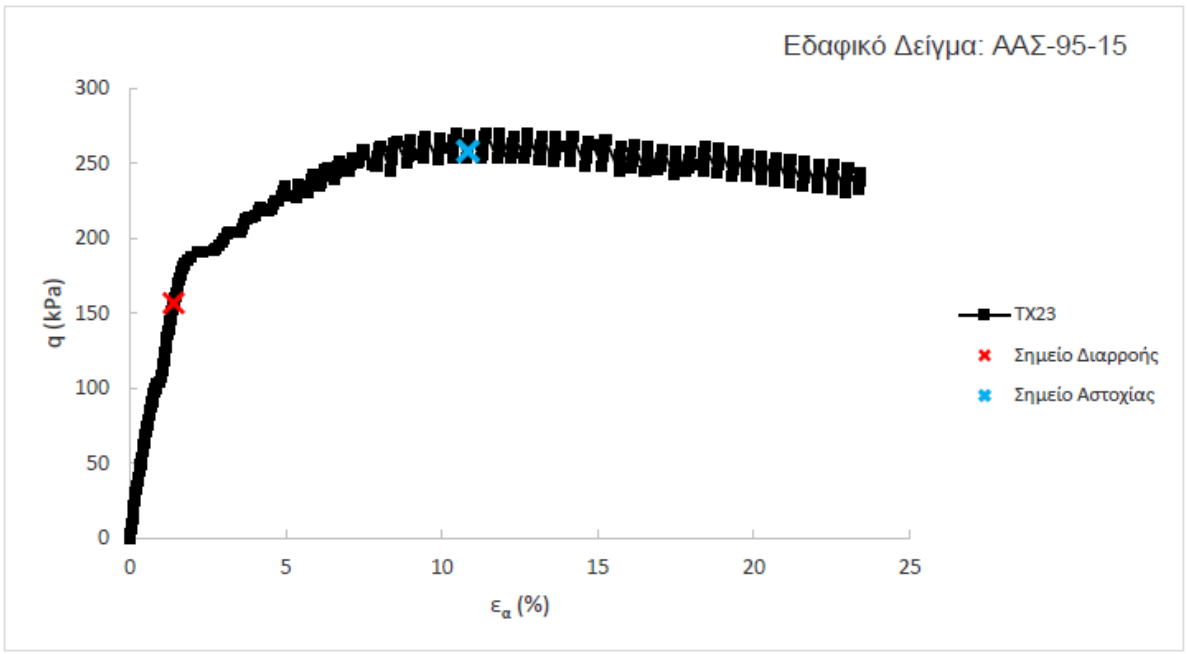


Σχήμα 6.51 - ΑΑΣ-95-15 – Καμπύλες μεταβολής όγκου – αξονικής παραμόρφωσηςαπό τριαξονική δοκιμή θλίψης σε στραγγιζόμενες συνθήκες με IC=50 kPa

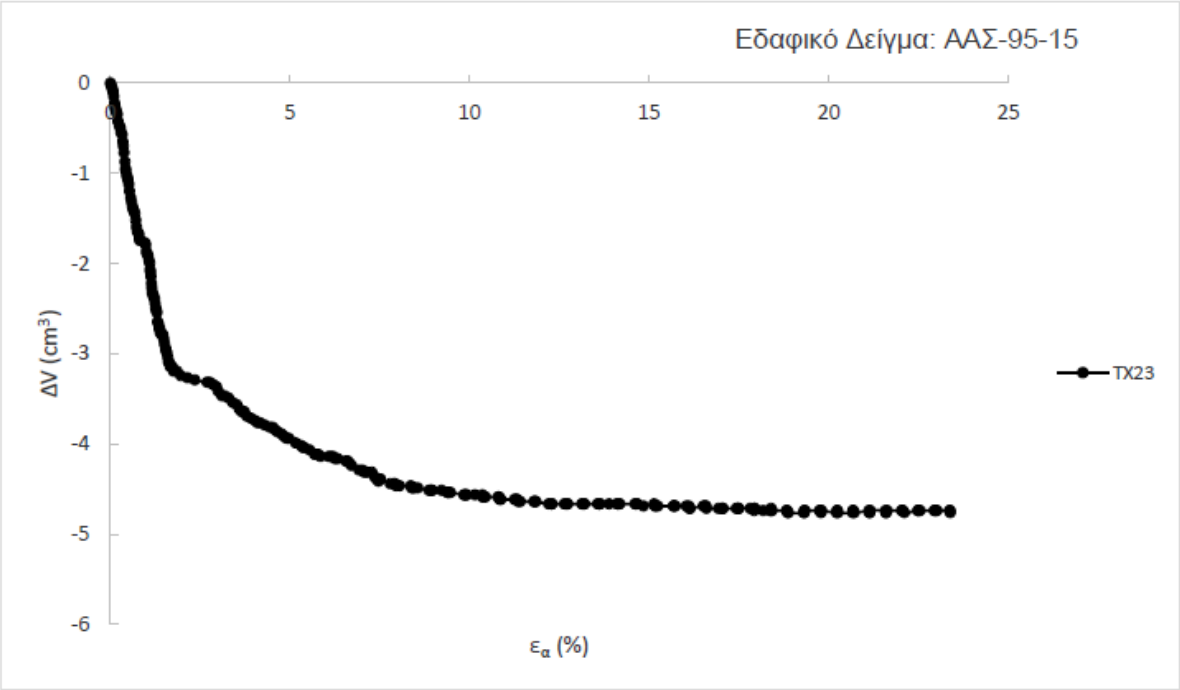


Σχήμα 6.52 - ΑΑΣ-95-15 Προσδιορισμός σημείου διαρροής σε διάγραμμα ειδικού όγκου–ενεργής τάσης από τριαξονική δοκιμή θλίψης σε στραγγιζόμενες συνθήκες με IC=50 kPa

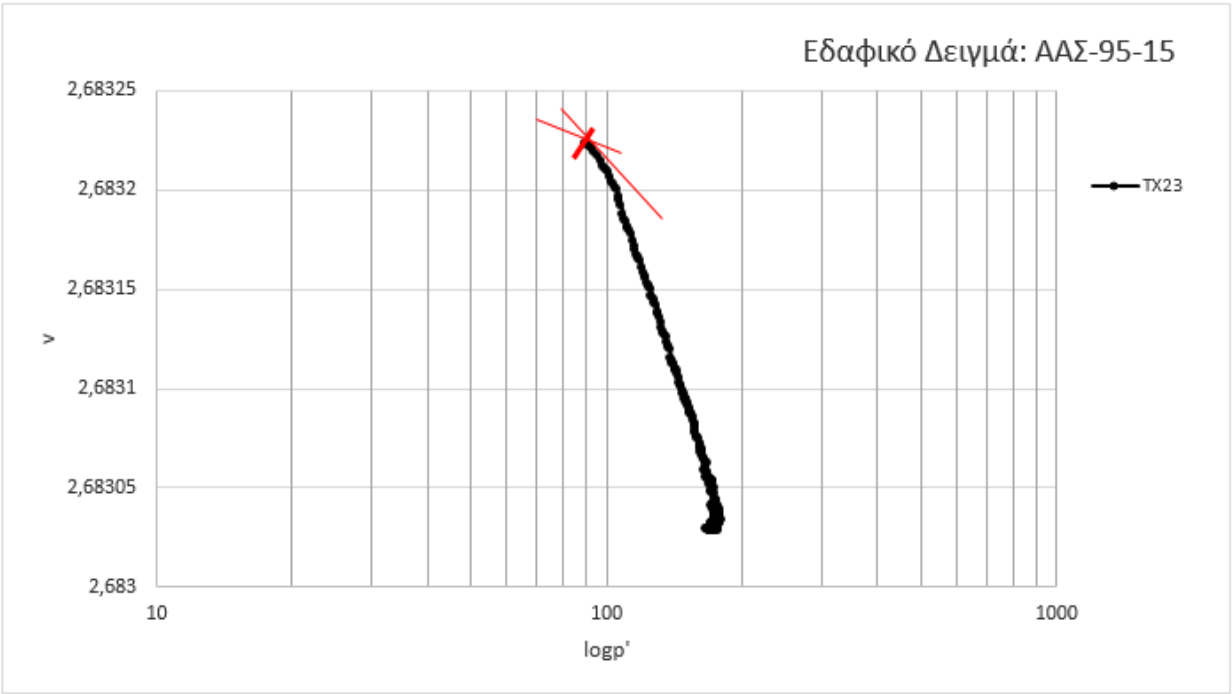
4. ΙΣΟΤΡΟΠΗ ΣΤΕΡΕΟΠΟΙΗΣΗ : 90 kPa



Σχήμα 6.53 - ΑΑΣ-95-15 Προσδιορισμός σημείων διαρροής και αστοχίας σε διάγραμμα αποκλίνουσας τάσης–αξονικής παραμόρφωσης από τριαξονική δοκιμή θλίψης σε στραγγιζόμενες συνθήκες με IC=90 kPa

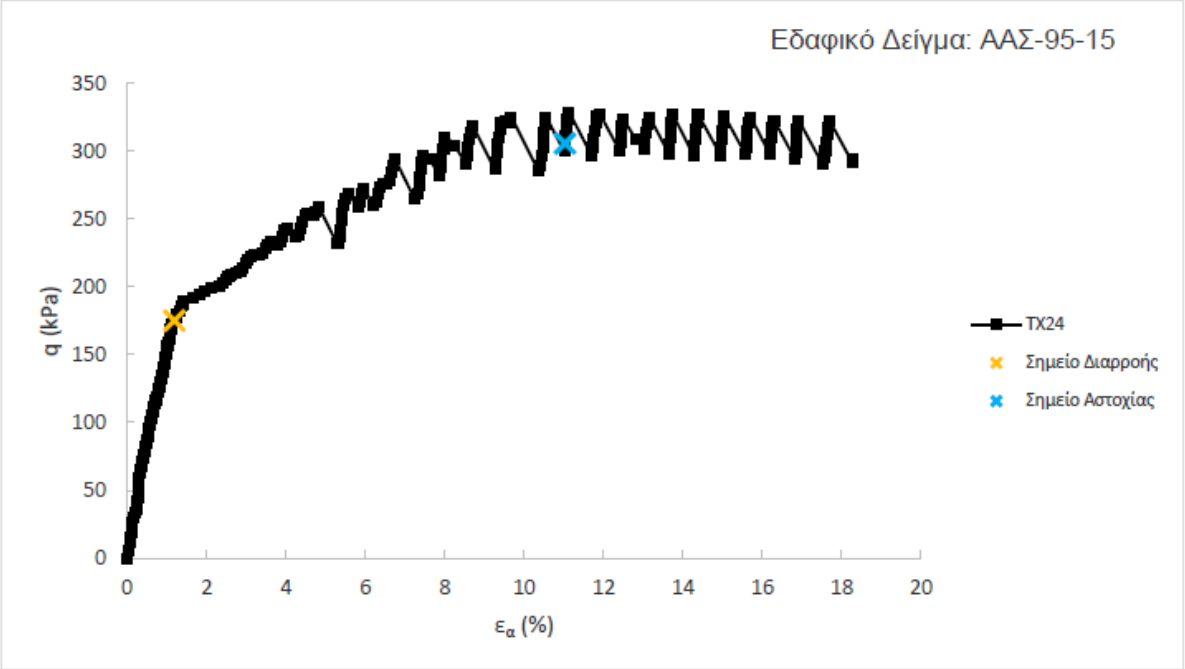


Σχήμα 6.54 - ΑΑΣ-95-15 – Καμπύλες μεταβολής όγκου – αξονικής παραμόρφωσης από τριαξονική δοκιμή θλίψης σε στραγγιζόμενες συνθήκες με IC=90 kPa

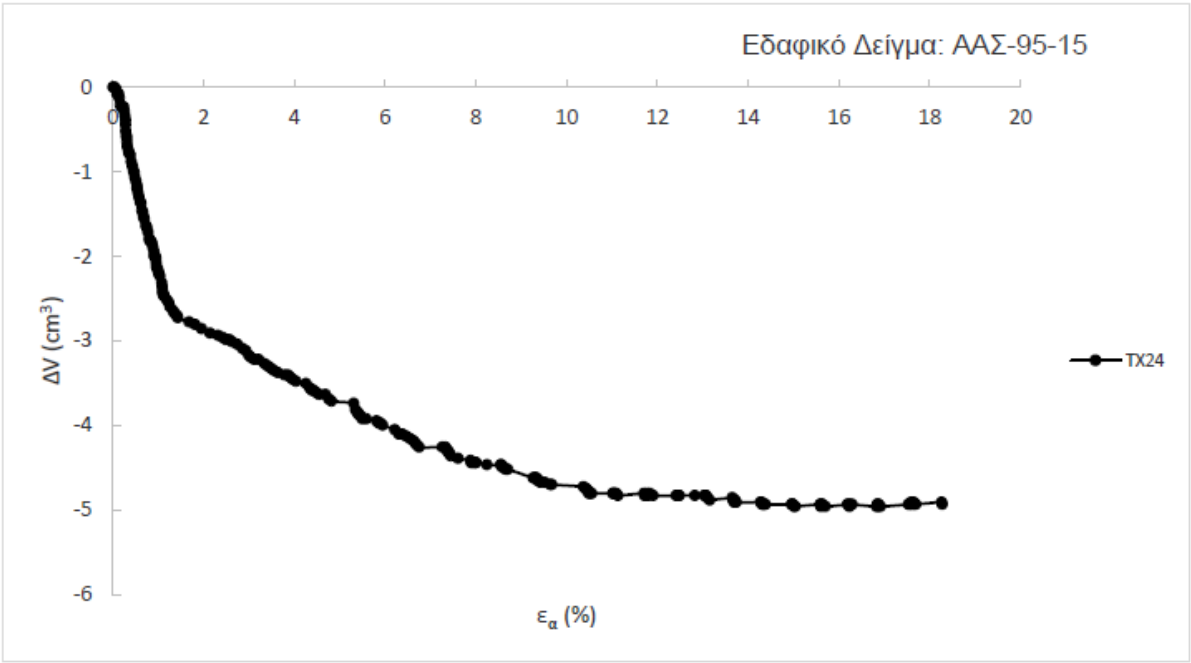


Σχήμα 6.55 - ΑΑΣ-95-15 Προσδιορισμός σημείου διαρροής σε διάγραμμα ειδικού όγκου–ενεργής τάσης από τριαξονική δοκιμή θλίψης σε στραγγιζόμενες συνθήκες με IC=90 kPa

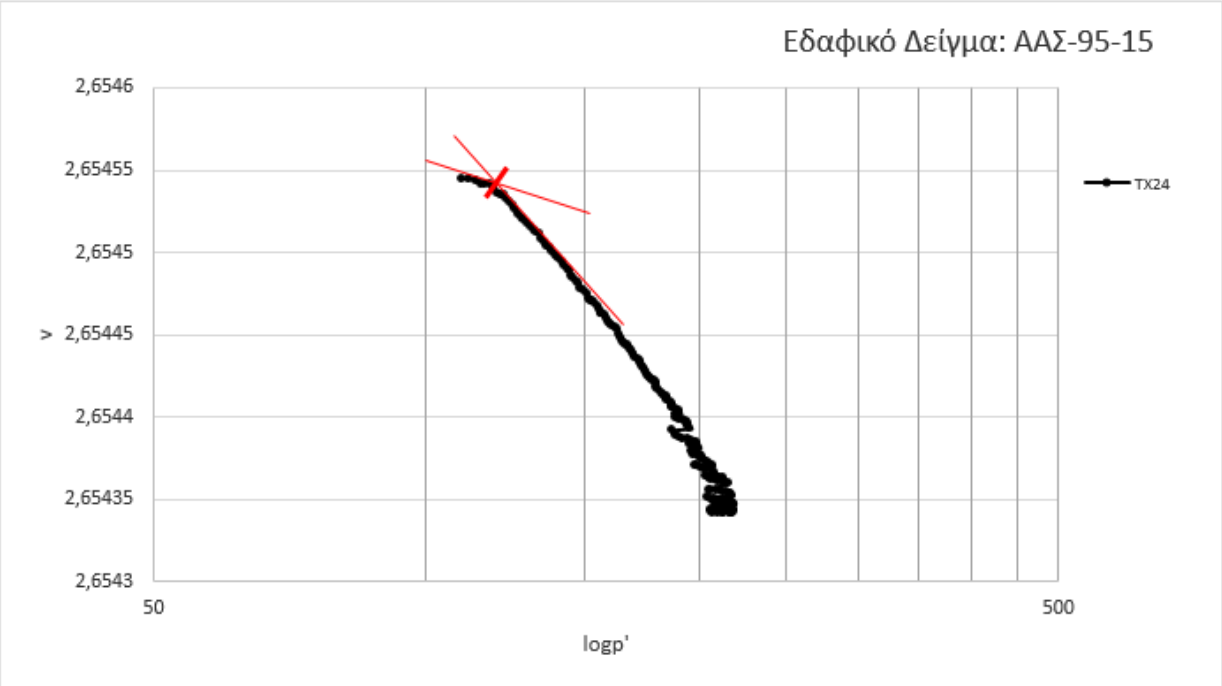
5. *ΙΣΟΤΡΟΠΗ ΣΤΕΡΕΟΠΟΙΗΣΗ : 110 kPa*



Σχήμα 6.56 - ΑΑΣ-95-15 Προσδιορισμός σημείων διαρροής και αστοχίας σε διάγραμμα αποκλίνουσας τάσης–αξονικής παραμόρφωσης από τριαξονική δοκιμή θλίψης σε στραγγιζόμενες συνθήκες με IC=110 kPa



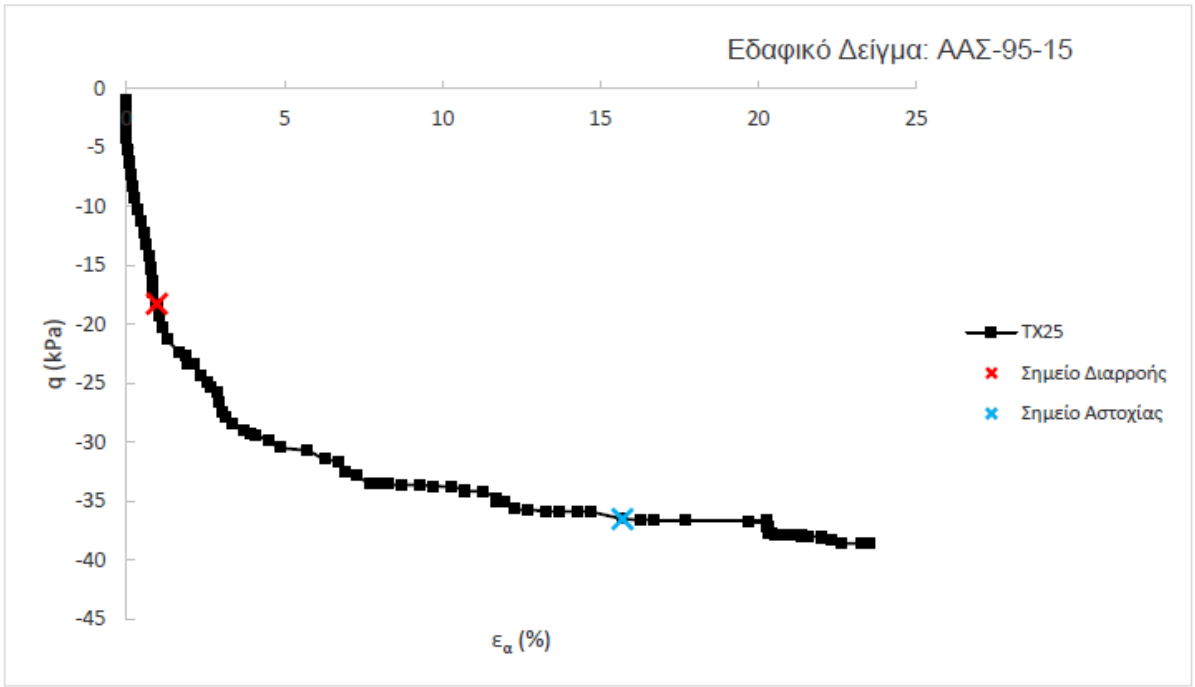
Σχήμα 6.57 - ΑΑΣ-95-15 – Καμπύλες μεταβολής όγκου – αξονικής παραμόρφωσης από τριαξονική δοκιμή θλίψης σε στραγγιζόμενες συνθήκες με IC=110 kPa



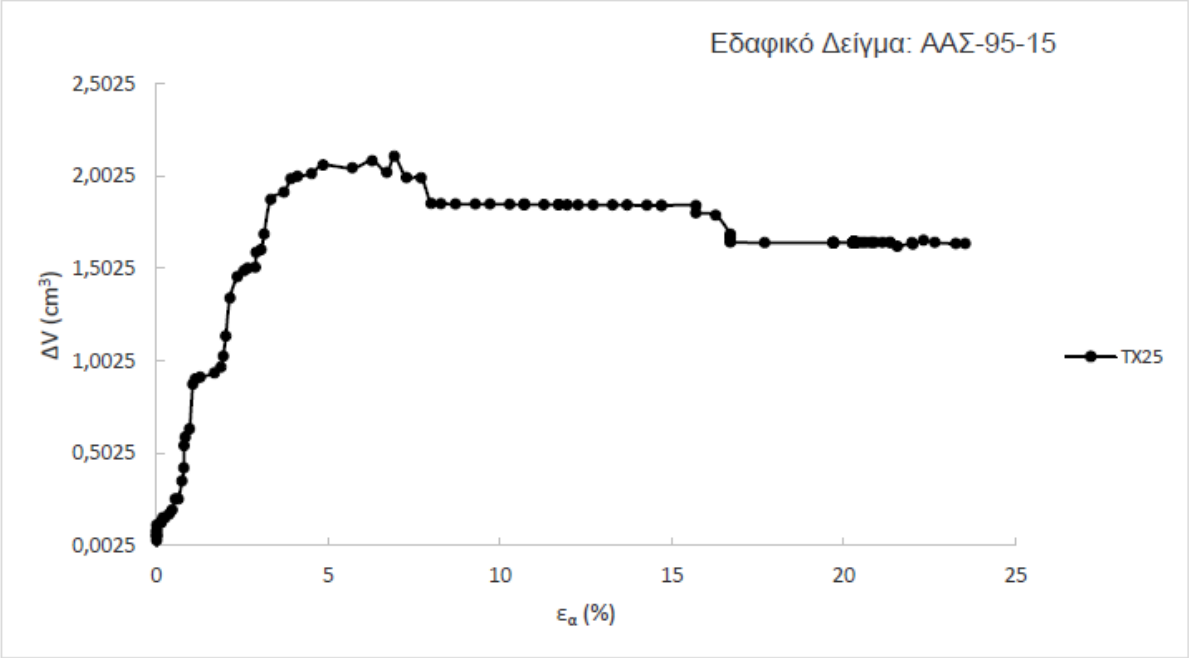
Σχήμα 6.58 - ΑΑΣ-95-15 Προσδιορισμός σημείου διαρροής σε διάγραμμα ειδικού όγκου–ενεργής τάσης από τριαξονική δοκιμή θλίψης σε στραγγιζόμενες συνθήκες με IC=110 kPa

