

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ - ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Χριστόδουλος Μπανιάς

Επιβλέπουσα καθηγήτρια:
Β. Ν. Γεωργιάννου, Αναπλ. Καθηγήτρια Ε.Μ.Π

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ
ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΙΔΥΩΔΟΥΣ
ΑΜΜΟΥ ΣΤΗ ΣΥΣΚΕΥΗ ΣΤΡΕΨΗΣ ΚΟΙΛΟΥ
ΔΟΚΙΜΙΟΥ

Αθήνα, Νοέμβριος 2011

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η διπλωματική εργασία αυτή δεν θα μπορούσε ποτέ να πραγματοποιηθεί χωρίς την συμβολή της κυρίας Β. Ν. Γεωργιάννου, Αναπληρώτριας Καθηγήτριας της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π., η οποία από τη θέση του επιβλέποντος καθηγητή ήταν πάντα διαθέσιμη και πρόθυμη να λύσει απορίες, να με καθοδηγήσει και να με στηρίξει με κάθε τρόπο.

Ακόμη, οφείλω ένα ευχαριστώ στην Κωνσταντίνα Σταύρου για την συνεργασία που είχαμε στα πρώτα στάδια της διπλωματικής εργασίας και για τα πειράματά της που αξιοποίησα στη συνέχεια. Επίσης, ευχαριστώ τον τεχνικό του εργαστηρίου Στέλιο Τσεντίδη για τις τεχνικές πληροφορίες και οδηγίες που μου έδωσε για τις συσκευές και τη λειτουργία τους και φυσικά την υποψήφια διδάκτορα του Τομέα Γεωτεχνικής Μαρία Κωνσταντίνου η οποία, πάντοτε παρούσα και με διάθεση για βοήθεια, αφιέρωσε πολύ χρόνο για να με ακούει και να με συμβουλεύει.

Τέλος, πρέπει να αναφέρω την συμβολή του Φώτη Πολύδωρου, φοιτητή του τμήματος Στατιστικής Ο.Π.Α., για τη βοήθεια του με το πρόγραμμα στατιστικής επεξεργασίας SPSS και την αδερφή μου, Χρύσα Μπανιά, για την επιμέλεια του γλωσσικού κομματιού της εργασίας και την τελική της μορφοποίηση.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η επίδραση που έχει το ποσοστό περιεχόμενης ιλύος σε μείγματα άμμου, όσον αφορά την μηχανική τους συμπεριφορά και πόσο αυτή αλλάζει ανάλογα αν το ποσοστό είναι μεγάλο ή μικρό είναι ένα κομμάτι της Γεωτεχνικής Επιστήμης που ακόμα δεν έχει αποσαφηνιστεί πλήρως. Οι απόψεις είναι πολλές και αντικρουόμενες και η ιδέα ενός γενικευμένου πλαισίου που θα περιλαμβάνει ένα μεγάλο φάσμα του εδαφικού υλικού είναι μάλλον, προς το παρόν, μακρινή. Οι λόγοι στους οποίους οφείλονται οι μεγάλες διαφορές που παρατηρούνται στα αποτελέσματα των εργασιών που γίνονται κατά καιρούς, είναι πολλοί: η σύσταση του υλικού, η κοκκομετρία του, ο δείκτης πόρων, η ενεργός τάση στερεοποίησης, ο τρόπος με τον οποίο οι συσκευές επιβάλλουν τη φόρτιση και αρκετές παράμετροι ακόμα.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία επεξεργάστηκαν πειραματικά δεδομένα από πλήθος δοκιμών, κυρίως ανακυκλικών αλλά και μονοτονικών, που έχουν εκτελεσθεί στην συσκευή στρεπτικής διάτμησης κοίλου δοκιμίου (hollow cylinder apparatus). Τα ποσοστά f λεπτόκοκκου υλικού που εξετάστηκαν ήταν: 0% (καθαρή άμμος), 5%, 10% και 15%. Οι ενεργές τάσεις των δοκιμών ήταν κυρίως 50kPa, 100kPa και 300kPa. Το υλικό που χρησιμοποιήθηκε ήταν άμμος M31. Γενικά, έγινε προσπάθεια οι δείκτες πόρων να είναι συγκρίσιμοι μεταξύ τους, να ανήκουν σε ένα σχετικώς μικρό εύρος. Τα δοκίμια που εξετάστηκαν ήταν στο μεγαλύτερο μέρος τους πυκνά, είχαν δείκτη πόρων περίπου από 0.60 έως 0.67, με μερικές μικρές διαφοροποιήσεις.

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι σε τόσο πυκνά δοκίμια, προσθήκη λεπτόκοκκου υλικού σε ποσοστό 5% έχει ιδιαίτερος ευνοϊκά αποτελέσματα στις μηχανικές αντοχές. Περαιτέρω αύξηση σε 10 ή 15% όμως δεν σημαίνει επιπλέον αύξηση της αντοχής, αλλά πτώση της, παραμένοντας όμως πάνω από τις αντοχές τις καθαρής άμμου. Αυτές οι παρατηρήσεις ισχύουν για δοκίμια στερεοποιημένα στα 100 ή τα 300kPa. Σε μικρότερη ενεργό τάση (50kPa), κάθε αύξηση του f σήμαινε αύξηση των αντοχών.

ABSTRACT

The influence of the silt percentage in sand-silt mixtures, when it comes to the mechanic behavior of the mixture and how it changes because of that percentage, is a part of Geotechnical Science that still is quite obscure. The results of the tests done so far are usually in conflict with each other due to the numerous aspects that play an important role in the experimental procedures: the difference of materials, density, consolidation stress and more.

This diploma thesis presents results of monotonic and cyclic tests performed in the hollow cylinder apparatus. The percentages of silt content at the samples are 0%, 5%, 10% and 15% and the initial effective stress had values of 50kPa, 100kPa and 300kPa. The material used was M31 sand. The samples were mostly dense, with void ration range: 0.60-0.67.

The results showed that in such dense samples when the percentage is $f = 5\%$ the mechanical behavior is improved. If the f percentage is further raised (10-15%) the behavior is deteriorated (still remains above the samples of $f = 0\%$). The behavior mentioned before, occurred when the sample's effective stress was 100 or 300kPa. If the effective stress was 50kPa, then any raise of the f percentage resulted in an improvement of the mechanical behavior.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	5
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	9
2. Η ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΗΣ ΑΜΜΟΥ ΣΕ ΜΟΝΟΤΟΝΙΚΗ ΚΑΙ ΑΝΑΚΥΚΛΙΚΗ ΦΟΡΤΙΣΗ..	11
2.1 ΔΟΚΙΜΕΣ ΑΠ' ΕΥΘΕΙΑΣ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ.....	11
2.2 ΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΤΗΣ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ.....	13
2.3 Η ΘΕΩΡΙΑ ΤΗΣ ΣΤΑΘΕΡΗΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ.....	14
2.4 ΔΟΚΙΜΕΣ ΑΝΑΚΥΚΛΙΚΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ.....	19
2.5 Η ΘΕΩΡΙΑ ΤΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΚΑΤΑΡΡΕΥΣΗΣ.....	22
2.6 ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΟΙ ΟΠΟΙΟΙ ΕΠΙΔΡΟΥΝ ΣΤΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΜΙΑΣ ΑΜΜΟΥ.....	28
3. Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΟΥ ΠΟΣΟΣΤΟΥ ΙΛΥΟΣ ΣΤΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΗΣ ΑΜΜΟΥ.....	35
3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	35
3.2 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ ΣΤΗΝ ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΟΥ ΠΟΣΟΣΤΟΥ ΙΛΥΟΣ ΣΤΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΗΣ ΑΜΜΟΥ.....	36
4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΩΝ.....	47
4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	47
4.2 ΥΠΕΡΠΙΕΣΕΙΣ ΠΟΡΩΝ.....	47
4.2.1 <i>Ανάπτυξη υπερπιέσεων πόρων Δu κατά την ανακυκλική φόρτιση υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης.....</i>	48
4.2.2 <i>Στατιστική επεξεργασία των πειραματικών αποτελεσμάτων.....</i>	65
4.2.2.1 Γραφική απεικόνιση.....	65
4.2.2.2 Περιγραφικά Μέτρα.....	68
4.2.2.3 Αποτελέσματα μοντέλου Γραμμικής Παλινδρόμησης.....	69
4.2.2.4 Έλεγχος καταλοίπων (ϵ).....	72
4.2.2.5 Συμπεράσματα.....	74
4.3 ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ.....	75
4.3.1 <i>Επίδραση ενεργού τάσης.....</i>	75
4.3.2 <i>Επίδραση ποσοστού λεπτόκοκκων.....</i>	79
4.4 ΑΝΑΚΥΚΛΙΚΗ ΚΑΙ ΜΟΝΟΤΟΝΙΚΗ ΣΤΡΕΠΤΙΚΗ ΔΙΑΤΜΗΣΗ ΑΜΜΟΥ M31 ΥΠΟ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΕΜΠΟΔΙΖΟΜΕΝΗΣ ΣΤΡΑΓΓΙΣΗΣ.....	84
4.4.1 <i>Μηχανική συμπεριφορά της άμμου χωρίς προσθήκη λεπτόκοκκων υλικού.....</i>	84
4.4.2 <i>Η επίδραση της προσθήκης λεπτόκοκκων υλικού στη μηχανική συμπεριφορά άμμου.....</i>	89
5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	93
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	95

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α	99
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β. ΠΙΝΑΚΕΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ	121

1. Εισαγωγή

Το έδαφος γενικά είναι ένα ανισότροπο υλικό και έχει ιδιαίζουσα μηχανική συμπεριφορά. Αντίθετα με τα συνήθη τεχνικά υλικά που είναι ομοιογενή και παρουσιάζουν συγκεκριμένες μηχανικές ιδιότητες, αυτό το ανομοιογενές σύνολο κόκκων αργίλου, ιλύος, άμμου, χαλίκων και κροκάλων που αποκαλείται έδαφος, δεν ακολουθεί εύκολα κανόνες και κάποιο γενικό πλαίσιο συμπεριφοράς. Στις περισσότερες κατασκευές του Πολιτικού Μηχανικού όμως, παρουσιάζονται γεωτεχνικά προβλήματα που δεν μπορούν να παραμεριστούν και να αποφευχθούν. Αυτά τα προβλήματα συνήθως αναφέρονται σε εντατικές καταστάσεις και φορτίσεις σύνθετες, με αλλαγές στο μέγεθος των κυρίων τάσεων και την διεύθυνσή τους. Συνεπώς, είναι προφανής η ανάγκη πραγματοποίησης πειραμάτων στο εργαστήριο ώστε να προσομοιωθούν οι φυσικές συνθήκες και να εξαχθούν χρήσιμα και ασφαλή συμπεράσματα.

Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη της μηχανικής συμπεριφοράς άμμου M31, τόσο καθαρής όσο και με διάφορα περιεχόμενα ποσοστά λεπτόκοκκου υλικού. Τα δοκίμια που δημιουργήθηκαν από την άμμο και τα μείγματά της, καταπονήθηκαν κυρίως ανακυκλικά αλλά και στατικά, στην συσκευής στρεπτικής διάτμησης κοίλου δοκιμίου. Η συσκευή αυτή, σε σχέση με τις συνηθισμένες εργαστηριακές συσκευές, δίνει τη δυνατότητα εφαρμογής εντατικού πεδίου στο δοκίμιο πολύ ευρύτερου.

Πρέπει να σημειωθεί ότι η ανακυκλική φόρτιση του εδάφους είναι ιδιαίτερης σημασίας για την προσομοίωση σεισμικών καταπονήσεων. Τα δοκίμια που εξετάζονται είναι κοίλα ώστε να διασφαλίζεται ομοιογενής κατανομή της διατμητικής παραμόρφωσης σε όλο το πάχος του τοιχώματος του δοκιμίου.

Η παρούσα διπλωματική εργασία χωρίζεται σε έξι κεφάλαια. Στο πρώτο γίνεται μια εισαγωγή στο αντικείμενο της εργασίας. Στο δεύτερο, παρουσιάζεται συνοπτικά η μηχανική συμπεριφορά των αμμωδών υλικών, πως αυτή μελετήθηκε τα προηγούμενα χρόνια και τι συμπεράσματα έχουν προκύψει γενικά. Στο κεφάλαιο 3 επιχειρείται μια πιο συγκεκριμένη προσέγγιση της άμμου, που αφορά την επίδραση του περιεχόμενου ποσοστού λεπτόκοκκου υλικού (ιλύος) στις μηχανικές της ιδιότητες. Στη συνέχεια, στο κεφάλαιο 4 περιγράφεται η πειραματική συσκευή στρεπτικής διάτμησης κοίλου δοκιμίου (hollow cylinder apparatus) και η διαδικασία που ακολουθείται για την εκτέλεση κάθε πειράματος. Στο κεφάλαιο 5 παρουσιάζονται και σχολιάζονται τα αποτελέσματα των πειραμάτων και στο κεφάλαιο 6 γίνεται μια σύνοψη των σημαντικότερων συμπερασμάτων του προηγούμενου κεφαλαίου. Τέλος, ακολουθεί η παράθεση της βιβλιογραφίας που χρησιμοποιήθηκε στην εργασία και τα παραρτήματα, με διαγράμματα που προέκυψαν από τις δοκιμές αλλά και ο συγκεντρωτικός πίνακας όλων των πειραμάτων που διεξήχθησαν.

2. Η συμπεριφορά της άμμου σε μονοτονική και ανακυκλική φόρτιση

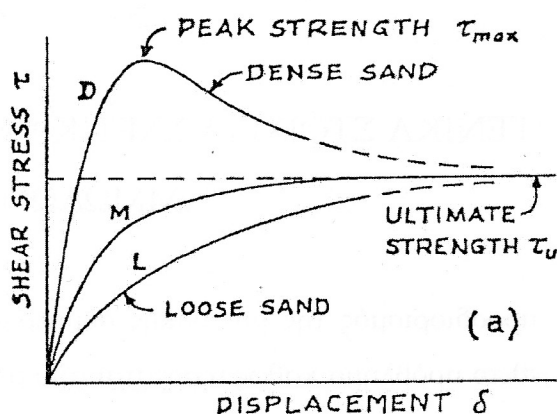
Ο προσδιορισμός της μηχανικής συμπεριφοράς των αμμωδών εδαφών είναι ένα σύνθετο πρόβλημα καθώς εξαρτάται από ένα μεγάλο πλήθος παραμέτρων. Στο παρόν κεφάλαιο περιγράφονται οι σημαντικότερες σχετικές μελέτες που έχουν πραγματοποιηθεί έως σήμερα, αναλύονται οι θεωρίες που έχουν διατυπωθεί και εξετάζονται συνοπτικά οι παράγοντες που επηρεάζουν τη συμπεριφορά των άμμων.

2.1 Δοκιμές απ' ευθείας διάτμησης

Η μηχανική συμπεριφορά των εδαφών μελετήθηκε το 1935 από τον Casagrande ο οποίος πραγματοποίησε σειρά δοκιμών απ' ευθείας διάτμησης σε δοκίμια χαλαρής άμμου. Παρατηρήθηκε πως όταν η χαλαρή άμμος υπόκειται σε διάτμηση υπό συνθήκες ανεμπόδιστης στράγγισης μειώνεται σταδιακά ο όγκος της μέχρι να φτάσει σε μία σταθερή τιμή. Όταν όμως δοκίμια της ίδιας άμμου μεγαλύτερης πυκνότητας υφίστανται την ίδια διάτμηση διογκώνονται μέχρι να φτάσουν σε μία κατάσταση ίδιου όγκου όπως και οι χαλαρές άμμοι. Την πυκνότητα της άμμου στη κατάσταση αυτή ο Casagrande την όρισε ως κρίσιμη πυκνότητα και τον αντίστοιχο δείκτη πόρων ομοίως κρίσιμο δείκτη πόρων. Και οι δύο αποτελούν συνάρτηση της κατακόρυφης επιβαλλόμενης τάσης στη συσκευή απ' ευθείας διάτμησης. Η εξέλιξη των δοκιμών φαίνεται στα παρακάτω διαγράμματα.

Στο Σχήμα.2.1 εμφανίζεται η εφαρμοζόμενη διατμητική τάση στο κατακόρυφο άξονα συναρτήσει της διατμητικής παραμόρφωσης στον οριζόντιο. Στη χαλαρή άμμο όπως

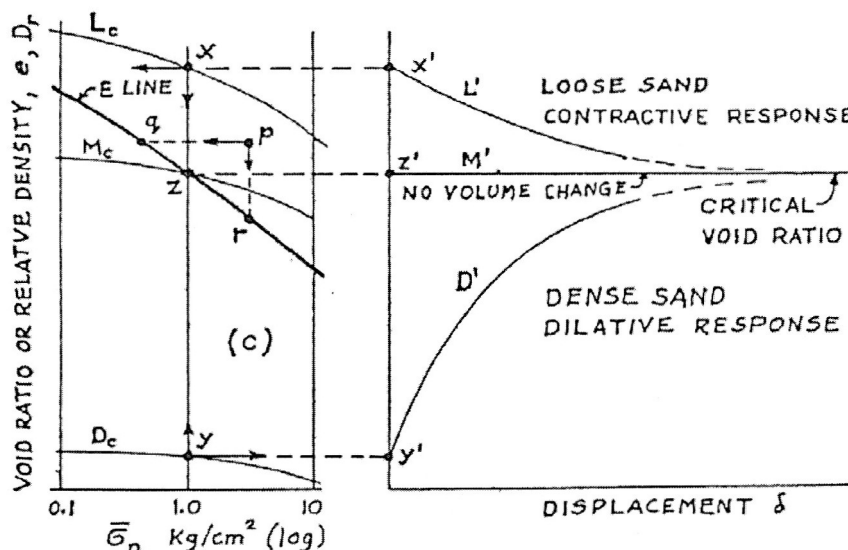
εκείνη που παριστάνει η καμπύλη L, είναι προφανές πως καθώς αυξάνεται η επιβαλλόμενη μετατόπιση, αυξάνεται παράλληλα και η διατμητική τάση της άμμου, έως την τιμή της διατμητικής αντοχής τ_0 . Σε πυκνή άμμο (καμπύλη D) συμβαίνει το αντίστροφο: η τιμή της διατμητικής αντοχής φτάνει μία μέγιστη τιμή τ_{max} και στη συνέχεια μειώνεται έως ότου σταθεροποιείται στην ίδια τιμή τ_0 της χαλαρής άμμου. Στην ειδική περίπτωση που η άμμος έχει την ίδια αρχική τιμή του δείκτη πόρων με τη κρίσιμη τιμή του το δοκίμιο δεν παρουσιάζει μεταβολή στον όγκο του.



Σχήμα 2.1 Συμπεριφορά πυκνών και χαλαρών άμμων σε δοκιμές απ' ευθείας διάτμησης από τον Casagrande

Στο σχήμα 2.2 στα αριστερά απεικονίζεται η μεταβολή του δείκτη πόρων και της σχετικής πυκνότητας στον κατακόρυφο άξονα σε συνάρτηση με το λογάριθμο της επιβαλλόμενης κατακόρυφης ενεργού τάσης. Στα δεξιά του σχήματος 2.2 διατηρείται ο ίδιος κατακόρυφος άξονας, ενώ στον οριζόντιο παριστάνεται η διατμητική παραμόρφωση του δοκιμίου. Η καμπύλη L' του σχήματος 2.2 παριστάνει τη συστολή του δοκιμίου, δηλαδή τη μείωση του δείκτη πόρων και επομένως του όγκου του δοκιμίου, κατά τη παραμόρφωσή του. Η καμπύλη D' εκφράζει την αύξηση του δείκτη πόρων και επομένως τη διόγκωση του αντίστοιχου δοκιμίου, ενώ η οριζόντια γραμμή M' παριστάνει το κρίσιμο δείκτη πόρων και τη κρίσιμη πυκνότητα, στην οποία τείνει τελικά να φτάσει τόσο η χαλαρή όσο και η πυκνή άμμος. Τα σημεία x και y στο σχήμα 2.2 απεικονίζουν τις αρχικές θέσεις του χαλαρού και του πυκνού δοκιμίου αντίστοιχα. Το σημείο z αντιστοιχεί στη κρίσιμη πυκνότητα και τον κρίσιμο δείκτη

πόρων για τη δεδομένη κατακόρυφη ενεργό τάση. Με την πραγματοποίηση δοκιμών απ' ευθείας διάτμησης για διαφορετικές τιμές της κατακόρυφης ενεργού τάσης προέκυψε η καμπύλη E των κρίσιμων πόρων και πυκνοτήτων.



Σχήμα 2.2 Ο δείκτης πόρων και η σχετική πυκνότητα συναρτήσει της αξονικής παραμόρφωσης

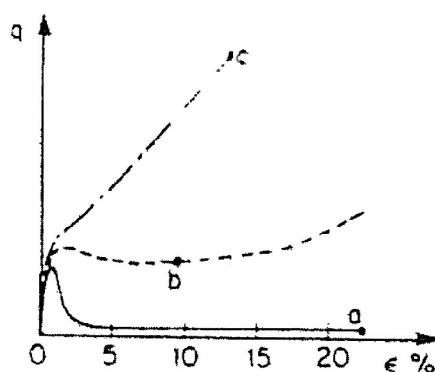
2.2 Το φαινόμενο της ρευστοποίησης

Έστω ένα τυχαίο δοκίμιο το οποίο υποβάλλεται σε διάτμηση υπό συνθήκες ελεύθερης στράγγισης και σταθερή κατακόρυφη τάση. Επειδή το νερό των πόρων μπορεί να διαφύγει ο όγκος του δοκιμίου συρρικνώνεται ενώ η κατακόρυφη ολική τάση διατηρείται σταθερή και ίση με την ενεργό τάση καθώς αναλαμβάνεται πλήρως από τους στερεούς κόκκους του δοκιμίου. Επομένως κατά την εξέλιξη της διάτμησης η γραφική παράσταση που αντιστοιχεί στην εντατική κατάσταση του δοκιμίου στο αριστερό διάγραμμα του σχήματος 2.2 είναι ένα ευθύγραμμο κατακόρυφο τμήμα το οποίο ξεκινά από το αρχικό σημείο p και καταλήγει στο σημείο r επί της γραμμής E. Όταν η ίδια δοκιμή εκτελείται υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης η επιβαλλόμενη τάση αυξάνει τη πίεση των πόρων στο δοκίμιο και μειώνει ισόποσα την ενεργό τάση του, η οποία είναι ίση με τη διαφορά της κατακόρυφης επιβαλλόμενης

τάσης από την πίεση των πόρων. Επομένως το σημείο p στο διάγραμμα του Σχ.2.2 μετατοπίζεται στη περίπτωση αυτή οριζόντια έως το σημείο q να βρεθεί επί της γραμμής E καθώς ο όγκος του δοκιμίου και κατ' επέκταση και ο δείκτης πόρων του είναι σταθερός ενώ η ενεργός τάση μειώνεται. Η ελάττωση αυτή της ενεργού τάσης και κατά συνέπεια και της διατμητικής αντοχής του δοκιμίου είναι δυνατόν να οδηγήσει στη ρευστοποίηση του. Η συμπεριφορά δηλαδή της άμμου είναι περισσότερο συγκρίσιμη με εκείνη μίας ρευστής μάζας παρά με ένα στερεό υλικό, για αυτό και το φαινόμενο καλείται ρευστοποίηση.

2.3 Η θεωρία της σταθερής κατάστασης

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η διπλωματική εργασία του Castro το 1969. Στα πλαίσια αυτής εκτελέστηκαν δοκιμές τριαξονικής θλίψης σε κορεσμένες άμμους για διαφορετικούς συνδυασμούς πίεσης πόρων και αρχικών τάσεων στερεοποίησης που παρουσιάζονται στο σχήμα 2.3.

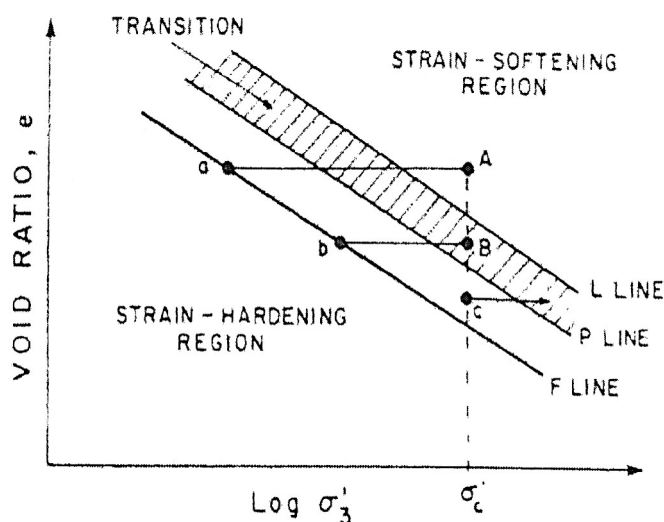


Σχήμα 2.3 Ο δείκτης πόρων συναρτήσει της αξονικής παραμόρφωσης για τρεις περιπτώσεις δοκιμών

Διαπιστώθηκε πως σε χαλαρά δοκίμια (a) η διατμητική τους αντοχή αρχικά αυξάνεται για μικρή αξονική παραμόρφωση έως 1-2%. Αφού φτάσει μία μέγιστη τιμή στη συνέχεια μειώνεται απότομα και το δείγμα καταρρέει όταν η παραμόρφωση φτάσει το

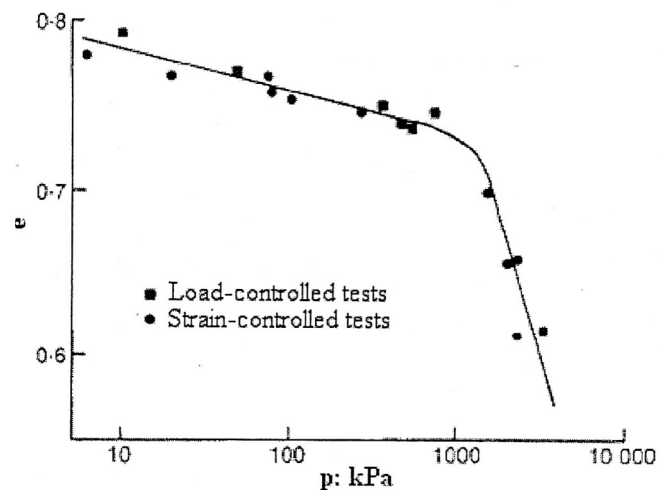
5%. Πέραν του σημείου αυτού η άμμος έχει ρευστοποιηθεί πλήρως και παραμορφώνεται πλέον υπό σταθερή διατμητική τάση. Τα πυκνά δοκίμια (c) αντίθετα παρουσιάζουν αύξηση της αντοχής τους συνεχώς κατά τη παραμόρφωση τους και επομένως δεν ρευστοποιούνται. Μεταξύ των χαλαρών και των πυκνών δοκιμίων παρεμβάλλεται μία ενδιάμεση περιοχή πυκνοτήτων (b) στην οποία τα δοκίμια επιδεικνύουν περιορισμένη ρευστοποίηση. Η διατμητική τους αντίσταση δηλαδή λαμβάνει μία μέγιστη τιμή για μία αρχικά μικρή παραμόρφωση και στη συνέχεια πέφτει σε μία χαμηλότερη, η οποία και διατηρείται περίπου σταθερή για παραμόρφωση έως και 10-15%. Πέραν αυτής η διατμητική αντίσταση παρουσιάζει και πάλι αύξηση.

Διαπιστώθηκε επίσης πως στα χαλαρά δοκίμια ο δείκτης πόρων τη στιγμή της αστοχίας σε συνάρτηση με το λογάριθμο της πλευρικής κύριας τάσης (σ_3) για διαφορετικές τιμές της αρχικής ενεργού τάσης ορίζουν μία ευθεία στο διάγραμμα $e - \log \sigma_3'$, η οποία ονομάστηκε γραμμή F, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.4.



Σχήμα 2.4 Διάγραμμα του δείκτη πόρων συναρτήσει του λογάριθμου της ορθής κατακόρυφης τάσης

Παράλληλα της γραμμής F ορίστηκαν δύο άλλες γραμμές οι P και L. Παρατηρήθηκε πως τα δοκίμια με αρχικό δείκτη πόρων και ενεργό τάση τέτοια ώστε να βρίσκονται άνω της γραμμής L ρευστοποιήθηκαν. Εκείνα με αρχικές συνθήκες κάτω της γραμμής P αύξαναν διαρκώς την αντοχή τους, ενώ τα δοκίμια με αρχική κατάσταση μεταξύ των γραμμών P και L επέδειξαν περιορισμένη ρευστοποίηση. Η χαρακτηριστική συμπεριφορά της άμμου αποτέλεσε αντικείμενο και άλλων μελετών. Η παραμόρφωση της χαλαρής άμμου υπό σταθερή διατμητική τάση μετά από μία αρχική αυξομείωσή της ορίστηκε από τον Poulos το 1981 ως σταθερή κατάσταση. Συγκεκριμένα ως σταθερή κατάσταση παραμόρφωσης για μία μάζα κόκκων ορίστηκε ως η κατάσταση στην οποία η μάζα παραμορφώνεται υπό σταθερό δείκτη πόρων και επομένως όγκο, ενεργό τάση, διατμητική τάση και ταχύτητα. Στη κατάσταση αυτή η δομή του εδάφους έχει πλήρως αποδομηθεί, ο προσανατολισμός των κόκκων έχει σταθεροποιηθεί στατιστικά και η θραύση των κόκκων εάν υπήρξε, έχει ολοκληρωθεί. Η σταθερή κατάσταση από δοκιμές προέκυψε πως μπορεί να παρατηρηθεί σε κάθε μάζα σωματιδίων και υπό οποιοσδήποτε συνθήκες στράγγισης και φόρτισης. Τα σημεία που αντιστοιχούν στην εντατική κατάσταση μίας άμμου, σε διάγραμμα $e-\log p'$, όταν εκείνη βρίσκεται σε σταθερή κατάσταση ορίζουν τη γραμμή σταθερής κατάστασης SSL (Steady State Line). Η SSL είναι ευθεία για συνήθεις τιμές της ενεργού τάσης έως και 1000kPa περίπου όπως διαπίστωσαν οι Been et al. το 1991, ενώ για υψηλότερες όπως φαίνεται στο σχετικό γράφημα του σχήματος 2.5 καμπυλώνεται.