ΔΟΚΙΜΕΣ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΥ

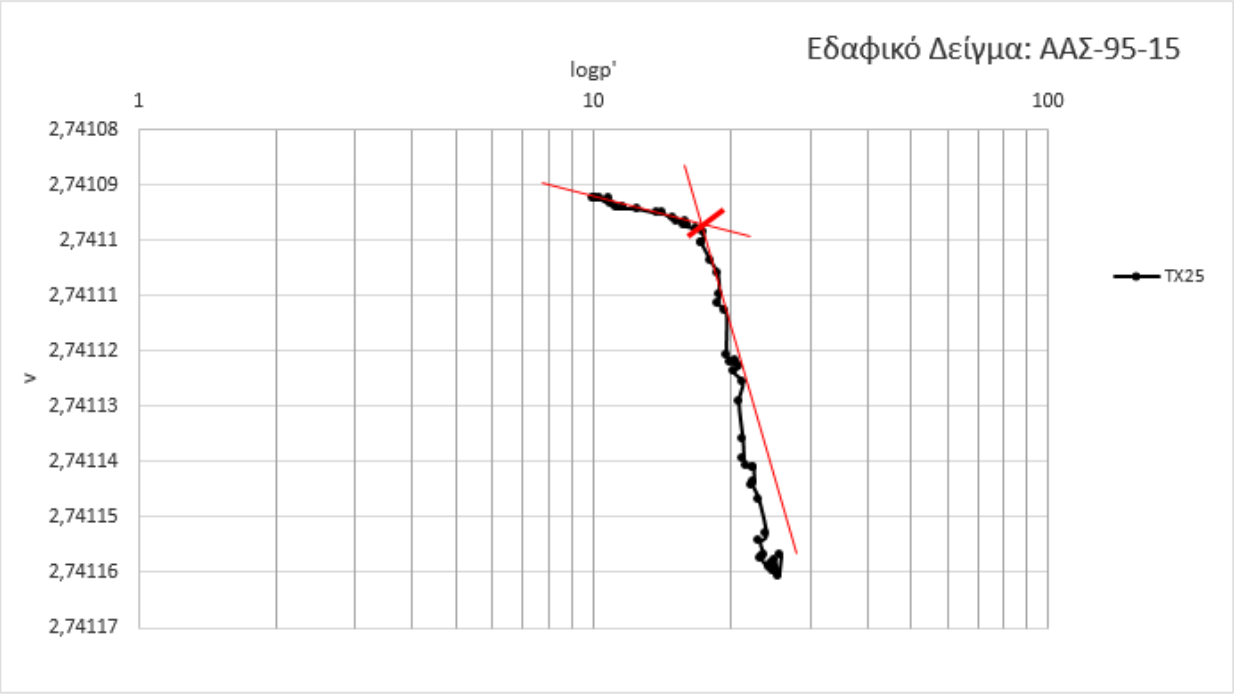
1. ***ΙΣΟΤΡΟΠΗ ΣΤΕΡΕΟΠΟΙΗΣΗ : 10 kPa***



Σχήμα 6.59 - ΑΑΣ-95-15 Προσδιορισμός σημείων διαρροής και αστοχίας σε διάγραμμα αποκλίνουσας τάσης–αξονικής παραμόρφωσης από τριαξονική δοκιμή εφελκυσμού σε στραγγιζόμενες συνθήκες με IC=10 kPa

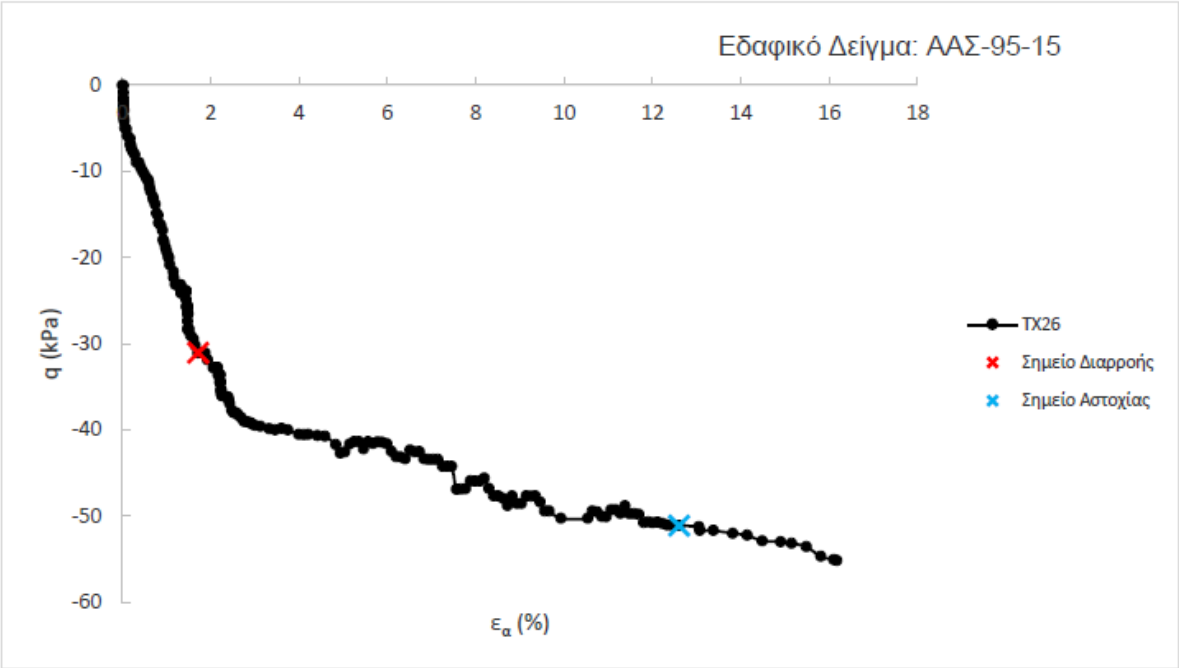


Σχήμα 6.60 - ΑΑΣ-95-15 – Καμπύλες μεταβολής όγκου – αξονικής παραμόρφωσης από τριαξονική δοκιμή εφελκυσμού σε στραγγιζόμενες συνθήκες με IC=10 kPa

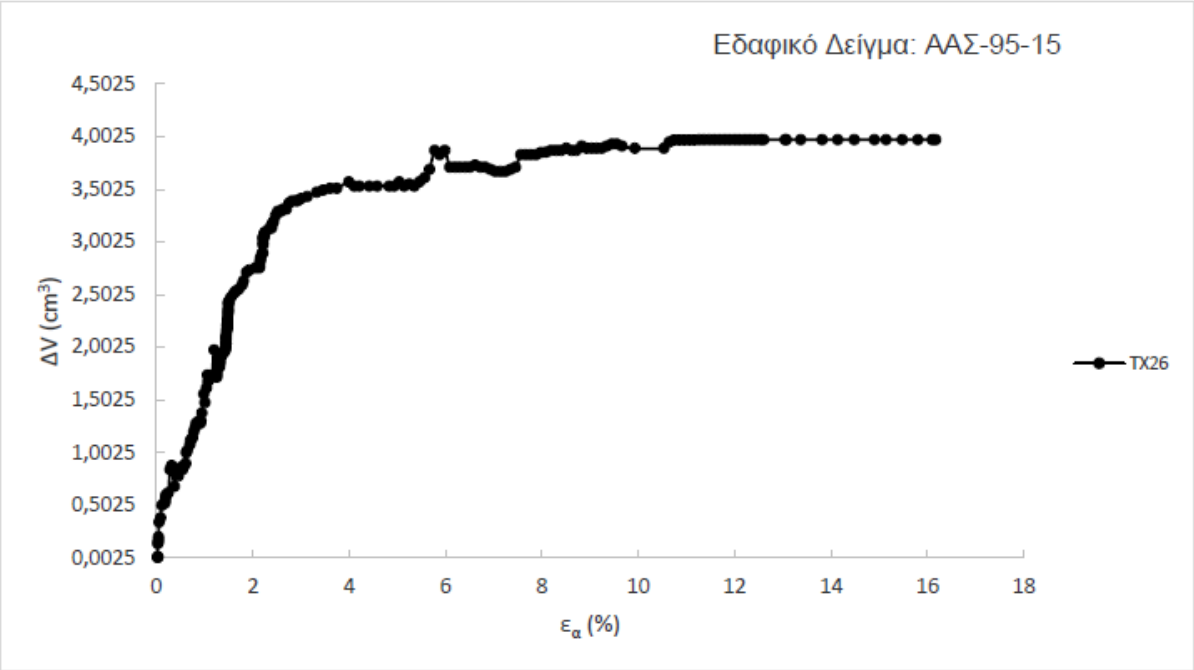


Σχήμα 6.61 - ΑΑΣ-95-15 Προσδιορισμός σημείου διαρροής σε διάγραμμα ειδικού όγκου–ενεργής τάσης από τριαξονική δοκιμή εφελκυσμού σε στραγγιζόμενες συνθήκες με IC=10 kPa

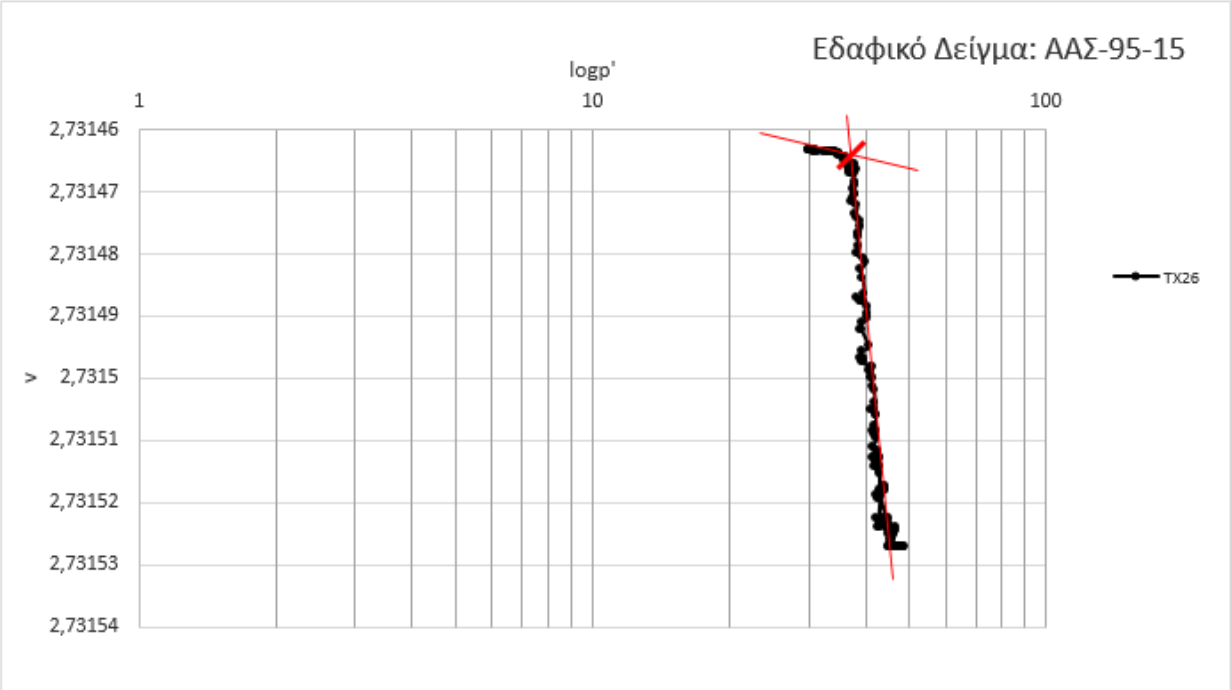
2. *ΙΣΟΤΡΟΠΗ ΣΤΕΡΕΟΠΟΙΗΣΗ : 30 kPa*



Σχήμα 6.62 - ΑΑΣ-95-15 Προσδιορισμός σημείων διαρροής και αστοχίας σε διάγραμμα αποκλίνουσας τάσης–αξονικής παραμόρφωσης από τριαξονική δοκιμή εφελκυσμού σε στραγγιζόμενες συνθήκες με IC=30 kPa

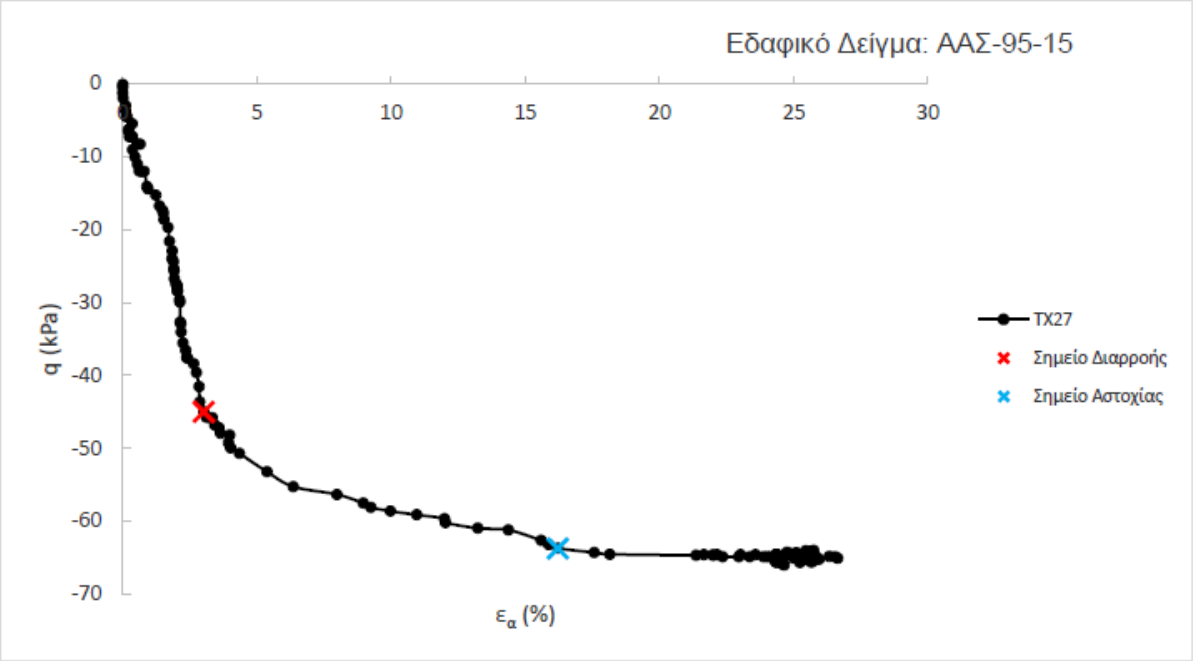


Σχήμα 6.63 - ΑΑΣ-95-15 – Καμπύλες μεταβολής όγκου – αξονικής παραμόρφωσης από τριαξονική δοκιμή εφελκυσμού σε στραγγιζόμενες συνθήκες με IC=30 kPa

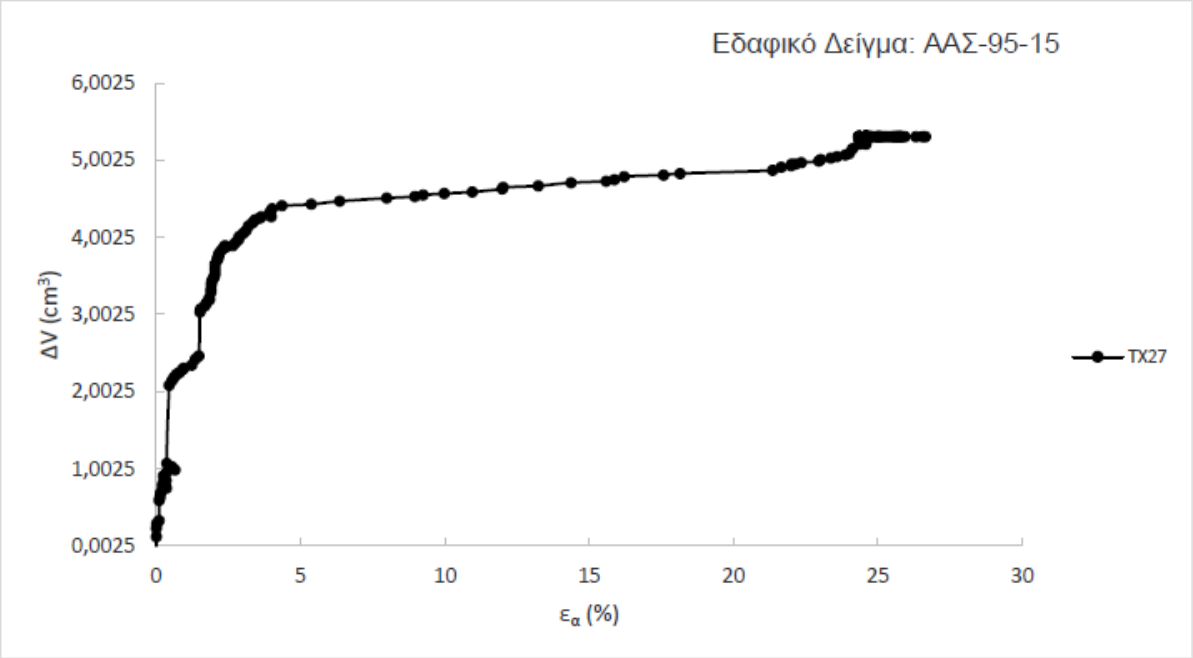


Σχήμα 6.64 - ΑΑΣ-95-15 Προσδιορισμός σημείου διαρροής σε διάγραμμα ειδικού όγκου–ενεργής τάσης από τριαξονική δοκιμή εφελκυσμού σε στραγγιζόμενες συνθήκες με IC=30 kPa

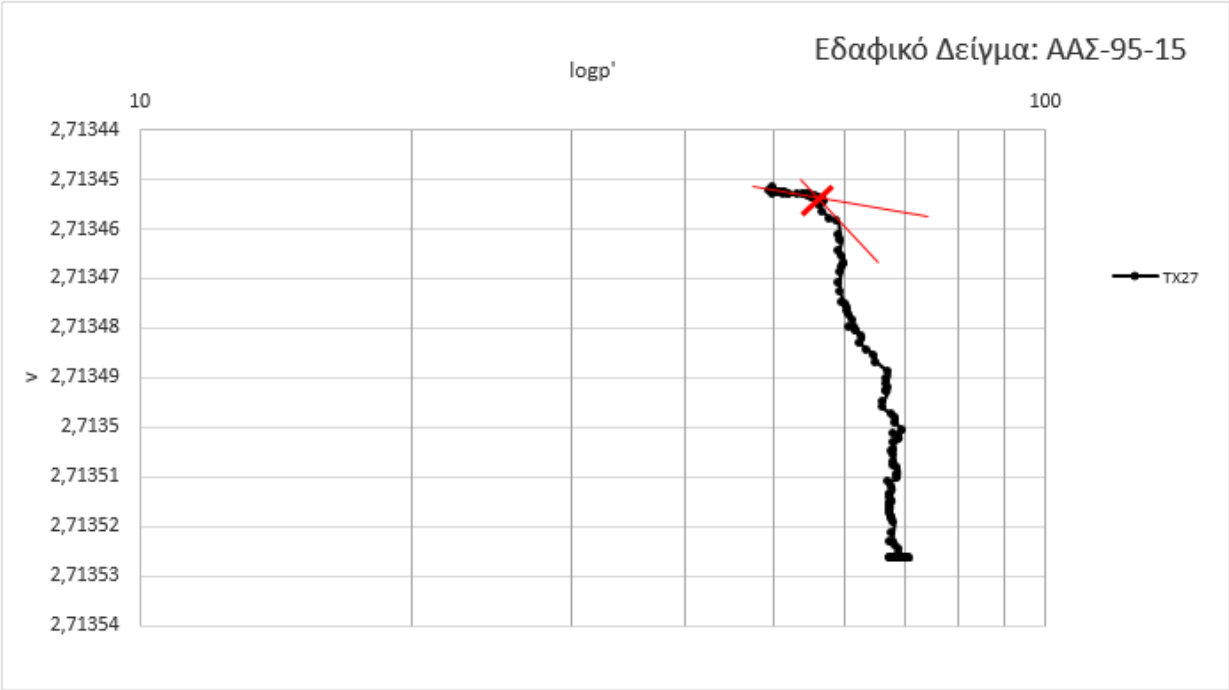
3. ΙΣΟΤΡΟΠΗ ΣΤΕΡΕΟΠΟΙΗΣΗ : 70 kPa



Σχήμα 6.65 - ΑΑΣ-95-15 Προσδιορισμός σημείων διαρροής και αστοχίας σε διάγραμμα αποκλίνουσας τάσης–αξονικής παραμόρφωσης από τριαξονική δοκιμή εφελκυσμού σε στραγγιζόμενες συνθήκες με IC=70 kPa