Σχήμα 2.5 Η γραμμή σταθερής κατάστασης SSL. Διακρίνεται η καμπύλωσή της για υψηλές τιμές της επιβαλλόμενης ενεργής τάσης (Been et al 1991).

Αρχικά θεωρήθηκε από τους Casagrande, Castro και Poulos πως η διατμητική αντοχή της άμμου στη σταθερή κατάσταση εξαρτάται αποκλειστικά από το δείκτη πόρων και επομένως η γραμμή SSL είναι δεδομένη για κάθε άμμο. Κατοπινές μελέτες προσδιόρισαν και άλλους παράγοντες οι οποίοι επηρεάζουν τόσο τη μορφή όσο και τη θέση της SSL στο διάγραμμα $e-\log p'$ και παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στο τέλος του κεφαλαίου.

Για να παρατηρηθεί το φαινόμενο της ρευστοποίησης και η σταθερή κατάσταση διαπιστώθηκε πως συνήθως απαιτούνται μεγάλες παραμορφώσεις της τάξης του 20% και άνω. Επίσης η ρευστοποίηση επιτυγχάνεται συνηθέστερα σε χαλαρές ομοιόμορφες άμμους, ενώ και σε αυτές ακόμα δεν είναι πάντοτε εφικτό. Λόγω τοπικών ανομοιομορφιών εντός της μάζας ενός δοκιμίου είναι πιθανή η τοπική παραμόρφωση των ορίων του δοκιμίου η οποία να μην αντιπροσωπεύει την πραγματική σταθερή κατάσταση του δοκιμίου. Για τους λόγους αυτούς ορίστηκε η ψεύδο-σταθερή κατάσταση, QSS (Quasi-Steady State), η οποία είναι ευκολότερα πραγματοποιήσιμη στο εργαστήριο. Όταν ένα δοκίμιο βρίσκεται στη κατάσταση αυτή, παρουσιάζει ροή με περιορισμένη παραμόρφωση.

Τέτοια συμπεριφορά για παράδειγμα επιδεικνύει το δοκίμιο του οποίου η απόκριση αντιστοιχεί στη καμπύλη (b) του σχήματος 2.3. Αρχικά καθώς δέχεται μία μικρή παραμόρφωση ο συνολικός όγκος του μειώνεται, ενώ αυξάνεται η διατμητική του αντίσταση. Στη συνέχεια αυτή ελαττώνεται απότομα σε μία τιμή η οποία διατηρείται σταθερή έως ότου η αξονική παραμόρφωση του δοκιμίου φτάσει το 10%. Πέραν της τιμής αυτής όμως η διατμητική αντοχή αυξάνεται, ενώ το δοκίμιο διαστέλλεται. Η περιοχή παραμόρφωσης της άμμου εντός της οποίας ο όγκος και η διατμητική αντοχή της διατηρείται σταθερή ορίστηκε από τους Alarcon και Guzman et al. το 1988 ως ψευδο-σταθερή κατάσταση. Επιπλέον το σημείο εκείνο όπου η άμμος μεταβάλλει τη συμπεριφορά της και πλέον διαστέλλεται με την αύξηση της παραμόρφωσης καλείται αλλαγή φάσης (phase transformation). Τα σημεία που αντιστοιχούν στη ψευδο-σταθερή κατάσταση ορίζουν τη γραμμή ψευδο-σταθερής κατάστασης QSSL (Quasi-Steady State Line). Ομοίως τα σημεία τα οποία αντιστοιχούν στην αλλαγή φάσης της άμμου ορίζουν τη γραμμή αλλαγής φάσης PTL (Phase Transformation Line). Σύμφωνα με πολλούς ερευνητές για τις άμμους εκείνες που εμφανίζουν συστολική συμπεριφορά η ψευδο-σταθερή κατάσταση και η αλλαγή φάσης ταυτίζονται.

Παραπλήσια με τη θεωρία της σταθερής κατάστασης είναι και εκείνη της κρίσιμης κατάστασης η οποία είχε προταθεί από τους Roscoe et al. το 1958. Σύμφωνα με τη τελευταία, ως κρίσιμη ορίστηκε η κατάσταση εκείνη στην οποία μία εδαφική μάζα παραμορφώνεται υπό σταθερή ορθή και διατμητική τάση και σταθερό δείκτη πόρων. Η διαφορά της δηλαδή σε σχέση με τη σταθερή κατάσταση έγκειται στο σταθερό ρυθμό παραμόρφωσης που απαιτείται από τον ορισμό της σταθερής κατάστασης. Επιπλέον διαφέρει και ως προς τη μέθοδο προσδιορισμού της καθώς η μελέτη της κρίσιμης κατάστασης στηρίχθηκε σε δοκιμές αργιλικών υλικών υπό στραγγιζόμενες συνθήκες, ενώ για την μελέτη της σταθερής κατάστασης εκτελέστηκαν δοκιμές εμποδιζόμενης στράγγισης σε αμμώδη εδάφη. Σε διάγραμμα $e-\log p'$ το γράφημα της κρίσιμης κατάστασης είναι ευθεία η οποία καλείται γραμμή κρίσιμης κατάστασης CSL (Critical State Line).

Οι απόψεις για τη σχέση μεταξύ των γραμμών σταθερής και κρίσιμης κατάστασης διαφέρουν: Σύμφωνα με ορισμένους ερευνητές όπως οι Casagrande, Poulos και Alarcon-Guzman λόγω των διαφορετικών συνθηκών στράγγισης που λαμβάνονται υπόψη για το προσδιορισμό τους, η γραμμή CSL είναι παράλληλη και κατακόρυφα μετατοπισμένη σε σχέση με την SSL. Αντίθετα κατά τους Been και Jefferies (1985), Sladen et al. (1985), οι γραμμές SSL και η CSL ταυτίζονται και οι διαφορές τους, εάν υπάρχουν, οφείλονται αποκλειστικά σε πειραματικά σφάλματα.

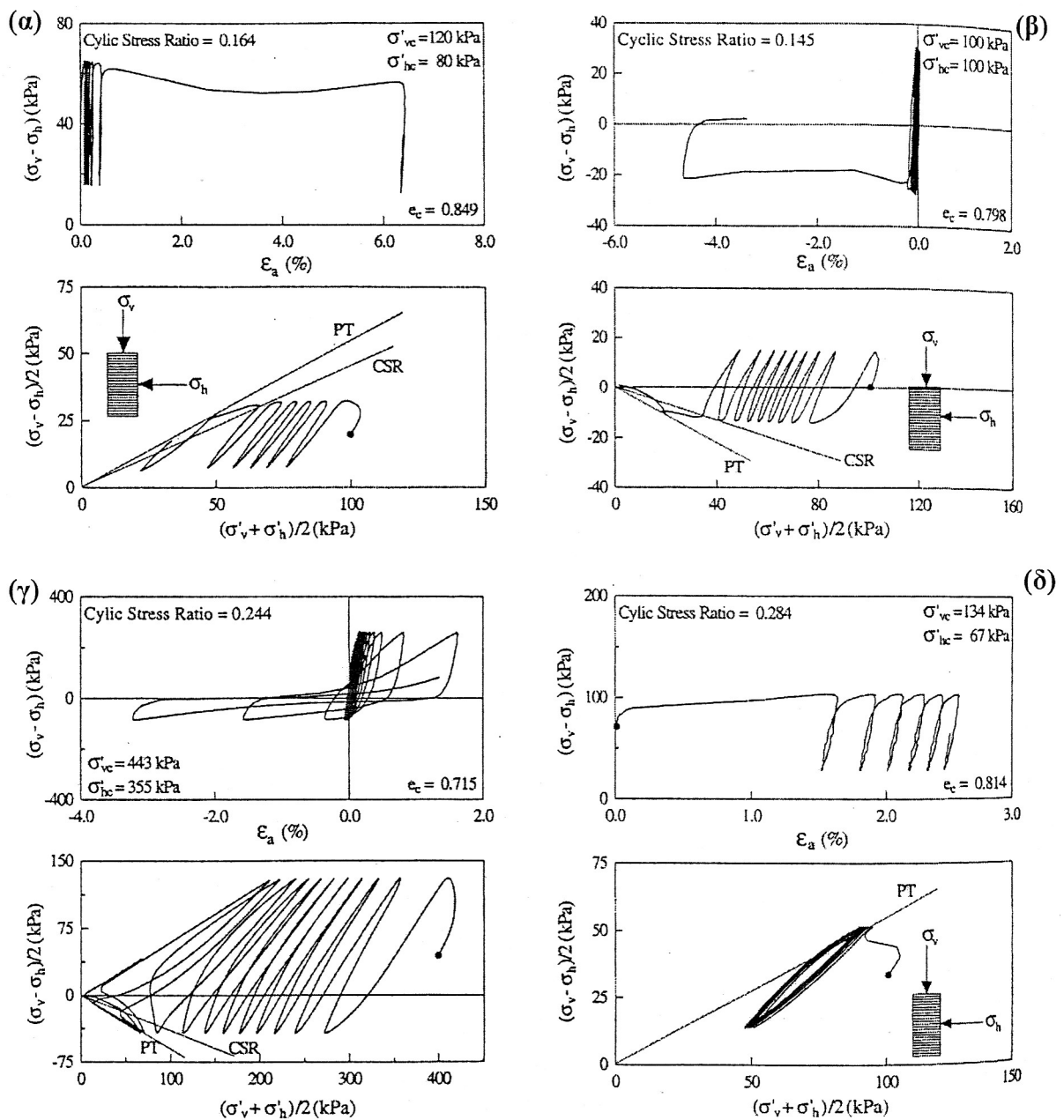
2.4 Δοκιμές ανακυκλικής φόρτισης

Παράλληλα με τις δοκιμές μονοτονικής φόρτισης άλλοι ερευνητές στηρίχθηκαν σε δοκιμές ανακυκλικής φόρτισης για τη μελέτη της συμπεριφοράς της άμμου. Δοκιμές δηλαδή κατά τις οποίες η άμμος φορτίζεται κατά μία κατεύθυνση καθώς υπόκειται σε τριαξονική θλίψη και στη συνέχεια κατά την αντίθετη φορά δεχόμενη τριαξονικό εφελκυσμό. Η διαδικασία αυτή κάποιες φορές επαναλαμβάνονταν με πλήθος διαδοχικών κύκλων φόρτισης- αποφόρτισης- επαναφόρτισης. Διαπιστώθηκε πως σε αυτές τις δοκιμές η άμμος αστοχούσε λόγω της ανακυκλικής κινητικότητας (cyclic mobility), της προοδευτικής δηλαδή συσσώρευσης υπερπίεσης πόρων κατά τη διάρκεια ανακυκλικής φόρτισης. Αποτέλεσμα αυτής είναι η άμμος να αστοχεί όταν στιγμιαία η μέγιστη τιμή της πίεσης πόρων φτάνει σε κάθε κύκλο τη μέγιστη πλευρική τάση. Όταν οι δύο αυτές τιμές εξισώνονται μηδενίζεται η ενεργός τάση, κατάσταση η οποία ορίστηκε και ως αρχική ρευστοποίηση από τους Seed και Lee το 1966.

Σε νεότερες μελέτες οι Vaid και Chern το 1985 και οι Alarcon και Guzman το 1988 κατέληξαν στο συμπέρασμα πως προϋπόθεση για να εκδηλώσει η άμμος συστολική συμπεριφορά υπό ανακυκλική φόρτιση είναι η μέγιστη αναπτυσσόμενη διατμητική τάση, το άθροισμα δηλαδή της αρχικής διατμητικής και της εφαρμοζόμενης ανακυκλικής τάσης να υπερβαίνει την αντοχή της σταθερής κατάστασης.

Οι Vaid et al. το 2001 διέκριναν τέσσερις μηχανισμούς ρευστοποίησης της άμμου υπό συνθήκες ανακυκλικής φόρτισης αναλόγως των αρχικών συνθηκών πυκνότητας, ενεργού τάσης καθώς και της εφαρμοζόμενης ανακυκλικής τάσης. Στην πρώτη περίπτωση η άμμος ρευστοποιείται πλήρως καθώς δέχεται θλιπτικά φορτία, όπως συμβαίνει και στην περίπτωση της μονοτονικής φόρτισης. Η δεύτερη περίπτωση αστοχίας της άμμου είναι τη στιγμή της αλλαγής της φοράς της φόρτισης, λόγω του εφελκυσμού που δέχεται.

Ένας τρίτος μηχανισμός αστοχίας απαντάται σε πυκνές άμμους οι οποίες όταν φορτίζονται μονοτονικά επιδεικνύουν διαστολική συμπεριφορά. Όταν οι άμμοι αυτές υποβληθούν σε ανακυκλική τάση υψηλότερη της διατμητικής τάσης ισορροπίας της άμμου η ενεργός τάση τους μηδενίζεται στιγμιαία κατά την εναλλαγή της φόρτισης μεταξύ θλίψης και εφελκυσμού. Τέλος μία ακόμα μορφή αστοχίας παρατηρείται εάν αντίστροφα η διατμητική τάση ισορροπίας είναι υψηλότερη της ανακυκλικής τάσης, οπότε αναπτύσσονται βαθμιαία παραμορφώσεις χωρίς να μηδενίζεται ποτέ η ενεργός τάση. Στο Σχήμα 2.6 ακολουθούν τα γραφήματα που αντιστοιχούν σε κάθε μία από τις παραπάνω τέσσερις περιπτώσεις.



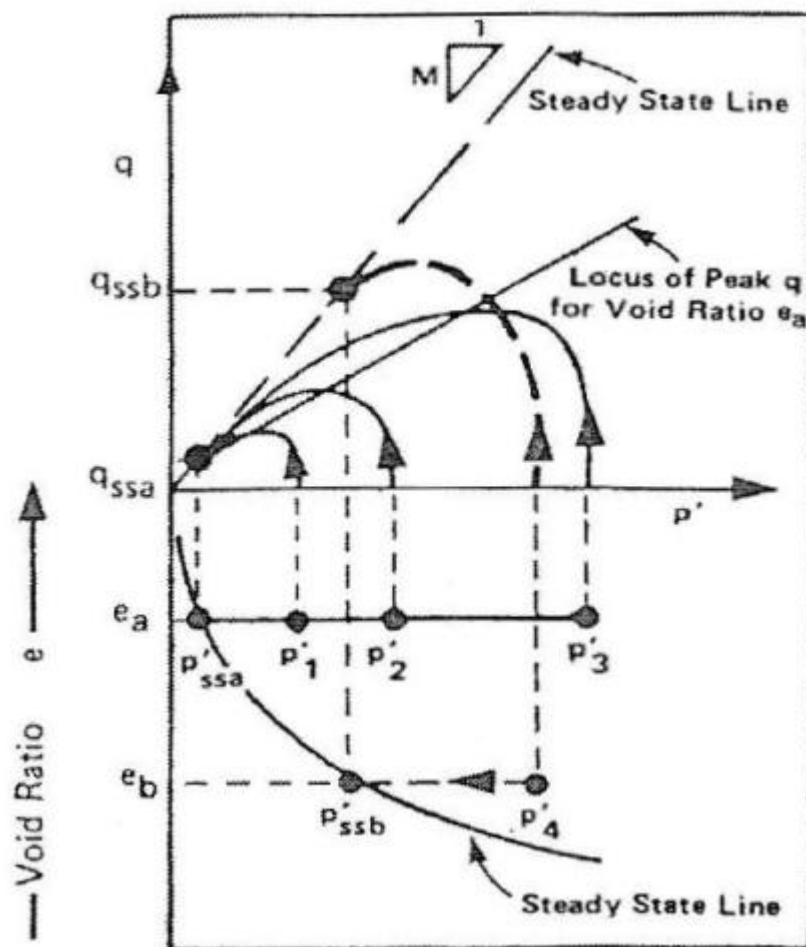
Σχήμα 2.6 Βασικοί μηχανισμοί ανάπτυξης παραμορφώσεων λόγω ρευστοποίησης υπό ανακυκλική φόρτιση (Vaid et al., 2001)

Από νεότερες ανακυκλικές δοκιμές, όπως εκείνες των Tatsuoka et al. (1989) και των Zhang et al. (1997), διαπιστώθηκε πως οι γραμμές κρίσιμης κατάστασης και αλλαγής φάσης δεν είναι σταθερές και δεδομένες για κάθε άμμο. Αντίθετα αυτές μετακινούνται για κάθε κύκλο ανακυκλικής φόρτισης παράλληλα προς την αρχή των

αξόνων. Ορίστηκε επομένως η μετακινούμενη γραμμή κρίσιμης κατάστασης MCSL (Moving Critical Stress Line) και η μετακινούμενη γραμμή αλλαγής φάσης MPTL (Moving Phase Transformation Stress Line) οι οποίες είναι αντίστοιχα παράλληλες στις γραμμές κρίσιμης κατάστασης και αλλαγής φάσης. Η MCSL φάνηκε πως εξαρτάται από την αρχική σχετική πυκνότητα της άμμου ενώ η MPTL είναι ανεξάρτητη του δείκτη πόρων της άμμου.

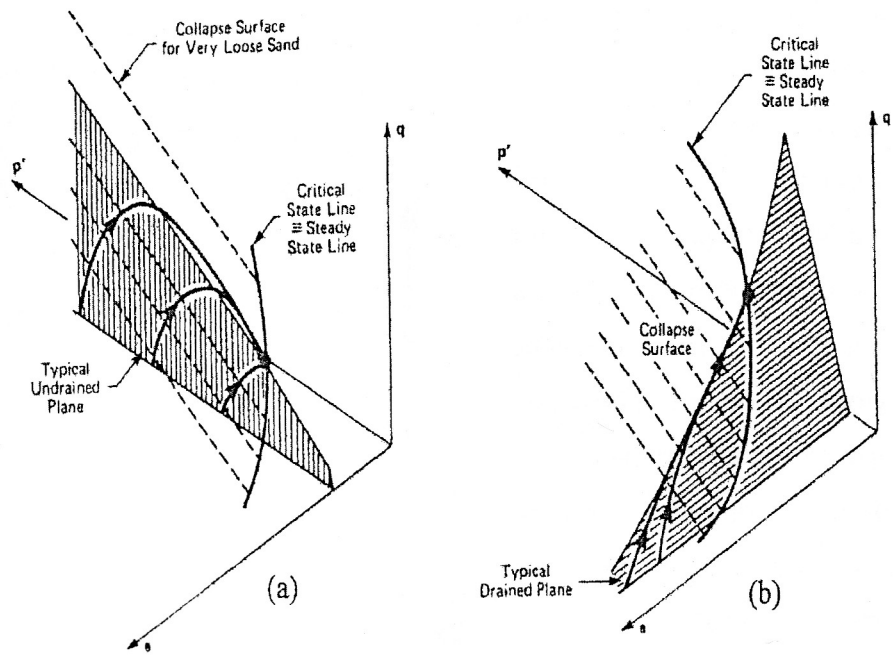
2.5 Η θεωρία της επιφάνειας κατάρρευσης

Η θεωρία της επιφάνειας κατάρρευσης αναπτύχθηκε από τους Sladen et al. το 1985 ως επέκταση της θεωρίας της σταθερής κατάστασης. Στο σχήμα 2.7 απεικονίζονται τα αποτελέσματα πειραμάτων τριαξονικής θλίψης σε δοκίμια ισότροπα στερεοποιημένα και υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης. Τα δοκίμια έχουν τον ίδιο αρχικό δείκτη πόρων, αλλά διαφορετικές αρχικές ενεργές τάσεις. Παρατηρείται πως σε μεγαλύτερη ενεργό τάση p' , αντιστοιχεί και υψηλότερη τιμή της μέγιστης διατμητικής αντοχής q του δοκιμίου. Η τελική όμως αντοχή στη σταθερή κατάσταση είναι κοινή σε όλες τις περιπτώσεις. Για δοκίμια με διαφορετικό δείκτη πόρων η διαδρομή τάσεων είναι παρόμοια, αλλά το σημείο το οποίο ορίζει τη σταθερή κατάσταση διαφέρει. Η μέγιστη διατμητική αντοχή του κάθε δοκιμίου εξαρτάται από την αρχική ενεργό τάση. Οι μέγιστες αυτές τιμές για σταθερό δείκτη πόρων ορίζουν μια ευθεία στο διάγραμμα τάσεων η οποία διέρχεται από το σημείο που ορίζει η σταθερή κατάσταση. Για παράδειγμα, μικρότερη τιμή του δείκτη πόρων, δηλαδή αυξημένη σχετική πυκνότητα του δείγματος, αντιστοιχεί σε σταθερή γραμμή παράλληλα μετατοπισμένη προς τα πάνω στο σχήμα 2.7 και αντίστροφα. Σε κάθε τιμή του αρχικού δείκτη πόρων αντιστοιχεί και μία διαφορετική γραμμή σταθερής κατάστασης.



Σχήμα 2.7 Πειράματα τριαξονικής θλίψης σε δοκίμια ισότροπα στερεοποιημένα υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης (από Sladen et al., 1985)

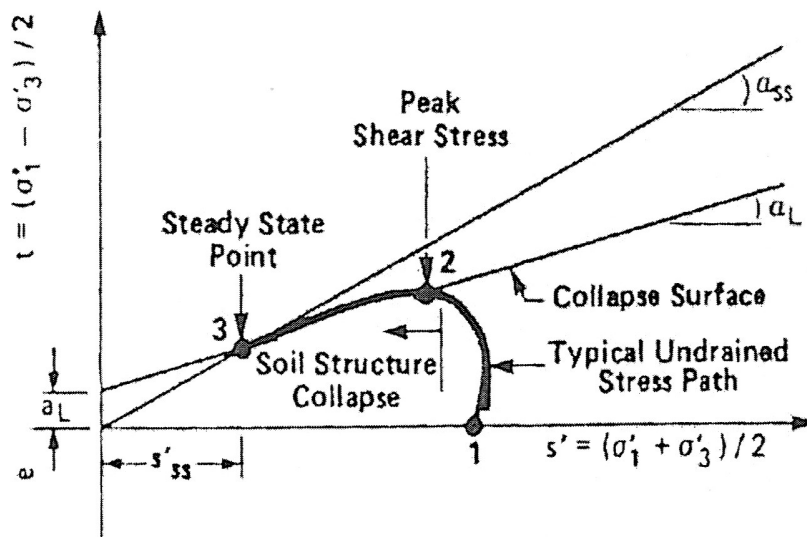
Υπάρχει επομένως ένα άπειρο πλήθος τέτοιων γραμμών οι οποίες σε τρισδιάστατο διάγραμμα δείκτη πόρων διατμητικής τάσης και μέσης ενεργού τάσης πόρων όπως αυτό του σχήματος 2.8 ορίζουν μία επιφάνεια η οποία ονομάστηκε επιφάνεια κατάρρευσης. Η κλίση της επιφάνειας κατάρρευσης, εξαρτάται από την ιστορία της φόρτισης. Σε δοκιμές για παράδειγμα στις οποίες έχει προηγηθεί της θλίψης ανισότροπη στερεοποίηση του δοκιμίου, η επιφάνεια κατάρρευσης εμφανίζει μεγαλύτερη κλίση, από την περίπτωση της ισότροπης στερεοποίησης.



Σχήμα 2.8 Η επιφάνεια κατάρρευσης στις τρεις διαστάσεις

Ένα εδαφικό στοιχείο ρευστοποιείται ή παρουσιάζει απότομη πτώση της διατμητικής του αντοχής όταν η εντατική του κατάσταση προσεγγίσει την επιφάνεια κατάρρευσης, η διατμητική του τάση q είναι μεγαλύτερη της διατμητικής αντοχής της σταθερής κατάστασης ενώ ταυτόχρονα επιβάλλονται συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης. Η μετάβαση όμως του εδαφικού στοιχείου από την αρχική κατάσταση έως την επιφάνεια κατάρρευσης μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε υπό στραγγιζόμενες ή υπό αστράγγιστες συνθήκες, ενώ η θεωρία της επιφάνειας κατάρρευσης επαληθεύτηκε και στην περίπτωση της ανακυκλικής φόρτισης.

Η επιφάνεια κατάρρευσης μπορεί να παρασταθεί σε διάγραμμα με μεταβλητές τις $t = \frac{(\sigma'_1 - \sigma'_3)}{2}$ και $s' = \frac{(\sigma'_1 + \sigma'_3)}{2}$ από παραμέτρους συγκρίσιμες με εκείνες που περιγράφουν τη περιβάλλουσα αστοχίας Mohr-Coulomb. Περιγράφεται δηλαδή από μια ισοδύναμη γωνία διατμητικής τριβής ϕ_L και μία ισοδύναμη συνοχή c_L (σχήμα 2.9)



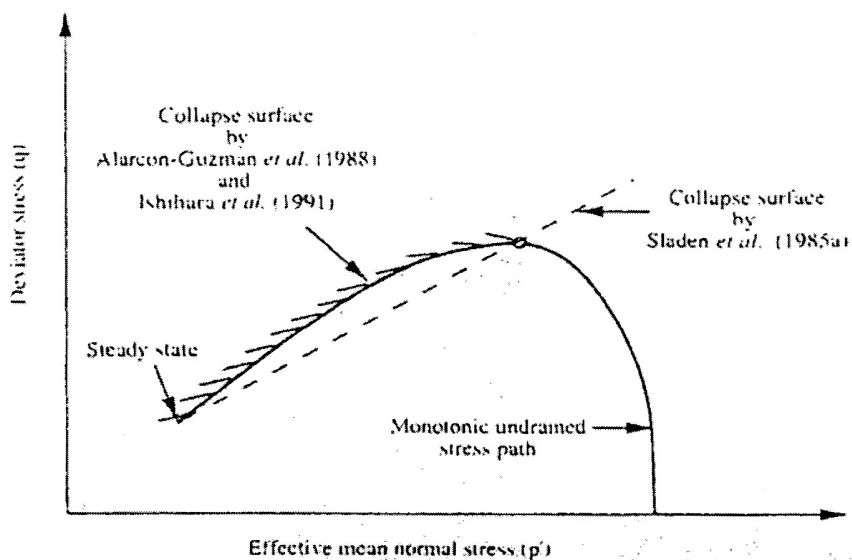
Σχήμα 2.9 Η επιφάνεια κατάρρευσης όπως προκύπτει σε διάγραμμα $t-s'$

Ισχύει ότι $\sin \phi_L = \tan \alpha_L$ και ότι $c_L = \frac{a_L}{\cos \phi_L}$, όπου α_L , είναι κλίση της επιφάνειας κατάρρευσης. Οι τιμές της ϕ_L έχει διαπιστωθεί πειραματικά πως κυμαίνονται μεταξύ 14° και 18° . Με δεδομένη επομένως τη διατμητική αντοχή ενός υλικού στη σταθερή

κατάσταση και την κλίση της επιφάνειας κατάρρευσης προσδιορίζονται και οι παράμετροι κατάρρευσής του.

Η θεωρία της επιφάνειας κατάρρευσης παρουσιάζει αρκετά πλεονεκτήματα σε σχέση με τη θεωρία σταθερής κατάστασης. Η τελευταία δεν προσδιορίζει τη φόρτιση που επιφέρει τη ρευστοποίηση, ούτε λαμβάνει υπόψη την επίδραση της επί τόπου εντατικής κατάστασης. Αντίθετα συνδέει την ασφάλεια έναντι ρευστοποίησης μόνο με το δείκτη πόρων του υλικού.