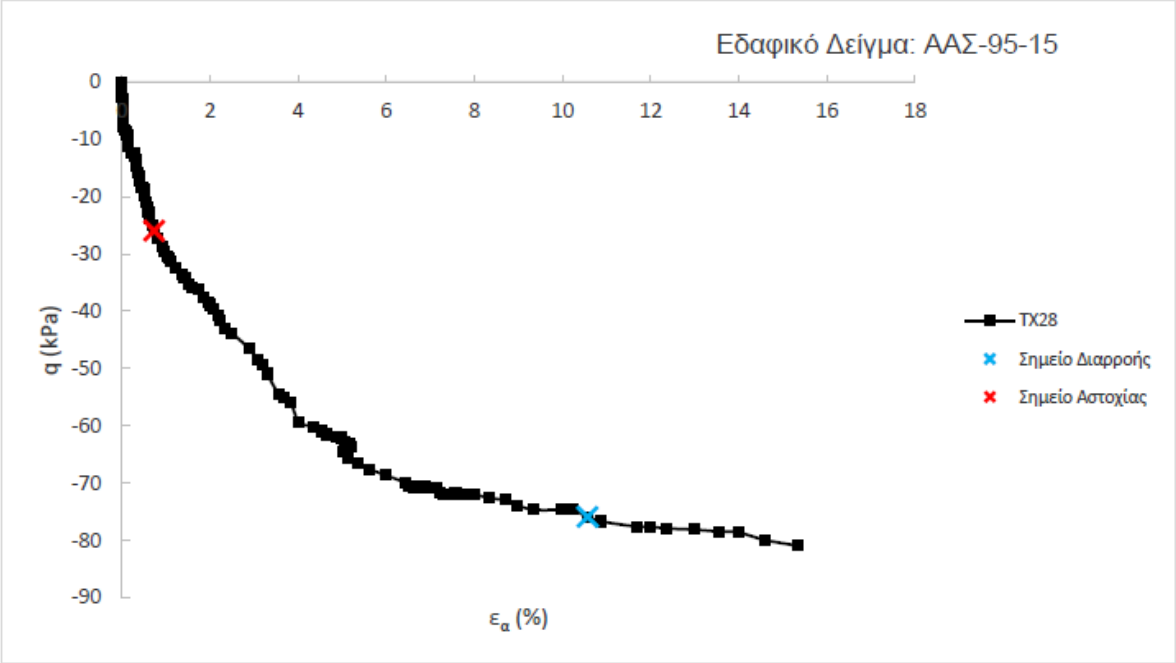


Σχήμα 6.66 - ΑΑΣ-95-15 – Καμπύλες μεταβολής όγκου – αξονικής παραμόρφωσηςαπό τριαξονική δοκιμή εφελκυσμού σε στραγγιζόμενες συνθήκες με IC=70 kPa

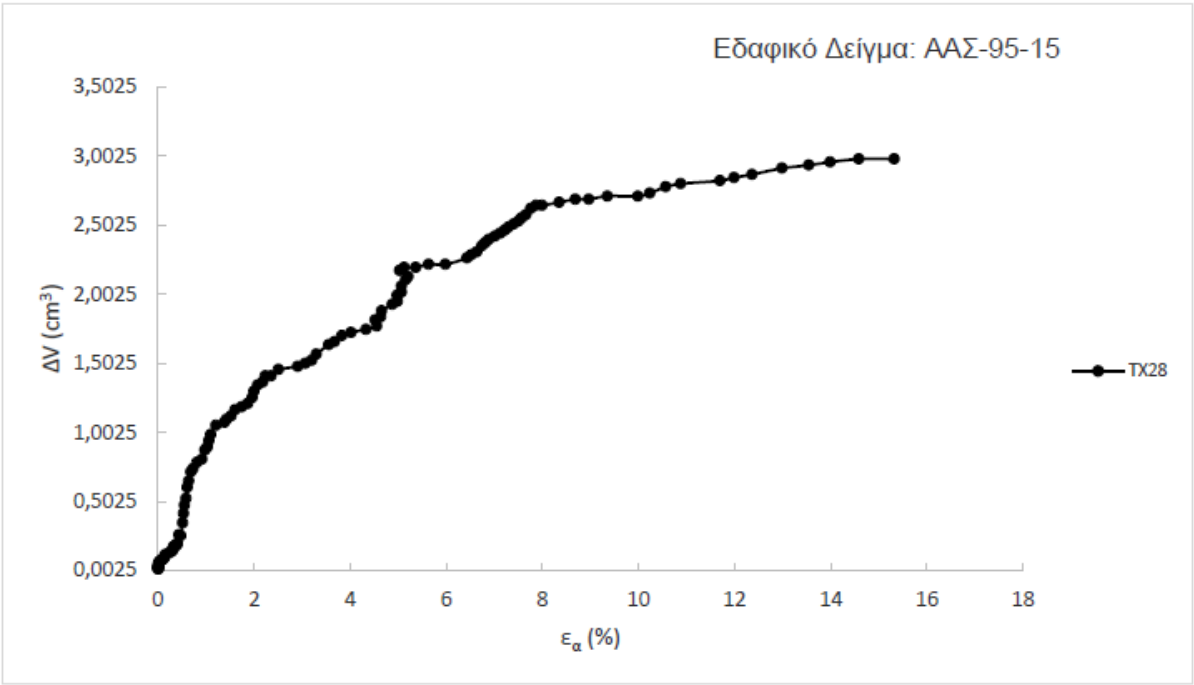


Σχήμα 6.67 - ΑΑΣ-95-15 Προσδιορισμός σημείου διαρροής σε διάγραμμα ειδικού όγκου–ενεργής τάσης από τριαξονική δοκιμή εφελκυσμού σε στραγγιζόμενες συνθήκες με IC=70 kPa

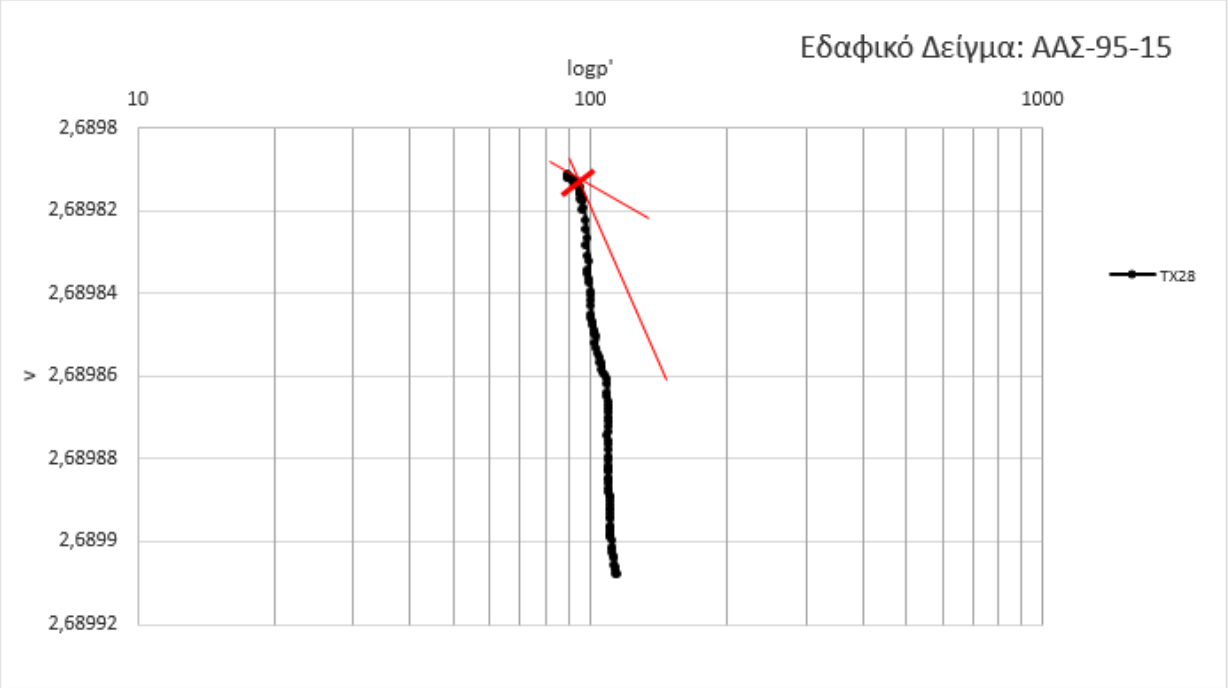
4. *ΙΣΟΤΡΟΠΗ ΣΤΕΡΕΟΠΟΙΗΣΗ : 90 kPa*



Σχήμα 6.68 - ΑΑΣ-95-15 Προσδιορισμός σημείων διαρροής και αστοχίας σε διάγραμμα αποκλίνουσας τάσης–αξονικής παραμόρφωσης από τριαξονική δοκιμή εφελκυσμού σε στραγγιζόμενες συνθήκες με IC=90 kPa

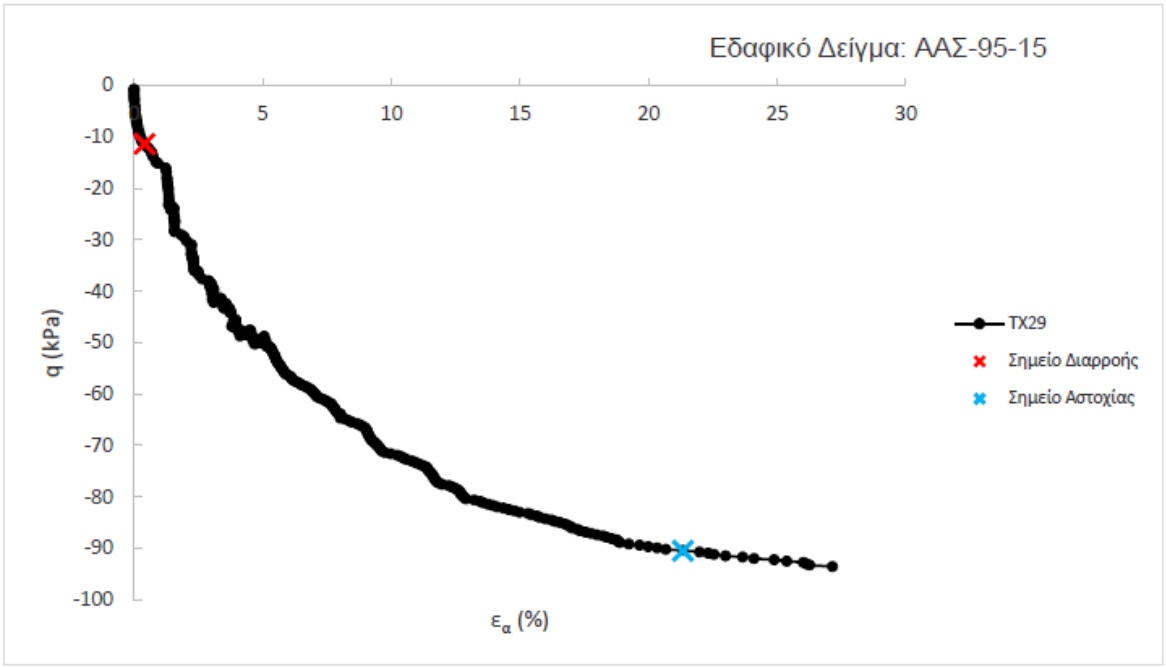


Σχήμα 6.69 - ΑΑΣ-95-15 – Καμπύλες μεταβολής όγκου – αξονικής παραμόρφωσης από τριαξονική δοκιμή εφελκυσμού σε στραγγιζόμενες συνθήκες με IC=90 kPa

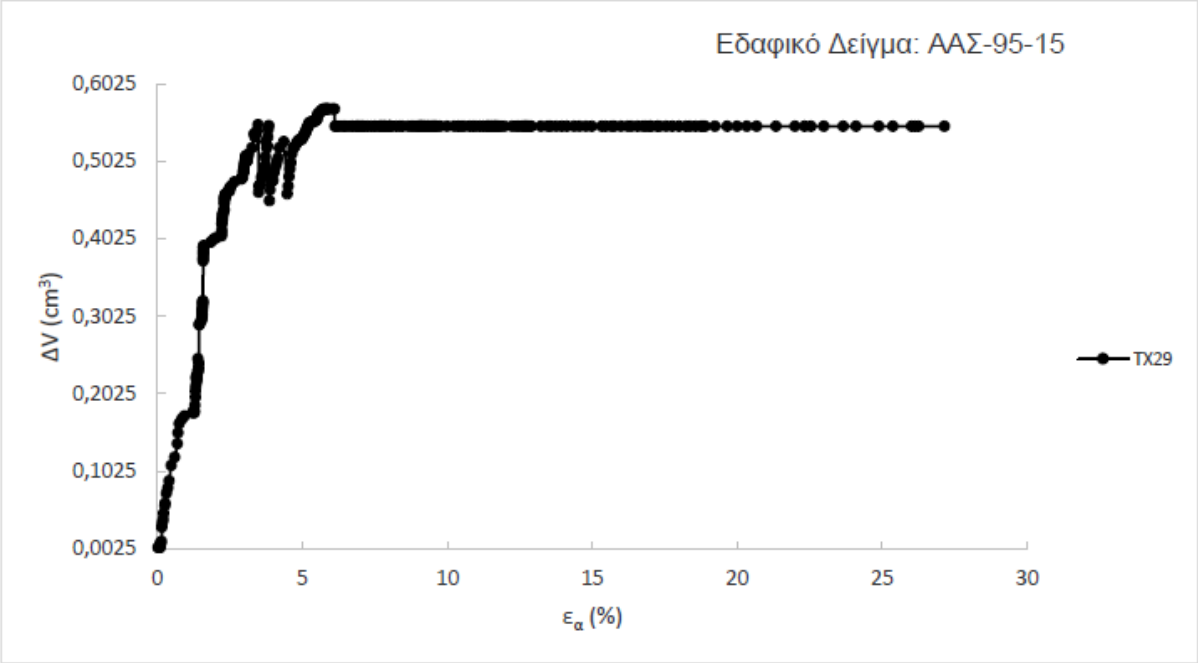


Σχήμα 6.70 - ΑΑΣ-95-15 Προσδιορισμός σημείου διαρροής σε διάγραμμα ειδικού όγκου–ενεργής τάσης από τριαξονική δοκιμή εφελκυσμού σε στραγγιζόμενες συνθήκες με IC=90 kPa

5. ΙΣΟΤΡΟΠΗ ΣΤΕΡΕΟΠΟΙΗΣΗ : 110 kPa



Σχήμα 6.71 - ΑΑΣ-95-15 Προσδιορισμός σημείων διαρροής και αστοχίας σε διάγραμμα αποκλίνουσας τάσης–αξονικής παραμόρφωσης από τριαξονική δοκιμή εφελκυσμού σε στραγγιζόμενες συνθήκες με IC=110 kPa



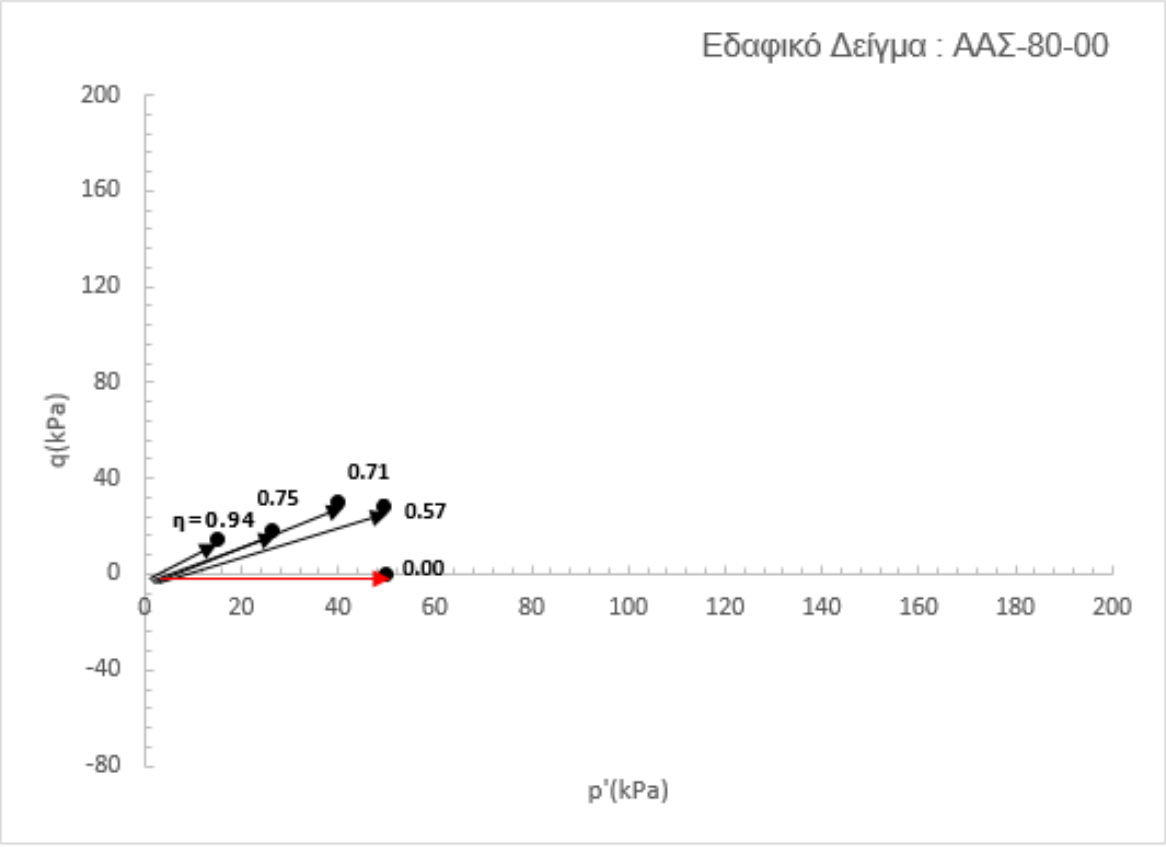
Σχήμα 6.72 - ΑΑΣ-95-15 – Καμπύλες μεταβολής όγκου – αξονικής παραμόρφωσης από τριαξονική δοκιμή εφελκυσμού σε στραγγιζόμενες συνθήκες με IC=110 kPa

Σχήμα 6.73 - ΑΑΣ-95-15 Προσδιορισμός σημείου διαρροής σε διάγραμμα ειδικού όγκου–ενεργής τάσης από τριαξονική δοκιμή εφελκυσμού σε στραγγιζόμενες συνθήκες με IC=110 kPa

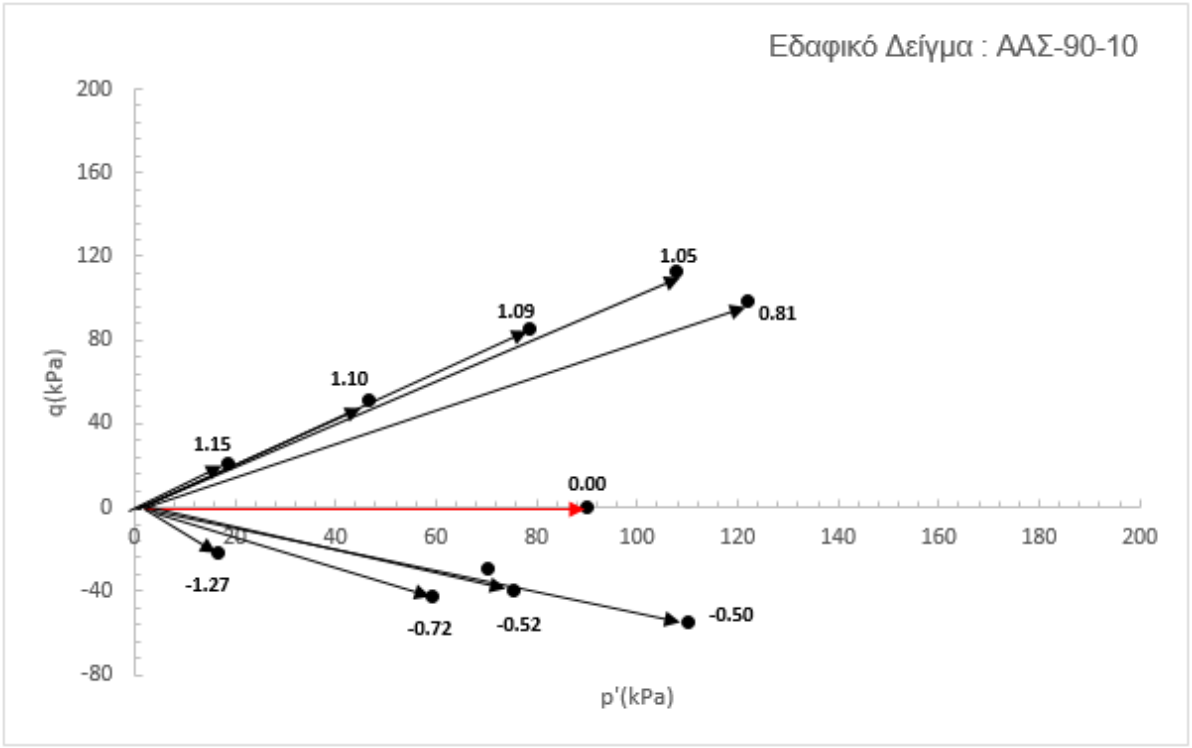
Τα αποτελέσματα δοκιμών ICD σε θλίψη και εφελκυσμό, έδειξαν ότι η συμπεριφορά τάσεων-παραμορφώσεων εξαρτάται από την ενεργή πλευρική πίεση ή

το λόγο διαρροής. Τα αποτελέσματα έδειξαν επίσης ότι, η παρουσία και η αύξηση του ποσοστού τέφρας, έχει παρόμοιο αποτέλεσμα στην αύξηση της μέγιστης αντοχής των δειγμάτων σε χαμηλές πλευρικές πιέσεις. Ενώ σε υψηλότερες πλευρικές πιέσεις, η διαρροή ήταν περισσότερη ψαθυρή, με σαφή μείωση της αξονικής παραμόρφωσης διαρροής (Πίνακας 6.3).