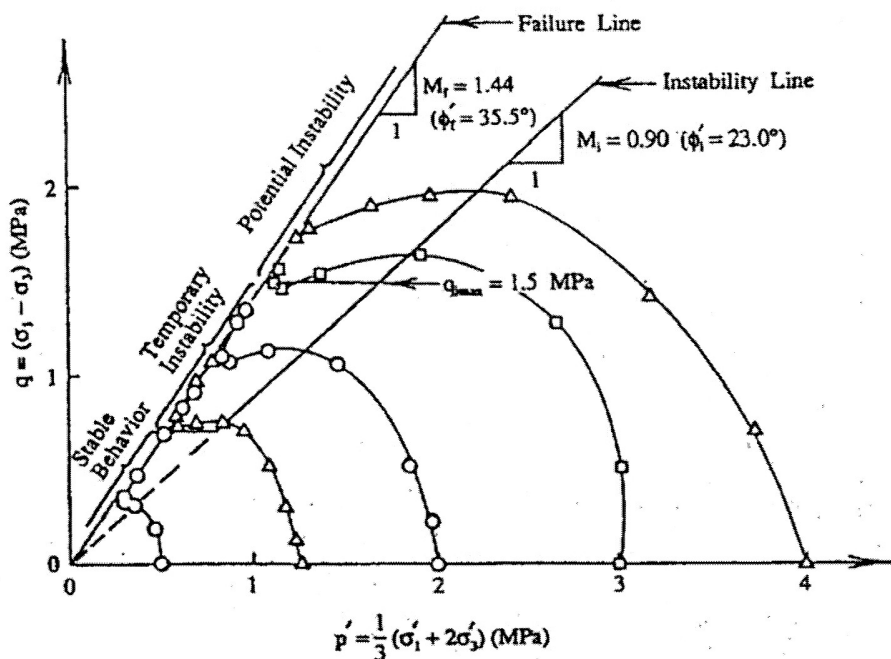
Επιφάνειες κατάρρευσης αντίστοιχες με εκείνες των Sladen et al. πρότειναν επίσης και άλλοι πολλοί μελετητές όπως οι Alarcon-Guzman (1988), οι Ishihara et al. (1991), ο Chern (1985), οι Kramer και Seed (1988), ο Lade (1992), ο Konrad (1993) και πιο πρόσφατα οι Chu et al. (2003). Ενδεικτικά στο σχήμα 2.10 παριστάνονται οι καμπύλες των Alarcon-Guzman και Ishihara et al. οι οποίες προέκυψαν κατόπιν δοκιμών τριαξονικής θλίψης.



Σχήμα 2.10 Η επιφάνεια κατάρρευσης όπως προκύπτει σε διάγραμμα $q-p'$

Όπως φαίνεται, οι επιφάνειες αυτές καμπυλώνονται στο χώρο και αποτελούν προσέγγιση της επίπεδης επιφάνειας που είχαν προτείνει αρχικά οι Sladen et al.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα ευρήματα της ερευνητικής εργασίας του Lade η οποία δημοσιεύτηκε το 1993. Σύμφωνα με αυτήν ορίζεται στον εντατικό χώρο q - p' μία γραμμή που ορίστηκε ως γραμμή αστάθειας (instability line) αντίστοιχη με τη γραμμή κατάρρευσης που όρισαν οι Sladen et al. Η διαφορά της σε σχέση με τη τελευταία είναι πως ξεκινά από την αρχή των αξόνων και πως η θέση της δεν είναι σταθερή, αλλά αποτελεί συνάρτηση του δείκτη πόρων της άμμου και της εφαρμοζόμενης ενεργού τάσης. (σχήμα 2.11).



Σχήμα 2.11 Η επιφάνεια κατάρρευσης όπως προκύπτει σε διάγραμμα q - p'

Ένα κοκκώδες έδαφος εμφανίζει ασταθή συμπεριφορά δηλαδή χάνει απότομα μεγάλο μέρος της διατμητικής του αντοχής και παράλληλα παραμορφώνεται έντονα όταν η εντατική του κατάσταση βρίσκεται υψηλότερα της γραμμής κατάρρευσης ή επί αυτής. Επιπλέον το έδαφος εμφανίζει αστάθεια εφόσον οι συνθήκες στράγγισης είναι

εμποδιζόμενες και η εντατική του κατάσταση ανήκει στη περιοχή του διαγράμματα p-q' που ορίζεται μεταξύ της γραμμής αστάθειας και της γραμμής αστοχίας. Άμμοι οι οποίες ανήκουν στη περιοχή των χαμηλών τάσεων (stable soil region) είναι πλήρως ευσταθείς. Παρουσιάζουν δηλαδή μεγάλες διαστολικές τάσεις και δε ρευστοποιούνται.

Μεταξύ των περιοχών ευσταθούς και ασταθούς συμπεριφοράς και ομοίως μεταξύ των γραμμών αστάθειας και αστοχίας παρεμβάλλεται η περιοχή προσωρινής αστάθειας (temporary instability region). Το έδαφος σε αυτήν διακρίνεται από μία αρχική πτώση της διατμητικής του αντοχής και παράλληλη αύξηση της τάσης πόρων του. Με περαιτέρω όμως παραμόρφωση, η συμπεριφορά του εδάφους γίνεται διαστολική και η διατμητική αντοχή του φτάνει και υπερβαίνει τη προηγούμενη μέγιστή της τιμή. Τέλος άνω της περιοχής προσωρινής αστάθειας, μεταξύ των γραμμών αστάθειας και αστοχίας σε υψηλές τάσεις εντοπίζεται η περιοχή δυνητικής αστάθειας (potential instability region). Το έδαφος εκεί διακρίνεται από πλήρη αστάθεια εφόσον επικρατούν συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης και γενικά από μειούμενη διατμητική αντοχή και αυξανόμενες πιέσεις πόρων. Επιπλέον υπό αστράγγιστες συνθήκες παρουσιάζει πλήρως ασταθή συμπεριφορά.

Μελέτη των Chu et al. (2003) οδήγησε στο συμπέρασμα πως μία συστολική άμμος η οποία ανήκει στη περιοχή μεταξύ των γραμμών αστάθειας και κρίσιμης κατάστασης συμπεριφέρεται ασταθώς τόσο υπό αστράγγιστες όσο και υπό στραγγιζόμενες συνθήκες. Μία διαστολική άμμος είναι δυνατόν να εμφανίσει επίσης ασταθή συμπεριφορά εάν η εντατική της κατάσταση βρίσκεται άνω της γραμμής αστάθειας, παράλληλα επικρατούν αστράγγιστες συνθήκες και η εφαρμοζόμενη μέση ενεργός τάση μειώνεται ενώ η διατμητική τάση διατηρείται σταθερή.

2.6 Παράγοντες οι οποίοι επιδρούν στη συμπεριφορά μίας άμμου

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον έχουν φυσικά οι παράγοντες οι οποίοι επηρεάζουν την απόκριση μίας άμμου. Αυτοί μπορούν διακριθούν σε δύο κατηγορίες:

- Σε εκείνους οι οποίοι σχετίζονται με τη δομή της ίδιας της άμμου και
- Σε όσους εξαρτώνται από τη μορφή της εξωτερικής φόρτισης.

Στη πρώτη κατηγορία ανήκουν η κοκκομετρία της άμμου, η παρουσία λεπτόκοκκων υλικών στη μάζα της και τέλος η ενδεχόμενη παρουσία χαλίκων. Όσον αφορά τις συνθήκες φόρτισης σημασία έχουν ο δείκτης πόρων της άμμου, η επιβαλλόμενη ενεργός τάση, η ενδεχόμενη επιβολή αρχικής διατμητικής τάσης καθώς και η διεύθυνση και η φορά επιβολής της. Η επίδραση καθενός από τους παραπάνω παράγοντες εξετάζεται στη συνέχεια συνοπτικά. Ειδικότερα η επίδραση των λεπτόκοκκων αναλύεται διεξοδικά στο επόμενο κεφάλαιο.

Σε σχέση με τη δομή της άμμου, ο πλέον καθοριστικός παράγοντας είναι η κοκκομετρία της, οι διαστάσεις δηλαδή και το σχήμα των κόκκων της. Έχει διαπιστωθεί πως οι άμμοι επιδεικνύουν αυξημένη αντοχή έναντι της ρευστοποίησης έναντι των ιλύων, των αργίλων και των χαλίκων.

Οι Vaid et al. το 1990 στηριζόμενοι σε δοκιμές ανακυκλικής φόρτισης έδειξαν πως χαλαρές άμμοι καλώς διαβαθμισμένες, αποτελούμενες δηλαδή από κόκκους με μεγάλη ποικιλία στις διαστάσεις τους αναπτύσσουν μεγαλύτερη αντοχές σε ρευστοποίηση από τις κακώς διαβαθμισμένες. Αντίστροφα όμως μεταξύ των πυκνών άμμων αποδεικνύονται περισσότερο ανθεκτικές οι κακώς διαβαθμισμένες άμμοι έναντι των καλώς διαβαθμισμένων.

Οι Castro et al. το 1982 σε μελέτες τους συμπέραναν ότι όσο αυξάνεται ο συντελεστής ομοιομορφίας C_u , η γραμμή σταθερής κατάστασης μετακινείται παράλληλα προς τα κάτω στο καταστατικό διάγραμμα, ενώ επίσης από το σχήμα των κόκκων επηρεάζεται όχι μόνο η θέση της αλλά και η μορφή της. Συγκεκριμένα, άμμοι μεγωνιώδεις κόκκους παρατηρήθηκε ότι παρουσιάζουν γραμμές σταθερής κατάστασης καμπυλωμένες και με απότομη κλίση.

Πέραν της κοκκομετρίας σημαντική για τις ιδιότητες της άμμου είναι επίσης η ενδεχόμενη παρουσία χαλίκων στη μάζα της. Η παρουσία χαλίκων βελτιώνει τη διατμητική αντοχή της άμμου καθώς αυξάνει την περατότητά της και κατά συνέπεια

την ευκολία εκτόνωσης της πίεσης των πόρων. Αντίστροφα όμως κατά τους Evans και Zhou το 1995 όταν η φόρτιση είναι ανακυκλική η πιθανότητα ρευστοποίησης μιγμάτων άμμου και χαλίκων αυξάνει για μεγαλύτερο ποσοστό χαλίκων. Τέλος από νεότερες δοκιμές στρεπτικής διάτμησης κοίλου δοκιμίου των Kuenza και Towhata προέκυψε πως η απόκριση των μιγμάτων άμμου και χαλίκων για μικρά ποσοστά χαλίκων ελέγχεται από την άμμο, ενώ για υψηλότερα ποσοστά χαλίκων από τους ίδιους τους χάλικες.

Ο δείκτης πόρων επηρεάζει καθοριστικά τη συμπεριφορά της άμμου. Εάν είναι αρκετά υψηλός ώστε η αρχική κατάσταση του δοκιμίου να αντιστοιχεί στο καταστατικό διάγραμμα σε σημείο υψηλότερα της γραμμής SSL, η άμμος συμπεριφέρεται συστολικά, με την επιβολή δηλαδή παραμόρφωσης ο όγκος της και η διατμητική της αντοχή ελαττώνονται, ενώ η πίεση των πόρων αυξάνεται. Αντίστροφα για χαμηλή τιμή του δείκτη πόρων και αρχική κατάσταση της άμμου κάτω της γραμμής SSL, η άμμος συμπεριφέρεται αντίστροφα και αναπτύσσονται αρνητικές πιέσεις πόρων. Τέλος για ενδιάμεση τιμή του δείκτη πόρων η άμμος αρχικά έως ένα σημείο παραμόρφωσης συμπεριφέρεται συστολικά και στη συνέχεια διαστολικά.

Η ενεργός τάση γενικά οδηγεί με την αύξηση της σε περισσότερο συστολική συμπεριφορά και σε μείωση της διατμητικής αντοχής της άμμου αρχικά. Σε πειράματα που εκτέλεσαν οι Ishihara et al. σε δοκίμια της άμμου Toyoura (1993) διαπίστωσαν ότι εκείνα τα οποία στερεοποιήθηκαν σε ενεργό τάση 100kPa επέδειξαν παραπάνω από 10πλάσια τιμή μέγιστης διατμητικής αντοχής σε σχέση με το δοκίμιο το οποίο στερεοποιήθηκε στα 10kPa. Ωστόσο για μεγάλες παραμορφώσεις, άνω του 20%, όπου η άμμος φτάνει πλέον στη σταθερή κατάσταση η αντοχή όλων των δοκιμίων προσεγγίζει την ίδια τιμή.

Η αρχική διατμητική τάση, η προδιάτμηση δηλαδή της άμμου, είναι μια άλλη παράμετρος. Είναι συνηθισμένο στη φύση μία άμμος να βρίσκεται υπό διατμητική τάση ακόμα και δίχως την επιβολή εξωτερικής φόρτισης από μια κατασκευή ή λόγω της σεισμικής δράσης και η επίδρασή της στην απόκριση της άμμου έχει αποτελέσει

αντικείμενο μελέτης διαφόρων ερευνητών. Στο εργαστήριο η προδιάτμηση επιτυγχάνεται με τη βοήθεια τριαξονικής συσκευής με στερεοποίηση των δοκιμίων σε διαφορετική τάση στο κατακόρυφο και στο οριζόντιο επίπεδο. Εναλλακτικά προσομοιώνεται με πειράματα στρεπτικής διάτμησης σε δοκίμια τα οποία φορτίζονται στρεπτικά πριν την επιβολή της κύριας φόρτισης. Οι πρώτες σχετικές μελέτες από τους Lee και Seed το 1967 και το 1975 με δοκιμές ανακυκλικής φόρτιση οδήγησαν στο συμπέρασμα ότι η προδιάτμηση επιδρά ευνοϊκά στην αντοχή της άμμου έναντι ρευστοποίησης. Αντίθετα σύμφωνα με τον Castro, από έρευνές του το 1969, το 1975 και το 1982, καθώς και τον Casagrande (1975) και τους Castro και Poulos (1977), η προδιάτμηση των άμμων είναι είτε αρνητική είτε αδιάφορη για την αντοχή της άμμου.

Άλλες μελέτες από τους Vaid et al. (1979), (1985), (2001) έδειξαν πως η επίδραση της προδιάτμησης στην άμμο εξαρτάται από τη παράλληλη συμβολή και άλλων παραγόντων όπως ο αρχικός δείκτης πόρων και η ενεργός τάση. Ειδικότερα η αύξηση της προδιάτμησης της άμμου με δεδομένη την ενεργό τάση ή αντίστροφα για αυξανόμενη ενεργό τάση με δεδομένη την προδιάτμηση της άμμου οδηγεί σε περισσότερο συστολική συμπεριφορά. Επιπλέον η αύξηση της προδιάτμησης της άμμου με σταθερή την ενεργό τάση αυτής μέχρι ενός σημείου είναι ευνοϊκή για την άμμο αλλά πέραν αυτού η επίδραση της προδιάτμησης αντιστρέφεται.

Άλλος παράγοντας που επηρεάζει την συμπεριφορά της άμμου είναι ο τρόπος επιβολής της φόρτισης. Λόγω της ανισοτροπίας της δομής της η άμμος εκδηλώνει διαφορετική συμπεριφορά για διαφορετικές διευθύνσεις φόρτισης, ιδιότητα που παρατηρείται όταν υποβάλλεται σε διαφορετικό τασικό πεδίο φορτίσεων. Μια άμμος επομένως είναι δυνατόν να παρουσιάζει συστολική συμπεριφορά για παράδειγμα όταν υπόκειται σε τριαξονικό εφελκυσμό και διαστολική συμπεριφορά όταν δέχεται τριαξονική θλίψη. Επιπλέον έχει προταθεί πως η απόκριση των άμμων επηρεάζεται και από τις συνθήκες στράγγισης της καθώς και το ρυθμό παραμόρφωσής της.

Οι Alarcon και Guzman et al. (1988) είχαν υποστηρίξει πως η γραμμή σταθερής κατάστασης που προέκυψε από δοκίμια τα οποία παραμορφώθηκαν υπό

στραγγιζόμενες συνθήκες, βρίσκεται υψηλότερα στο καταστατικό διάγραμμα από την αντίστοιχη γραμμή σταθερής κατάστασης που προέκυψε από δοκιμές σε αστράγγιστες συνθήκες. Ωστόσο τα ευρήματά τους αυτά αμφισβητήθηκαν από τους Poulos et al. το 1988 και Been et al. το 1991 οι οποίοι υποστήριξαν πως οι διαφορές στη θέση της σταθερής κατάστασης μεταξύ στραγγιζόμενων και αστράγγιστων δοκιμών είναι μηδαμινές και τυχαίες.

Ο ρυθμός επιβολής των παραμορφώσεων θεωρήθηκε επίσης από τους Castro (1969) και Casagrande (1975) ότι επηρέασε τη θέση της γραμμής σταθερής κατάστασης και ότι η θέση αυτή στην περίπτωση επιβολής παραμόρφωσης με σταθερό ρυθμό προκύπτει υψηλότερα στο καταστατικό διάγραμμα. Η άποψη αυτή αμφισβητήθηκε από τους Poulos et al. (1988) και Been et al. (1991) οι οποίοι απέδειξαν πως οι διαφορές μεταξύ των θέσεων της γραμμής σταθερής κατάστασης για τις δύο παραπάνω περιπτώσεις είναι ασήμαντες. Επιπλέον ενδιαφέρον έχουν οι συνθήκες εκείνες και οι παράγοντες οι οποίοι επηρεάζουν τις μετρήσεις που λαμβάνονται στο εργαστήριο, κατά την εκτέλεση πειραμάτων με αντικείμενο τη συμπεριφορά του εδάφους.

Μία σημαντική παράμετρος είναι η μέθοδος παρασκευής ενός δοκιμίου. Για να μελετήσουν την επίδρασή της οι Ishihara και Zlatovic το 1997 εκτέλεσαν μια σειρά δοκιμών σε μίγματα άμμου και ιλύος με διαφορετικές μεθόδους προετοιμασίας. Ορισμένα παρασκευάστηκαν ξηρά απόθεση (dry deposition), άλλα με καθίζηση άμμου στο νερό (water sedimentation) και άλλα με απόθεση άμμου με χαμηλό ποσοστό υγρασίας (moist placement). Για κάθε μέθοδο παρασκευής, ετοιμάστηκε σειρά δοκιμών στην πιο χαλαρή τους κατάσταση τα οποία παραμορφώθηκαν έως τη κατάσταση της ψευδο-σταθερής κατάστασης. Διαπιστώθηκε ότι δείγματα που αποτελούνται από το ίδιο υλικό, αλλά παρασκευάστηκαν με διαφορετικές μεθόδους παρουσίασαν τις ίδιες σχεδόν κανονικοποιημένες καμπύλες τάσης παραμόρφωσης και διαδρομές τάσεων, μέχρι τη τιμή της μέγιστης διατμητικής αντοχής. Όμως για εντατικές καταστάσεις πέραν της διατμητικής αντοχής οι δύο καμπύλες αποκλίνουν.

Στις υπόλοιπες παραμέτρους που επηρεάζουν τα πειραματικά δεδομένα ανήκουν οι διαστάσεις των δοκιμίων, η ανομοιογενής παραμόρφωσή τους σε περίπτωση που δημιουργούνται ζώνες διάτμησης σε αυτά και η επίδραση της ελαστικής μεμβράνης που περιβάλλει το δοκίμιο και χρησιμοποιείται για την απομόνωσή του στη τριαξονική συσκευή από το νερό της κυψέλης πλευρικών τάσεων.

3. Η επίδραση του περιεχόμενου ποσοστού ιλύος στη μηχανική συμπεριφορά της άμμου

3.1 Εισαγωγή

Γενικά, το θέμα της προσθήκης ποσοστού λεπτόκοκκων σε μείγμα άμμου και η επίδραση αυτού του ποσοστού στις μηχανικές ιδιότητες του μείγματος, είναι ένα πολύ σύνθετο θέμα που δεν έχει μελετηθεί επαρκώς. Οι υπάρχουσες απόψεις ποικίλουν και συχνά έρχονται σε αντίθεση η μια με την άλλη. Οι μελέτες που έχουν γίνει στο παρελθόν βασίζονται κυρίως σε τριαξονικές δοκιμές και σε μικρότερο βαθμό σε δοκιμές στρέψης κοίλου δοκιμίου (hollow cylinder).

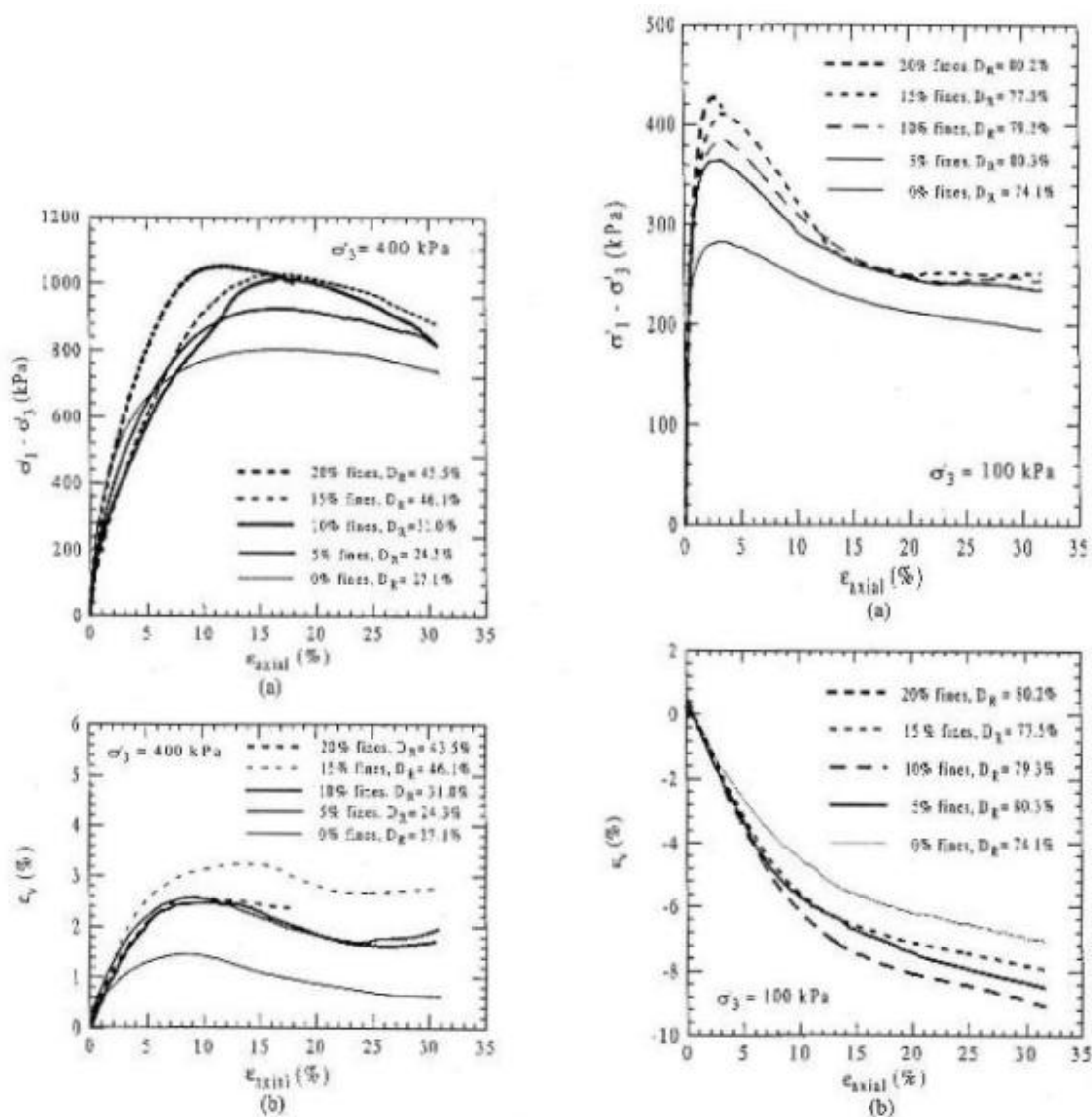
3.2 Βιβλιογραφικές αναφορές στην επίδραση του περιεχομένου ποσοστού ιλύος στη μηχανική συμπεριφορά της άμμου

Πειράματα των Salgado, Bandini, Karim

Οι Salgado, Bandini, Karim (2000) εκτέλεσαν τριαξονικές δοκιμές υπό στραγγιζόμενες συνθήκες σε δοκίμια χαλαρής και πυκνής άμμου Ottawa με μείξη διάφορων ποσοστών (0-20%) ιλύος. Παρατήρησαν ότι η προσθήκη ακόμα και μικρών ποσοστών ιλύος στο δείγμα της άμμου οδηγεί σε σημαντική αύξηση της $\phi'_{αστ}$ και αλλά και της γωνίας τριβής της κρίσιμης κατάστασης. Στα διαγράμματα του σχήματος 3.1 φαίνονται τα πειραματικά αποτελέσματα απεικονισμένα ως προς:

α) $\sigma'_1 - \sigma'_2$ με την αξονική παραμόρφωση ϵ_{axial} (%) και

β) ογκομετρική παραμόρφωση ϵ_v (%) με την αξονική παραμόρφωση ϵ_{axial} (%).

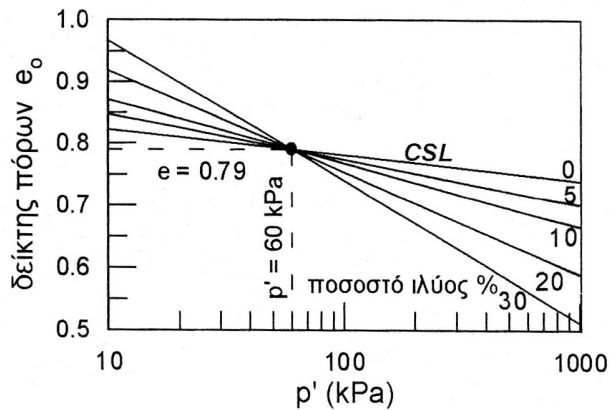


Σχήμα 3.1 Τριαξονικές δοκιμές (στραγγιζόμενες συνθήκες) σε δοκίμια χαλαρής (αριστερά) και πυκνής (δεξιά) άμμου Ottawa με μείξη διάφορων ποσοστών (0-20%) ιλύος.

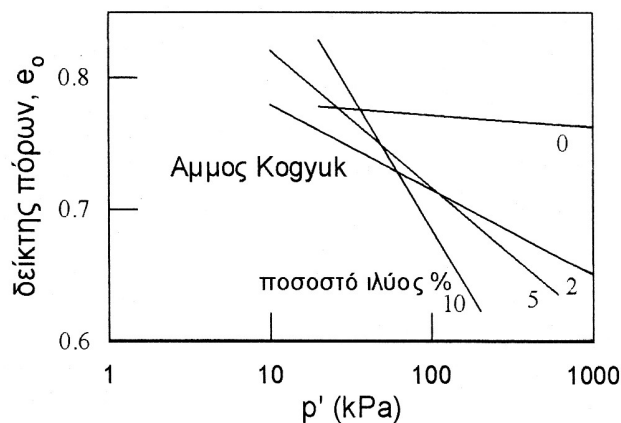
Επεξεργασία πειραμάτων από Αδριανόπουλο, Μπουκοβάλα, Παπαδημητρίου

Οι Αδριανόπουλος, Μπουκοβάλας, Παπαδημητρίου (2001) εκτίμησαν από πειράματα της βιβλιογραφίας ότι η επίδραση του δείκτη πόρων e_0 είναι σχετικά μικρή σε σχέση με την επίδραση της τάσης στερεοποίησης p'_0 (βλ. σχήμα 3.2). Επίσης, ότι υπάρχει μια μη

μονοσήμαντη επίδραση του ποσοστού ιλύος (f) στην αντοχή σε ρευστοποίηση. Βρέθηκε ότι για σχετικά μικρό p' η ιλύς αυξάνει την αντοχή του μίγματος σε ρευστοποίηση ενώ για μεγάλο p' την μειώνει. Στο Σχήμα 3.3 απεικονίζονται οι CSL σε διάγραμμα δείκτη πόρων – αρχικής τάσης στερεοποίησης, για ποσοστά ιλύος 0-10%.



Σχήμα 3.2 Επίδραση του ποσοστού ιλύος f (%) στη θέση της CSL στο χώρο $[e-\ln(p')]$.

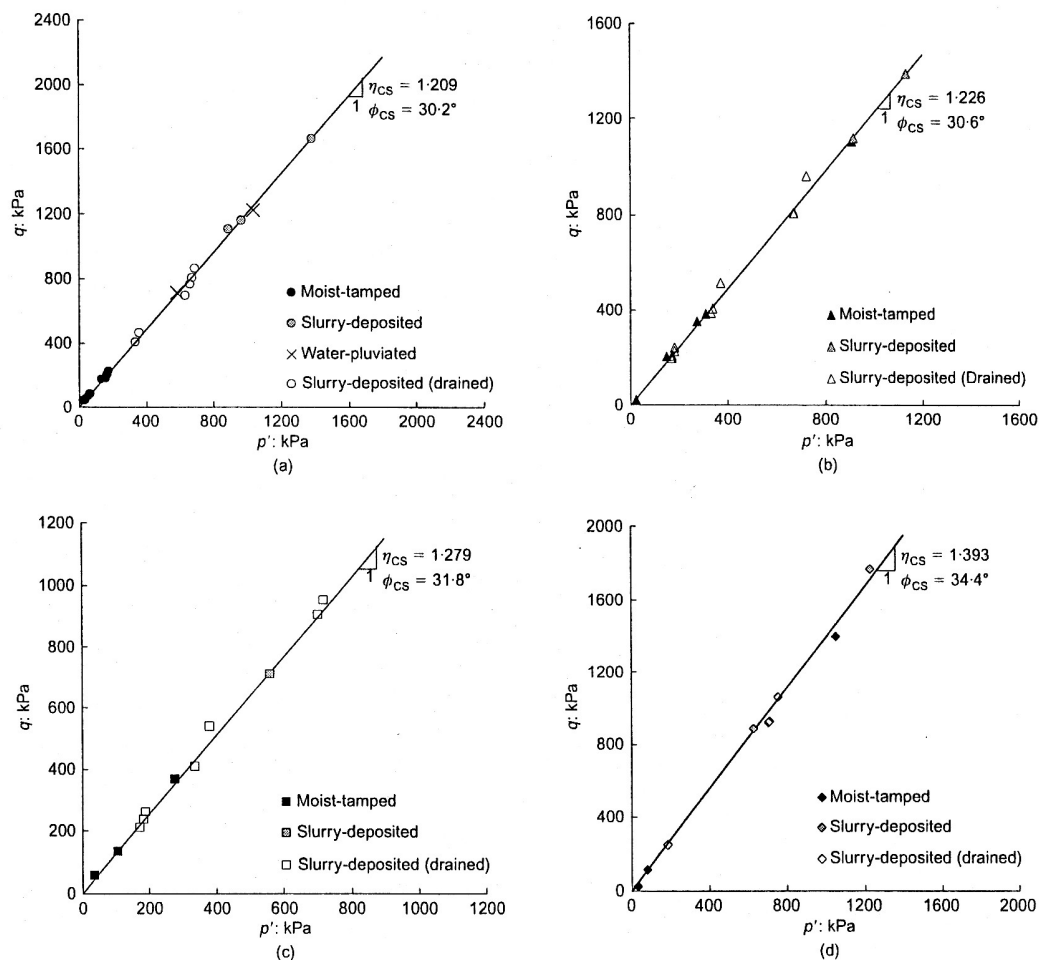


Σχήμα 3.3 Επίδραση του ποσοστού ιλύος στη θέση της CSL για την άμμο Kogyuk

Πειράματα των Murthy, Loukidis, Carraro, Prezzi, Salgado

Οι Murthy, Loukidis, Carraro, Prezzi, Salgado (2007) αναφερόμενοι στην κρίσιμη κατάσταση (Critical State) διαπίστωσαν ότι η αύξηση του ποσοστού λεπτόκοκκων (f)

οδηγεί σε μια μετατόπιση προς τα κάτω γραμμής κρίσιμης κατάστασης καθώς και αύξηση της γωνίας τριβής. Ακόμη, παρατήρησαν μια εμφανή διαφορά στη διατμητική αντοχή των δοκιμίων, ανάλογα τη μέθοδο δημιουργίας του δοκιμίου: moist tamping ή slurry deposition, με την πρώτη να παρουσιάζει μεγαλύτερες αντοχές. Σε μεγάλες καταπονήσεις όμως η διαφορά εξαφανίζεται και τα δοκίμια δείχνουν κοινή συμπεριφορά (σχήμα 3.4).

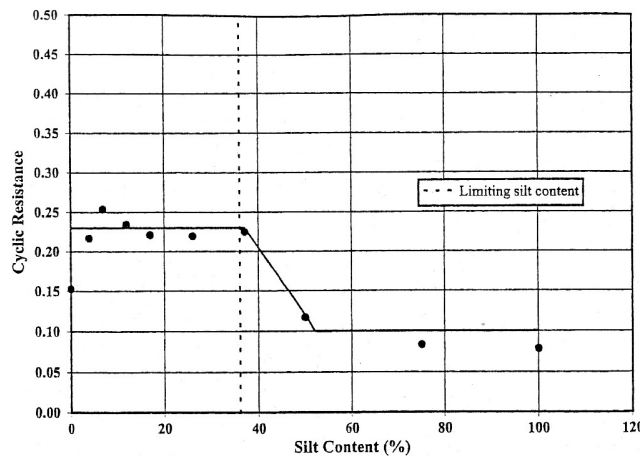


Σχήμα 3.4 Καμπύλες κρίσιμης κατάστασης για άμμο Ottawa με a) 0%, b) 5%, c) 10%, d) 15% ποσοστά περιεχόμενης μη-πλαστικής ιλύος

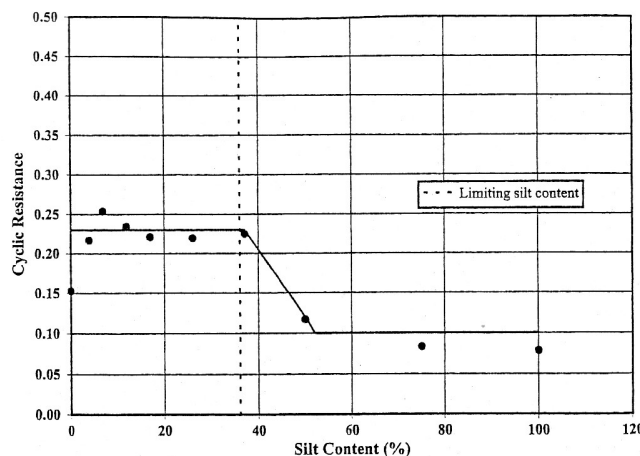
Πειράματα των Polito, Martin

Οι Polito, Martin (2001) εστιάζουν στο μέγιστο ποσοστό ιλύος που μπορεί να εισαχθεί στα κενά του σκελετού των κόκκων της άμμου (limiting silt content), το οποίο

εντοπίζεται περίπου στο 25-45% για τις περισσότερες άμμους. Για μείγματα με μικρότερο ποσοστό λεπτόκοκκων από το προαναφερθέν, η αντοχή σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση ελέγχεται κυρίως από την σχετική πυκνότητα μεταξύ των δειγμάτων (υποδεικνύεται από τον λόγο των κενών). Αύξηση της πυκνότητας, αυξάνει την αντοχή. Για μείγματα πάνω από το όριο του μέγιστου ποσοστού ιλύος, πάλι κύριο λόγο παίζει η πυκνότητα αλλά γενικά οι αντοχές είναι μειωμένες. Η αύξηση της αντοχής με την αύξηση της πυκνότητας συμβαίνει και πάλι αλλά σε μικρότερο βαθμό. Συμπερασματικά, καταλήγουν ότι η συμπεριφορά της ιλυώδους άμμου δεν μπορεί να προσδιοριστεί μόνο από το ποσοστό των λεπτόκοκκων αλλά πρέπει να συγκριθεί και με το limiting silt content της καθαρής άμμου (Σχήματα 3.5 και 3.6).



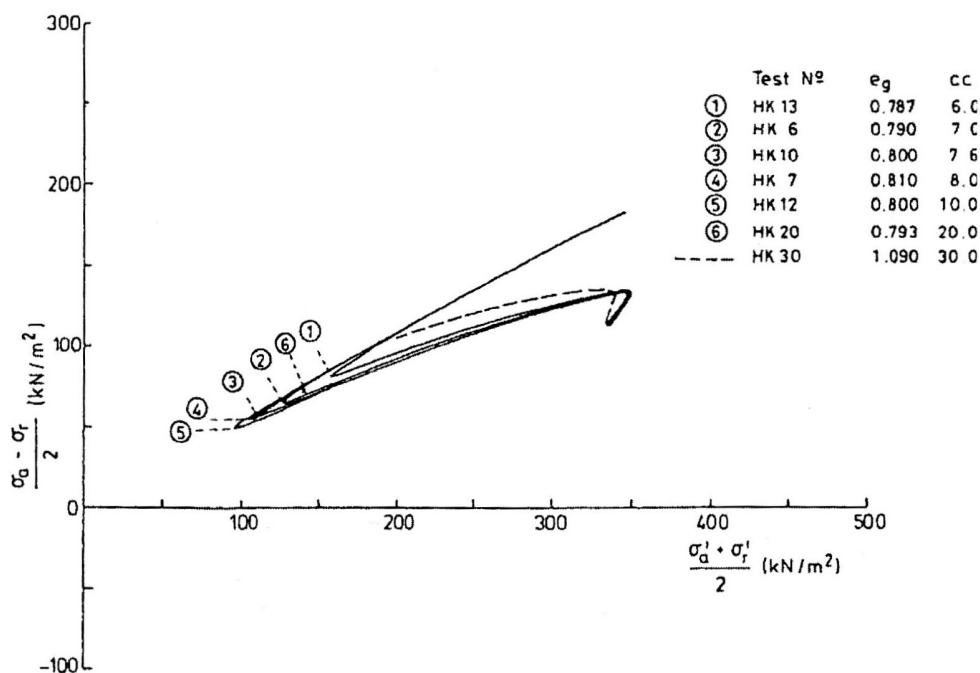
Σχήμα 3.5 Διακύμανση της αντοχής σε ανακυκλική φόρτιση δοκιμίων άμμου για διάφορα περιεχόμενα ποσοστά ιλύος (σχετική πυκνότητα $D_r=30\%$).



Σχήμα 3.6 Διακύμανση της αντοχής σε ανακυκλική φόρτιση δοκιμίων άμμου για διάφορα περιεχόμενα ποσοστά ιλύος (σχετική πυκνότητα $D_r=60\%$).

Πειράματα των Georgiannou et al.

Για τη μελέτη της επίδρασης μικρού ποσοστού αργίλου στη συμπεριφορά της άμμου χρησιμοποιήθηκε από τους Georgiannou et al. (1990-1991) σε πειράματα τριαξονικών δοκιμών, η παράμετρος του δείκτη πόρων της κοκκώδους φάσης του υλικού e_g ή e_{sk} : σκελετικός δείκτης πόρων όπως καλείται. Αυτός ορίζεται ως: $e_{sk} = V_T G_s \rho_w / (M_t - M_f) - 1$, όπου e_s είναι ο δείκτης πόρων του εδαφικού σκελετού, V_T είναι ο ολικός όγκος του δείγματος, G_s το ειδικό βάρος των κόκκων της άμμου, ρ_w η πυκνότητα του νερού, M_t η ολική μάζα των στερεών, M_f η μάζα των λεπτόκοκκων στο δείγμα. Τα αποτελέσματα των δοκιμών απεικονίζονται γραφικά στο σχήμα 3.7.



Σχήμα 3.7 Διαδρομές τάσεων δοκιμών με διαφορετικά ποσοστά πρόσμιξης σε άργιλο που υποβλήθηκαν σε τριαξονική φόρτιση υπό αστράγγιστες συνθήκες

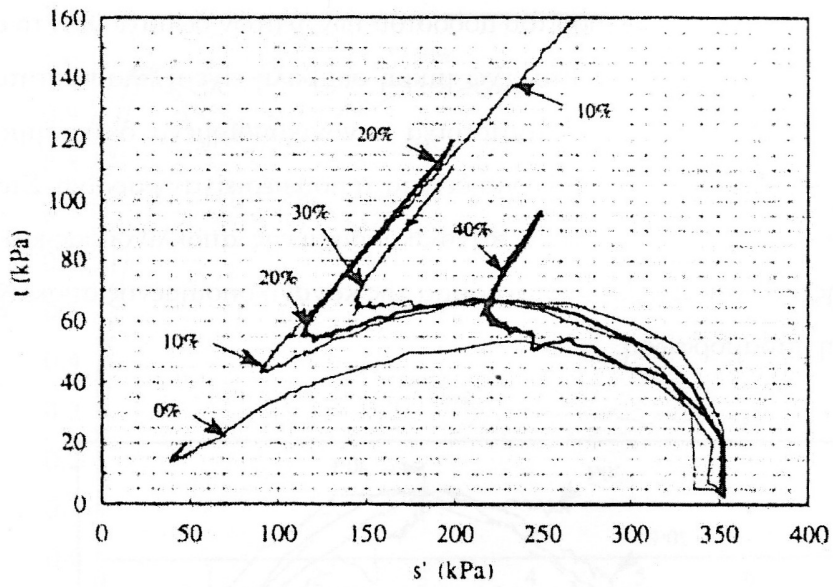
Διαπιστώνεται πως για δεδομένο δείκτη πόρων και για αύξηση του ποσοστού της αργίλου έως και 10% η παραμόρφωση που απαιτείται έως το σημείο της αλλαγής της φάσης αυξάνει, ενώ η S_{US} και η S_{UP} διατηρούν την ίδια σχεδόν τιμή. Οι αργιλώδεις άμμοι με ποσοστό αργίλου έως και 12% παρουσιάζουν υψηλές τιμές ψαθυρότητας σε θλίψη

υπό αστράγγιστες συνθήκες. Η τάση αυτή αντιστρέφεται όμως για ποσοστά λεπτόκοκκου υλικού μεταξύ 20% και 30%. Τότε η συμπεριφορά αλλάζει και γίνεται συγκρίσιμη με εκείνη των ιζηματογενών αργίλων. Η παρουσία ιλύος σε μίγμα αργίλου και άμμου έχει ως αποτέλεσμα καλύτερη διαβάθμιση, μειωμένα κενά μεταξύ των κόκκων και κατά συνέπεια καλύτερη συμπεριφορά.

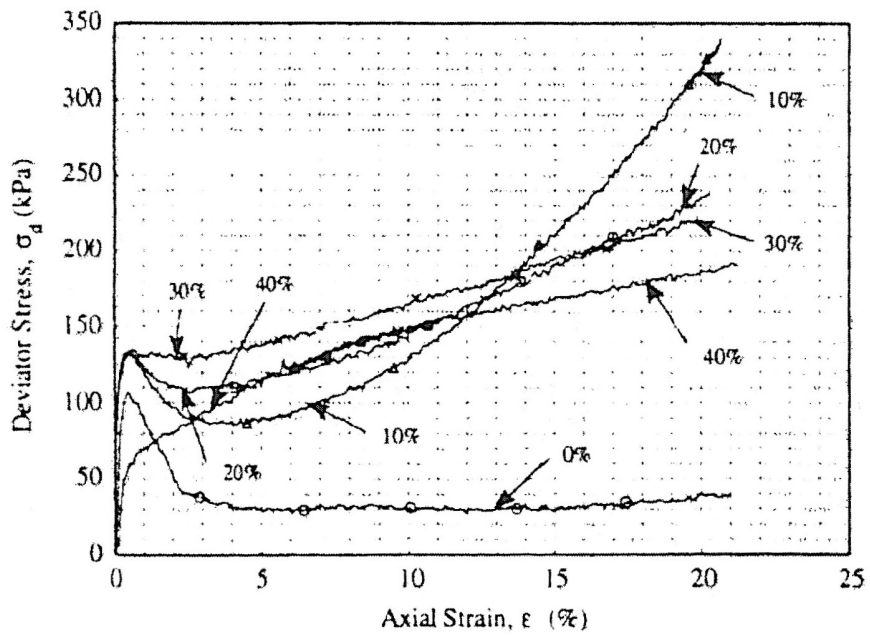
Επίσης μειωμένη αντίσταση στη ρευστοποίηση παρουσιάζουν τα εδάφη με ποσοστό αργίλου περί το 10%. Σε δοκιμές ανακυκλιζόμενης φόρτισης που πραγματοποιήθηκαν στα ίδια εδάφη επιβεβαιώθηκε πως μίγματα άμμου, αργίλου και ιλύος είναι σταθερότερα όταν το ποσοστό της αργίλου φτάνει το 10%. Εξαίρεση αποτέλεσαν τα μίγματα άμμου και αργίλου, τα οποία ρευστοποιήθηκαν για την ίδια τιμή ανεξάρτητα από το ποσοστό αργίλου έως και 10%.

Πειράματα των Pitman et al.

Νεότερα πειράματα από τους Pitman, Robertson και Sego (1994) για να εξετάσουν την επιρροή των λεπτόκοκκων υλικών και της διαβάθμισης της άμμου οδήγησαν σε διαφορετικά αποτελέσματα. Εκτελέστηκαν πειράματα σε δείγματα χαλαρής άμμου Ottawa με προσθήκη καολίνη υψηλής πλασσιμότητας, μη πλάσιμου θραυσμένου πυριτίου, καθώς και σε λεπτόκοκκη πυριτική άμμο. Τα δείγματα υποβλήθηκαν σε δοκιμές ισότροπης στερεοποίησης και τριαξονικής θλίψης υπό αστράγγιστες συνθήκες. Στο σχήμα 3.8 παρουσιάζονται οι διαδρομές τάσεων, ενώ στο σχήμα 3.9 ακολουθεί το διάγραμμα αποκλινοσών τάσεων-παραμόρφωσης.

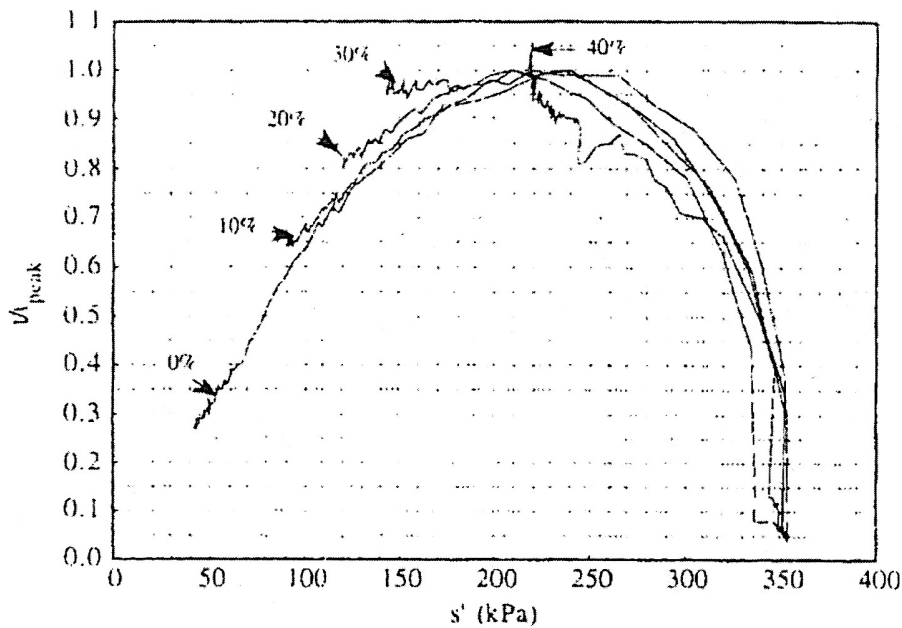


Σχήμα 3.8 Διαδρομές τάσεων δειγμάτων με διαφορετική πρόσμιξη σε καολίνη

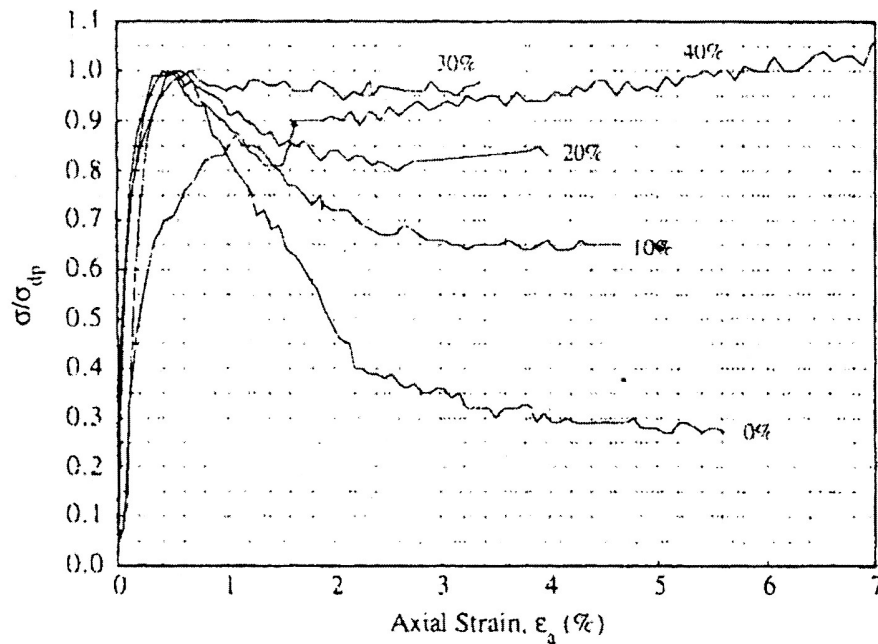


Σχήμα 3.9 Διάγραμμα αποκλινοσών τάσεων – παραμορφώσεων δειγμάτων με διαφορετική πρόσμιξη σε καολίνη

Παρατηρήθηκε πως με την αύξηση του ποσοστού των λεπτών σωματιδίων, το έδαφος παρουσίασε μικρότερη ψαθυρότητα, ενώ μικρή συμβολή είχε η πλασιμότητα ή μη των σωματιδίων. Ακολουθούν τα αντίστοιχα κανονικοποιημένα διαγράμματα ως προς την αρχική τάση στερεοποίησης για δείγματα που περιείχαν καολίνη. Στο σχήμα 3.10 απεικονίζεται το διάγραμμα κανονικοποιημένης αποκλίνουσας και μέσης ενεργού τάσης, ενώ στο σχήμα 3.11 το διάγραμμα της κανονικοποιημένης αποκλίνουσας τάσης-προς τη παραμόρφωση. Σε αυτά φαίνεται πως δοκίμια με διαφορετικά ποσοστά πρόσμιξης σε λεπτόκοκκο πυριτικό υλικό έως και 30% παρουσιάζουν την ίδια ακριβώς απόκριση μέχρι το σημείο αλλαγής της φάσης, για παραμόρφωση 0,5% περίπου. Μετά την αλλαγή φάσης η απόκρισή τους διαφοροποιείται κατά πολύ αναλόγως της περιεκτικότητάς τους σε λεπτόκοκκο υλικό: όσο μεγαλύτερο είναι αυτό, τόσο περισσότερο διατηρούν τα δοκίμια υψηλή διατμητική αντίσταση και επομένως η συμπεριφορά τους προσεγγίζει εκείνη των πυκνών δοκιμίων.

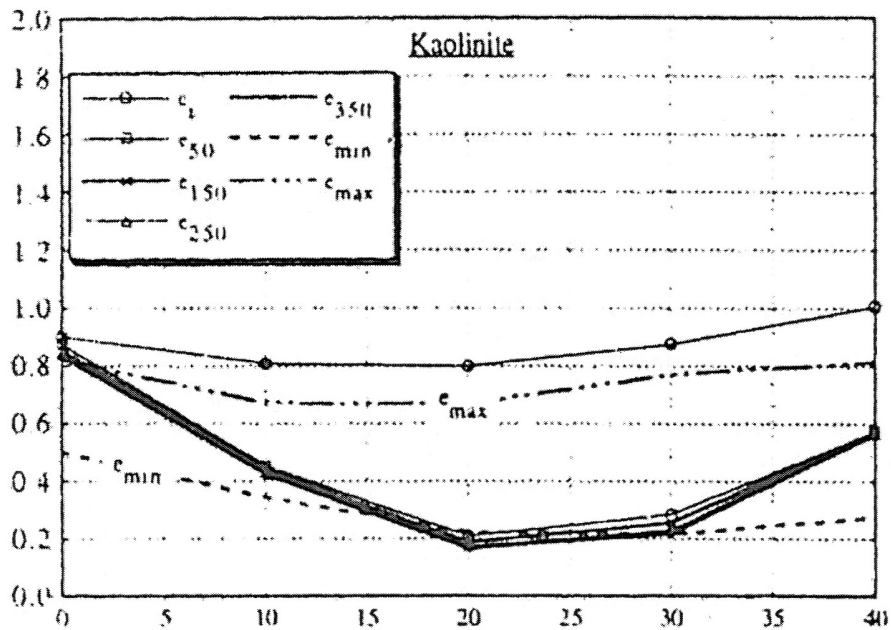


Σχήμα 3.10 Κανονικοποιημένο διάγραμμα αποκλίνουσας τάσης – μέσης ενεργού τάσης δοκιμίων με διαφορετικά ποσοστά πρόσμιξης σε καολίνη



Σχήμα 3.11 Κανονικοποιημένο διάγραμμα αποκλινοσών τάσεων – παραμορφώσεων δοκιμίων με διαφορετικά ποσοστά πρόσμιξης σε καολίνη

Ειδικά το δοκίμιο με λεπτόκοκκο υλικό σε ποσοστό 40%, ενώ μεν αρχικά για παραμόρφωση έως 0,5% παρουσίασε μικρότερη αντοχή από τα υπόλοιπα, στη συνέχεια αυτή αυξάνεται διαρκώς έως τη σταθερή κατάσταση, ξεπερνώντας κατά πολύ την αντοχή όλων των υπολοίπων δοκιμίων. Διακρίνονται επομένως δύο τύποι συμπεριφοράς: Εκείνη που παρατηρείται σε μικρές παραμορφώσεις, έως 0,5% και η απόκριση που παρατηρείται για παραμόρφωση άνω του 0,5%. Στις μικρές παραμορφώσεις η απόκριση των δοκιμίων με ποσοστό ίλύος έως και 30% ήταν παρόμοια, ενώ για τις μεγάλες παραμορφώσεις αποκλίνει. Ακολουθώντας, στο σχήμα 3.12, παριστάνεται η μεταβολή του δείκτη πόρων μιγμάτων άμμου και καολίνη σε συνάρτηση με το ποσοστό τους σε καολίνη για διαφορετικές τιμές της ενεργού τάσης στερεοποίησης.



Σχήμα 3.12 Διάγραμμα δείκτη πόρων συναρτήσει της περιεκτικότητας της άμμου σε καολίνη, για διαφορετικές τιμές της ενεργού τάσης στερεοποίησης

Οι διαφορετικές γραμμές αντιστοιχούν σε διαφορετικές τιμές της ενεργού τάσης κατά τη προετοιμασία του δείγματος και ως το τέλος της στερεοποίησης. Ο δείκτης πόρων στα πλάσιμα λεπτόκοκκα υλικά παρουσιάζει μεγάλες διακυμάνσεις που οφείλονται στη μεγαλύτερη συμπιεστότητά τους και τους επιτρέπει να παραμορφώνονται γύρω από τους ασυμπίεστους κόκκους άμμου και να δημιουργούν καλύτερη επαφή με αυτούς.

4. Αποτελέσματα δοκιμών

4.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο 5 παρουσιάζονται οι δοκιμές που έγιναν στην άμμο M31, παρατίθενται διαγράμματα, γίνεται ανάλυση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν και εξάγονται συμπεράσματα. Συγκεκριμένα, στα επόμενα υποκεφάλαια, μελετούνται οι υπερπιέσεις πόρων που ανέπτυξαν τα δοκίμια, ακολουθούν οι καμπύλες ρευστοποίησης της άμμου και τέλος εξετάζεται περαιτέρω η μηχανική συμπεριφορά της M31 με λεπτομερή εξέταση της εξέλιξης του πειράματος, παρουσίαση διαδρομών τάσεων, διαγραμμάτων διατμητικών τάσεων – διατμητικών παραμορφώσεων και άλλων παραμέτρων των πειραμάτων. Στην παρούσα εργασία έγινε αξιολόγηση των πειραμάτων τα οποία είχαν εκπονηθεί από την κυρία Κων/να Σταύρου (προσωπική επικοινωνία). Στο παράρτημα Β παρατίθεται συγκεντρωτικός πίνακας με τα χαρακτηριστικά των δοκιμών που επεξεργάστηκαν στην παρούσα διπλωματική εργασία. Η συσκευή που χρησιμοποιήθηκε για την εκτέλεση των πειραμάτων είναι η συσκευή στρεπτικής διάτμησης κούλου δοκιμίου (hollow cylinder apparatus), Αναλυτική περιγραφή της οποίας παρουσιάζεται στη διδακτορική διατριβή του κυρίου Αργύριου Τσομώκου (2005). Η προαναφερθείσα περιγραφή παρατίθεται ως παράρτημα Α.

4.2 Υπερπιέσεις πόρων

Σε αυτό το υποκεφάλαιο θα μελετηθούν οι υπερπιέσεις πόρων που ανέπτυξαν τα δοκίμια κατά την ανακυκλική φόρτιση που τους επιβλήθηκε. Παρουσιάζονται και ερμηνεύονται τα πειραματικά αποτελέσματα και γίνεται μια προσπάθεια θεωρητικής προσέγγισης του

φαινομένου με χρήση κάποιων τύπων. Ακόμη, στο τέλος του υποκεφαλαίου, υπάρχει και μια στατιστική ανάλυση των δεδομένων που προέκυψαν.

4.2.1 Ανάπτυξη υπερπιέσεων πόρων Δu κατά την ανακυκλική φόρτιση υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης

Κατά καιρούς διάφοροι ερευνητές έχουν προτείνει εμπειρικές σχέσεις οι οποίες υπολογίζουν το ρυθμό ανάπτυξης υδατικών υπερπιέσεων λόγω ανακυκλικής φόρτισης σε ένα εδαφικό υλικό. Ενδεικτικά αναφέρονται οι Seed et al. (1976), Ishibashi et al. (1977), Seed and Booker (1977), Nemat-Nasser and Shokooh (1979), Chang et al. (1983), Mitchell and Dubin (1986), Martin et al. (1975), Pierce (1983), Bouchovalas and Gazetas (1996), Egglezos and Bouckovalas (1998, 1999). Οι σχέσεις αυτές χωρίζονται σε δύο κύριες κατηγορίες, τις σχέσεις που προέκυψαν από δοκιμές ελεγχόμενης τάσης και τις σχέσεις που προέκυψαν από δοκιμές ελεγχόμενης παραμόρφωσης. Στους Πίνακες 4.2.3α και 4.2.3β παρατίθενται συνοπτικά ορισμένες από τις σχέσεις που έχουν προκύψει με βάση δοκιμές ελεγχόμενης τάσης, εφόσον και οι ανακυκλικές δοκιμές της παρούσας διπλωματικής εργασίας έχουν πραγματοποιηθεί όλες με έλεγχο της επιβαλλόμενης τάσης και όχι της παραμόρφωσης.