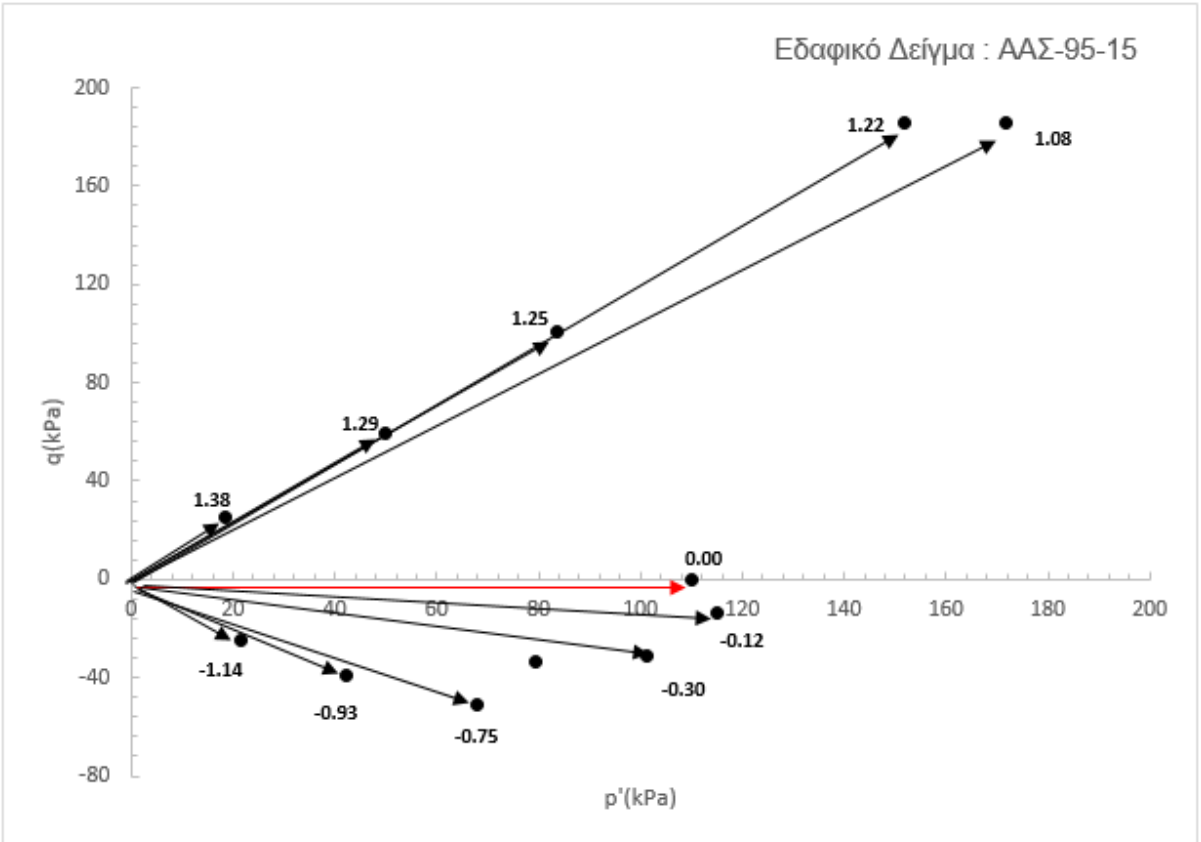
Όπως περιγράφηκε στο κεφάλαιο 2, ο λόγος τάσεων διαρροής $\eta=q_y/p'_y$ έχει χρησιμοποιηθεί για να δώσει την τάση μεταβολής της περιβάλλουσας διαρροής για τους τρεις τύπους δειγμάτων αργίλου αυτής της έρευνας. Οι τάσεις μεταβολής της περιβάλλουσας διαρροής από δοκιμές, στραγγιζόμενες με διατήρηση σταθερού του λόγου η (μαύρα διανύσματα), και ισότροπης στερεοποίησης η=0 (ερυθρά διανύσματα), σε συνθήκες θλίψης και εφελκυσμού, έχουν σχεδιαστεί για κάθε δείγμα σε διάγραμμα q-p' , όπως φαίνεται στα Σχήματα 6.74, 6.75 και 6.76 για ποσοστά τέφρας 0%, 10% και 15% αντίστοιχα.



Σχήμα 6.74- ΑΑΣ-80-00 Τιμές της σταθεράς η ($=q_y/p'_y$) για στραγγιζόμενες δοκιμές θλίψης και εφελκυσμού



Σχήμα 6.75- ΑΑΣ-90-10 Τιμές της σταθεράς η (=q_y/p'_y) για στραγγιζόμενες δοκιμές θλίψης και εφελκυσμού



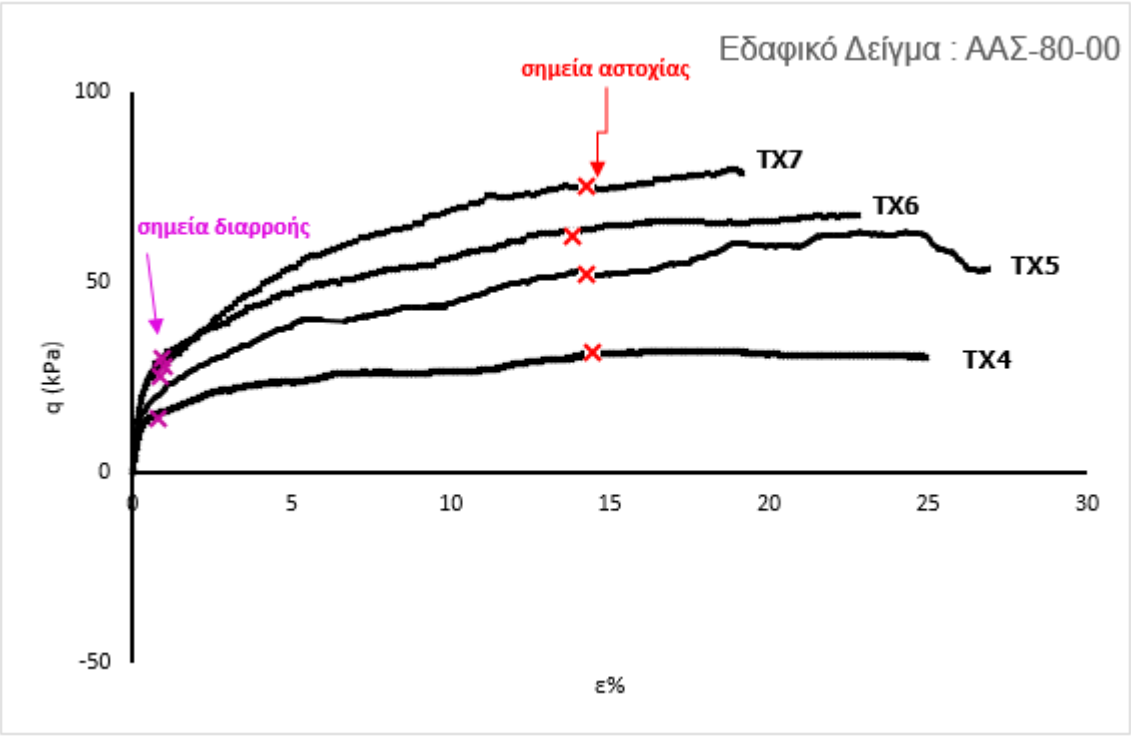
Σχήμα 6.76 - ΑΑΣ-95-15 Τιμές της σταθεράς η (=q_y/p'_y) για στραγγιζόμενες δοκιμές θλίψης και εφελκυσμού

Όπως παρατηρείται σε αυτά τα διαγράμματα, σε συνθήκες εφελκυσμού, τα ισότροπα στερεοποιημένα δείγματα αργίλου βελτιωμένης με τέφρα (ΑΑΣ-90-10 και ΑΑΣ-95-15) τείνουν να διαρρέουν σε χαμηλότερα επίπεδα τάσης, και η τάση μεταβολής της περιβάλλουσας διαρροής κλίνει περισσότερο προς τον άξονα p΄. Αυτό το χαρακτηριστικό εξετάζεται λεπτομερώς σε επόμενη ενότητα, αλλά αυτές οι τάσεις μεταβολής της περιβάλλουσας διαρροής δίνουν μία αρχική εκτίμηση της συμπεριφοράς των βελτιωμένων με τέφρα αργίλων σε συνθήκες θλίψης και εφελκυσμού, καθώς και του τρόπου που αυτό το «ελλειψοειδές σχήμα» εξελίσσεται με την αύξηση του ποσοστού τέφρας.

6.6.2 Διαγράμματα Τάσεων – Παραμορφώσεων

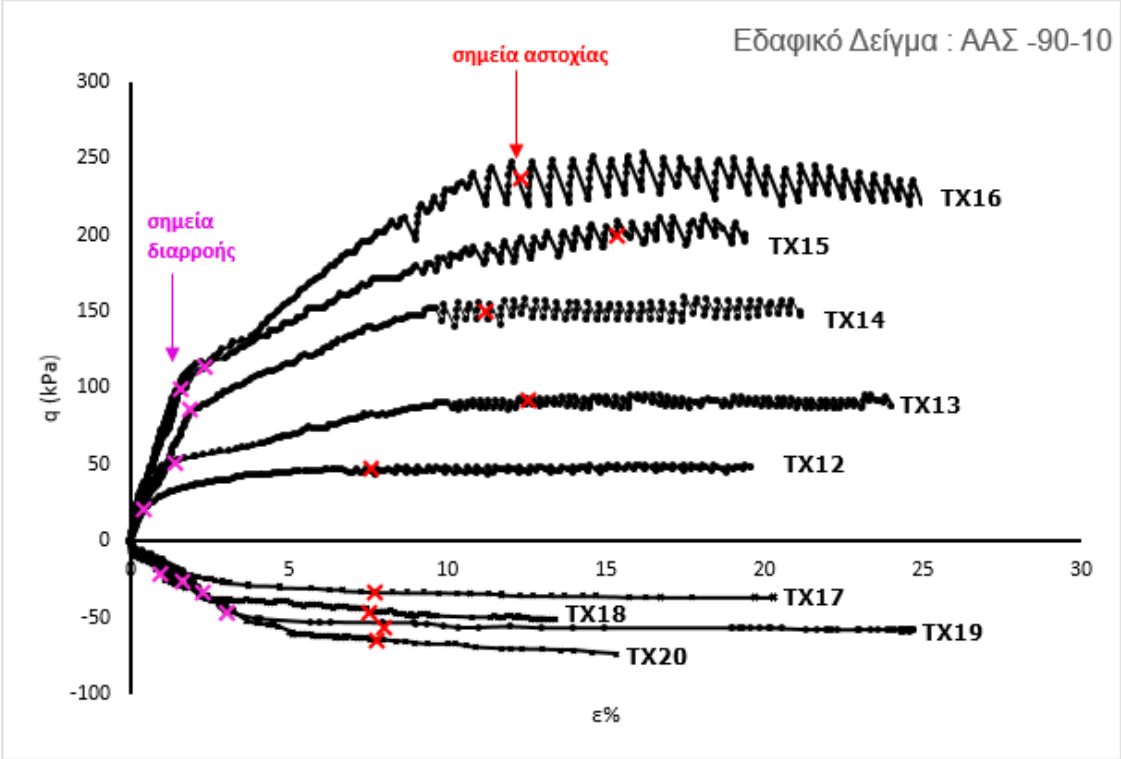
Στα Σχήματα 6.77 έως 6.79 δίνονται συνολικά όλες οι τυπικές καμπύλες τάσεων–παραμορφώσεων για τους τρεις τύπους δειγμάτων (ΑΑΣ-80-00, ΑΑΣ-90-10 και ΑΑΣ-95-15) από ολές τις τριαξονικες δοκιμες θλίψης και εφελκυσμού σε στραγγιζόμενες συνθήκες που εκετελέστηκαν σε αυτή την έρευνα.

A. <u>Εδαφικό Δείγμα : ΑΑΣ-80-00</u>



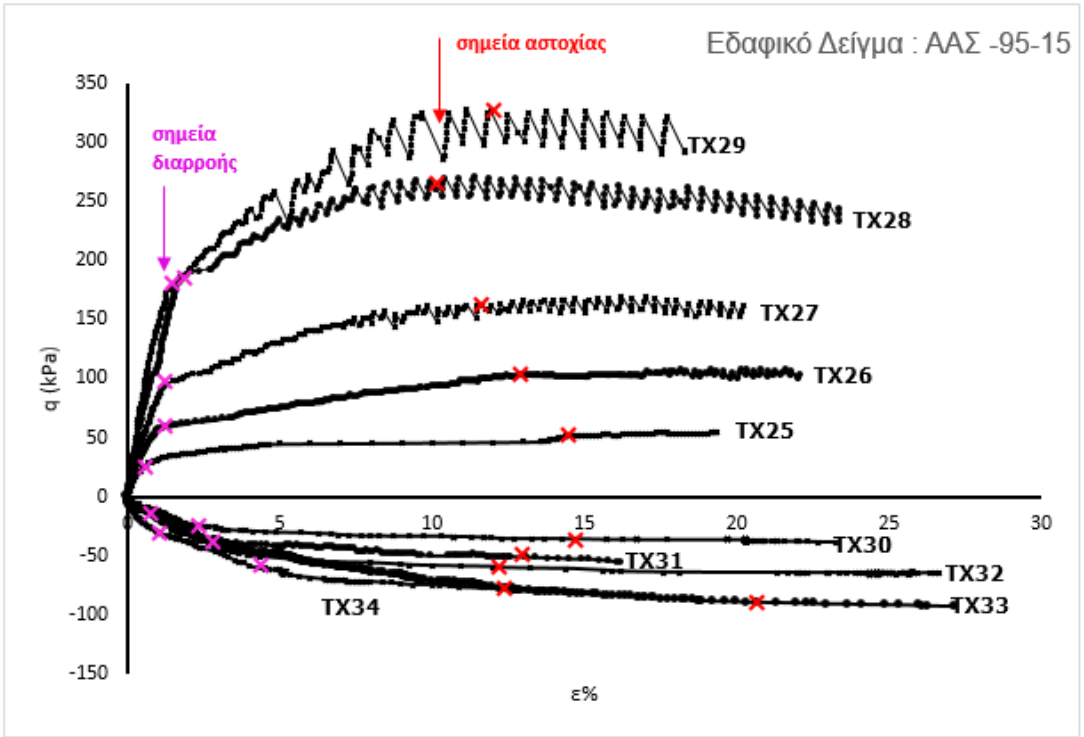
Σχήμα 6.77 : ΑΑΣ-80-00 – Καμπύλη αποκλίνουσας τάσης – αξονικής παραμόρφωσης σε δοκιμές θλίψης σε στραγγιζόμενες συνθήκες

B. <u>Εδαφικό Δείγμα : ΑΑΣ-90-10</u>



Σχήμα 6.78 : ΑΑΣ-90-10 - Καμπύλες αποκλίνουσας τάσης– αξονικής παραμόρφωσης σε δοκιμές θλίψης και εφελκυσμού σε στραγγιζόμενες συνθήκες

C. <u>Εδαφικό Δείγμα : ΑΑΣ-95-15</u>



Σχήμα 6.79 : ΑΑΣ-95-15 - Καμπύλες αποκλίνουσας τάσης–αξονικής παραμόρφωσης σε δοκιμές θλίψης και εφελκυσμούσε στραγγιζόμενες συνθήκες

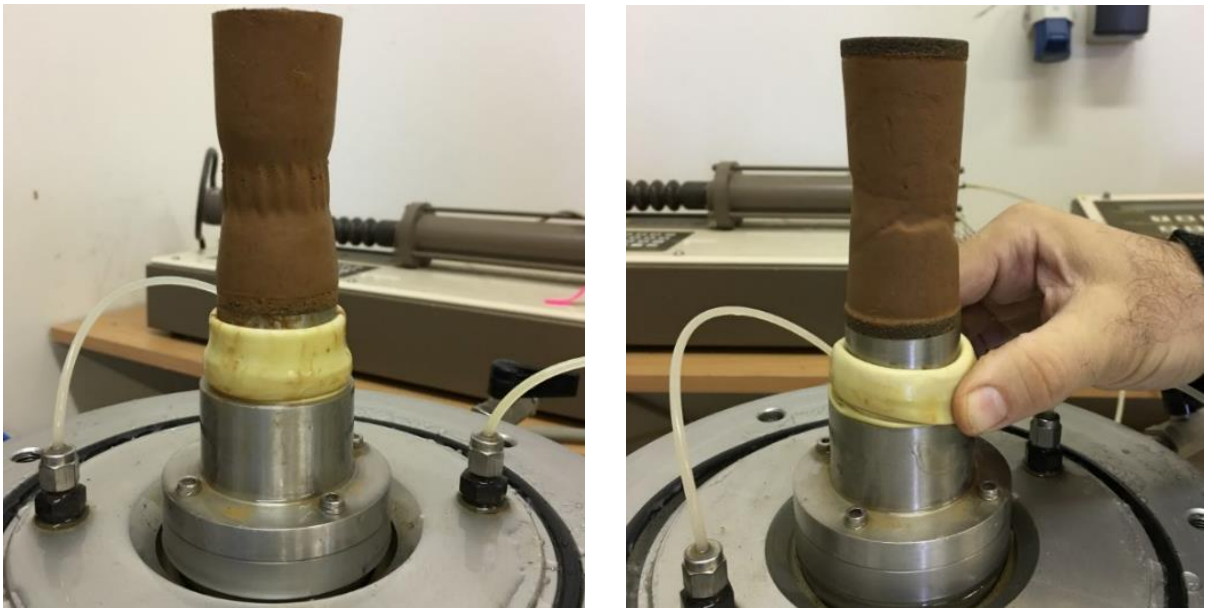
Σε κάθε δοκιμή έγινε καταγραφή επιβαλλόμενων τάσεων και μεταβολών όγκου σε σχέση με την αξονική παραμόρφωση. Πλήρη αποτελέσματα και λεπτομέρειες για κάθε δοκιμή παρουσιάζονται στους Πίν. 6.3 & 6.4. Τα προκύπτοντα αποτελέσματα είναι αντιπροσωπευτικά των ελαφρά υπερστερεοποιημένων δειγμάτων, διότι λόγω της χαμηλής αντοχής του υλικού των δειγμάτων επιβάλλονται αναγκαστικά χαμηλές τάσεις στερεοποίησης πριν τη διάτμηση. Η ιπτάμενη τέφρα δεν προκαλεί ισχυρή σύνδεση στη μάζα της υψηλής πλαστικότητας αργίλου (βλ. Κεφ. 4 & 5).

Οι δοκιμές θλίψης σε δείγματα βελτιωμένα με τέφρα δείχνουν αύξηση της αντοχής σε σχέση με δείγματα χωρίς προσθήκη τέφρας. Είναι αξιοσημείωτο ότι η άμεση και ταχεία αύξηση της αποκλίνουσας τάσης και η αμελητέα μεταβολή της στη θραύση οφείλεται στην προσθήκη τέφρας. Ένα άλλο θέμα το οποίο παρατηρείται στις δοκιμές θλίψης, είναι οι ανωμαλίες που καταγράφονται σε υψηλές τάσεις μόνο στα δείγματα αργίλου με τέφρα. Η θεωρητική βάση αυτής της ανώμαλης συμπεριφοράς έχει παρουσιασθεί σε προηγούμενες έρευνες (Biot & Willis,1957, Brown & Korringa,1975, Vardoulakis & Sulem,1995) σε βελτιωμένα εδάφη με προσθήκη συνδετικού υλικού, κυρίως τσιμέντου. Μία απλουστευμένη εξήγηση αυτής της ανωμαλίας είναι ότι το μέγεθος των πόρων στη μικροδομή των τεχνητά σιμεντωμένων εδαφών καλύπτει ένα εύρος, από τάξη μεγέθους νανομέτρου (nm) πόρους γέλης (gel pores) μέχρι τάξη μεγέθους μικρομέτρου (μm) τριχοειδείς πόρους (capillary pores), καθώς και τάξη μεγέθους χιλιοστού (mm) κενών με αέρα. Από τα διάφορα προσωμοιώματα μικροδομής «Συνδετικού Υλικού–Ύδατος–Εδάφους» (Tada 1983, Ashkar κ.ά. 2007, Thiery κ.ά. 2011, Shakiba κ.ά.. 2014, Dela Varga κ.ά.2017) ένα μέρος του νερού στο δίκτυο πόρων των συσσωματωμάτων συνδέει τα ασβεστιτικού χαρακτήρα συσσωματώματα μεταξύ τους. Αυτό το διαστρωματικό νερό συμπεριφέρεται ως ασυμπίεστος σύνδεσμος μεταξύ των συσσωματωμάτων και συνεπώς προσπαθεί να διατηρήσει την αρχική του θέση κατά την επιβολή πιέσεων. Όμως τελικά εκδιώκεται από τη μάζα του πολτού προκαλώντας αυτές τις ανωμαλίες που παρουσιάζονται στα διαγράμματα τάσεων παραμορφώσεων των βελτιωμένων με ιπτάμενη τέφρα αργίλων. Στην ύπαρξη αυτής της σύνθετης δομής οφείλεται το πριονωτό διάγραμμα μετά την ελαστική περιοχή (Σχ.6.78 και 6.79)

Από τα διαγράμματα των δοκιμών εφελκυσμού, είναι δύσκολο να προκύψουν συμπεράσματα, διότι σε κάθε περίπτωση μετά τη θραύση συνέβαινε κατάρρευση του

δοκιμίου λόγω της μειούμενης επιφάνειας της διατομής. Παρά ταύτα, αξίζει να σημειωθεί ότι, όλες οι δοκιμές εφελκυσμού σε δείγματα με διαφορετικό ποσοστό τέφρας, και διαφορετική τάση στερεοποίησης, εμφανίζουν τον ίδιο χρόνο θραύσης, γεγονός που υποδηλώνει ότι οι διαφορές του βαθμού εκτόνωσης της πίεσης πόρων δεν επηρεάζει την περιβάλλουσα θραύσης. Ωστόσο, σε στραγγιζόμενες δοκιμές, το μέγεθος της δημιουργούμενης πίεσης πόρων (πριν την εκτόνωσή της) στη διάρκεια της διάτμησης, φαίνεται να είναι καθοριστικός παράγοντας για το σχηματισμό των επιφανειών θραύσης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.80(α).