Από τις προαναφερθείσες σχέσεις εκείνη που βρέθηκε να προσομοιώνει καλύτερα, με μικρές τροποποιήσεις, το σύνολο των ανακυκλικών δοκιμών στην άμμο M31, είναι η σχέση των Ishibashi et al. (1977). Πιο συγκεκριμένα η σχέση που προτείνεται έχει την εξής γενική μορφή:

$$\frac{\Delta U_N}{p_i'} = \left(1 - \frac{U_{N-1}}{p_i'}\right)^{c_1} \cdot \left(\frac{c_2 N}{N^{c_3} + c_4}\right) \cdot \left(\frac{\tau_{SA(N)}}{p'_{N-1}}\right)^{c_5} \quad (4.2.1)$$

όπου

- ΔU_N είναι η διαφορά μεταξύ της υπερπίεσης πόρων στο τέλος του (N-1) κύκλου φόρτισης (U_{N-1}) με την υπερπίεση πόρων στο Νιοστό κύκλο φόρτισης (U_N), ($\Delta U_N=U_N-U_{N-1}$)
- p'_i είναι η αρχική ενεργός μέση τάση
- N είναι ο τρέχων αριθμός των κύκλων φόρτισης
- $\tau_{SA(N)}$ είναι το ημι-εύρος της επιβαλλόμενης διατμητικής τάσης στο Νιοστό κύκλο φόρτισης
- p'_{N-1} είναι η τιμή της μέσης ενεργού τάσης μετά από (N-1) κύκλους φόρτισης και
- c_1, c_2, c_3, c_4, c_5 είναι σταθερές των οποίων το μέγεθος εξαρτάται από την άμμο, την πυκνότητά της και εάν η δοκιμή πραγματοποιείται με σταθερή την τ_{SA} ή όχι.

Οι τιμές που λαμβάνουν οι σταθερές βρέθηκαν από τον Τσομώκο (2006) για δοκίμια που κατασκευάστηκαν από άμμο Ham river και Fontainebleau, για συγκεκριμένα εύρη δείκτη πόρων εδαφικού υλικού (βλ. Πίνακα 4.2.1).

Άμμος	Είδος δοκιμής	Πυκνότητα	Παράμετρος				
			c_1	c_2	c_3	c_4	c_5
Ham river	Σταθερή τ_{SA}	Χαλαρά δοκίμια ($e_i=0.728-0.740$)	-1.10	1.5	1.66	-0.60	2.40
Ham river	Σταθερή τ_{SA}	Πυκνά δοκίμια ($e_i=0.670-0.702$)	-0.80	0.90	1.66	-0.73	2.40
Fontainebleau	Σταθερή τ_{SA}	Χαλαρά δοκίμια ($e_i=0.721-0.753$)	-0.50	3.80	1.66	-0.21	2.40
Fontainebleau	Σταθερή τ_{SA}	Πυκνά δοκίμια ($e_i=0.668-0.703$)	-0.80	1.65	1.66	-0.55	2.40
Ham river	Μεταβαλλόμενη τ_{SA}	$e_i= 0.725$	-0,40	3.40	1.66	-0.52	2.40
Fontainebleau	Μεταβαλλόμενη τ_{SA}	$e_i= 0.717$	-0.80	5.30	1.66	1.20	2.40

Πίνακας 4.2.1: Τιμές των σταθερών c_1-c_5 για διαφορετικά είδη άμμου, πυκνά/χαλαρά δοκίμια και ανάλογα με το είδος της δοκιμής (Τσομώκος 2006).

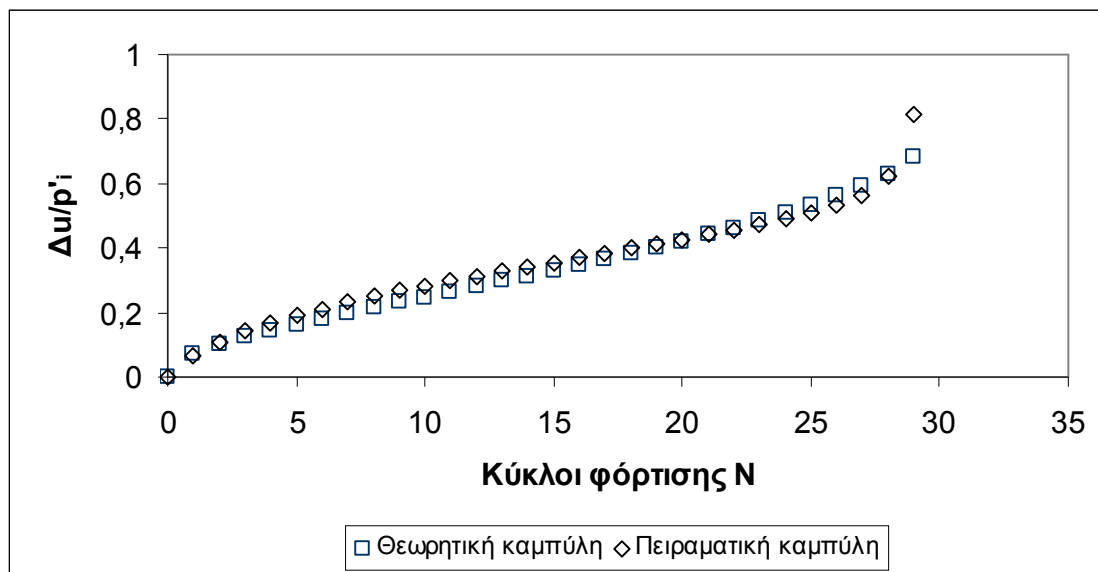
Μετά από εφαρμογή του τύπου βάσει των παραμέτρων του Πίνακα 4.2.1, με τους οποίους έγιναν διάφοροι συνδυασμοί, δεν διαπιστώθηκε συμβατότητα με τα πειραματικά αποτελέσματα που έχουν προκύψει από τις ανακυκλικές φορτίσεις της καθαρής (περιεχόμενο ποσοστό υλός $f=0\%$) άμμου M31. Το αποτέλεσμα αυτό ήταν αναμενόμενο αφού τα δοκίμια αποτελούνταν από διαφορετικό υλικό από τα προηγουμένως μελετηθέντα και όπως έχει δειχθεί στον Πίνακα 4.2.1, διαφορετικό υλικό σημαίνει διαφορετικές παράμετροι. Επιπλέον πρέπει να σημειωθεί ότι στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας εξετάζονται δοκίμια αρκετά πιο πυκνά, αφού οι δείκτες πόρων

των δοκιμίων με $f = 0\%$ είναι κάτω από 0.675 ενώ οι δείκτες πόρων σκελετού στα μείγματα περίπου στο 0.7 και κάτω (άρα ο δείκτης πόρων υπολογισμένος με τον συμβατικό τρόπο είναι ακόμα χαμηλότερος). Συνεπώς, για να είναι ορθή η εφαρμογή της σχέσης (4.2.1, σελ. 48) για την άμμο M31 έγιναν οι απαραίτητες αλλαγές σε κάποιες από τις παραμέτρους. Στη συνέχεια, η σχέση χρησιμοποιήθηκε με τον ίδιο τρόπο για να χαραχθούν θεωρητικές καμπύλες για τα μείγματα άμμου και ιλύος. Διαπιστώθηκαν αρκετές παρεκκλίσεις μεταξύ των πειραματικών δεδομένων και της θεωρητικής πρόβλεψης, συνεπώς βρέθηκαν εκ νέου κάποιες παράμετροι που αφορούν τα μείγματα αυτή τη φορά, ώστε το μοντέλο που προκύπτει να προβλέπει με καλύτερο τρόπο τα αποτελέσματα. Χρησιμοποιήθηκαν οι ίδιες παράμετροι τόσο για τα μείγματα με $f = 5\%$ όσο και για αυτά με 15%. Συνοπτικά παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.2.2:

Άμμος	Ποσοστό ιλύος f (%)	Είδος δοκιμής	Πυκνότητα	Παράμετρος				
				c_1	c_2	c_3	c_4	c_5
M31	0	Σταθερή τ_{SA}	Πυκνά δοκίμια ($e_o=0.628-0.675$)	-0.4	0.8	1.66	-0.55	2.4
M31	5	Σταθερή τ_{SA}	Πυκνά δοκίμια ($e_{sk}=0.658-0.698$)	1	1.65	1.66	-0.55	2.4
M31	10	Σταθερή τ_{SA}	Πυκνά δοκίμια ($e_{sk}=0.719-0.721$)	1.6	1.65	1.66	-0.55	2.4
M31	15	Σταθερή τ_{SA}	Πυκνά δοκίμια ($e_{sk}=0.663-0.716$)	1	1.65	1.66	-0.55	2.4

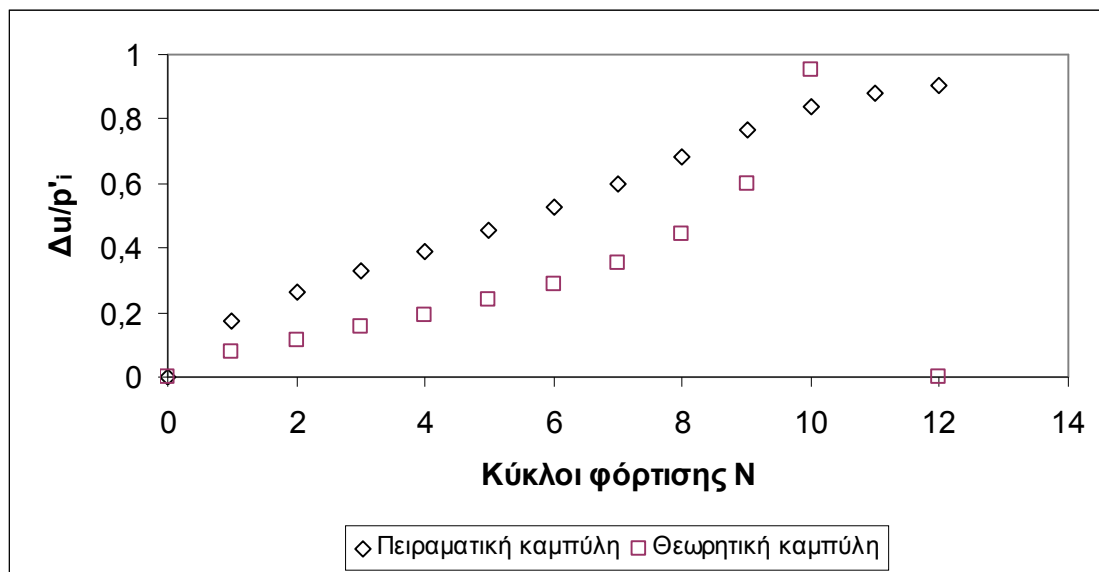
Πίνακας 4.2.2: Τιμές των σταθερών c_1 - c_5 για πυκνά δοκίμια, για διάφορα ποσοστά ιλύος.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα Σχήματα 4.2.1-4.2.5 όπου συγκρίνονται οι πειραματικές καμπύλες που έχουν προκύψει από επεξεργασία των αποτελεσμάτων με τις αντίστοιχες καμπύλες που προκύπτουν από εφαρμογή της σχέσης 4.2.1. Συγκεκριμένα, στο Σχήμα 4.2.1 συγκρίνεται η πειραματική καμπύλη δοκιμίου καθαρής ($f=0\%$), πυκνής άμμου M31 με την θεωρητική που έχει προκύψει αν στην σχέση 4.2.1 χρησιμοποιηθούν οι νέες παράμετροι που βρέθηκαν, για το συγκεκριμένο υλικό και δείκτη πόρων (βλ. Πίνακα 4.2.2). Γενικά, παρατηρείται ικανοποιητική σύμπτωση μεταξύ των δυο καμπυλών, συνεπώς το μοντέλο που προκύπτει από την Σχέση 4.2.1 είναι αρκετά κοντά στην πραγματικότητα.



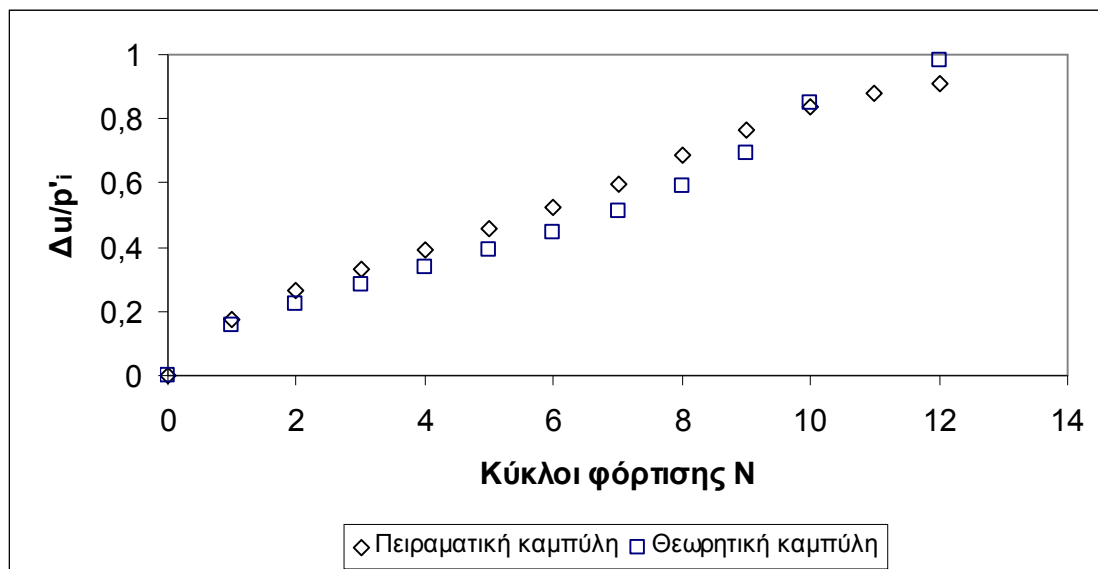
Σχήμα 4.2.1. Θεωρητική και πειραματική καμπύλη $\frac{\Delta u}{p'_i}$ - N δοκιμίου άμμου M31, υποβαλλόμενο σε ανακυκλική στρέψη υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης με $\tau_{SA}=15.775\text{kPa}$, $p'_i=100\text{kPa}$, $e_o=0.641$ και περιεχόμενο ποσοστό ιλύος $f=0\%$

Ακολούθως παρατίθεται το Σχήμα 4.2.2, όπου έχουν απεικονιστεί, όπως στο Σχήμα 4.2.1, η θεωρητική και η πειραματική καμπύλη για δοκίμιο άμμου M31, με περιεχόμενο ποσοστό ιλύος $f=5\%$ και δείκτη πόρων σκελετού $e_{sk}=0.671$. Οι παράμετροι c που έχουν χρησιμοποιηθεί για την σχέση 4.2.1 είναι αυτοί που βρέθηκε ότι ικανοποιούν το μοντέλο της καθαρής άμμου. Όπως φαίνεται όμως από το διάγραμμα δεν επαρκούν για να προβλέψουν την συμπεριφορά του μείγματος, αφού υπάρχουν σημαντικές αποκλίσεις μεταξύ θεωρητικής και πειραματικής καμπύλης. Συνεπώς, απαιτήθηκε να βρεθούν άλλες παράμετροι για να μπορεί να ικανοποιηθεί και η περίπτωση των μειγμάτων. Στο Σχήμα 4.2.3 απεικονίζεται η ίδια πειραματική καμπύλη και μια ακόμα νέα θεωρητική με τις κατάλληλες παραμέτρους c (βλ. Πίνακα 4.2.2).



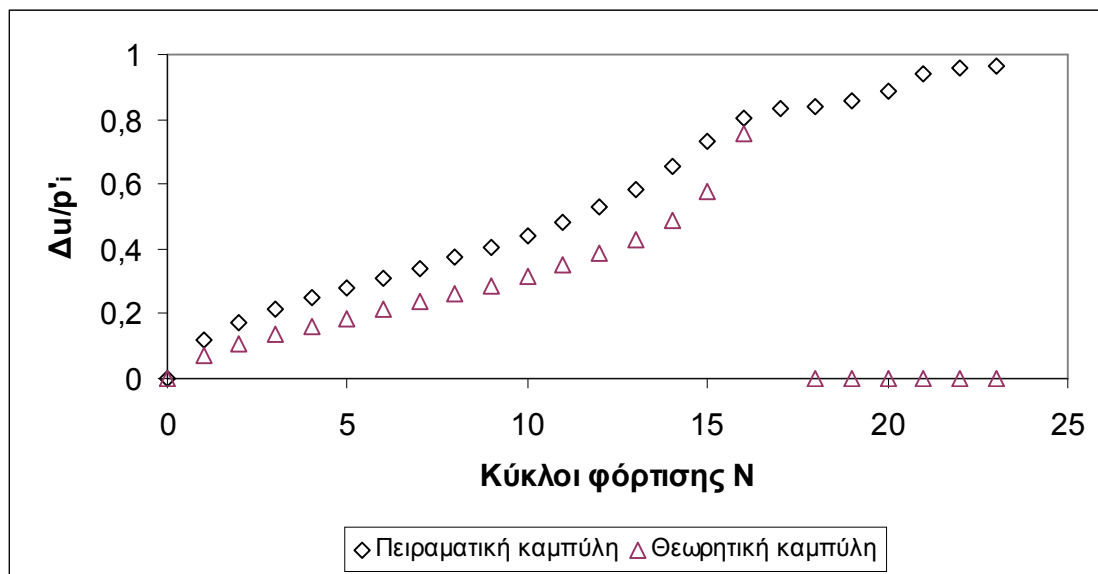
Σχήμα 4.2.2. Θεωρητική και πειραματική καμπύλη $\frac{\Delta u}{p'_i}$ - N δοκιμίου άμμου M31, υποβαλλόμενο σε ανακυκλική στρέψη υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης με $\tau_{SA}=26.796\text{kPa}$, $p'_i=100\text{kPa}$, $e_{sk}=0.671$ και περιεχόμενο ποσοστό ιλύος $f=5\%$

Στο Σχήμα 4.2.3 απεικονίζεται η ίδια πειραματική καμπύλη και μια ακόμα νέα θεωρητική με τις κατάλληλες παραμέτρους c (βλ. Πίνακα 4.2.2). Η νέα προσέγγιση κρίθηκε ικανοποιητική, αφού προέβλεψε σχεδόν όλα τα σημεία. Διαφορές ανάμεσα στις δυο αυτές καμπύλες προκύπτουν κυρίως κατά τους τελευταίους κύκλους φόρτισης της δοκιμής, όπου η υπερπίεση πόρων συσσωρεύεται με πολύ μεγάλο ρυθμό και είναι δύσκολο να προβλεφθεί με ακρίβεια (αυτό το τελευταίο κομμάτι της θεωρητικής καμπύλης έχει παραληφθεί).



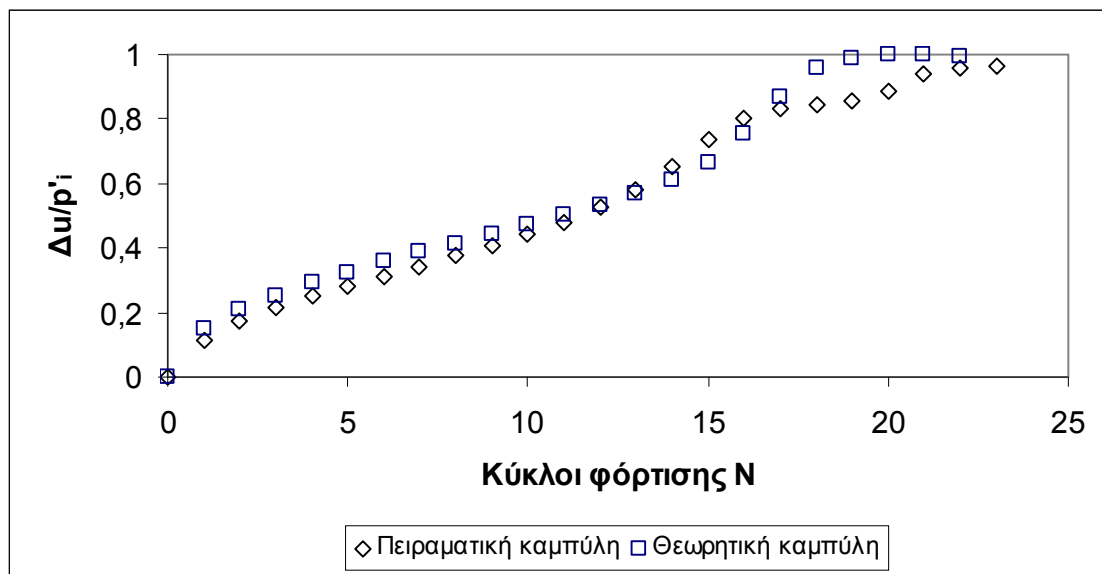
Σχήμα 4.2.3. Θεωρητική και πειραματική καμπύλη $\frac{\Delta u}{p'_i}$ - N δοκιμίου άμμου M31, υποβαλλόμενο σε ανακυκλική στρέψη υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης με $\tau_{SA}=26.796\text{kPa}$, $p'_i=100\text{kPa}$, $e_{sk}=0.671$ και περιεχόμενο ποσοστό ιλύος $f=5\%$

Στα σχήματα 4.2.4 και 4.2.5 παρουσιάζεται η ίδια διαδικασία που περιγράφηκε πιο πριν, η πειραματική καμπύλη και στα δυο σχήματα απεικονίζει την πορεία των υπερπίεσεων πόρων κατά τη διάρκεια του πειράματος, για δοκίμιο άμμου M31 με περιεχόμενο ποσοστό ιλύος $f=15\%$ και δείκτη πόρων σκελετού $e_{sk}=0.716$. Στο σχήμα 4.2.4 η θεωρητική καμπύλη δημιουργήθηκε βάσει των παραμέτρων που ικανοποιούσαν το δοκίμιο καθαρής άμμου. Αν και στους πρώτους κύκλους φόρτισης τα θεωρητικά και τα πειραματικά αποτελέσματα φαίνεται να πλησιάζουν αρκετά κοντά (σίγουρα καλύτερα από τον συσχετισμό που υπήρχε για το μείγμα με $f=5\%$) δεν μπορούμε να πούμε ότι αυτό αρκεί γιατί από την μέση του πειράματος και μετά αρχίζει να υπάρχει μεγάλη απόκλιση, ενώ στους τελευταίους πια κύκλους του πειράματος το θεωρητικό μοντέλο αστοχεί πλήρως.



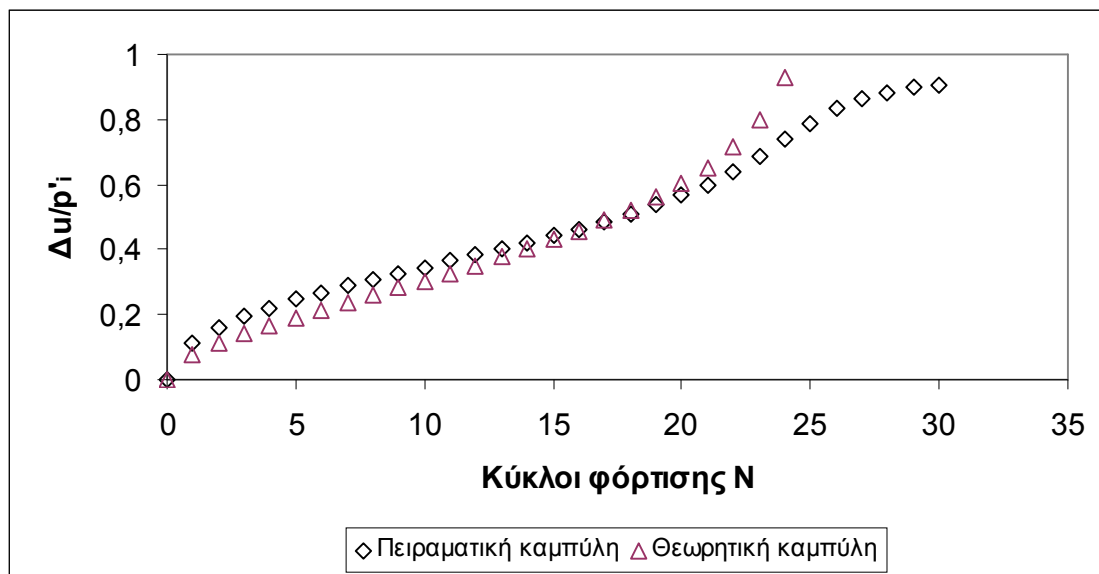
Σχήμα 4.2.4. Θεωρητική και πειραματική καμπύλη $\frac{\Delta u}{p'_i}$ - N δοκιμίου άμμου M31, υποβαλλόμενο σε ανακυκλική στρέψη υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης με $\tau_{SA}=19.901\text{kPa}$, $p'_i=100\text{kPa}$, $e_{sk}=0.716$ και περιεχόμενο ποσοστό ιλύος $f=15\%$

Στο Σχήμα 4.2.5 παρουσιάζεται εκ νέου μια θεωρητική καμπύλη, που δημιουργήθηκε αυτή τη φορά με χρήση των συντελεστών (βλ. Πίνακα 4.2.2) που βρέθηκαν ότι ικανοποιούσαν το μείγμα με $f=5\%$. Η σύμπτωση των καμπυλών είναι αρκετά μεγαλύτερη από ότι στην προηγούμενη περίπτωση και για το μεγαλύτερο μέρος του πειράματος είναι ικανοποιητική. Μόνο στους τελευταίους κύκλους αρχίζει πάλι να ‘ξεφεύγει’ το μοντέλο, λόγω της μεγάλης συσσώρευσης υπερπίεσης πόρων στους τελευταίους κύκλους, όταν το δοκίμιο πλησιάζει την αστοχία.

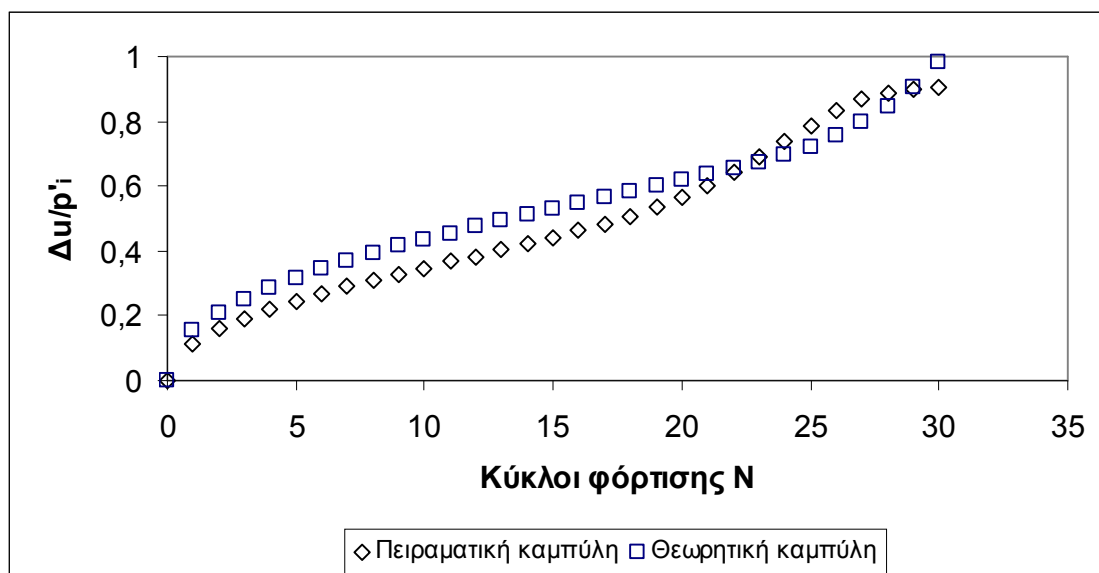


Σχήμα 4.2.5. Θεωρητική και πειραματική καμπύλη $\frac{\Delta u}{p'_i}$ - N δοκιμίου άμμου M31, υποβαλλόμενο σε ανακυκλική στρέψη υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης με $\tau_{SA}=19.901\text{kPa}$, $p'_i=100\text{kPa}$, $e_{sk}=0.716$ και περιεχόμενο ποσοστό ιλύος $f=15\%$

Τέλος, παρουσιάζονται δυο ακόμα διαγράμματα (σχήματα 4.2.6 και 4.2.7), όπου έχει γίνει η ίδια διαδικασία για δοκίμιο με $\tau_{SA}=19.991\text{kPa}$, $p'_i=100\text{kPa}$, $e_{sk}=0.721$ και περιεχόμενο ποσοστό ιλύος $f=10\%$. Με μια πρώτη ματιά, φαίνεται ότι οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν στο δοκίμιο καθαρής άμμου ικανοποιούν το μείγμα 10%, αυτό όμως ισχύει μόνο για τους πρώτους κύκλους φόρτισης (εκεί υπάρχει πραγματικά μεγάλη σύγκλιση) ενώ στους τελευταίους κύκλους φόρτισης το μοντέλο αστοχεί τελείως – αυτή η διαφοροποίηση δεν φαίνεται στην κλίμακα του σχήματος 4.2.6 όπου και παρουσιάζονται οι 24 από τους 30 κύκλους της αστοχίας. Αντίθετα, με εκ νέου εύρεση παραμέτρων, φτάνουμε σε μια πιο ικανοποιητική σύμπτωση καμπυλών η οποία αφορά πλέον όλη τη διάρκεια του πειράματος, έως και τον τελευταίο κύκλο φόρτισης του δοκιμίου (βλ. σχήμα 4.2.7). Τα πειράματα που απεικονίζονται στα σχήματα 4.2.1-4.2.7 είχαν όλα αρχική τάση στερεοποίησης $p'_i=100\text{kPa}$.