Τέλος, είναι σημαντικό να αναφέρουμε ότι, όπως παρατήρησε ο Parry (2004), σε στραγγιζόμενες δοκιμές ελαφρά υπερστερεοποιημένων αργίλων, δημιουργείται ένα πλάτωμα κατά την αστοχία (Σχήματα 6.77 έως 6.79). Η δε προοδευτική μείωση όγκου στη διάρκεια στραγγιζόμενης δοκιμής έχει σαν αποτέλεσμα την προοδευτική αύξηση της αντοχής, η οποία συμπίπτει με την κρίσιμη κατάσταση.



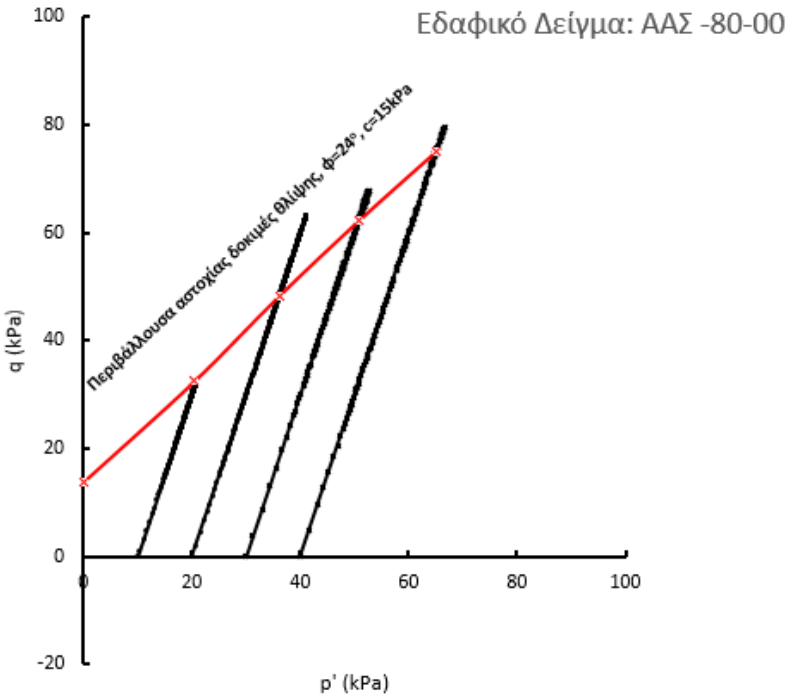
Σχήμα 6.80(α) – Τυπικές μορφές θραύσης σε δοκιμές εφελκυσμού.

Σχήμα 6.80(β) – Τυπικές μορφές θραύσης σε δοκιμές θλίψης δειγμάτων με και χωρίς τέφρα

6.7 Μορφή Αστοχίας

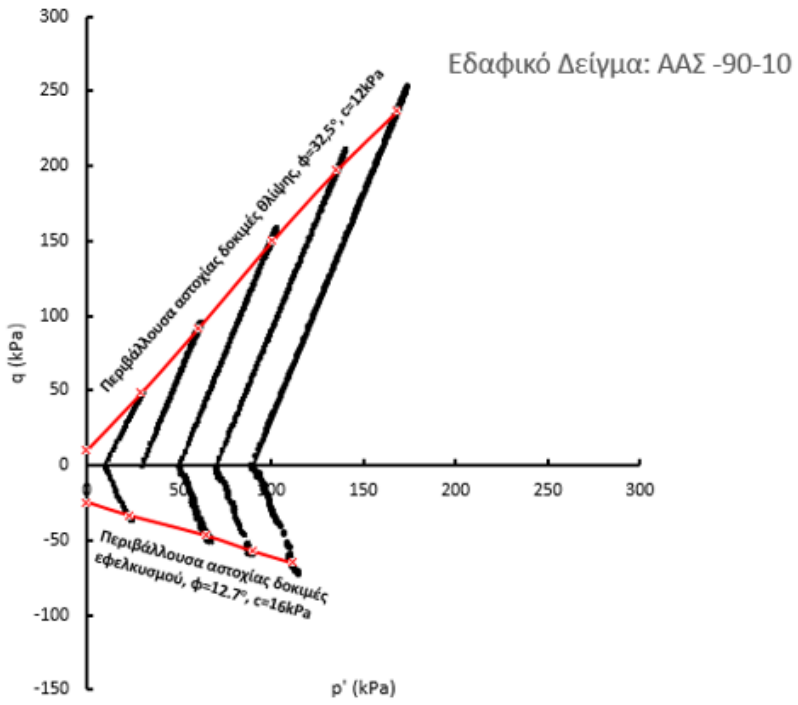
6.7.1 Περιβάλλουσες Αστοχίας σε Δοκιμές Θλίψης και Εφελκυσμού

A. <u>Εδαφικό Δείγμα : ΑΑΣ-80-00</u>



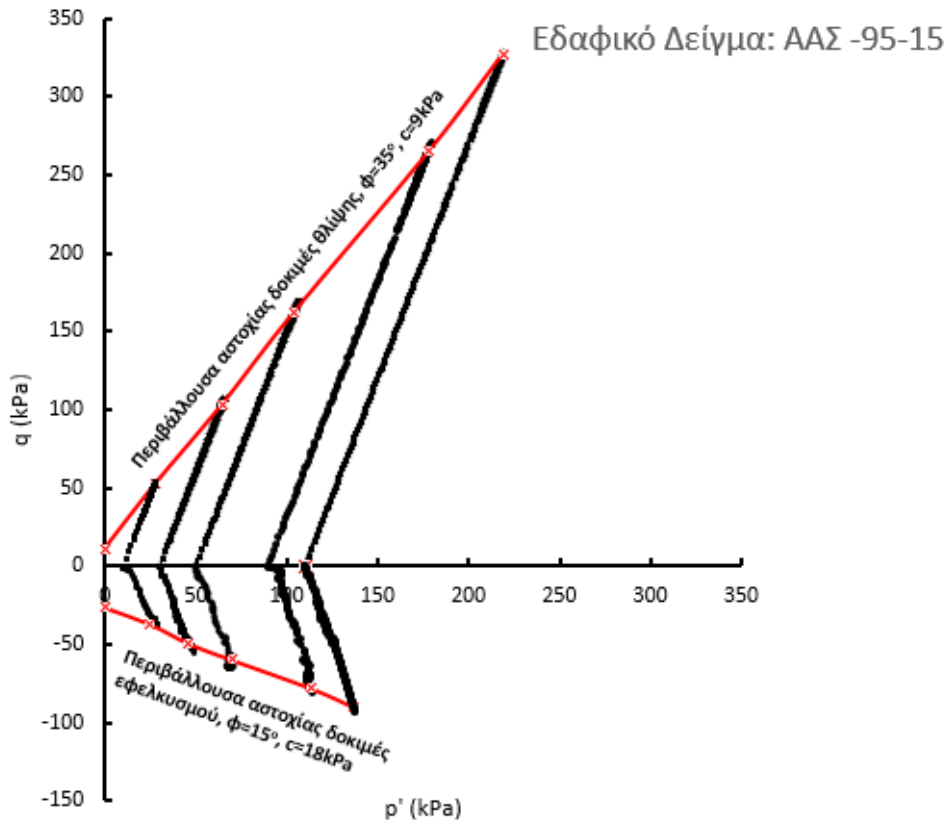
Σχήμα 6.81: ΑΑΣ-80-00 Περιβάλλ. αστοχίας &διαδρομές τάσεων σε δοκιμές θλίψης

B. <u>Εδαφικό Δείγμα : ΑΑΣ-90-10</u>



Σχήμα 6.82: ΑΑΣ-90-10 – Περιβάλλουσες αστοχίας και διαδρομές τάσεων σε δοκιμές θλίψης και εφελκυσμού

C. <u>Εδαφικό Δείγμα : ΑΑΣ-95-15</u>



Σχήμα 6.83 : ΑΑΣ-95-15 – Περιβάλλουσες αστοχίας και διαδρομές τάσεων σε δοκιμές θλίψης και εφελκυσμού

Τα αποτελέσματα αυτών των δοκιμών έδωσαν τιμές γωνίας τριβής (φ΄) και συνοχής (c) για κάθε τύπο δείγματος αργίλου, οι οποίες δίνονται στον Πίνακα 6.5.

Ονομασία Μίγματος	**Τύπος Δοκιμής**	**λ[1]**	**Γωνία εσωτερικής τριβής φ(°)**	**Συνοχή c' (kPa)**
ΑΑΣ-80-00	Θλίψη	0.26	24	15
ΑΑΣ-90-10	Θλίψη	0.20	32.5	12
	Εφελκυσμός		12.7	16
ΑΑΣ-95-15	Θλίψη	0.18	35	9
	Εφελκυσμός		15	18

[1]*λ: κλίση γραμμής ισότροπης θλίψης*

Πίνακας 6.5: Χαρακτηριστικά περιβάλλουσας αστοχίας δοκιμών θλίψης και εφελκυσμού

Τα Σχήματα 6.81, 6.82 και 6.83 εμφανίζουν τις περιβάλλουσες αστοχίας που προέκυψαν από στραγγιζόμενες δοκιμές θλίψης και εφελκυσμού στους τρεις τύπους δειγμάτων ΑΑΣ-80-00, ΑΑΣ-90-10 και ΑΑΣ-95-15 αντίστοιχα. Επίσης παρουσιάζονται και διαδρομές τάσεων στη φάση διάτμησης. Από αυτά τα διαγράμματα, μπορεί να γίνει συγκριτική εξέταση των περιβαλλουσών αστοχίας. Οι δοκιμές θλίψης, που βασικά συνεπάγονται υψηλότερες ενεργές τάσεις στην αστοχία, απαιτούν μεγαλύτερου μεγέθους προεκβολή της περιβάλλουσας, για τον προσδιορισμό της συνοχής, σε αντίθεση με τις δοκιμές εφελκυσμού (Πίνακας 6.5). Συνεπώς οι δοκιμές εφελκυσμού, υπό χαμηλές ενεργές τάσεις, μπορεί να δώσουν καλύτερη εκτίμηση της συνοχής λόγω επίδρασης της δομής (δηλ. των δεσμών σιμέντωσης και της κράτυνσης, Iyer 1975).

Επιπλέον οι τιμές συνοχής από δοκιμές θλίψης είναι μικρότερες από εκείνες των δοκιμών εφελκυσμού. Αυτό μπορεί να αποδοθεί στο γεγονός ότι οι δοκιμές θλίψης με χαμηλή ενεργή πλευρική πίεση μειώνουν το μέγεθος της προεκβολής η οποία απαιτείται για την εκτίμηση της συνοχής. Ωστόσο, οι γωνίες τριβής είναι σημαντικά διαφορετικές στις δύο δοκιμές, και είναι αξιοσημείωτο ότι η γωνίας τριβής στις δοκιμές εφελκυσμού είναι μικρότερη από εκείνη των δοκιμών θλίψης, για όλα τα δείγματα. Αυτό είναι αναμενόμενο λόγω της διαφοράς στο μηχανισμό αστοχίας.

6.7.2 Μηχανισμός Αστοχίας σε Διάτμηση και Κινητοποίηση Συνοχής και Τριβής

Για ασθενώς σιμεντωμένο έδαφος, η διατμητική αντίσταση σε συνθήκες εφελκυσμού αποτελείται από δύο συνιστώσες. Η μία είναι η συνοχή ψαθυρού τύπου (λόγω σιμέντωσης) και η άλλη είναι ιξώδους τύπου (εξαρτώμενη από την ενεργή ορθή τάση). Η εικόνα του μηχανισμού κινητοποίησης των συνιστωσών της διατμητικής αντίστασης, μπορεί να περιγραφεί με όρους των εννοιών που διατυπώθηκαν από τον Bjerrum (1971). Σύμφωνα με αυτή την άποψη, όλες οι επαφές σωματιδίων της αργίλου μπορούν να διαχωριστούν σε επαφές τριβής και επαφές συνοχής. Η αντίσταση τριβής στην πρώτη κατηγορία προέρχεται από την ολίσθηση μεταξύ σωματιδίων στα σημεία επαφής τους. Ο Calladine (1971) εξέτασε με λεπτομέρεια το μηχανισμό αστοχίας σε τέτοιες επαφές (ονομαζόμενες επαφές τραχύτητας) για κανονικά στερεοποιημένες και υπερστερεοποιημένες αργίλους. Όπως αναφέρει ο Iyer (1974), η συνοχή προέρχεται από τη διάρρηξη των επαφών στο προσροφημένο ύδωρ. Όταν σε ένα αργιλικό σωματίδιο επιβληθεί κάποια τάση

για ορισμένο χρόνο, οι ενεργές τάσεις θα μεταβιβαστούν βαθμιαία από τις επαφές συνοχής στις επαφές τριβής, στις οποίες θα αποθηκευτεί και το ανακτήσιμο έργο παραμόρφωσης (recoverable strain energy) (Iyer, 1974).

Όταν σε αυτό το σύστημα επιβληθεί μείωση της ενεργής ορθής τάσης, προκαλούμενη από τη δειγματοληψία και την εν συνεχεία διόγκωση, το περίπλοκο δίκτυο δομής φορτίζεται λόγω εσωτερικών τάσεων. Με την επιβολή διατμητικής τάσης, η τριβή δεν μπορεί να κινητοποιηθεί, μέχρι να διαρραγούν οι επαφές συνοχής, και να επιβληθούν μεταβολές της ενεργής ορθής τάσης στις επαφές τριβής. Στην περίπτωση των συνθηκών στράγγισης, η μεταβίβαση τάσεων είναι απότομη, λόγω της ψαθυρής φύσης των δεσμών. Επίσης καμία μεταβίβαση ορθής τάσης δεν λαμβάνει χώρα μέσω των επαφών τριβής, μέχρι να έχει κινητοποιηθεί πλήρως η συνοχή (Bjerrum and Kenney, 1976).

Κατά την εκτέλεση όλων των δοκιμών της παρούσας έρευνας, το πρώτο μέρος της διατμητικής αντίστασης εμφανίστηκε σαν απότμηση συνοχής στον άξονα των αποκλινουσών τάσεων και το δεύτερο μέρος εμφανίστηκε με χαρακτήρα τριβής. Σε ισχυρά σιμεντωμένα εδάφη, όπως ο σιμεντωμένος σχιστόλιθος, οι λατερίτες, κλπ., επικρατεί η συνοχή ψαθυρής φύσης. Για αναζυμωμένες αργίλους, η διατμητική αντοχή σε θλίψη εξαρτάται από την ενεργή ορθή τάση, και η συμπεριφορά είναι βασικά τριβής (ιξώδους τύπου συνοχή) με ελαφρά συνοχή.

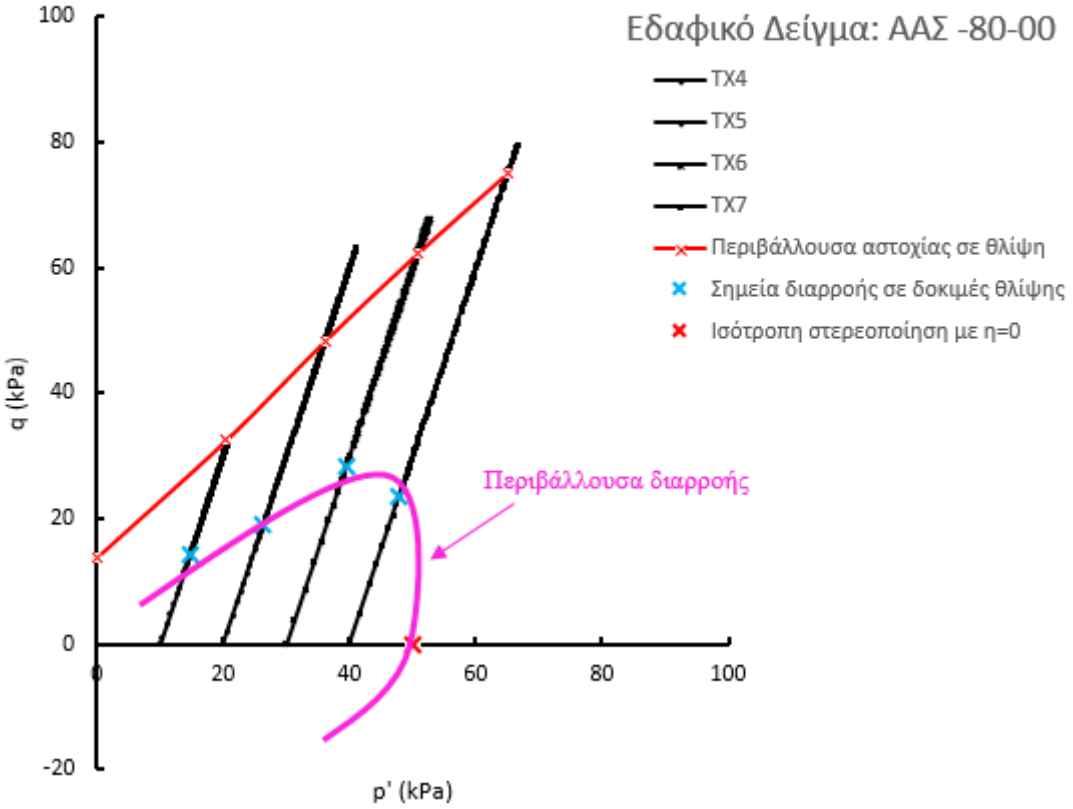
Έτσι η σιμέντωση είναι η κυρίαρχη αιτία της διατμητικής αντίστασης σε σιμεντωμένα εδάφη. Ενώ στις αναζυμωμένες αργίλους, όπως τα δείγματα της παρούσας έρευνας, η τάση στερεοποίησης έχει σχετικά μεγαλύτερη σπουδαιότητα στην ανάπτυξη συνοχής ιξώδους τύπου.

Αυτός ο μηχανισμός εξηγεί την ανάπτυξη τριβής στην περίπτωση των δοκιμών θλίψης. Η διατμητική αντίσταση, των βελτιωμένων με τέφρα αργίλων, βρέθηκε να εξαρτάται από την ενεργή ορθή τάση, και οι περιβάλλουσες αστοχίας των τριών δειγμάτων (Σχήματα 6.81 έως 6.83) φαίνεται να είναι κεκλιμένες για την περιοχή τάσεων που εξετάζεται στην έρευνα, επιδεικνύοντας συμπεριφορά συνοχής-τριβής. Αντίστροφα, η διατμητική αντίσταση σε δοκιμές εφελκυσμού εξαρτάται λιγότερο από την ενεργή ορθή τάση (δηλ. εμφανίζεται σχεδόν οριζόντια περιβάλλουσα αστοχίας) επιδεικνύοντας συνεκτική συμπεριφορά με ελαφρό χαρακτήρα τριβής.

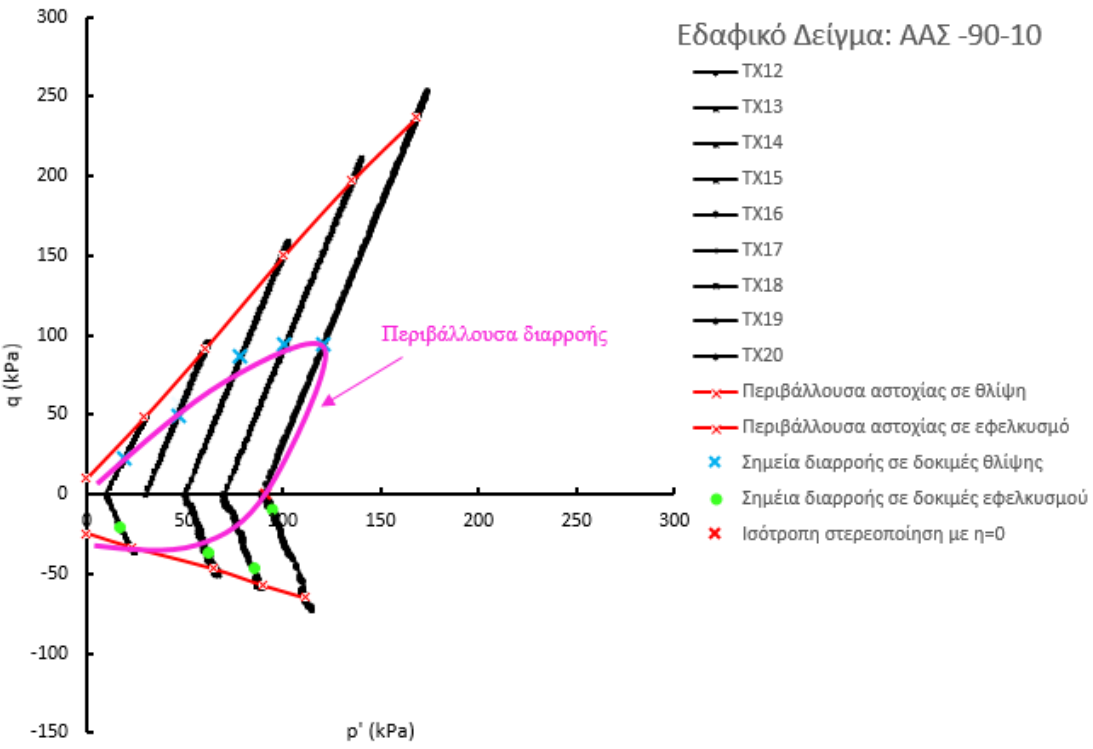
6.8 Περιβάλλουσες Διαρροής : Προσδιορισμός και Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά

Η περιβάλλουσα διαρροής είναι ο γεωμετρικός τόπος των εντατικών καταστάσεων που διαχωρίζει την «ελαστική» συμπεριφορά πριν τη διαρροή, από τη «πλαστική» συμπεριφορά μετά τη διαρροή. Οι περιβάλλουσες διαρροής δεν είναι μοναδικές για δεδομένη τάση προστερεοποίησης, αλλά εξαρτώνται από την ταχύτητα φόρτισης ή τη διάρκεια της (Tavenas και Leroueil, 1981; Graham κ.ά., 1983). Σε αυτήν την έρευνα χρησμοποιήθηκε σταθερή ταχύτητα παραμόρφωσης για όλες τις στραγγιζόμενες δοκιμές θλίψης και εφελκυσμού, διαφορετική βέβαια για κάθε μίγμα, όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενες ενότητες αυτού του κεφαλαίου. Η έννοια της διαρροής έχει αποδειχθεί χρήσιμη για την κατανόηση της συμπεριφοράς μαλακών αργίλων κάτω από επιχώματα και πρανή (Kenney και Folkes, 1979; Wroth και Houlsby, 1980; Tavenas και Leroueil, 1981). Όπως αναφέρουν οι Graham κ.ά. (1983) έχει γενικώς εκτιμηθεί ότι ενώ τα αναζυμωμένα δείγματα επιτρέπουν σαφέστερη κατανόηση πολλών αλλά όχι όλων των πλευρών της συμπεριφοράς της αργίλου υπό ελεγχόμενες συνθήκες, ωστόσο και για τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά συμπεριφοράς, όπως η σιμέντωση και η γήρανση, δίνουν μία ενδιαφέρουσα βάση δεδομένων για περαιτέρω έρευνα.