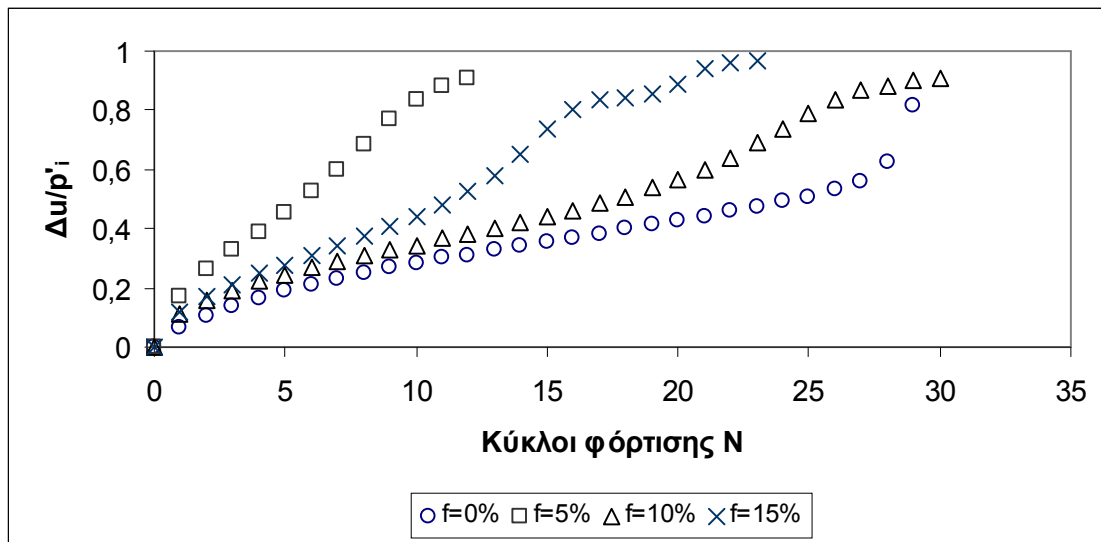


Σχήμα 4.2.6. Θεωρητική και πειραματική καμπύλη $\frac{\Delta u}{p'_i}$ - N δοκιμίου άμμου M31, υποβαλλόμενο σε ανακυκλική στρέψη υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης με $\tau_{SA}=19.991\text{kPa}$, $p'_i=100\text{kPa}$, $e_{sk}=0.721$ και περιεχόμενο ποσοστό ιλύος $f=10\%$



Σχήμα 4.2.7. Θεωρητική και πειραματική καμπύλη $\frac{\Delta u}{p'_i}$ - N δοκιμίου άμμου M31, υποβαλλόμενο σε ανακυκλική στρέψη υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης με $\tau_{SA}=19.991\text{kPa}$, $p'_i=100\text{kPa}$, $e_{sk}=0.721$ και περιεχόμενο ποσοστό ιλύος $f=10\%$

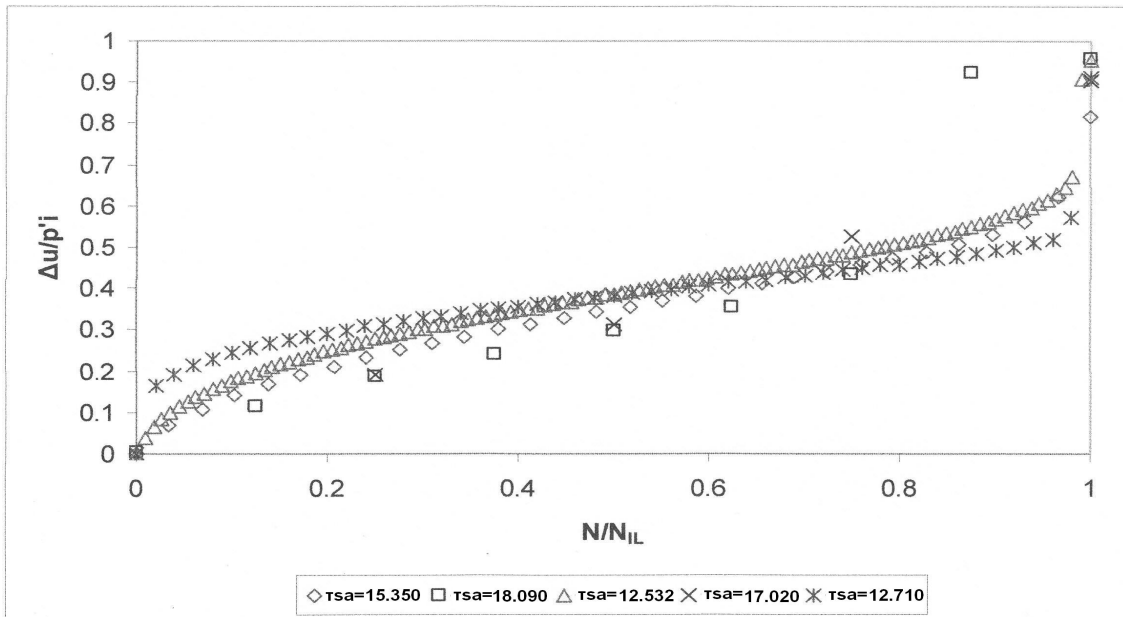
Στο σχήμα 4.2.8 παρουσιάζονται πειραματικές καμπύλες $\frac{\Delta u}{p'_i}$ - N για δοκίμια στερεοποιημένα στα 100kPa, με διαφορετικά περιεχόμενα ποσοστά ιλύος. Η καμπύλη της καθαρής άμμου (f=0%) έχει την γνωστή από την βιβλιογραφία μορφή, με το κυρτό και το κοίλο κομμάτι της, στην αρχή και το τέλος της, αντίστοιχα: αρχικά ο λόγος $\frac{\Delta u}{p'_i}$ αυξάνεται σημαντικά στους πρώτους κύκλους φόρτισης, κατόπιν ο ρυθμός αύξησης της Δu ελαττώνεται και τελικά παρουσιάζει ξανά σημαντική αύξηση όταν ο αριθμός των κύκλων φόρτισης N προσεγγίζει την οριακή τιμή N_{IL} (αρχική ρευστοποίηση). Αντίθετα, τα μείγματα (f=5-10-15%) δείχνουν να διατηρούν την αρχική - πιο έντονη - αύξηση της Δu σε μεγαλύτερο μέρος του πειράματος και να κυρτώνουν ομαλότερα όταν πλησιάζει η αστοχία. Επίσης, πρέπει να σημειωθεί πως για μια ακόμα φορά φαίνεται ότι η προσθήκη μικρού ποσοστού ιλύος (f=5%) σε πυκνό δοκίμιο διαφοροποιεί σημαντικά την συμπεριφορά του σε σχέση με της καθαρής άμμου, ενώ περαιτέρω αύξηση του f δημιουργεί με κατάσταση 'ενδιάμεση' των 5 και 0%.



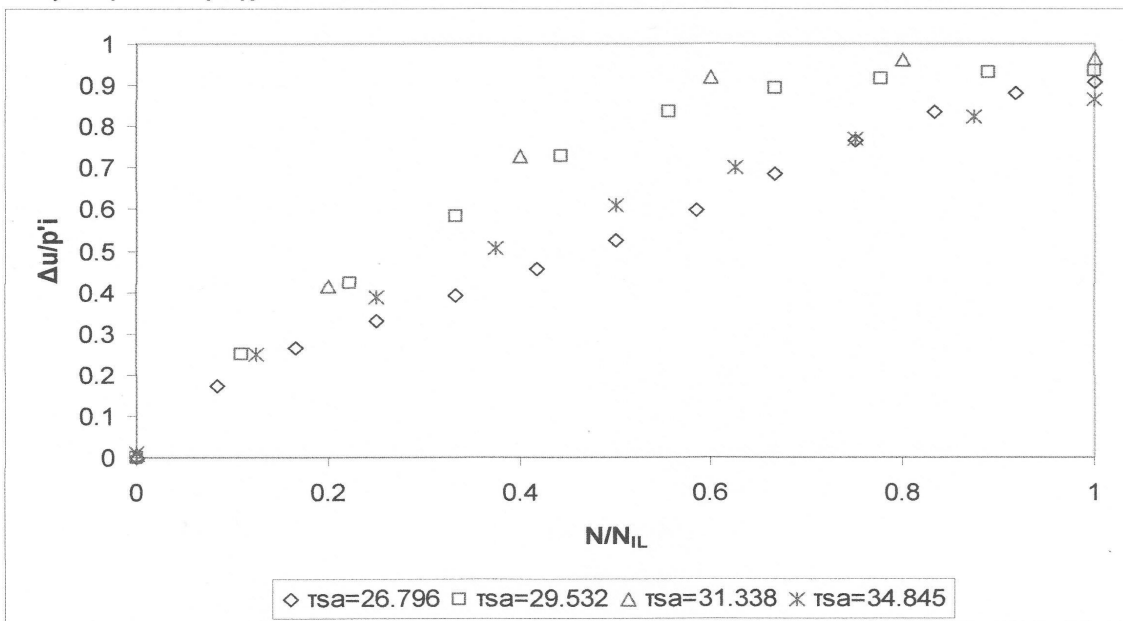
Σχήμα 4.2.8. Πειραματικές καμπύλες $\frac{\Delta u}{p'_i}$ - N δοκιμίων άμμου M31, υποβαλλόμενα σε ανακυκλική στρέψη υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης με $\tau_{SA} = 15.775-26.796\text{kPa}$, $p'_i = 100\text{kPa}$, $e_{sk} = 0.641-0.721$ και περιεχόμενο ποσοστό ιλύος $f = 0-15\%$

Αρκετές μελέτες (π.χ. Lee and Albaisa, 1974, De Alba et al., 1976) σε δοκίμια καθαρής άμμου έχουν δείξει ότι αν σχεδιασθεί στο ίδιο διάγραμμα ο λόγος $Ru = \frac{\Delta u}{p'_{i}}$ (υπερπίεση πόρων/ αρχική μέση ενεργό τάση) ως προς το λόγο $\frac{N}{N_{ll}}$ (τρέχων αριθμός κύκλων φόρτισης προς το συνολικό αριθμό κύκλων φόρτισης μέχρι την εκδήλωση αρχικής ρευστοποίησης) όλων των δοκιμίων, προκύπτουν καμπύλες οι οποίες βρίσκονται πολύ κοντά η μία με την άλλη για ένα μεγάλο εύρος πυκνοτήτων. Η παραπάνω μέθοδος κανονικοποίησης των αποτελεσμάτων εφαρμόστηκε στα αποτελέσματα των πειραμάτων της παρούσας διπλωματικής εργασίας για τα δοκίμια καθαρής άμμου αλλά και για τα μείγματα. Οι τιμές της υπερπίεσης πόρων ελήφθησαν στο τέλος κάθε κύκλου φόρτισης όταν, δηλαδή, η $\Delta\tau_{\theta z}$ σχεδόν μηδενιζόταν. Στα Σχήματα 4.2.9 και 4.2.13 απεικονίζονται τα δεδομένα που προέκυψαν από πειράματα με δοκίμια στερεοποιημένα στα 100 και τα 300kPa, σύμφωνα με την εν λόγω μέθοδο κανονικοποίησης, για περιεχόμενα ποσοστά ιλύος $f = 0\%$. Παρατηρούμε ότι τα σημεία που απαρτίζουν τις καμπύλες βρίσκονται ιδιαιτέρως κοντά και τα διαγράμματα συμφωνούν απολύτως με την βιβλιογραφία που προβλέπει αυτή τη συμπεριφορά. Άλλωστε τόσο στα 100 όσο και στα 300kPa το εύρος των δεικτών πόρων και της επιβαλλόμενης διατμητικής τάσης ήταν μικρό σε σχέση με αυτό που εξετάστηκε σε παλιότερες μελέτες (βλ. και Τσομώκος, 2006) όταν και επισημάνθηκε η σύγκλιση των καμπυλών για διαγράμματα $\frac{\Delta u}{p'_{i}} - \frac{N}{N_{ll}}$.

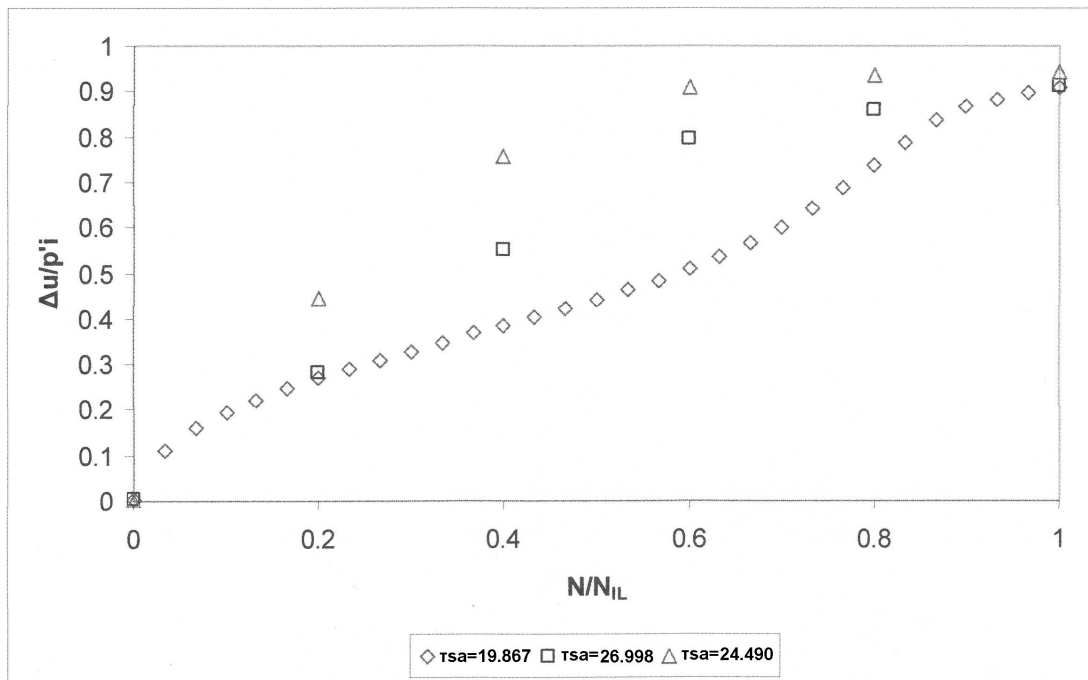
Εν συνεχεία, εξετάζοντας την συμπεριφορά των μειγμάτων, παρατηρείται μια απόκλιση μεταξύ των καμπυλών για τα δοκίμια με $f = 5\%$ (σχήματα 4.2.10 και 4.2.14), απόκλιση που φαίνεται και στο σχήμα 4.2.11 ($f = 10\%$, 100kPa). Η έντονη αυτή διαφοροποίηση μεταξύ των καμπυλών τείνει να μειωθεί για ποσοστά μεγαλύτερα του 5% και για υψηλές τάσεις αρχικής στερεοποίησης (300kPa), σχήματα 4.2.15 και 4.2.16.



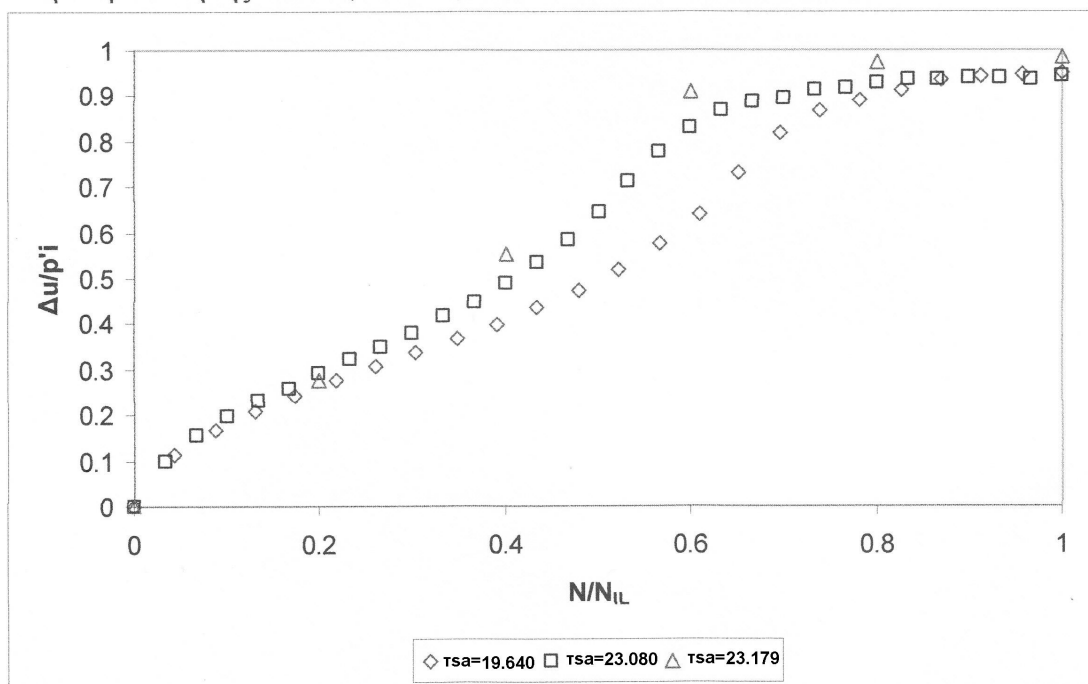
Σχήμα 4.2.9. Κανονικοποιημένες καμπύλες $\frac{\Delta u}{p'_i} - \frac{N}{N_{IL}}$ δοκιμών άμμου M31 με αρχική τάση στερεοποίησης 100kPa, $f=0\%$, $\Delta\tau_{\theta z}=12.532-18.090$ kPa και $e_o=0.628-0.659$



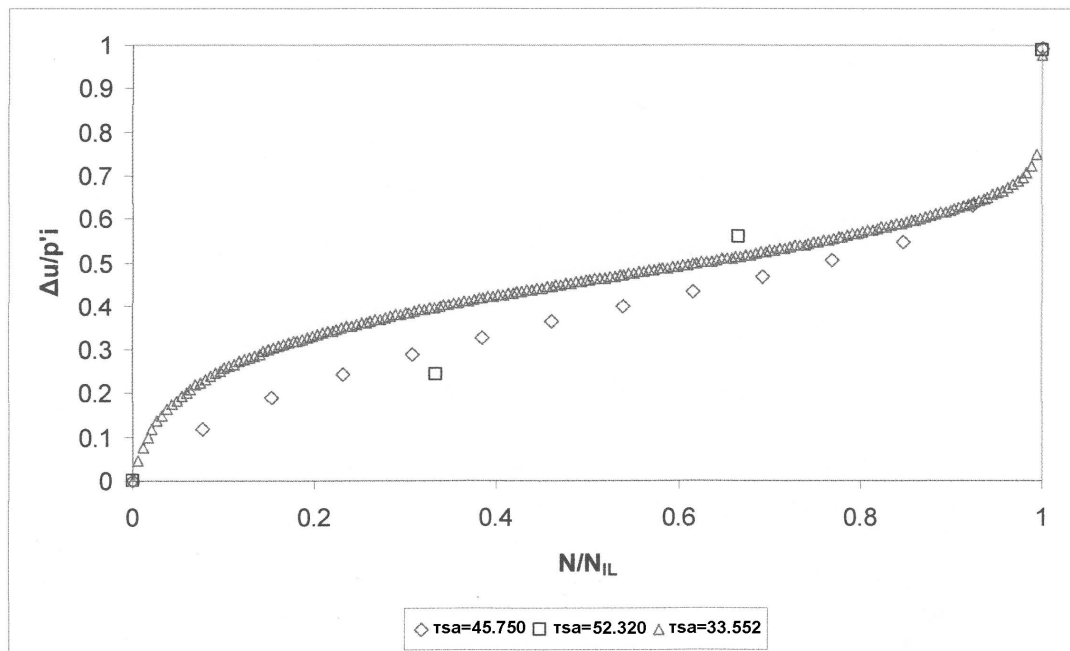
Σχήμα 4.2.10. Κανονικοποιημένες καμπύλες $\frac{\Delta u}{p'_i} - \frac{N}{N_{IL}}$ δοκιμών άμμου M31 με αρχική τάση στερεοποίησης 100kPa, $f=5\%$, $\Delta\tau_{\theta z}=26.676-34.846$ kPa και $e_{sk}=0.658-0.671$



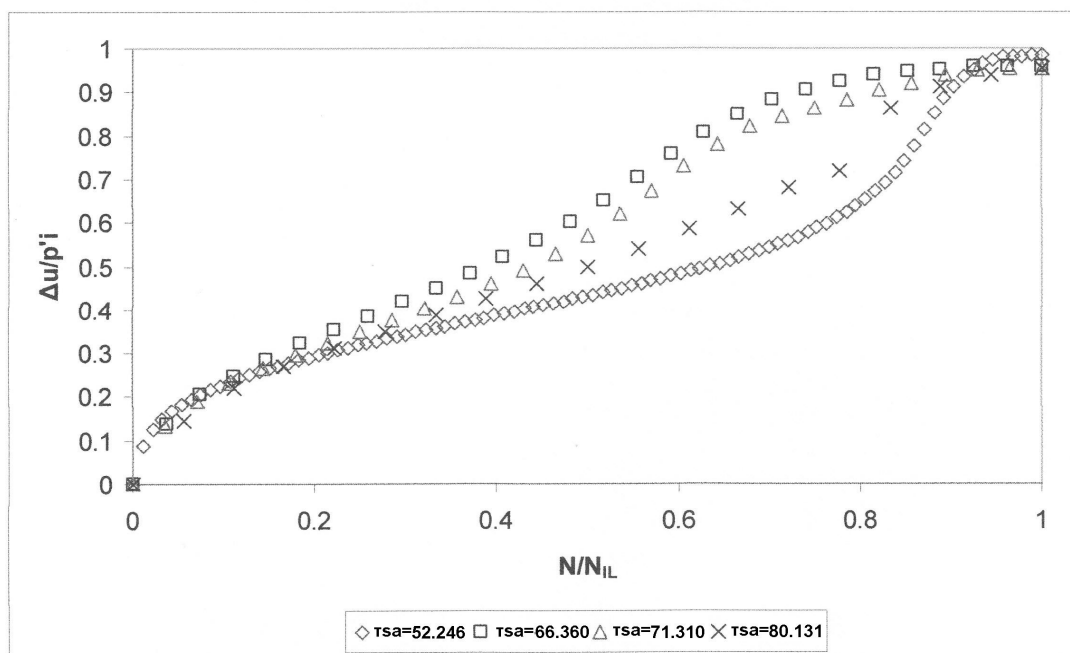
Σχήμα 4.2.11. Κανονικοποιημένες καμπύλες $\frac{\Delta u}{p'_i} - \frac{N}{N_{IL}}$ δοκιμών άμμου M31 με αρχική τάση στερεοποίησης 100kPa, $f= 10\%$, $\Delta\tau_{\theta z}= 19.867-26.998$ kPa και $e_{sk}= 0.719-0.775$



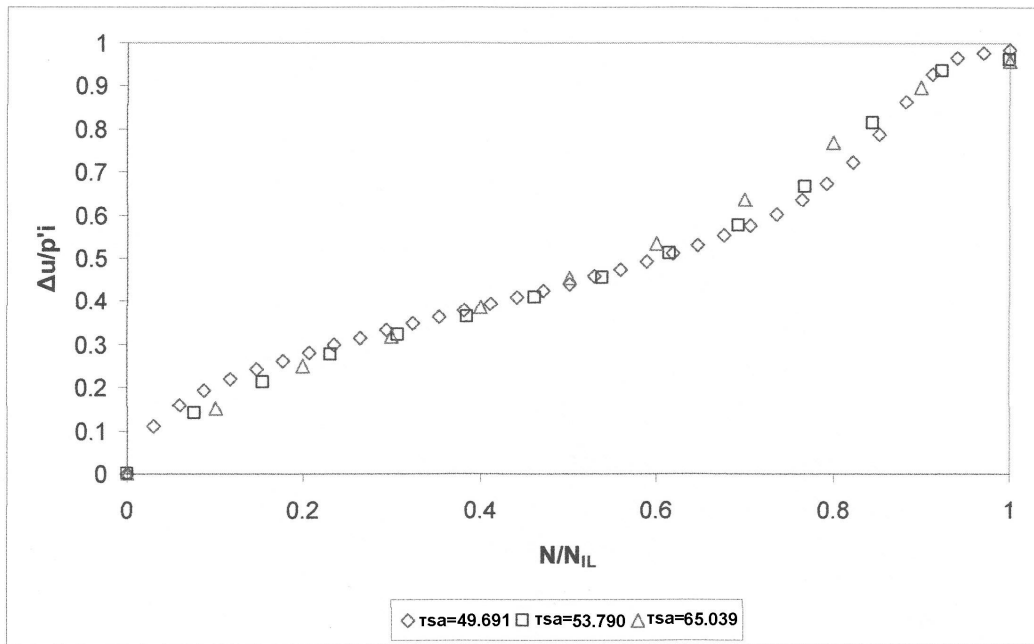
Σχήμα 4.2.12. Κανονικοποιημένες καμπύλες $\frac{\Delta u}{p'_i} - \frac{N}{N_{IL}}$ δοκιμών άμμου M31 με αρχική τάση στερεοποίησης 100kPa, $f= 15\%$, $\Delta\tau_{\theta z}= 19.640-23.179$ kPa και $e_{sk}= 0.663-0.716$



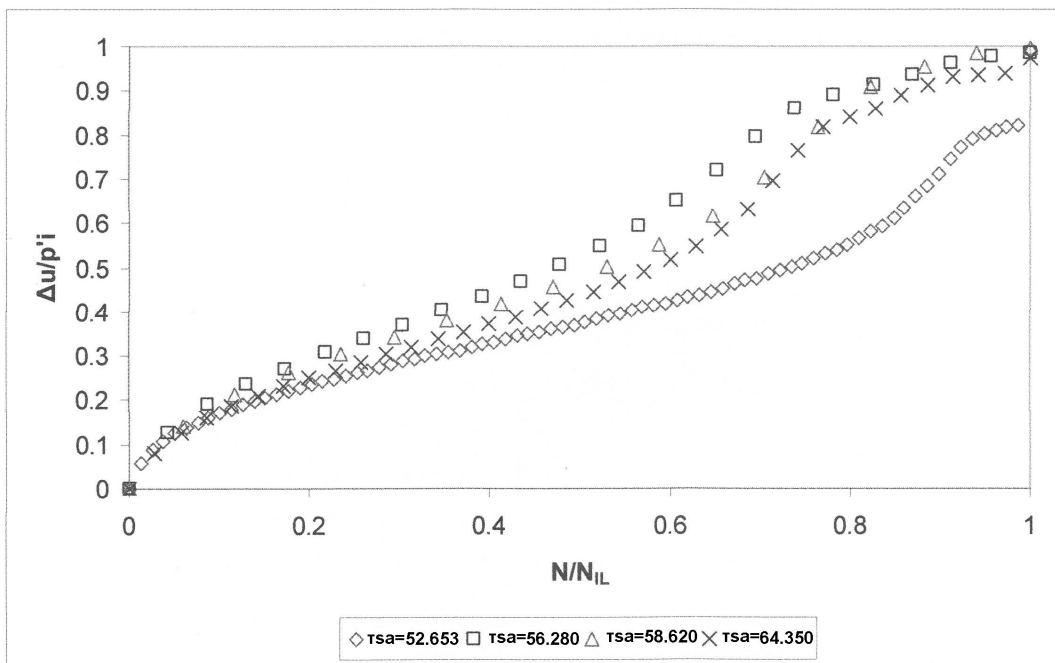
Σχήμα 4.2.13. Κανονικοποιημένες καμπύλες $\frac{\Delta u}{p'_i} - \frac{N}{N_{IL}}$ δοκιμίων άμμου M31 με αρχική τάση στερεοποίησης 300kPa, $f=0\%$, $\Delta\tau_{\theta z}=33.552-52.320$ kPa και $e_o=0.626-0.642$