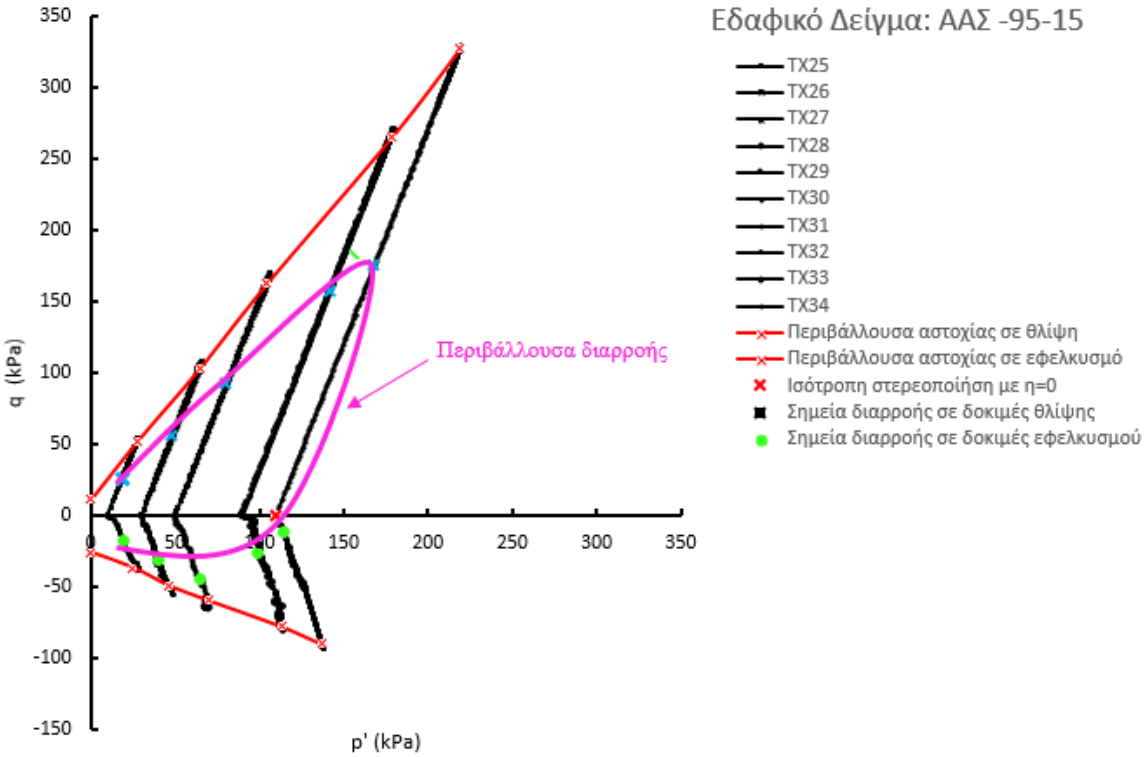
Όλες οι δοκιμές της παρούσας έρευνας έδωσαν καλά προσδιορισμένες περιβάλλουσες διαρροής σε διαγράμματα q-p’, χωρίς κανονικοποίηση (Σχήματα 6.84-6.86).



Σχήμα 6.84 - ΑΑΣ-80-00 Περιβάλλουσες διαρροής και αστοχίας(0% προσθήκη τέφρας)

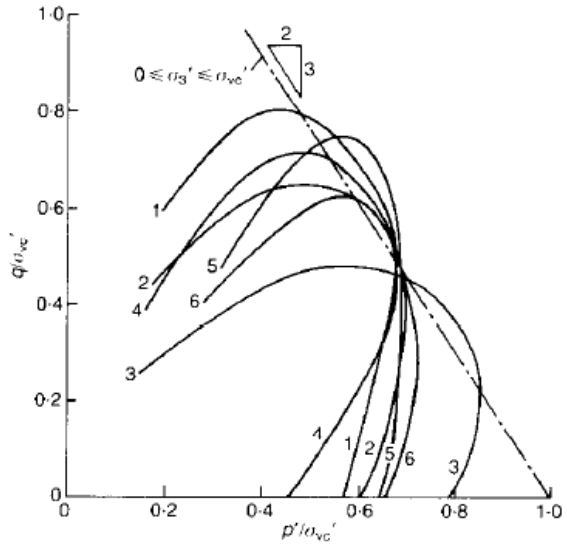


Σχήμα 6.85-ΑΑΣ-90-10 Περιβάλλουσες διαρροής και αστοχίας(10% προσθήκη τέφρας)



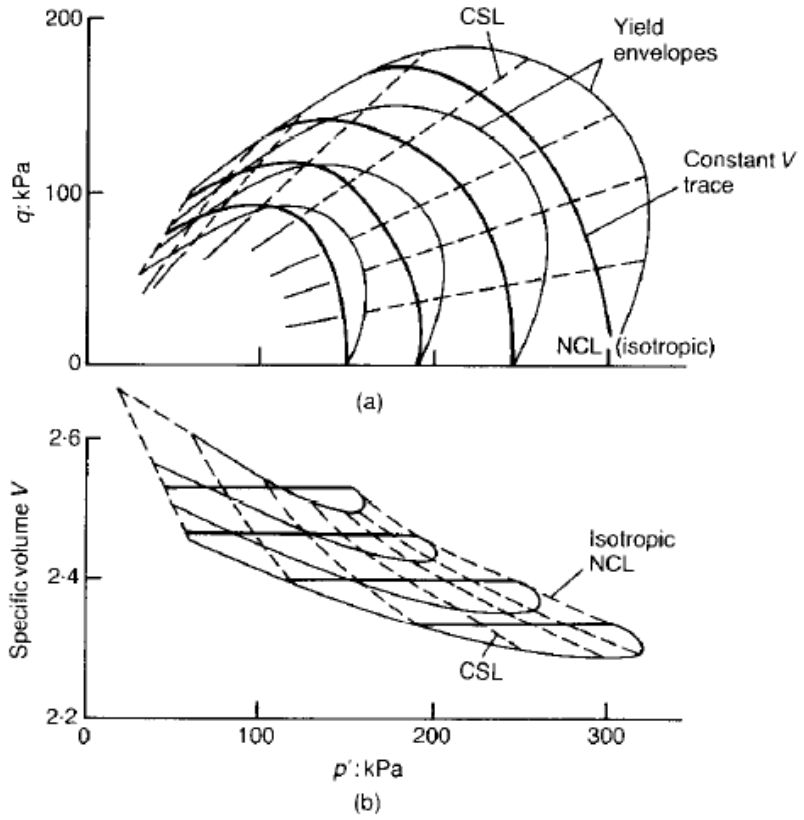
Σχήμα 6.86 -ΑΑΣ-95-15 Περιβάλλουσες διαρροής και αστοχία(15% προσθήκη τέφρας)

Αν και είναι συνηθισμένο να παρουσιάζονται κανονικοποιημένες περιβάλλουσες διαρροής, ως κανονικοποιημένη σχέση μεταξύ μέσων τάσεων και αποκλινουσών τάσεων, μορφής παρόμοιας με του Σχήματος 6.87 κατά τους Graham κ.ά. (1988). Η θετική χρήση αυτών των περιβαλλουσών στη γεωτεχνική πρακτική έχει αποδειχθεί απο πολλούς ερευνητές (Wood, 1980; Crooks, 1985).



Σχήμα 6.87 - Παραδείγματα κανονικοποιημένων περιβαλλουσών διαρροής από διαφορετικές περιοχές (Graham κ.ά., 1988)

Ωστόσο, για τη συμπεριφορά στη διαρροή είναι σημαντική τόσο η τάση όσο και η παραμόρφωση. Η συμπεριφορά στη διαρροή μπορεί με άνεση να περιγραφεί από μία επιφάνεια οριακής κατάστασης στον τρισδιάστατο χώρο p'-q-v (Wroth & Houlsby, 1985). Η συνήθης πρακτική της σχεδίασης κανονικοποιημένων περιβαλλουσών διαρροής μόνο στο χώρο τάσεων p'/σ'_{vc} - q/σ'_{vc} (όπου, σ'_{vc} είναι η τάση προστερεοποίησης) έχει κατά τα άλλα αποκρύψει ορισμένα θεμελιώδη χαρακτηριστικά της διαρροής φυσικών αργίλων. Για παράδειγμα, οι αστράγγιστες αντοχές συνήθως θεωρείται ότι κείνται επί της επιφάνειας οριακής κατάστασης (περιβάλλουσας διαρροής). Ωστόσο, γενικά αυτό δεν συμβαίνει για περιβάλλουσες διαρροής οι οποίες προκύπτουν από στραγγιζόμενες δοκιμές με τις ίδιες αρχικές τάσεις και ίδιους αρχικούς ειδικούς όγκους (Wroth & Houlsby, 1985; Graham & Houlsby, 1985). Οι Graham & Li (1985) αναφέρουν ότι δεδομένα διαρροής για φυσική και ανασυνεστημένη άργιλο Winnipeg ήταν τοποθετημένα στην ίδια κανονικοποιημένη περιβάλλουσα διαρροής, συνεπώς το γεωμετρικό σχήμα των περιβαλλουσών διαρροής δεν εξαρτάται από τη γήρανση ή εξαλλοίωση. Ωστόσο, οι περιβάλλουσες στο χώρο p'-v που δίνουν οι Graham και Li διαφέρουν μεταξύ τους. Οι έντονες γραμμές στα Σχήματα 6.88(a) και 6.88(b) έχουν προσδιοριστεί γεωμετρικά, ως ίχνη σταθερού vτης επιφάνειας οριακής κατάστασης για στραγγιζόμενες συνθήκες από εργαστηριακές δοκιμές. Επιτρέπουν συνεπώς καλύτερη εκτίμηση του πραγματικού σχήματος το οποίο μπορεί να προκύψει από περιβάλλουσες διαρροής οι οποίες εμφανίζουν κλίση προς τα επίπεδα αναφοράς. Είναι εμφανές πλέον ότι οι περιβάλλουσες διαρροής είναι πολύ περισσότερο ελλειπτικές και πλησιάζουν περισσότερο στο σχήμα εκείνων του προσομοιώματος κρίσιμης κατάστασης, το οποίο βασίζεται σε αστράγγιστες δοκιμές με σταθερό v.



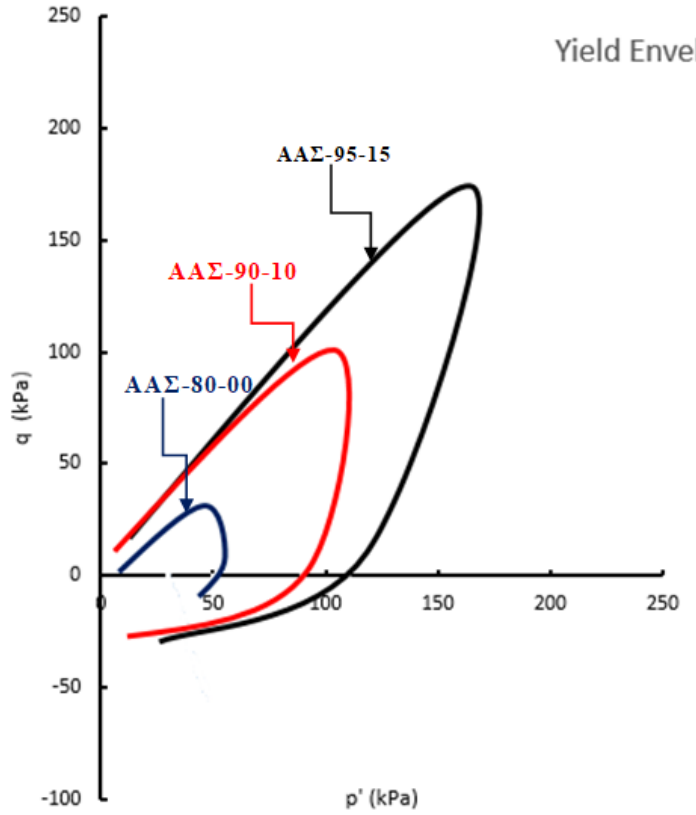
Σχήμα 6.88 - Περιβάλλουσα διαρροής φυσικής πλαστικής αργίλου Winnipeg, με τα γραφικά κατασκευασμένα ίχνη σταθερού ν και την επιφάνεια οριακών καταστάσεων χωρίς κανονικοποίηση των εφαρμοζόμενων τάσεων (Graham κ.ά. 1988)

Αξίζει επίσης να αναφερθεί ότι στην κρίσιμη κατάσταση, έχει ισχύσει η πρακτική κανονικοποίησης των δεδομένων με την τρέχουσα τιμή της ισοδύναμης πίεσης p'_e. Σε ισότροπα στερεοποιημένα δείγματα, ως p'_e συνήθως λαμβάνεται η τιμή p' στη γραμμή της ισότροπης κανονικής στερεοποίησης (NCL) με ίδια τιμή ειδικού όγκου ν με της τρέχουσας εντατικής κατάστασης p' και q. Ωστόσο, στην παρούσα έρευνα, οι περιβάλλουσες διαρροής των τριών τύπων δειγμάτων αργίλου, βελτιωμένης και μη, έχουν σχεδιασθεί στο χώρο p'- q.

Τα Σχ. 6.84÷6.86 δίνουν τα σημεία διαρροής δειγμάτων με διαφορετικά ποσοστά τέφρας και υγρασίας, με αποτέλεσμα διαφορετική φαινόμενη προφόρτιση. Τα σημεία διαρροής, για κάθε μίγμα, προέκυψαν με τις μεθόδους που περιγράφηκαν στην ενότητα 6.6 για δεδομένα από ισότροπα στερεοποιημένες στραγγιζόμενες δοκιμέσσε συνθήκες θλίψης και εφελκυσμού καθώς και δοκιμές ισότροπης στερεοποίησης. Παρατηρήθηκε ότι όλες οι διαδρομές τάσεων για δείγματα στραγγιζόμενων δοκιμών τείνουν γενικώς να κινηθούν κατά μήκος της γραμμής αστοχίας.

Όπως δείχνουν τα Σχ. 6.84÷6.86 & 6.89, η περιβάλλουσα διαρροής διαστέλλεται με την αύξηση του ποσοστού της τέφρας, της φαινόμενης προστερεοποίησης (λόγω

ωρίμανσης), και τη μείωση της συνολικής υγρασίας στο τέλος του χρόνου ωρίμανσης των τριών μηνών. Η διαστολή της επιφάνειας διαρροής με το ποσοστό της τέφρας μπορεί να αιτιολογηθεί με την αύξηση της σιμέντωσης. Η διαστολή της περιβάλλουσας με το χρόνο ωρίμανσης μπορεί να αιτιολογηθεί με το σχηματισμό δευτερευόντων προϊόντων σιμέντωσης μέσω της ποζολανικής αντίδρασης. Ενώ η διαστολή της περιβάλλουσας με τη φαινόμενη τάση προστερεοποίησης (λόγω ωρίμανσης) ή τη συνολική υγρασία μπορεί να αιτιολογηθεί με τη μείωση του λόγου κενών μετά την ωρίμανση. Όπως προκύπτει, το μέγεθος της περιβάλλουσας αλλάζει καθώς μεταβάλλονται οι παραπάνω τρεις παράγοντες. Επίσης οι ίδιοι παράγοντες επηρεάζουν το σχήμα της περιβάλλουσας.



Σχήμα 6.89- Εξέλιξη περιβαλλουσών πρωτεύσας διαρροής για τα 3 εδαφικά δείγματα με προσθηκή ιπτάμενης τέφρας 0%, 10% και 15% από τριαξονικές δοκιμές θλίψης και εφελκυσμού σε στραγγιζόμενες συνθήκες.

7 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

7.1 Συμπεράσματα

Ο σκοπός της παρούσας έρευνας ήταν να διερευνήσει την επίδραση της ιπτάμενης τέφρας ως βελτιωτικού υλικού, ενός όχι τόσον ευρέως αποδεκτού συνδετικού μέσου, στα μηχανικά χαρακτηριστικά μίας αργίλου υψηλής πλαστικότητας και να προτείνει ένα πλαίσιο συμπεριφοράς για μία άργιλο τεχνητά και ελαφρά σιμεντωμένη. Αρχικά εξετάστηκαν δείγματα μιγμάτων αργίλου υψηλής πλαστικότητας, από τον Άγιο Στέφανο, με διαφορετικά ποσοστά τέφρας, με σκοπό να διερευνηθεί η συμπεριφορά αυτής της αργίλου σε σχέση με την αύξηση του ποσοστού της τέφρας. Ακολούθως, για τη συνέχιση της έρευνας, επιλέχτηκαν δύο από αυτά τα μίγματα για να μελετηθεί η μικροδομική συμπεριφορά τους με αναλύσεις Περίθλασης Ακτίνων Χ και Πολωτικού Μικροσκοπίου, καθώς και να εκτελεστεί ένα φάσμα τριαξονικών δοκιμών σε συνθήκες θλίψης και εφελκυσμού.Στη συνέχεια εξετάστηκε το πλαίσιο συμπεριφοράς των μιγμάτων σε τριαξονική φόρτιση και συσχετίσθηκε με τις μικροδομικές μεταβολές που συνέβησαν. Επιπλέον, έγινε σύγκριση των μιγμάτων της βελτιωμένης αργίλου με τη μη βελτιωμένη (αλλά ανασυνεστημένη με πρόσθετη υγρασία) άργιλο, εκτελώντας σε δοκίμια της τελευταίας το ίδιο πρόγραμμα δοκιμών. Τέλος, με βάση τις παρατηρήσεις των δοκιμών της παρούσας έρευνας, προτάθηκαν ορισμένες νέες απόψεις για τη συμπεριφορά τεχνητά και ελαφρά σιμεντωμένων αργίλων.

7.1.1 Μικροδομική και Βασική Μηχανική Συμπεριφορά της Βελτιωμένης Αργίλου

- Η ανάμιξη τέφρας με τον πολτό της αργίλου οδήγησε σε ταχεία αντίδραση ενυδάτωσης, η οποία προκάλεσε μείωση της υγρασίας και την παραγωγή πρωτογενών προϊόντων σιμέντωσης. Η αντίδραση ενυδάτωσης συνοδευόταν από την πιο αργή ποζολανική αντίδραση, η οποία εξελισσόταν με την πάροδο του χρόνου.
- Ο δείκτης πλαστικότητας δύναται να κανονικοποιηθεί με την τελική υγρασία της βελτιωμένης με ιπτάμενη τέφρα αργίλου. Ο δείκτης πλαστικότητας βρέθηκε να έχει ισχυρή συσχέτιση με το ποσοστό τέφρας ενώ είναι ανεξάρτητος από το χρόνο ωρίμανσης. Συνεπώς, αυτή η συμπεριφορά δύναται να χρησιμοποιηθεί για την

ποσοτικοποίηση των μηχανικών χαρακτηριστικών αργίλων υψηλής πλαστικότητας βελτιωμένων με τέφρα.

- Η αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη της βελτιωμένης με ιπτάμενη τέφρα αργίλου αυξάνει με την αύξηση του ποσοστού της τέφρας και του χρόνου ωρίμανσης. Η ποζολανική αντίδραση, βρέθηκε ότι σε σύντομο χρονικό διάστημαπαύει να συμβάλει στην αύξηση της αντοχής, όταν τα ποσοστότέφρας δεν υπερβαίνει το15%. Αποδείχθηκε ότι η συμβολή της αντίδρασης, παρέμενε σημαντική για παρατεταμένους χρόνους ωρίμανσης έως και 2 έτη, όταν το ποσοστό τέφρας είναι μεγαλύτερο από 15%. Σε τόσο μεγάλες περιόδους ωρίμανσης, σημαντικό μέρος των ιόντων Ca^{2+}διαχέεται στη μάζα της βελτιωμένης αργίλου προωθώντας την ποζολανική αντίδραση. Από την άλλη πλευρά, σε δείγματα με προσθήκη τέφρας σε ποσοστό χαμηλότερο από 15% και χρόνο ωρίμανσης τριών (3) μηνών, μόνο μικρό μέρος τωνCa^{2+}αναλώθηκε από το έδαφος, οδηγώντας σε δείγμαπιο εύχρηστο κατά τη μορφοποίηση δοκιμίων.
- Με βάση τις παρατηρήσεις, η σχέση αντοχής σε ανεμπόδιστη θλίψη και ποσοστού τέφρας, μπορεί να χωρισθεί σε δύο ζώνες : Ανενεργή Ζώνη και Ενεργή Ζώνη. Τα δείγματα βελτιωμένης αργίλου με ποσοστό τέφρας μέχρι 8% και για όλο το φάσμα χρόνων ωρίμανσης, έδειξαν μόνο μία οριακή βελτίωση της αντοχής σε ανεμπόδιστη θλίψη, αυτή ορίζεται ως Ανενεργή Ζώνη. Αυτό φαίνεται να υποδηλώνει ότι απαιτείται ορισμένο ποσοστό τέφρας (μεγαλύτερο από 8%) για να ολοκληρωθεί η ποζολανική αντίδραση μεταξύ τέφρας και σωματιδίων αργίλου. Το τελικό αποτέλεσμα της πλήρους σιμέντωσης είναι η αύξηση της διατμητικής αντοχής, και αυτή η ζώνη ορίζεται ως Ενεργή Ζώνη. Το άνω όριο αυτής της ζώνης πρέπει να είναι σε ποσοστό τέφρας σχετικά μεγαλύτερο από15% και στους 3 μήνες χρόνου ωρίμανσης. Σε αυτή τη ζώνη η ταχεία απόκτηση αντοχής αποδίδεται στο γεγονός ότι η ποζολανική αντίδραση προωθεί την ταχεία διάχυση των ιόντων Ca^{2+} στη μάζα της αργίλου.
- Στις δοκιμές στερεοποίησης σε συμπιεσόμετρο, παρατηρήθηκε σημαντική αύξηση της φαινόμενης τάσης προστερεοποίησης και μείωση του φαινόμενου δείκτη συμπίεσης με την αύξηση του ποσοστού τέφρας και του χρόνου ωρίμανσης. Αυτό οφείλεται στη δημιουργία δομής στα σωματίδια της βελτιωμένης αργίλου (μέσω των δεσμών σιμέντωσης). Η βελτωμένη άργιλος επιδεικνύει δυσκαμψία στη διόγκωση με αποτέλεσμα χαμηλό δείκτη διόγκωσης.
- Σε υψηλότερη τάση πέραν της φαινόμενης τάσης προστερεοποίησης οι καμπύλες e-logσ'_vτης βελτιωμένης αργίλου μεταθέτονται σε υψηλότερο λόγο κενών από της μη βελτιωμένης αργίλου για την ίδια επιβληθείσα τάση προστερεοποίησης (50 kPa).Αυτή

η μετάθεση είναι σχεδόν παράλληλη με τη γραμμή πρωτογενούς στερεοποίησης, ενώ είναι σημαντικότερη για μεγαλύτερα ποσοστά τέφρας και μεγαλύτερους χρόνους ωρίμανσης.