Σχήμα 4.2.14. Κανονικοποιημένες καμπύλες $\frac{\Delta u}{p'_i} - \frac{N}{N_{IL}}$ δοκιμίων άμμου M31 με αρχική τάση στερεοποίησης 300kPa, $f=5\%$, $\Delta\tau_{\theta z}=52.246-80.131$ kPa και $e_{sk}=0.631-0.715$



Σχήμα 4.2.15. Κανονικοποιημένες καμπύλες $\frac{\Delta u}{p'_i} - \frac{N}{N_{IL}}$ δοκιμίων άμμου M31 με αρχική τάση στερεοποίησης 300kPa, $f= 10\%$, $\Delta\tau_{0z}= 49.691-65.039$ kPa και $e_{sk}= 0.648-0.716$



Σχήμα 4.2.16. Κανονικοποιημένες καμπύλες $\frac{\Delta u}{p'_i} - \frac{N}{N_{IL}}$ δοκιμίων άμμου M31 με αρχική τάση στερεοποίησης 300kPa, $f= 15\%$, $\Delta\tau_{0z}= 52.653-64.350$ kPa και $e_{sk}= 0.686-0.723$

Μελέτες	Προτεινόμενη σχέση	Περιγραφή μεγεθών
Seed et al. (1976)	$\frac{U_N}{\sigma_{o'}'} = \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \text{Arc sin} \left(2 \left(\frac{N}{N_L} \right)^{\frac{1}{a}} - 1 \right)$	<ul style="list-style-type: none"> ▪ U_N η τιμή της υπερπίεσης πόρων μετά από N κύκλους φόρτισης ▪ σ_o' η κατακόρυφη ενεργός τάση στερεοποίησης του υλικού ▪ N ο αριθμός των κύκλων φόρτισης ▪ N_L ο αριθμός των κύκλων φόρτισης που απαιτούνται για την ρευστοποίηση του υλικού ▪ a εμπειρικός συντελεστής με τιμές από 0.4-2.5 (για τις δοκιμές τους προτείνουν $a=0.7$)
Ishibashi et al. (1977)	$\frac{\Delta U_N}{\sigma_{c'}'} = \left(1 - \frac{U_{N-1}}{\sigma_{c'}'} \right) \left(\frac{6.13N}{N^{1.77} - 0.46} \right) \left(\frac{\tau_N}{\sigma_{N-1}'} \right)^{2.4}$	<ul style="list-style-type: none"> ▪ ΔU_N η διαφορά μεταξύ της υπερπίεσης πόρων κατά το τέλος του $(N-1)$ κύκλου φόρτισης (U_{N-1}) με την υπερπίεση πόρων κατά τον Νιοστό κύκλο φόρτισης (U_N), ($\Delta U_N = U_N - U_{N-1}$) ▪ N ο αριθμός των κύκλων φόρτισης ▪ $\sigma_{c'}'$ η αρχική ενεργός πλευρική πίεση ▪ τ_N η επιβαλλόμενη διατμητική τάση κατά τον Νιοστό κύκλο φόρτισης ▪ σ_{N-1}' η ενεργός πλευρική πίεση κατά τον $(N-1)$ κύκλο φόρτισης
Seed and Booker (1977)	$\frac{U_N}{\sigma_{o'}'} = \frac{2}{\pi} \text{Arc sin} \left(\left(\frac{N}{N_L} \right)^{\frac{1}{2a}} \right)$	<ul style="list-style-type: none"> ▪ U_N η τιμή της υπερπίεσης πόρων μετά από N κύκλους φόρτισης ▪ σ_o' η κατακόρυφη ενεργός τάση στερεοποίησης του υλικού ▪ N ο αριθμός των κύκλων φόρτισης ▪ N_L ο αριθμός των κύκλων φόρτισης που απαιτούνται για την ρευστοποίηση του υλικού ▪ a εμπειρικός συντελεστής με τιμές από 0.4-2.5
Nemat-Nasser and Shokooch (1979)	$\frac{U_N}{\sigma_{o'}'} = \left(1 - \frac{N \left(\frac{\tau_d}{\sigma_o} \right)^5}{1.35 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{\epsilon_o}{(\epsilon_o - \epsilon_{\min})^{3.5}}} \right)^{\frac{1}{1.3}} - 1$	<ul style="list-style-type: none"> ▪ U_N η τιμή της υπερπίεσης πόρων μετά από N κύκλους φόρτισης ▪ σ_o' η κατακόρυφη ενεργός τάση στερεοποίησης του υλικού ▪ N ο αριθμός των κύκλων φόρτισης ▪ ϵ_o ο δείκτης πόρων του υλικού ▪ ϵ_{\min} ο ελάχιστος δείκτης πόρων του υλικού ▪ τ_d η επιβαλλόμενη διατμητική τάση

Πίνακας 4.2.3α. Σχέσεις που έχουν προκύψει με βάση δοκιμές ελεγχόμενης τάσης

<p>Chang et al. (1983)</p>	$\frac{U_N}{U_r} = \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \text{Arc sin} \left(\frac{N}{N_{50}} \left(\frac{1}{2} \right)^{\frac{1}{a}} - 1 \right)$	<ul style="list-style-type: none"> ▪ U_N η τιμή της υπερπίεσης πόρων μετά από N κύκλους φόρτισης ▪ $U_r = \sigma_{3c} \left(\frac{(1 + \sin \phi)}{2 \sin \phi} - K_o \frac{(1 - \sin \phi)}{\sin \phi} \right)$ ▪ σ_{3c} η αρχική οριζόντια ενεργός τάση ▪ K_o ο συντελεστής ανισότροπης στερεοποίησης, $K_o = \frac{\sigma_{1c}'}{\sigma_{3c}'}$ ▪ σ_{1c}' η αρχική κατακόρυφη ενεργός τάση ▪ ϕ η γωνία εσωτερικής τριβής του υλικού ▪ N ο αριθμός των κύκλων φόρτισης ▪ $N_{50} = \left(\frac{R^*}{a} \right)^{\frac{1}{b}}$ ▪ a, b εμπειρικοί συντελεστές του υλικού ▪ $R^* = \left(\frac{\tau_d}{\sigma_{sw}} \right) / \left(\frac{1 + K_o}{2} \right)$
<p>Mitchell and Dubin (1986)</p>	$\frac{U_N}{\sigma_o'} = \frac{1}{2} \left(\frac{\tau_d}{\sigma_o'} \right) \left(1 + \ln \frac{1}{1 - \frac{1}{\log N_{im}}} \right)$	<ul style="list-style-type: none"> ▪ U_N η τιμή της υπερπίεσης πόρων μετά από N κύκλους φόρτισης ▪ σ_o' η κατακόρυφη ενεργός τάση στερεοποίησης του υλικού ▪ N ο αριθμός των κύκλων φόρτισης ▪ N_{im} ο αριθμός των κύκλων φόρτισης μέχρι να παρατηρηθεί ανακυκλική κινήσιμότητα ▪ τ_d η επιβλαβόμενη διατμητική τάση
<p>Egglezos and Bouckovalas (1998)</p>	$\Delta u(N) = \left(\frac{2}{\pi} \right) \sigma_{'sat} \text{Arc sin} \left(N^{2b_1} \sin \left(\frac{1}{2} \pi \frac{\Delta u(1)}{\sigma_{'sat}} \right) \right)$	<ul style="list-style-type: none"> ▪ U_N η τιμή της υπερπίεσης πόρων μετά από N κύκλους φόρτισης ▪ σ_o' η ενεργός τάση στερεοποίησης ▪ $\Delta u(1)$ η πίεση πόρων μετά τον 1^ο κύκλο φόρτισης η οποία για δοκιμές ελεγχόμενης τάσης δίνεται από τη σχέση: $\Delta u(1) = \text{BP}_a \left(\frac{\sigma_o'}{P_a} \right)^{b_2} \left(\frac{\tau_{sk}}{\sigma_o'} \right)^{b_3} e^{b_4}$ ▪ σ' η κατακόρυφη ενεργός τάση στερεοποίησης ▪ τ_{sk} μέγεθος επιβλαβόμενης ανακυκλικής τάσης ▪ B, b_1, b_2, b_3, b_4 παράμετροι που εξαρτώνται από το εξεταζόμενο υλικό και το είδος της δοκιμής ▪ e ο δείκτης πόρων ▪ P_a η ατμοσφαιρική πίεση

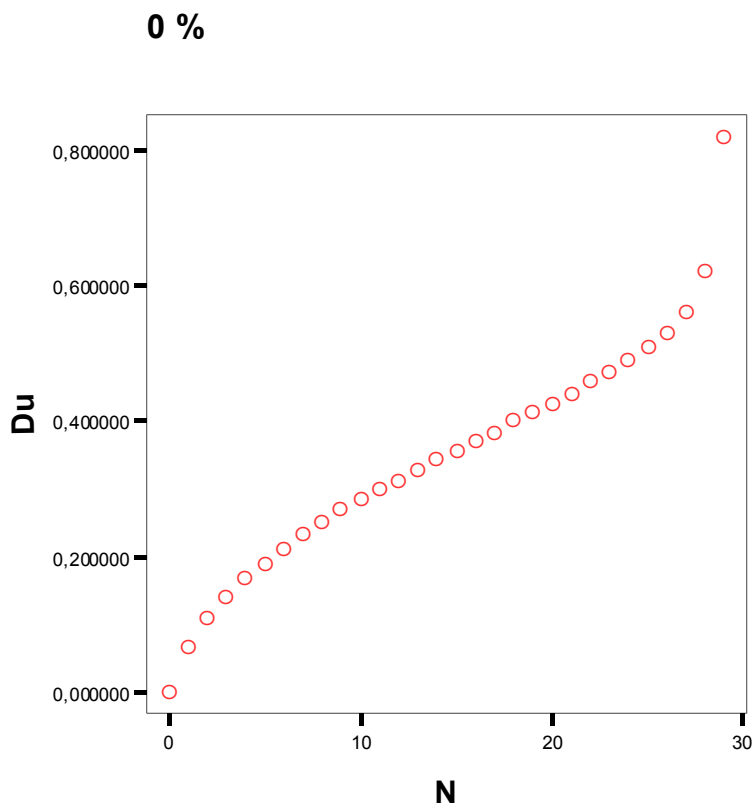
Πίνακας 4.2.3β. Σχέσεις που έχουν προκύψει με βάση δοκιμές ελεγχόμενης τάσης

4.2.2 Στατιστική επεξεργασία των πειραματικών αποτελεσμάτων

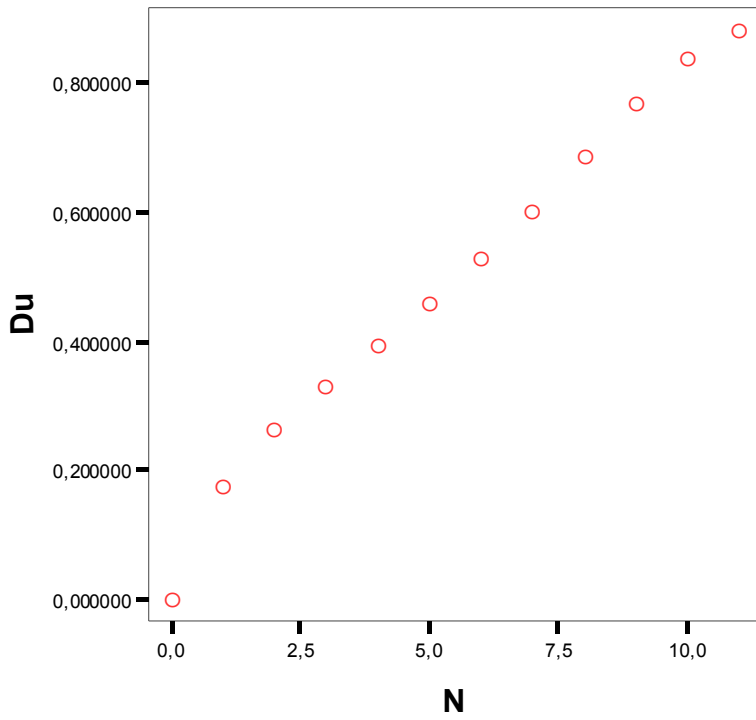
Η στατιστική ανάλυση θα γίνει με τη χρήση του στατιστικού πακέτου SPSS 15.0. Σκοπός της μελέτης είναι να εξετάσουμε εάν υπάρχει κάποια στατιστικά σημαντική σχέση που συνδέει τις τιμές της εξαρτημένης μεταβλητής Du/r_i με τις αντίστοιχες τιμές της ανεξάρτητης μεταβλητής N . Θα εξετάσουμε δεδομένα από πειράματα που πραγματοποιήσαμε για τα 4 διαφορετικά ποσοστά περιεχόμενης ύλης: 0%, 5%, 10% και 15% και θα χρησιμοποιήσουμε το μοντέλο της απλής γραμμικής παλινδρόμησης. Ο έλεγχος των υποθέσεων του γραμμικού μοντέλου θα γίνει σε επίπεδο σημαντικότητας $(1 - \alpha) = 95 \%$.

4.2.2.1 Γραφική απεικόνιση

Κατασκευάζουμε ένα διάγραμμα σημείων (scatter plot) για το κάθε ποσοστό (σχήματα 4.2.17α και β):

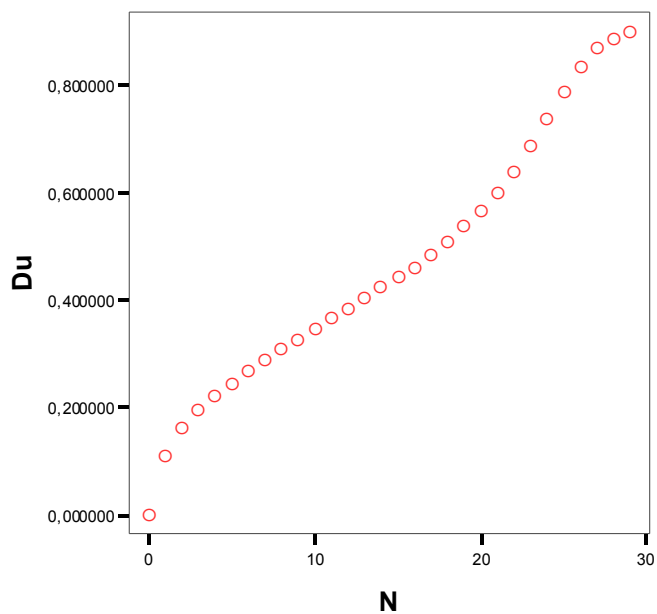


5 %

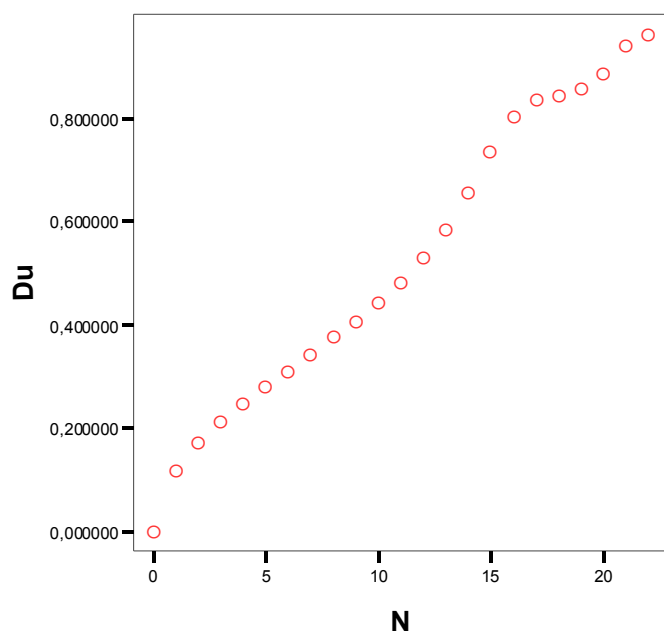


Σχήμα 4.2.17α. Διάγραμμα σημείων (scatter) – απεικονίζεται η Δu κανονικοποιημένη ως προς ρ_i' με τους κύκλους φόρτισης N (περιεχόμενο ποσοστό ύλους $f=0$ και 5%)

10 %



15 %



Σχήμα 4.2.17β. Διάγραμμα σημείων (scatter) – απεικονίζεται η Δu κανονικοποιημένη ως προς ρ_i με τους κύκλους φόρτισης N (περιεχόμενο ποσοστό ιλύος $f=10$ και 15%)

Η εποπτική πρώτη εικόνα που έχουμε δεν μας βοηθάει στην εξαγωγή κάποιου συμπεράσματος και μας οδηγεί στο να εφαρμόσουμε ένα μοντέλο γραμμικής παλινδρόμησης.

4.2.2.2 Περιγραφικά Μέτρα

0%

	N"	Range	Minimum	Maximum	Mean	Variance
N	30	29	0	29	14,50	77,500
Du	30	0,816997	0,000000	0,816997	0,3483004	0,030
Valid N (listwise)	30					

5 %

	N"	Range	Minimum	Maximum	Mean	Variance
N	12	11	0	11	5,50	13,000
Du	12	0,880120	0,000000	0,880120	0,492655	0,075
Valid N (listwise)	12					

10 %

	N"	Range	Minimum	Maximum	Mean	Variance
N	31	30	0	30	15,00	82,667
Du	31	0,907704	0,000000	0,907704	0,4804669	0,064
Valid N (listwise)	31					

15 %

	N"	Range	Minimum	Maximum	Mean	Variance
N	24	23	0	23	11,50	50,000
Du	24	0,964697	0,000000	0,964697	0,5402917	0,089
Valid N (listwise)	24					

Πίνακας 4.2.4 Descriptive statistics για περιεχόμενα ποσοστά λεπτόκοκκων 0-5-10-15 %

Επεξήγηση πινάκων

N": αριθμός παρατηρήσεων

Range: Εύρος τιμών των παρατηρήσεων

Minimum: κατώτατη παρατηρηθείσα τιμή

Maximum: ανώτατη παρατηρηθείσα τιμή

Mean: Απλός μέσος όρος των παρατηρήσεων

Variance: Διακύμανση των παρατηρήσεων

4.2.2.3 Αποτελέσματα μοντέλου Γραμμικής Παλινδρόμησης

0 %
Model Summary

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	0,967(a)	0,934	0,932	,045502666

a Predictors: (Constant), N

ANOVA(b)

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	0,826	1	0,826	399,166	,000(a)
	Residual	0,058	28	0,002		
	Total	0,884	29			

a Predictors: (Constant), N

b Dependent Variable: Du

Coefficients(a)

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
		B	Std. Error	Beta	B	Std. Error
1	(Constant)	0,070	0,016		4,334	,000
	N	0,019	0,001	0,967	19,979	,000

a Dependent Variable: Du

5 %
Model Summary

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	,994(a)	,988	,987	,030898641

a Predictors: (Constant), N

ANOVA(b)

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	,818	1	,818	857,265	,000(a)
	Residual	,010	10	,001		
	Total	,828	11			

a Predictors: (Constant), N, b Dependent Variable: Du

Coefficients(a)

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
		B	Std. Error	Beta	B	Std. Error
1	(Constant)	,077	,017		4,563	,001
	N	,076	,003	,994	29,279	,000

a Dependent Variable: Du

10 %
Model Summary

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	,988(a)	,977	,976	,039136079

a Predictors: (Constant), N

ANOVA(b)

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	1,867	1	1,867	1218,927	,000(a)
	Residual	,044	29	,002		
	Total	1,911	30			

a Predictors: (Constant), N, b Dependent Variable: Du

Coefficients(a)

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
		B	Std. Error	Beta	B	Std. Error
1	(Constant)	,069	,014		5,021	,000
	N	,027	,001	,988	34,913	,000

a Dependent Variable: Du

15 %
Model Summary

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	,993(a)	,986	,986	,035548927

ANOVA(b)

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	2,018	1	2,018	1596,860	,000(a)
	Residual	,028	22	,001		
	Total	2,046	23			

a Predictors: (Constant), N

b Dependent Variable: Du

Coefficients(a)

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
		B	Std. Error	Beta	B	Std. Error
1	(Constant)	,059	,014		4,162	,000
	N	,042	,001	,993	39,961	,000

a Dependent Variable: Du

Πίνακας 4.2.5: Πίνακες γραμμικής παλινδρόμησης για τα διαφορετικά ποσοστά περιεχόμενης ιλύος.

Επεξήγηση πινάκων

Model Summary: τιμές συντελεστών συσχέτισης R/R^2

ANOVA: Πίνακας ανάλυσης διακύμανσης (υπολογισμός του στατιστικού F test για τον έλεγχο ύπαρξης γραμμικής συσχέτισης).

Coefficients: Υπολογισμός παραμέτρων του γραμμικού μοντέλου

Από τον παραπάνω πίνακα παρατηρούμε τα εξής :

α) Οι θετικές τιμές των συντελεστών R και οι υψηλές τιμές των συντελεστών R Square (είναι πολύ κοντά στο 1) μάς υποδεικνύουν μία πολύ ισχυρή θετική συσχέτιση μεταξύ των τιμών της εξαρτημένης και της ανεξάρτητης μεταβλητής και στα τέσσερα εξεταζόμενα ποσοστά.

β) Οι τιμές των p-value (Sig.) είναι μικρότερες από 0.05 και μας υποδεικνύουν ότι οι τιμές των συντελεστών (coefficients) $\beta_0=0,059$ και $\beta_1=0,042$ στο γραμμικό μοντέλο

$Du = 0,059 + 0,042N + \varepsilon$ είναι στατιστικά σημαντικές για το επίπεδο σημαντικότητας που έχουμε επιλέξει και στα τέσσερα εξεταζόμενα ποσοστά.

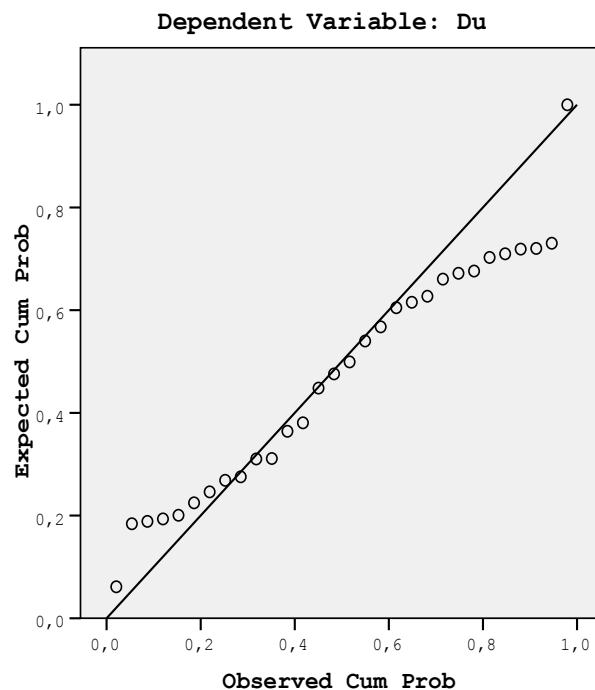
4.2.2.4 Έλεγχος καταλοίπων (ε)

Το τελευταίο στάδιο της ανάλυσης περιλαμβάνει τον έλεγχο των καταλοίπων ε του γραμμικού μοντέλου.

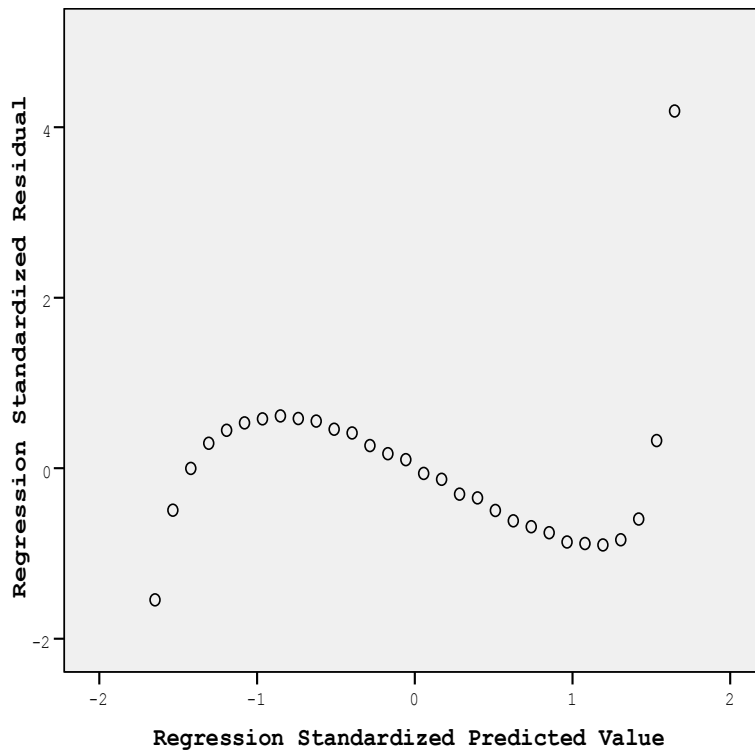
Για την κατασκευή του γραμμικού μοντέλου έχουμε υποθέσει ότι τα κατάλοιπα ακολουθούν κανονική κατανομή με μέση τιμή 0 και σταθερή διακύμανση και ότι είναι ανεξάρτητα από τις τιμές της ανεξάρτητης μεταβλητής. Θα ελέγξουμε τις υποθέσεις αυτές κατασκευάζοντας ένα Normal Probability Plot και ένα Residual vs. Fitted value Plot.

0 %

Normal P-P Plot of Regression Standardized Residual



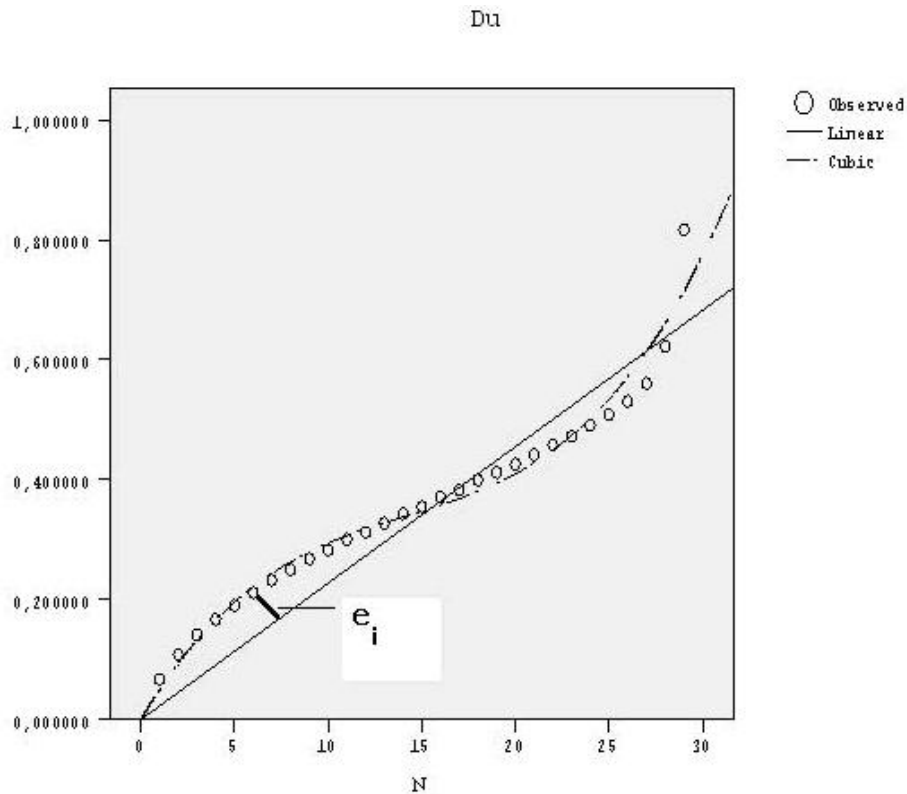
Σχήμα 4.2.18 Normal probability plot για έλεγχο κανονικότητας καταλοίπων (η Du κανονικοποιημένη ως προς ρ_i)



Σχήμα 4.2.19 Residual vs. Fitted Value plot για έλεγχο μέσης τιμής και διακύμανσης καταλοίπων

Τα παραπάνω διαγράμματα δεν έχουν την απαραίτητη μορφή για να θεωρηθεί ότι πληρούνται οι προϋποθέσεις του γραμμικού μοντέλου. Παρόμοια μορφή παρουσιάζουν και τα αντίστοιχα διαγράμματα για τις υπόλοιπες κατηγορίες ποσοστών 5, 10 και 15 %, συνεπώς δεν παρουσιάζονται εδώ. Παρατηρούμε ότι τόσο η υπόθεση κανονικότητας των καταλοίπων όσο και της σταθερής τους διακύμανσης παραβιάζονται. Για το λόγο αυτό θα πρέπει να προβούμε σε ένα κατάλληλο μετασχηματισμό των τιμών της μεταβλητής Du. Η προσπάθεια εύρεσης του κατάλληλου μετασχηματισμού είναι μία αρκετά δύσκολη και πολύπλοκη διαδικασία που ξεφεύγει από τα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Παρά ταύτα, όπως βλέπουμε στο παρακάτω διάγραμμα ένας κυβικός μετασχηματισμός θα διόρθωνε σημαντικά το πρόβλημα προσεγγίζοντας πολύ καλά τα παρατηρούμενα δεδομένα.