- Η ανάλυση μη βελτιωμένης αργίλου με Πολωτικό Μικροσκόπιο έδειξε ότι τα σωματίδια της αργίλου είναι σε διεσπαρμένη διάταξη.Στην βελτιωμένη άργιλο όμως, λόγω απελευθέρωσης ιόντων ασβεστίου από την αντίδραση ενυδάτωσης, η υφή μετατρέπεται σε κροκιδωμένη, σχηματίζοντας συσσωματώματα αργίλου-τέφρας διεσπαρμένα στη μάζα του δείγματος, εμποδίζοντας το σχηματισμό μίας ισχυρής και ομοιόμορφης δομής.

7.1.2 Πλαίσιο Συμπεριφοράς Βελτιωμένης με Ιπτάμενη Τέφρα Αργίλου Υψηλής Πλαστικότητας

- Η δοκιμή ισότροπης στερεοποίησης σε άργιλο βελτιωμένη με ιπτάμενη τέφρα, ανέδειξε τη συσχέτιση του ποσοστού τέφρας με τη φαινόμενη τάση προστερεοποίησης, η οποία αναπτύσσεται στη διάρκεια της ωρίμανσης λόγω της ποζολανικής ιδιότητας της τέφρας. Ωστόσο, η δοκιμή αυτή, δίνει πολύ χαμηλότερη τάση φαινόμενης προστερεοποίησης λόγω ωρίμανσης, από εκείνην που δίνουν τα αποτελέσματα της μονοδιάστατης στερεοποίησης από δοκιμή συμπιεσομέτρου. Συνεπώς συμπεραίνεται ότι, για εδάφη βελτιωμένα με την προσθήκη παράγοντα σιμέντωσης, η μονοδιάσατη ανισότροπη στερεοποίηση μπορεί ορισμένες φορές να δώσει παραπλανητικές ενδείξεις για την ανάπτυξη αντοχής στη διάρκεια του χρόνου ωρίμανσης.
- Η ύπαρξη δομής είναι συνήθως γνωστή για ευρύ φάσμα φυσικών εδαφών. Όμως για τεχνητά παρασκευασμένα εδάφη, δεν είναι πλήρως γνωστή.Η συμπεριφορά αυτών των εδαφών στο εργαστήριο, δεν μπορεί να γίνει κατανοητή, εκτός αν ληφθεί υπόψη η επίδραση της δομής, καθώς η δομή είναι εξίσου σημαντική με τον αρχικό λόγο κενών και την ιστορία τάσεων κατά τον καθορισμό αυτής της συμπεριφοράς.Αν και η δομή μπορεί να προκύψει από διαφορετικές αιτίες, η επίδραση της στη συμπεριφορά παραμένει παρόμοια. Η δομή αυξάνει την αντοχή και διευρύνει την ελαστική περιοχή, όταν το δείγμα είναι σε συνθήκες θλίψης. Ενώ σε συνθήκες εφελκυσμού, το δείγμα φαίνεται να χάνει τη συνεκτικότητά του ταχύτερα, ελαχιστοποιώντας την ελαστική συμπεριφορά του εδάφους. Η έννοια της διαρροής, η οποία αναπτύχθηκε για να περιγράψει την επίδραση αυτών των συνθηκών, είναι εξίσου εφαρμόσιμη στην επίδραση της δομής όσο και της ιστορίας τάσεων. Ωστόσο, για να αποφευχθεί η

σύγχυση, απαιτείται χωριστό πλαίσιο συμπεριφοράς για να περιγράψει αυτές τις επιδράσεις για ένα τεχνητά και ελαφρά σιμεντωμένο έδαφος με ασθενή δομή.

- Η εργαστηριακή έρευνα που εκτελέστηκε, έθεσε θέματα για την επιρροή που έχει η ιπτάμενη τέφρα στη δομή αλλά και στο σχήμα της επιφάνειας διαρροής. Και οι δύο τύποι βελτιωμένης αργίλου δεν σχημάτισαν ισχυρή δομή στη μάζα των δειγμάτων, και κατά μεγάλο βαθμό συμπεριφέρθηκαν ως μία αναζυμωμένη άργιλος. Όμως το γεγονός αυτό δεν εμπόδισε το σχηματισμό μίας σαφούς επιφάνειας διαρροής, η οποία δείχνει την επίδραση της σιμέντωσης.
- Οι δοκιμές θλίψης, οι οποίες ουσιαστικά συνεπάγονται υψηλότερη ενεργή τάση στην αστοχία, απαιτούσαν μεγαλύτερου μεγέθος προεκβολή για να προκύψει η συνοχή, σε σχέση με τις δοκιμές εφελκυσμού.Συνεπώς, οι δοκιμές εφελκυσμού, με χαμηλότερες ενεργές τάσεις, δίνουν καλύτερη εκτίμηση της συνοχής η οποία αποδίδεται στην επίδραση της δομής (π.χ. δεσμούς σιμέντωσης, κράτυνση). Ωστόσο η γωνία τριβής παρουσίαζε σημαντική διαφορά. Η χαμηλότερη τιμή γωνίας τριβής σε δοκιμές εφελκυσμού ήταν αναμενόμενη, λόγω του διαφορετικού μηχανισμού αστοχίας.
- Τα εργαστηριακά αποτελέσματα έδειξαν ότι η επιφάνεια αρχικής διαρροής διαστέλλεται με μικρή αύξηση του ποσοστού της τέφρας, καθώς και με τη μείωση της συνολικής υγρασίας. Η περιβάλλουσα διαρροής δύναται να συσχετισθεί με την αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη, το ποσοστό τέφρας και τη συνολική υγρασία. Η παρουσία τέφρας στη μάζα της αργίλου, προκαλεί μείωση της καμπυλότητας της επιφάνειας αρχικής διαρροής. Αυτό συμβαίνει διότι, όταν η ενεργή πλευρική τάση είναι υψηλότερη από εκείνη στην οποία στερεοποιήθηκε το δείγμα, και επίσης πλησιάζει την τάση αρχικής διαρροής, οπότε παρατηρείται μείωση της διαρροής σε σύγκριση με εκείνη που αντιστοιχεί σε χαμηλότερες πλευρικές τάσεις.
- Η διατμητική αντίσταση στην αστοχία βρέθηκε να εξαρτάται από το μέγεθος της ενεργής τάσης στην αστοχία, τη φύση των δεσμών και τη διατάραξη της δομής της αργίλου.Η δευτερεύουσα στερεοποίησηαποδείχθηκε ότι προκαλεί αλλαγές στη φύση των δεσμών, με αποτέλεσμα σε δοκιμές εφλκυσμού, η άργιλος να επιδεικνύει συμπεριφορά περίπου συνεκτικού υλικού.
- Για τον ορισμό και προσδιορισμό της τάσης και της επιφάνειας πρωτεύουσας διαρροής χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος των Coop και Atkinson. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι μπορεί να προκύψει μία εύλογα συμβατή επιφάνεια αρχικής διαρροής για άργιλο βελτιωμένη με τέφρα.

- Τα αποτελέσματα δοκιμών ισότροπης θλίψης και εφελκυσμού έδειξαν ότι η τάση αρχικής διαρροής αυξάνει με το ποσοστό τέφρας καθώς και με τη μείωση της συνολικής υγρασίας.
- 'Ολα τα δείγματα, σε ισότροπα στερεοποιημένες στραγγιζόμενες δοκιμές (ICD) θλίψης, επέδειξαν έντονη ελαστική συμπεριφορά πριν τη μέγιστη αντοχή. Ενώ τα δείγματα βελτιωμένης με τέφρα αργίλου, σε δοκιμές ICD εφελκυσμού είχαν μικρή ογκομετρική μεταβολή μέχρι τη μέγιστη αντοχή, αποδεικνύοντας έτσι την ύπαρξη ασθενών δεσμών στην εδαφική μάζα, όταν αυτή υποβάλλεται σε εφελκυστικές τάσεις. Η μεταβίβαση της αντίστασης από συνεκτικές σε επαφές τριβής, είναι πολύ πιο αργή στις συνθήκες εφελκυσμού, καθώς το έδαφος επιχειρεί να διατηρήσει την αρχική του κατάσταση.
- Η κύρια επίδραση της προσθήκης τέφρας στη μαλακή άργιλο είναι η αύξηση του αρχικού λόγου κενών και η εμφάνιση καλά καθορισμένου σημείου διαρροής στα διαγράμματα τάσεων-παραμορφώσεων σε θλίψη και εφελκυσμό. Η διαρροή σχετίζεται με τη θραύση δεσμών σιμέντωσης. Ειδικότερα σε υψηλότερη πλευρική τάση, η οποία είναι πέραν της τάσης διαρροής, η δομή προφανώς έχει καταστραφεί στη διάρκεια της φάσης στερεοποίησης, ωστόσο συνεχίζει ακόμη να εμφανίζεται κάποια επίδραση της σιμέντωσης κατά τη διάρκεια της διάτμησης. Αυτό ήταν προφανές σε συνθήκες εφελκυσμού. Η υφή της βελτιωμένης αργίλου έπαιξε σημαντικό ρόλο στη διάρκεια της διάτμησης, και τα δείγματά της επέδειξαν πιο όλκιμη συμπεριφορά. Σε χαμηλή πλευρική τάση, η οποία είναι χαμηλότερη από την τάση διαρροής, η καταστροφή της δομής της βελτιωμένης αργίλου, συμβαίνει μόνο στη φάση της διάτμησης, ακολουθούμενη από χαλάρωση οφειλόμενη στην παραμόρφωση. Όσο μεγαλύτερο είναι το ποσοστό της τέφρας, τόσο υψηλότερα μεταθέτονται η επιφάνεια και η περιβάλλουσα διαρροής.

7.2 Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα

- Το πλαίσιο συμπεριφοράς, το οποίο διατυπώθηκε στην παρούσα έρευνα για άργιλο βελτιωμένη με ιπτάμενη τέφρα, βασίστηκε σε περιεκτικότητες 10% και 15% σε τέφρα (εκφρασμένες με βάση το ξηρό βάρος αργίλου συν το βάρος του συνολικού ύδατος στο τελικό μίγμα) και σε χρόνο ωρίμανσης τριων (3) μηνών. Καθώς η αντοχή της βελτιωμένης αργίλου εξαρτάται από την περιεκτικότητα σε τέφρα και το χρόνο ωρίμανσης, είναι αβέβαιο αν το πλαίσιο

συμπεριφοράς δύναται επίσης να εφαρμοστεί σε άλλες περιπτώσεις αργίλων βελτιωμένων με διαφροετικά ποσοστά τέφρας και διαφορετικούς χρόνους ωρίμανσης. Συνεπώς αυτό το θέμα είναι αναγκαίο να διερευνηθεί περαιτέρω.

- Ένα άλλο θέμα, το οποίο ανέκυψε από την παρούσα έρευνα και την ανασκόπηση της σχετικής βιβλιογραφίας είναι το εξής. Ο σχηματισμός δομής στη μάζα του εδάφους, δεν οφείλεται μόνο στο συνδετικό υλικό, αλλά σε αυτό συμβάλλει και το ίδιο το έδαφος ανάλογα με τον τύπο του. Μία άργιλος υψηλής πλαστικότητας, έχει τα δικά της μηχανικά χαρακτηριστικά τα οποία δύνανται να βελτιωθούν. Συνεπώς θα παρουσιάζει ενδιαφέρον μία έρευνα με διαφορετικά εδάφη, αλλά με προσθήκη ίδιου ποσοστού τέφρας και ίδιους χρόνους ωρίμανσης.
- Σε αυτήν την έρευνα, δεν καλύφθηκε το θέμα της συμπεριφοράς πριν τη διαρροή της βελτιωμένης με ιπτάμενη τέφρα αργίλου, καθώς και της μη γραμμικής συμπεριφοράς σε μικρές παραμορφώσεις. Η δυσκαμψία της υψηλής πλαστικότητας αργίλου βελτιωμένης με ιπτάμενη τέφρα και η εξάρτησή της από διάφορους παράγοντες, όπως το ποσοστό τέφρας, η συνολική υγρασία, και ο χρόνος ωρίμανσης με την προκύπτουσα λόγω ωρίμανσης φαινόμενη τάση προστερεοποίησης, πρέπει να ερευνηθούν περαιτέρω σε συνθήκες τριαξονικής φόρτισης και σε δοκίμια μεγαλύτερων διαστάσεων. Η μεταβολή της δυσκαμψίας στη διάρκεια καταστροφής της δομής, πρέπει επίσης να μελετηθεί. Η ενσωμάτωση μετρητών τοπικής παραμόρφωσης στη συνήθη διάταξη τριαξονικής δοκιμής, δύναται να ικανοποιήσει τις περισσότερες από αυτές τις απαιτήσεις. Οι γνώσεις σχετικά με τη δυσκαμψία της βελτιωμένης με ιπτάμενη τέφρα αργίλου, θα είναι χρήσιμες στην αριθμητική ανάλυση προβλημάτων και στην γεωτεχνική πρακτική.
- Η βασική παραδοχή αυτής της έρευνας είναι ότι όλα τα δείγματα είναι ισότροπα. Τα δείγματα, πριν τη διάτμηση, στερεοποιήθηκαν ισότροπα σε καθορισμένη πίεση. Αν και αυτές οι συνθήκες είναι κατάλληλες και επαρκείς για εργαστηριακή έρευνα, ωστόσο είναι διαφορετικές από εκείνες για εδάφη βελτιωμένα με ιπτάμενη τέφρα επί τόπου, όπου η ωρίμανση και η φόρτιση συμβαίνουν σε ανισότροπες συνθήκες. Η επίδραση της ανισοτροπίας θα μπορούσε να ερευνηθεί με τα δείγματα να ωριμάζουν και να δοκιμάζονται σε ανισότροπες συνθήκες θλίψης και εφελκυσμού, με την προϋπόθεση το πρόγραμμα ωρίμανσης και δοκιμών να έχει σχεδιαστεί κατάλληλα.

- Με βάση το πλαίσιο συμπεριφοράς το οποίο παρουσιάζει η παρούσα έρευνα, θα μπορούσε να διατυπωθεί ένα καταστατικό προσομοίωμα αργίλου βελτιωμένης με ιπτάμενη τέφρα σε τριαξονικές φορτίσεις θλίψης και εφελκυσμού.Αυτό είναι απαραίτητο ώστε το βελτιωμένο έδαφος να μπορεί να ενσωματωθεί επιτυχώς σε μία ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Adachi T. and Oka F (1995). "An elasto-elastoplastic constitituve model for soft rock with strain softening". Int. J. Numer. and Anal. Methods in Geomech, 19(4), 233-247

Abdulla Ali A. and Kiousis Panos D. (1997). "Behavior of cemented sands-I. Testing". Int. J. Numer. Analyt. Merthods Geomech. Vol. 21, 533-547

Ahnberg, H. Ljungkrantz, C. and Holmqvist, L. (1995). "Deep Stabilisation of Different Types of Soft Soils". Proc. 11th ECSMFE, Copenhagen, Vol. 7:7.167-7.172.

Airey D.W. (1993). "Triaxial testing of naturally cemented carbonate soil". Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol.-119, No.9, 1379-1398

Al-Tabbaa, A. (1995). “Excess pore pressure during consolidation and swelling with radial drainage”. Geotechnique 45 No. 4, 701-707.

Al-Tabbaa, A. and Wood, D.M. (1989). "An experimentally based bubble model for clay". In numerical models in geomechanics, Niagara Falls (edited by S. Pietruszazak and G.N. Pande), Rotterdam, 91-99.

Anagnostopoulos A., Kalteziotis N., Tsiambaos G.K. and Kavvadas M. (1991). "Geotechnical properties of the Corinth Canal Marls". Geotechnical and Geological Engineering, Vol. 9, 1-26

Anagnostopoulos A., Schlosser, F., Kalteziotis, N. and Frank, R. (eds), “Geotechnical engineering of hard-soft rocks”, Balkema, Rotterdam, Vol. 1, pp. 1299-1308.

Asaoka A., Nakano M. and Noda T. (2000). "Superloading yield surface concept for highly structured soil behavior". Soil and Foundations, Vol. 40(2), 99-110

Assarson K., Broms B., Grahhom, S. and Paus K. (1974). "Deep foundations and ground improvement schemes". Proceedings on Geotextiles, Geomembranes and other Geosynthetics in Ground Improvement, Bangkok, 161-173.

Atkinson J.H. and Richardson D. (1987), "The effect of local drainage in shear zones on the undrained strength of overconsolidated clay". Geotechnique 37, No.3, 393-403)

Balasubramamiam A.S., Kamruzzaman, A.H.M., Uddin K, Lin D.G. and Bergado D.T. (1998). Chemical Stabilization of Bangkok Clay with Cement, Lime and Bergado, D.T. (1998), Proc. 13 SEAGC, Taipei 253-258

Barden L. and McDermott Richard J.W. (1965). "Use of free ends in triaxial testing of clays". Journal of soil mechanics and foundation division, ASCE, Vol. Vol.-91, No. SM6, 1-23

Barksdale R.D. and Blight, G..E (1997). "Compressibility and settlement of residula soils". In mechanics of residual soils, Rotterdam A.A. Balkema 95-154

Baudet B. and Stallebrass S. (2004). "A constitutive model for structured clays" Geotechnique 54, No.4, 269-278

Bazant Z.P., Planas J. (1998). "Fracture and Size in concrete and other quazi-brittle Materials". CRC Press, 291-299

Belgado D.T., Anderson L.R., Miura N. and Balasubramaniam, A.S. (1996). "Soft ground improvement in Lowland and other environments", ASCE Press New York

Bergado D.T., Ruenkrairergsa T. Taesiri Y. “Deep soil mixing to reduce embankment settlement”. Ground Improvement J. 3(3), 145-162

Black D.K. and Lee, K.L. (1973) “Saturating laboratory samples by back pressure”. J. Soil Mechanics & Foundation Division, ASCE Vol. 99 (SM1), 9484, 75-93.

Bressani, L.A. (1990). “Experimental properties of bonded soils” PhD thesis, University of London

Broms, B.B. (1984). “Stabilisation of soft clay with lime columns.” Proceedings, Seminar on soil improvement and construction techniques in soft ground”, NanYang Technological Institute, Singapore

BS1377 (1990). “British Standards Methods of Test for Soils for Civil Engineering Purposes”. British Standard Institute, London

BS1881 (1983). “Testing concrete-Part 117: Method for determination of tensile splitting strength”. British Standard Institution, London

Burland J.B. (1990) “On compressibility and shear strength of natural clays”. Geotechnique, Vol. 29(3), 329-378

Burland J.B., Rampello S. Georgiannou V.N., and Calabresi, G. (1996) “A Laboratory study on the strength of four stiff clays”. Geotechnique. Vol. 46(3), 491-514.

Callisto L. and Rampello S. (2004) “An interpretation of structural degradation for three natural clays”. Can. Geotech. J. Vol.-41, 392-407.

Callisto L. and Calabresi G. (1998). “Mechanical behaviour of a natural soft clay”. Geotechnique 48, No.4, 495-513.

Cecconi M., Viggiani G., Rampello S. (1998). “An experimental investigation of the mechanical behaviour of a pyroclastic soft rock”. Proc. 2nd Int. Symp. On Geotech. Eng of Hard Rocks, Naples 1 473-482.

Chazallon C. and Hicher P.Y. (1995). “An elasto-plastic model with damage for bonded geomaterials”. Numerical models in Geomechanics NUMOG-5 Conf., Rotterdam, The Netherlands. 21-26.

Chazallon C., and Hicher P.Y. (1998). “A constitutive model coupling elastoplasticity and damage for cohesive-frictional materials”. Mechanics of Cohesive-Frictional Materials 3, 41-63.

Chandler R.J. (2000). “Clay sediments in depositional basins: the geotechnical cycle”. Q. J. Engng Geol. Hydrogeol., Vol.33, 7-39.

Chiu C.F., Zhu W and Zhang C.L. (2008). “Yielding and shear behaviour of cement-treated dredeged materials”. Engineering Geology Vol.103, 1-12

Chua Tong Seng (1990). “Some considerations in undrained triaxial testing of very soft clay”. Master thesis, National University of Singapore, Singapore

Chew S.H., Kamruzzaman and Lee F.H. (2004). “Physicochemical and engineering behaviour of cement treated clays”. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 696-705.

Chin K.G., Lee F.H, and Dasari G.R. (2004). “Effects of curing stress on mechanical properties of cement-treated soft marine clay”. Proc. Int. Symp. On Engineering Practice and Performance of soft Deposits, Osaka, 217-222.

Consoli N.C., Rotta G.V, and Prietto P.D.M. (2000). “Influence of curing stress on the triaxial response of cemented soils”. Geotechnique 50, No.1, 99-105.

Consoli N.C., Rotta G.V. and Prietto P.D.M. (2006). “Yielding-compressibility-strength relationship for an artificially cemented soil under stress”. Geotechnique 56, No.1, 69-72.

Coop M.R. and Atkinson J.H. (1993). “The mechanics of cemented carbonate sands”. Geotechnique 43, No.1, 53-67.

Cotecchia F. and Chandler R.J. (1997). “The influence of structure on the pre-failure behaviour of a natural clay”. Geotechnique Vol. 47(3), 523-544.

Crooks, J.H.A and Graham J. (1976). “Geotechnical properties of the Belfast estuarine deposits”. Geotechnique 30, No. 2, 293-315.

Cuccovillos T. and Coop M.R. (1997). “Yielding and pre-failure deformation of structured sands”. Geotechnique 47, No.1, 69-72.

Cotecchia F. and Chandler. R.J. (2000). “A general framework for the mechanical behaviour of clays”. Geoetechnique Vol. 50(4), 431-447.

Cuccovillos T. and Coop M.R. (1999). “On the mechanics of structured sands”. Geotechnique 49, No. 6, 741-760.

Deschenes J., Massiera M., and Tournier J. (1995). “Testing of a cement bentonite mix for a low permeability plastic barrier”. In Dredging, Remediation and Containment of contaminated sediments, ASTM 1293, 252-270.

Desrues J. (1998). “Localisation patterns in ductile and brittle geomaterials”. In Material Instabalities in solids, 137-158.

Ducasse P., Mieussens C., Moreau M. and Soyez B. (1986). “Oedometric Testing in the Laboratoires des Ponts et Chaussees, France”. Consolidation of Soils: Testing and Evaluation ASTM STP 892: 282-298.

Ferreira P.M. and Bica A.V.D. (2006). “Problems in identifying the effects of structure and critical state in a soil with a transitional behaviour”, Geotechnique No.56, 445-454.

Gajo, A and Miur Wood D. (2001). “A new approach to anisotropic bounding surface plasticity: general formation and simulations for natural and reconstituted clays”. Int. J.Nummer Anal. Methods Geomech. Vol.18, 314-333.

Gens A. and Nova R. (1993). “Conceptual bases for constitutive model for bonded soils and weak rocks”. Proc. Int. Conf. on Hard Soils-Soft Rocks, 485-494.

Georgiannou V.N. and Burland J.B. (2001). “A laboratory study of post-rupture strength”. Geotechnique 51, No.8, 665-675.

Graham J., Noonan M.L. and Lew K.V. (1983). “Yield states and stress-stain relationships in a natural plastic clay”. Can. Geotech. Journal Vol.20, 502-516.

Harleston N. and Wang X.H. (2009). “Laboratory evaluation of cement reinforced and cement-flyash-gravel (CFG) reinforced concrete pavement sections”. EJGE, Vol.14

Head K.H. (1986). “Manual of soil Laboratory Testing”. ELE International Limited, Pentech Press, London.

Hirai H., Takahashi M. and Yamada M. (1989). “An elastic-plastic constitutive model for the behaviour for improved sandy soils”. Soils and Foundations, Vol. 29(2), 69-84.

Horpibulusk S., Miura N. and Nagaraj T.S. (2003). “Assessment of strength development in cement-admixed high water content clays with abrams Law as basis”. Geotechnique Vol. 53(4), 439-444.

Horpibulusk S., Miura N. and Bergado D.T. (2004). “Undrained shear behaviour of cement admixed clay at high water content”. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering ASCE, 1096-1105.

Horpibulusk S., Liu M.D., and Suebuk J. (2009). “Behavior of cement clay simulated via the theoretical framework”. Computers and Geotechnics.

Huang J.T. and Airey D.W. (1998). “Properties of artificially cemented carbonate sand”. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 492-499.

Huat B.K. (2006). “Effect of cement admixtures on the engineering properties of tropical peak soils”. EJGE paper, Vol. 11.

Ikhlef N.S., Ghembaza M.S. and Dadouch M. (2015). “Effect of treatment with cement of the mechanical characteristics of silt from Telegh Region of Sidi Belades, Algeria.”. Geotech Geol Eng. 33:1067-1079.

Iyer T.S.R. (1974). “The behaviour of Drammen plastic clay under low effective stresses”. Can. Geotech. J. Vol 12:70-82.

Jardine R.J. (1985). “Investigations of pile-soil behaviour with special reference to the foundation of offshore structures”. PhD thesis, University of London.

Jardine R.J., St. John H.D., Highr D.W. and Potts D.M. (1991). “Some practical applications of a non-linear ground model”. Proccedings of 10th European Conference on Soil Mechanics, Florence, Vol. 1 pp.223-238.

Jardine R.J. (1992). “Some observations on the kinematic nature of soil stiffness”. Soils and Foundations 32, 111-124.

Jardine, R.J. (1995). “One perspective of the pre-failure deformation characteristics on some geomaterials”. Proceedings of the International Symposium on Pre-Failure Deformation Characteristics of Geomaterials, Hokkaido, Japan, Shibuya, S., Mitachi, T. and Miura, S. (eds),Vol. 2, 855-885.

Jardine, R.J., Gens A., Hight D.W. and Coop M.R. (2002). “Developments in understanding soil behaviour”. Extended paper Imperial College,

Kaomon, M. and Bergado, D. T. (1991). “Ground improvement techniques”. Proceedings of the 9th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering Bankok, 2, 526-546.

Kamruzzaman A. H. M., Chew S. H., and Lee F. H. (2009). “Structuration and Destructuration behavior of cement-treated Singapore marine clay”. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol. 135, No. 4, 573-589.

Kasama K., Ochiai H. and Yasufuku N.(2000). “On the stress-strain behavior of lightly cemented clay based on an extended critical state concept”. Soils and Foundations, Vol.40, No.5, 37-47.

Kavvadas, M., Anagnostopoulos, A., Leonardos, M. and Karras, B. (1993). “Mechanical properties of Ptolemais lignite”. Proceedings of the International Symposium on the Geotechnical Engineering of Hard Soils-Soft Rocks, Athens,

Kavvadas, M., Papadopoulos, B. and Kalteziotis, N. (1994). “Geotechnical properties of Ptolemais lignite”. Geotechnieal and Geological Engineering, 12, 87-112.

Kavvadas M. (1995). “A plasticity approach to the mechanical behavior of bonded soils”. Proc. 4th Int. Conf. Computational Plasticity, Barcelona.

Kavvadas M. and Amorosi A.(2000). “A constitutive model for structured soils”.Geotechnique 50, No. 3, 263-273.

Khemissa M. (2016). “Validity of oedometer and triaxial test results”. Geotech. Geol. Eng. (34), 1171-1180.

Kilpatrick, B.L., and Garner, S.J. (1992). “Use of Cement Bentonite for Cut-Off Wall Construction”. Proc. of Grouting, Soil Improvement, and Geosynthetics, ASCE Geotechnical Publication 30, 803-815.

Koskinen, M., Karstunen, M. and Wheeler, S. J. (2002). “Modelling destructuration and anisotropy of a soft natural clay”. Proc. 5th Eur. Conf. Numer. Methods Geotech. Engng, Paris, 11-20.

Koukouzas N.K., Zeng R., Perdikatsis V., Xu W. and Kakaras E.K. (2005). “Mineralogy and Geochemistry of greek and Chinese coal fly ash: Research for potential applications”. 2005 World of Coal Ash Conference Proc.

Kumar J.S and Janewoo U. (2016). “Stabilization of expansive soil with cement kiln dust and RBI Grade 81 at subgrade level”. Geotech Geol Eng. 34: 1037-1046.

Lacasse L. and Berre T. (1988). “State of the art paper: Triaxial Testing Methods for Soils”, Advanced Triaxial of Soil and Rock, ASTM STP 977.

Lagioia R. and Nova R. (1995). “An experimental and theoretical study of the behavior of a calcarenite in triaxial compression”. Geotechnique 45, No. 4, 663-648.

Lagioia, R., and Nova, R.(1995). “An experimental model for structured soils”. Geotechnique, 50(3), 263-273.

Locat, J., Berube, M.-A., and Choquette, M. (1990). “Laboratory Investigations on the Lime Stabilization of Sensitive Clays Shear Strength Development”. Can. Geotech. J., Vol. 27, 294-304.

Lee Kenneth L. (1978). “End restraint effects on undrained static triaxial strength of sand”. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol-104, No. GT6, 687-703.

Lee F. H., Lee Yong, Chew S. H. and Yong K. Y.(2005). “Strength and modulus of marine clay-cement mixes”. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 178-185.

Lee K., Chan D. and Lam K. (2004). “Constitutive model for cement treated clay in a critical state frame work”. Soils and Foundations, Vol. 44, No.3, 69-77.

Leroueil S. and Vaughan P. R. (1990). “The general and congruent effects of structure in natural soils and weak rocks”. Geotechnique 40, No. 3, 467-488.

Leroueil S. (1998). “Contribution to the round table: peculiar aspects of structured soils”. Proc. 2nd Symp. Geotech. Hard Soils-Soft Rocks, Napoli 3, 1669-1678.

Liu M. D. and Carter J. P. (1999). “Virgin compression of structured soils”.Geotechnique 49, No. 1, 43-57.

Liu M. D. and Carter J. P. (2000). “Modelling the destructuring of soils during virgin compression”. Geotechnique 50, No. 4, 479-483.

Liu M. D. and Carter J. P. (2002). “A structured Cam Clay model”. Can. Geotech. J.Vol- 39, 1313-1332.

Liu MD, Carter JP, Horpibulsuk S, Liyanapathirana DS.. “Modelling the behaviour of cemented clay”. In: Geo-Shanghai 2006; 65–72 [Geotechnical special publication no. 152.

Lo S.C.R. and Chu J. (1991). “The measurement of K0 by triaxial strain path testing” Soil and Foundations Vol.31, No.2, 181-187.

Locat, J. Tremblay, H., and Leroueil, S. (1996). “Mechanical and Hydraulic Behaviour of a Soft Inorganic Clay Treated with Lime”. Can. Geotech. J., Vol. 33, 654-669.

Lorenzo G. A. and Bergado D. T. (2004). “Fundamental parameters of cement-admixed clay-new approach”. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 1042-1050.

Low H. E., Phoon, K. K., Tan T.S., and Leroueil S.(2008). “Effect of soil microstructure on the compressibility of natural Singapore marine clay”. Can. Geotech. J.45, 161-176.

Maccarini, M. (1987). “Laboratory studies of a weakly bonded artificial soil”. PhD thesis, University of London.

Malandraki, V. and Toll, D.G. (1994). “Yielding of a Weakly Bonded Artificial Soil”. Proc. Int. Symp. Pre-failure Deformation Characteristics of Geomaterials, Sapporo, Japan (ed. Shibuya, S., Mitachi, T. and Miura, S.), Rotterdam: Balkema, pp. 315-320.

Malandraki, V. and Toll, D.G. (1996). “The definition of yield for bonded materials”. Geotechnical and Geological Engineering, Vol.14, 67-82.

Malandraki, V. and Toll, D. G. (2000). “Drained probing triaxial tests on a weakly bonded artificial soil”. Geotechnique 50, 141-151.

Matsuoka H. and SUN, D. A. (1993). “A constitutive law for frictional and cohesive materials”. JSCE, No. 463/III-22, 163-172(in Japanese).

Matsuoka H. and SUN, D. A. (1995). “Extension of spatially mobilized plane(SMP) to frictional and cohesive materials and its application to cemented sands”. Soils and Foundations, Vol. 35, No. 4, 63-72.

McDowell G. R. (2000). “A family of yield loci based on micro mechanics”. Soils and

Foundations, Vol. 40, No.6, 133-137.

McDowell G. R. and Hau .K. W. (2004). “ A generalized modified cam clay model for clay and sand incorporating kinematic hardening and bounding surface plasticty”. Granunlar Matter 6, 11-16.

Mitchell R. J. (1970). “On the yielding and mechanical strength of Leda clays”. Canadian Geotechnical Journal, vol.7, 297-312.

Mitchell, J.K. (1976). “Fundamentals of Soil Behavior”. Wiley, New York.

Mitchell, J.K. (1993). “Fundamentals of Soil Behavior”. 2nd Ed., Wiley, New York.

Miura N., Horpibulsuk S. and Nagagaj T. S. (2001). “Engineering behavior of cement stabilized clay at high water content”. Soils and Foundations, Vol. 41, No.5, 33-45.

Mroz, Z., Norris, V.A. and Zienkiewicz, O. C.(1978). “An anisotropic hardening model for soils and its application to cyclic loading”. Int. J. Num. Anal. Methods Geomechanics 2, 203-221.

Wood, D. M. (1990). “Soil Behaviour and Critical State Soil Mechanics”. Cambridge University Press

Muir Wood (1995). “Kinematic hardening model for structured soil”. Numerical Models in Geomechanics-NUMOG V, Pande and Pietruzczak(eds), Balkema, Rotterdam, 83- 88.

Nagaraj. T.S., Pandain, N.S. and Narasimha Raju, P.S.R.(1998). “Compressibility behavior of soft cemented soils”. Geotechnqiue, 48, NO.2, 281-287.

Namikawa T, Koseki J.(2006). “Experimental determination of softening relations for cement-treated sand”. Soils and Foundations, Vol.46(4), 491–504.

Namikawa T. and Mihira S. (2007). “Elasto-plastic model for cement-treated sand”. Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech., Vol. 31, 71-107.

Parathiras A.N. (1994). “Displacement rate effects on the residual strength of soils”. Phd Thesis University of London.

Parry R.H.G (2004). “Mohr circles, stress paths and geoetechnics”, Spon Press

Petchgate K., Voottipruex P. and Suknognkol W. (2000). “ Effect of height and diameter ratio on strength of cement stabilized soft Bangkok clay”. Geotechnical Engineering Journal, Vol. 31, No.3, 227-239.

Porbaha, A., Shibuya, S. and Kishida, T. (2000). “State of Art in Deep Mixing Technology. Part III: Geomaterial Characterization”. Ground Improvement, Vol. 3, 91-110.

Prevost, J. H.(1978). “ Plasticity theory for soil stress-strain behavior”. J. Engng Mech. Div. ASCE104, No.5, 1177-1194.

Rao, S.N., and Rajasekaran, G. (1996). “Reaction products formed in lime-stabilized marine clays”. J. Geotech. Engrg., 122(5), 329-336.

Roscoe, K.H., and Burland, J.B. 1968. “On the generalized stress strain behaviour of ‘wet clay”. In Engineering plasticity. Edited by J. Heyman and F.A. Leckie. Cambridge University Press, 535–609.

Rotta G. V., Consoli N. C., Prietto P. D. M., Coop M .R. and Graham J.(2003). “Isotropic yielding in an artificially cemented soil cured under stress”. Geotechnique 53, No. 5, 493-501.

Rowe P. W. and Barden Laing(1964). “ Importance of free ends in triaxial testing”. Journal of the soil mechanics and foundation division, ASCE, Vol-90, No. SM1, 1-27.

Saihi S., Leroueil S., La Rochelle P. and French I. (2002). “Behaviour of the stiff and sensitive Saint-Jean-Vianney clay in intact, destructured and remoulded conditions”., Can. Geotech. J. 39:1075-1087.

Saitoh, S., Suzuki, Y., Shirai, K. (1985). “Hardening of Soil Improved by Deep Mixing Method”. Proc. 11th ICSMFE, Vol. 5, 1745-1748.

Samieh A. M. and Wong R. C.K.(1997). “Deformation of Athabasca oil sand at low effective stresses under varying boundary conditions”. Can. Geotech. J., Vol. 34, 985–990.

Schnaid, F., Prietto, P. D. M. and Consoli, N.C.(2001). “Characterization of cemented sand in triaxial compression”. J. Geotech. Geoenviron. Engng. ASCE 127, No. 10, 857-868.

Sharma N.K., Swain S.K., Sahoo U. (2012). “Stabilisation of a clayey soil and fly ash and lime: a micro level investigation”, Geotech. Geol. Eng. 30:1197-1205.

Sharma N.K. (2017). “Laboratory study on stabilization of clayey soil with cement kiln dust and fiber”. Geotech. Geol. Eng. 35:2291-2302.

Smith P. R., Jardine R. J. and Hight D. W. (1992). “The yielding of Bothkennar clay”. Geotechnique 42, No. 2, 257-274.

Stavridakis E. I. (2006). “Effect of curing time and bentonite content on the quantitative evaluation of engineering behavior of cement treated clayed mixtures under soaked conditions”. EJGE paper, Vol. 11, Bundle A.

Suzuki, M., Fujimoto, T., Yamamoto, T., and Okabayashi, S. (2004). “Strength Increase of Cement-Stabilized Soil due to Initial Consolidation”. Proc. Int. Symp. On Engineering Practice and Performance of Soft Deposits, Osaka, 211-216.

Taki, O. and Yang, D. (1991). “Soil Cement Mixed Wall Technique”. Geotechnical Engineering Congress, ASCE, Special Publication, No. 27, 298-309.

Tatsuoka F. and Kobayashi A. (1983). “Triaxial strength characteristics of cement-treated soft clay”. Proc. 8th ECSMFE, Vol. 8, No. 1, 421-426.

Tatsuoka, F. and Shibuya, S. (1991). “Deformation characteristics of soils and rocks from feld and laboratory tests”. Proceedings of the Ninth Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Southeast Asian Geotechnical Society, Bangkok, Vol. 2, 53-114.

Tatsuoka, F.,Uchida, K., Imai, K., Ouchi, T., and Kohata, Y. (1997). “Properties of Cement Treated Soil in Trans-Tokyo Bay Highway Project”. Ground Improvement, Vol. 1(1), 37-57.

Timoshenko and Goodier (1970). “Theory of elasticity”. Third Ed, McGraw-Hill, Japan, 122-123.

Tan S. T., Goh T. L. and Yong K. Y. (2002). “Properties of Singapore marine clays improved by cement mixing”. Geotechnical Testing Journal, Vol. 25, No.4, 1-11.

Tan, T.S., Phoon, K.K., Lee, F.H., Tanaka, H., Locat, J., and Chong, P.T. (2003). “A Characterisation Study of Singapore Lower Marine Clay”. In Characterisation and Engineering Properties of Natural Soils, Tan et al. (eds.). Swets & Zeitlinger, Lisse, 429-54.

Tan, S. L. (1983). “Geotechnical properties and Laboratory testing of soft soils in Singapore”. Proc., 1st International Seminar on Construction Problems in soft soils, Nanyang Technological Institute, Singapore, 1-47.

Ting C.M.R., Sills G.C. and Wijeyesekera D.C. (1994). “Development of K0 in soft clays”. Geotechnique 44, No.1, 101-109.

Thiyyakkandi S. (2012), “Failure of cemented soil under decreasing effective stress”, EJGE Vol. 17: 919-927.

Topolnicki M., Gudehus G. and Mazurkiewicz B.K. (1990). “Observed stress-strain behaviour of remoulded saturated clay under plane strain conditions”. Geotechnique 40, No. 2, 155-187.

Uchida K., Hyogo K., Stedman D.J. and Sakagami T. (2003), “Strain- Path control K_0 Consolidation of Marine Clays”. Proc. Of the 13th Int. Offshore Conf., 25-30.

Uddin, K., Balasubramaniam A. S. and Bergado D .T. (1997). “Engineering Behavior of Cement-Treated Bangkok Soft Clay”. Geotech. Eng., Vol. 28(1), 89-119.

Vatsala A., Nova R., and Murthy B. R. Srinivasa(2001). “Elastoplastic model for cemented soils”. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol. 127, 679-687.

Vaughan, P.R. (1988). “Characterising the mechanical properties of the in-situ residual soil”. Proceedings of the 2nd International Conference on Geomechanics in Tropical Soils, Singapore, Balkema, Rotterdam, Vol. 2, pp. 469-87.

Vaughan, P.R., Maccarini, M. and Mokhtar, S.M. (1988). “Indexing the engineering properties of residual soil”. Quarterly Journal of Engineering Geology, 21, 61-84.

Vaughan, P.R. (1990b). “Discussion of session 1.1, Proceedings of the Conference on Engineering Geology of Weak Rock”. Leeds, Cripps, J.C., Coulthard, J.M., Culshaw, M.G., Forster, A., Hencher, S.R. and Moon, C.F. (eds), Balkema, Rotterdam, p. 111.

Viggiani, G., Rampello, S. and Georgiannou, V.N.(1993). “Experimental analysis of localization phenomenon in triaxial tests on stiff clays”. Proc. 1st Symp. Geotech. Hard Soils-Soft Rocks, Athens 2, 849-856.

Wissa, A.E.Z., Ladd, C.C. and Lambe, T.W. (1965). “Effective Sress Strength Parameters of Stabilized Soils”. Proc. 6th ICSMFE, Montreal, Vol. 1, 412-416.

Wong P. K. K. and Mitchell R. J. (1975). “Yielding and plastic flow of sensitive cemented clay”. Geotechnique 25, No. 4, 763-782.

Wood D. M. (1990). “Soil behavior and critical state soil mechanics”.150-153, Cambridge University Press.

Wood D. M. (2004). “Experimental inspiration for kinematic hardening soil models”. Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 656-664.

Yin, J.H., and Lai, C.K. (1998). “Strength and Stiffness of Hong Kong Marine Deposits Mixed with Cement.”. Geotech. Eng., Vol. 29(1), 29-44.

Yu, Y. Z, Pu, J. L., Ugai, K. and Takashi, H.(1999). “A study of the permeability of soil-cement mixture”. Soils and Foundations, 39(5), 145-149.