Σχήμα 5.2.20 Curve estimation plot για εύρεση κατάλληλου μετασχηματισμού (η Du κανονικοποιημένη ως προς ri'), στο σχήμα υποδεικνύεται το εκάστοτε σφάλμα – error e_i

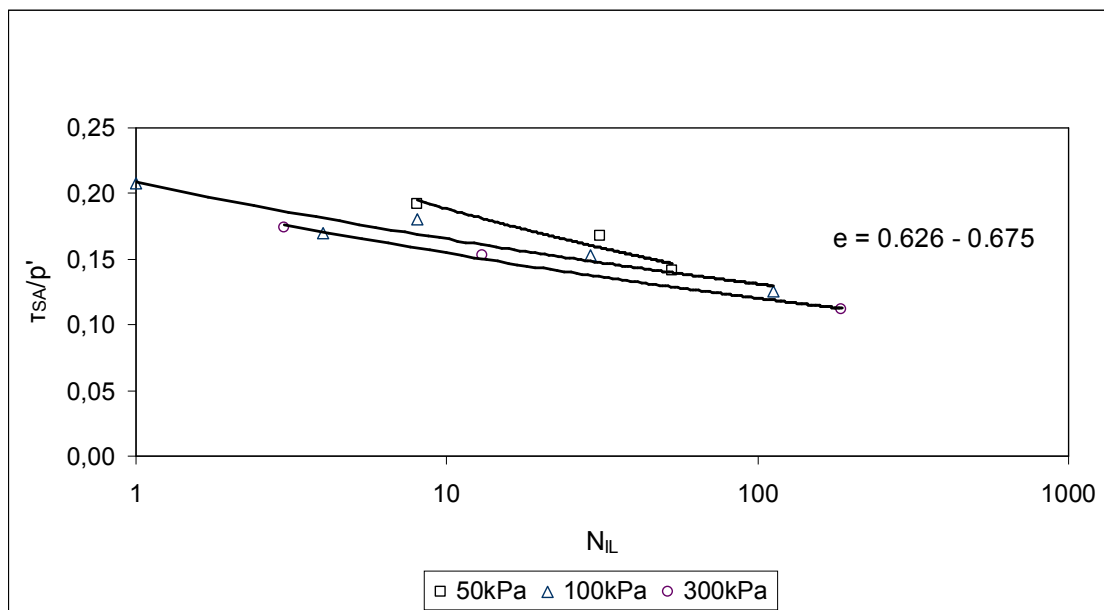
4.2.2.5 Συμπεράσματα

Με την εύρεση του κατάλληλου μετασχηματισμού έχουμε την δυνατότητα να δημιουργήσουμε ένα ισχυρό γραμμικό μοντέλο πρόβλεψης των τιμών της μεταβλητής Du για δεδομένες τιμές της μεταβλητής N για κάθε ένα από τα ποσοστά 0, 5, 10 και 15 %. Παρόλα ταύτα θα πρέπει να αποφεύγεται η χρήση τιμών της μεταβλητής N εκτός του εύρους τιμών που έχουμε ήδη παρατηρήσει και επεξεργαστεί στατιστικά γιατί ενδέχεται το μοντέλο να μας δώσει απαράδεκτες τιμές για την μεταβλητή Du . Συνεπώς συμπεραίνουμε ότι το γραμμικό μοντέλο που χρησιμοποιήσαμε μπορεί να προβλέψει επαρκώς την ανάπτυξη της υπερπίεσης πόρων, αλλά μόνο για περιορισμένο εύρος τιμών N . Για τιμές $N > 30$ οι εκτιμήσεις των παραμέτρων του μοντέλου δε θα είναι στατιστικά σημαντικές και το γραμμικό μοντέλο θα μας δίνει απαράδεκτες τιμές.

4.3 Καμπύλες ρευστοποίησης

4.3.1 Επίδραση ενεργού τάσης

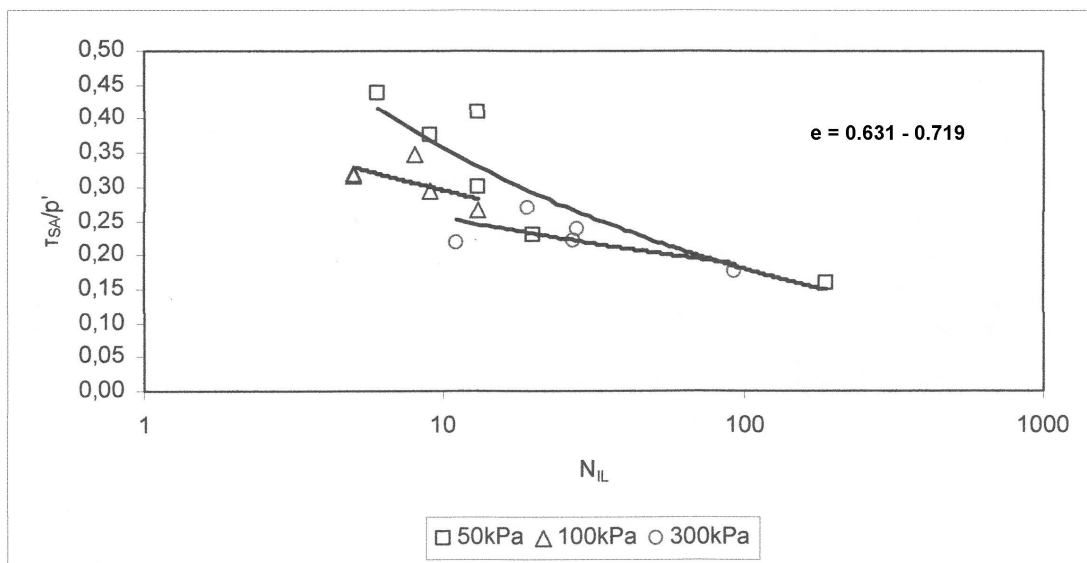
Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τα πειράματα στην συσκευής στρεπτικής διάτμησης κούλου δοκιμίου (hollow cylinder), μετά την επεξεργασία του παρουσιάζονται στα ακόλουθα διαγράμματα. Στο σχήμα 4.3.1 φαίνεται η απόκριση σε στρεπτική καταπόνηση δειγμάτων άμμου (περιεχόμενο ποσοστό ύλους $f = 0\%$). Η καμπύλη που αντιστοιχεί σε δοκίμια που στερεοποιήθηκαν σε ενεργό τάση ίση με 50kPa δείχνει αυξημένες αντοχές των δοκιμίων σε σχέση με τα δοκίμια που στερεοποιήθηκαν στα 100kPa και τα 300kPa. Οι δυο αυτές σειρές πειραμάτων δείχνουν παραπλήσια συμπεριφορά των δοκιμίων και οι καμπύλες συγκλίνουν.



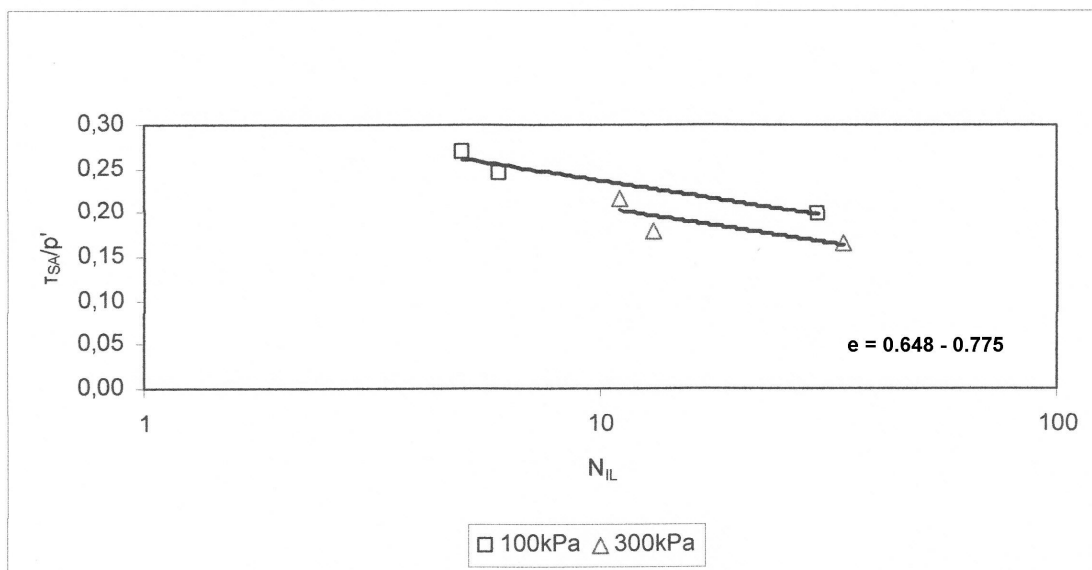
Σχήμα 4.3.1. Καμπύλες ρευστοποίησης δοκιμίων καθαρής ($f=0\%$) άμμου M31: επιβαλλόμενη διατμητική τάση κανονικοποιημένη ως προς την τάση στερεοποίησης σε σχέση με τους κύκλους αστοχίας N_{LL}

Σχετικά με την επίδραση της ενεργού τάσης, παρόμοια αποτελέσματα προκύπτουν ξανά και από την σύγκριση δοκιμίων στερεοποιημένων στα 100 και τα 300 kPa, όταν υπάρχει προσθήκη λεπτόκοκκου υλικού. Συγκεκριμένα, στα σχήματα 4.3.2, 4.3.3, 4.3.4 φαίνεται

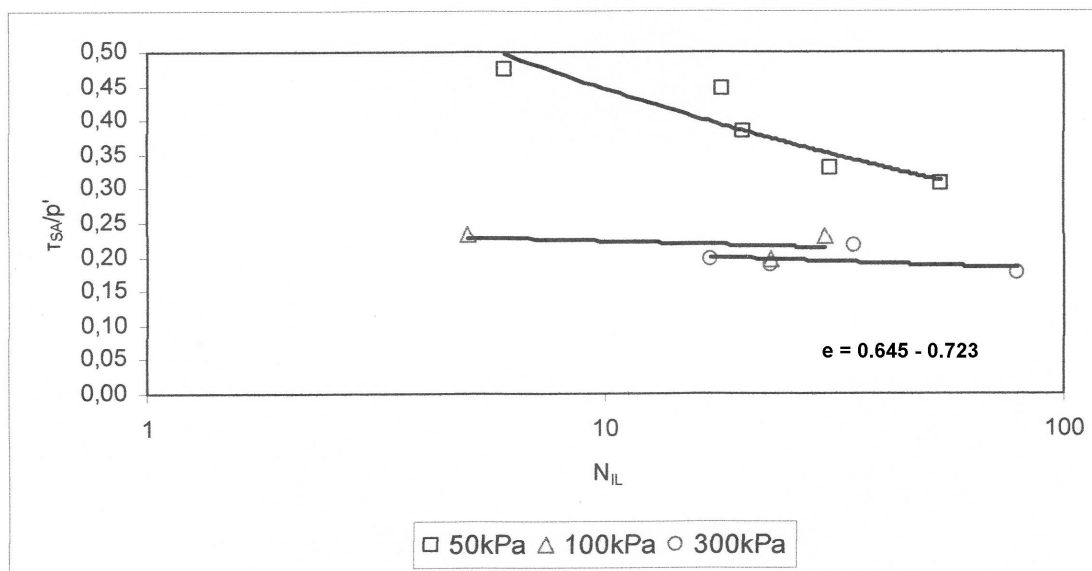
η σύγκλιση των καμπυλών για 100kPa και 300 kPa, για περιεχόμενα ποσοστά ιλύος (f) 5, 10 και 15% αντίστοιχα. Ακόμα, διαπιστώνεται περαιτέρω η διαφοροποίηση της συμπεριφοράς των δοκιμίων στερεοποιημένων στα 50kPa, αφού η προσθήκη λεπτόκοκκων ανεβάζει αξιοσημείωτα τις αντοχές των δοκιμίων, όπως φαίνεται στα σχήματα 4.3.2 και 4.3.4, για ποσοστά 5 και 15 %. Για f=10 % και αρχική τάση στερεοποίησης 50kPa δεν υπάρχουν δεδομένα.



Σχήμα 4.3.2. Καμπύλες ρευστοποίησης δοκιμίων (f=5%) άμμου M31: επιβαλλόμενη διατμητική τάση κανονικοποιημένη ως προς την τάση στερεοποίησης σε σχέση με τους κύκλους αστοχίας N_{IL}

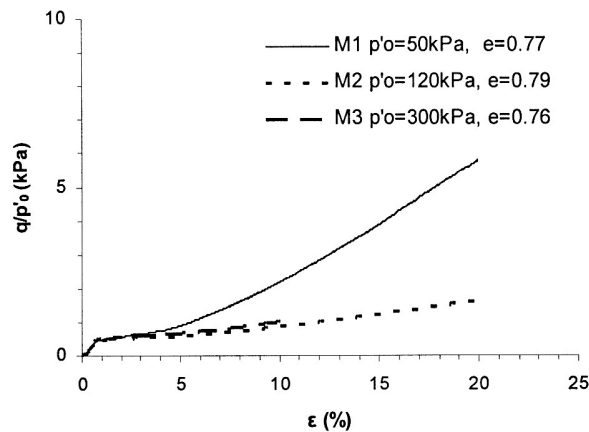


Σχήμα 4.3.3. Καμπύλες ρευστοποίησης δοκιμίων ($f=10\%$) άμμου M31: επιβαλλόμενη διατμητική τάση κανονικοποιημένη ως προς την τάση στερεοποίησης σε σχέση με τους κύκλους αστοχίας N_{IL}



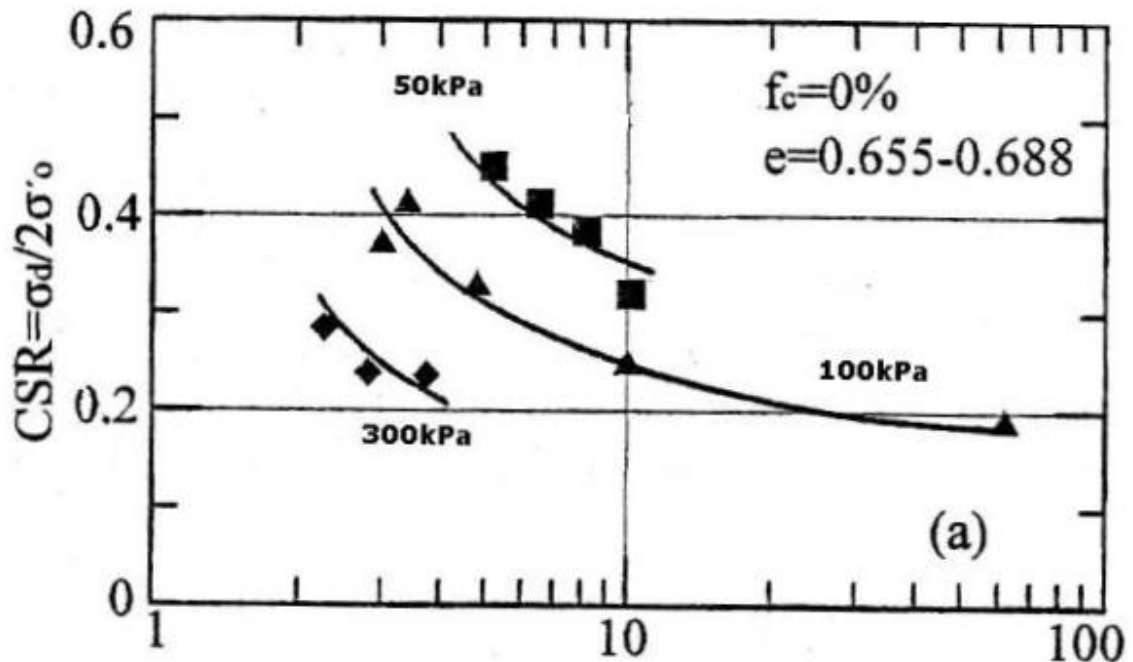
Σχήμα 4.3.4. Καμπύλες ρευστοποίησης δοκιμίων ($f=15\%$) άμμου M31: επιβαλλόμενη διατμητική τάση κανονικοποιημένη ως προς την τάση στερεοποίησης σε σχέση με τους κύκλους αστοχίας N_{IL}

Η επίδραση της αρχικής ενεργού τάσης που υποδεικνύει αυτή η σειρά πειραμάτων, έρχεται σε συμφωνία με παλαιότερα αποτελέσματα δοκιμών - χαλαρής άμμου αυτή τη φορά, με δείκτες πόρων 0,76 έως 0,79 - (σχήμα 4.3.5) όπου επισημαίνεται η ιδιαίτερη αντοχή δείγματος άμμου (καθαρής άμμου, $f=0\%$) με αρχική ενεργό τάση στα 50kPa σε σχέση με τα δοκίμια που στερεοποιήθηκαν στα 120 και 300kPa (Γεωργιάννου, Σάκκης 2009). Στο σχήμα η αποκλίνουσα τάση έχει κανονικοποιηθεί σε σχέση με την αρχική ενεργό τάση της κάθε δοκιμής, (q/p'_{0}) , έτσι ώστε να απαλειφθεί η επίδραση της αρχικής τάσης στερεοποίησης. Είναι προφανές ότι ενώ τα διαγράμματα για ενεργές τάσεις 120 και 300kPa κανονικοποιούνται, αυτό δεν ισχύει για το διάγραμμα που αντιστοιχεί σε αρχική τάση 50kPa, το οποίο αποκλίνει από εκείνα που αντιστοιχούν στις υψηλότερες τάσεις και τα οποία πρακτικώς συμπίπτουν.



Σχήμα 4.3.5. Κανονικοποιημένες καμπύλες τάσεων - παραμορφώσεων: καθαρή άμμος με αρχικές τάσεις στερεοποίησης 50, 120 και 300kPa (τριαξονικές δοκιμές), χαλαρά δοκίμια (Γεωργιάννου, Σάκκης 2009)

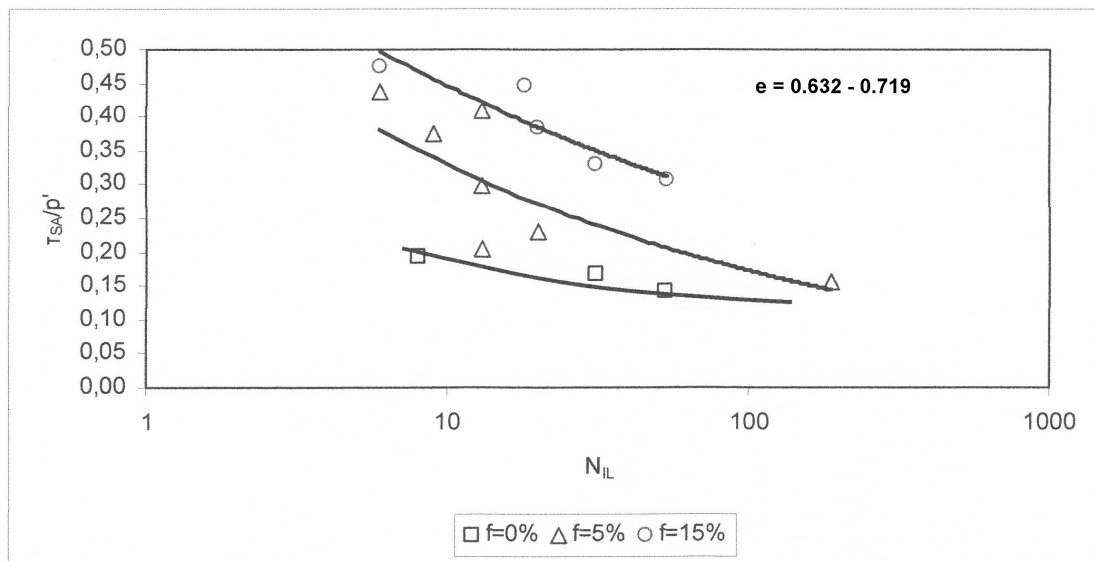
Αντίθετα αποτελέσματα σημειώνονται σε μια άλλη μελέτη, όπου υποδεικνύεται (Παπαδοπούλου, Τίκα 2008) διαφοροποίηση μεταξύ δοκιμών στερεοποιημένων στα 100 και τα 300kPa. Όπως φαίνεται στο σχήμα 4.3.6, ενισχύονται οι ενδείξεις για τη συμπεριφορά δοκιμών στερεοποιημένων στα 50kPa, πάλι η καμπύλη βρίσκεται υψηλότερα, τα 100 και τα 300kPa όμως έχουν σημαντική διαφορά μεταξύ τους. Τα δοκίμια που εξετάστηκαν ήταν μέτριας πυκνότητας (δείκτης πόρων $e=0.655$ έως 0.688).



Σχήμα 5.3.6. Κανονικοποιημένες καμπύλες τάσεων παραμορφώσεων: καθαρή άμμος με αρχικές τάσεις στερεοποίησης 50, 100 και 300kPa (τριαξονικές δοκιμές), δείκτες πόρων $e = 0.655$ έως 0.688 (Παπαδοπούλου, Τίκα 2008)

4.3.2 Επίδραση ποσοστού λεπτόκοκκων

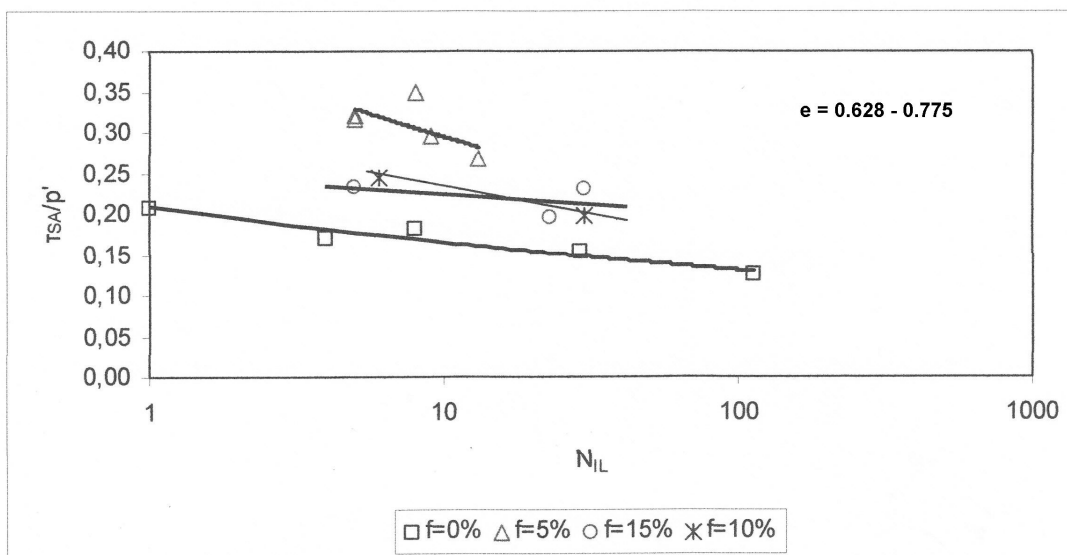
Στη συνέχεια της επεξεργασίας των πειραματικών αποτελεσμάτων των δοκιμών στρέψης κοίλου δοκιμίου, εξετάζεται η επίδραση της προσθήκης κλάσματος λεπτόκοκκου υλικού (ίλυσ) σε δείγμα καθαρής άμμου. Τα ποσοστά (κατά βάρος) που εξετάζονται είναι 0% (καθαρή άμμος), 5%, 10% και 15%. Στα ακόλουθα διαγράμματα απεικονίζονται τα πειραματικά αποτελέσματα ομαδοποιημένα βάσει της αρχικής τάσης στερεοποίησης, η οποία κυμαίνεται από 50 – 300 kPa. Στο σχήμα 4.3.7 φαίνεται ότι η προσθήκη ίλυσ είναι αντίστοιχη με την βελτίωση της αντοχής του υλικού, η προσθήκη ίλυσ κατά 5% αυξάνει σημαντικά το στρεπτικό φορτίο που μπορεί να αναλάβει το δοκίμιο σε σχέση με την καθαρή άμμο ($f=0\%$) – ή αντίστοιχα, για ίδιο στρεπτικό φορτίο απαιτούνται περισσότεροι κύκλοι καταπόνησης. Ομοίως, περαιτέρω αύξηση του ποσοστού f σε 15% οδηγεί σε μεγαλύτερη αύξηση της αντοχής, σε σχέση με το 5%.



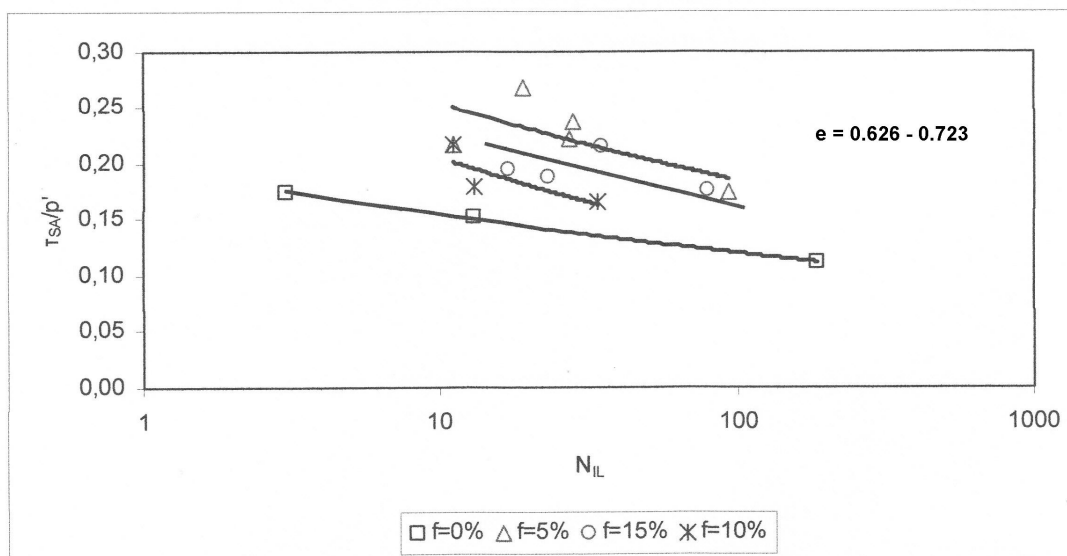
Σχήμα 4.3.7. Καμπύλες ρευστοποίησης δοκιμίων άμμου M31 με $p_i' = 50\text{kPa}$: επιβαλλόμενη διατμητική τάση κανονικοποιημένη ως προς την τάση στερεοποίησης σε σχέση με τους κύκλους αστοχίας N_{IL} .

Για αρχική ενεργό τάση 100kPa όμως, παρουσιάζεται μια διαφοροποίηση (σχήμα 4.3.8). Ενώ η προσθήκη μικρής ποσότητας ιλύος (5%) οδηγεί σε σημαντική αύξηση της αντοχής, η προσθήκη μεγαλύτερου κλάσματος ιλύος, σε 10 ή 15% μειώνει την αντοχή σε σχέση με το κλάσμα 5%, αλλά όχι και σε σχέση με την καθαρή άμμο. Παρόμοια συμπεριφορά παρουσιάζουν και τα δοκίμια που στερεοποιήθηκαν στα 300kPa (σχήμα 4.3.9), όπου και πάλι όσα είχαν πρόσμιξη με λεπτόκοκκο υλικό 10 και 15% βρίσκονται, σχετικά με την αντοχή τους πάντα, 'ανάμεσα' στην καθαρή άμμο και τα δοκίμια με 5%. Αξίζει να σημειωθεί ότι αυτά τα δυο ενδιάμεσα ποσοστά δεν διαφέρουν σημαντικά μεταξύ τους, οι καμπύλες υποδεικνύουν ομοιότητα στην συμπεριφορά των δοκιμίων. Ακόμη, πρέπει να σημειωθεί ότι το υλικό που χρησιμοποιήθηκε σε αυτές τις σειρές πειραμάτων ήταν γενικά πολύ πυκνό. Συγκεκριμένα ο σκελετικός δείκτης πόρων κυμαίνεται περίπου από 0,57 έως 0,71, συνεπώς αν γίνει ο υπολογισμός ως προς τον δείκτη πόρων με τον συνήθη ορισμό (όγκος κενών δια όγκο άμμου) φαίνεται πόσο πυκνά ήταν τα δοκίμια. Μια εξήγηση λοιπόν για την συμπεριφορά του εδαφικού υλικού που διαπιστώθηκε πιο πάνω, είναι ακριβώς αυτή η πυκνότητα. Πυκνό υλικό σημαίνει μικρά κενά μεταξύ των κόκκων της άμμου άρα λιγότερος χώρος για να εισέλθουν τα

λεπτόκοκκα. Μικρή ποσότητα ιλύος λοιπόν μπαίνει στα κενά και βελτιώνει σημαντικά τις αντοχές, μεγαλύτερη σημαίνει ότι περισσεύει λεπτόκοκκο το οποίο αρχίζει να εμποδίζει πλέον τις επαφές των κυρίως κόκκων της άμμου.

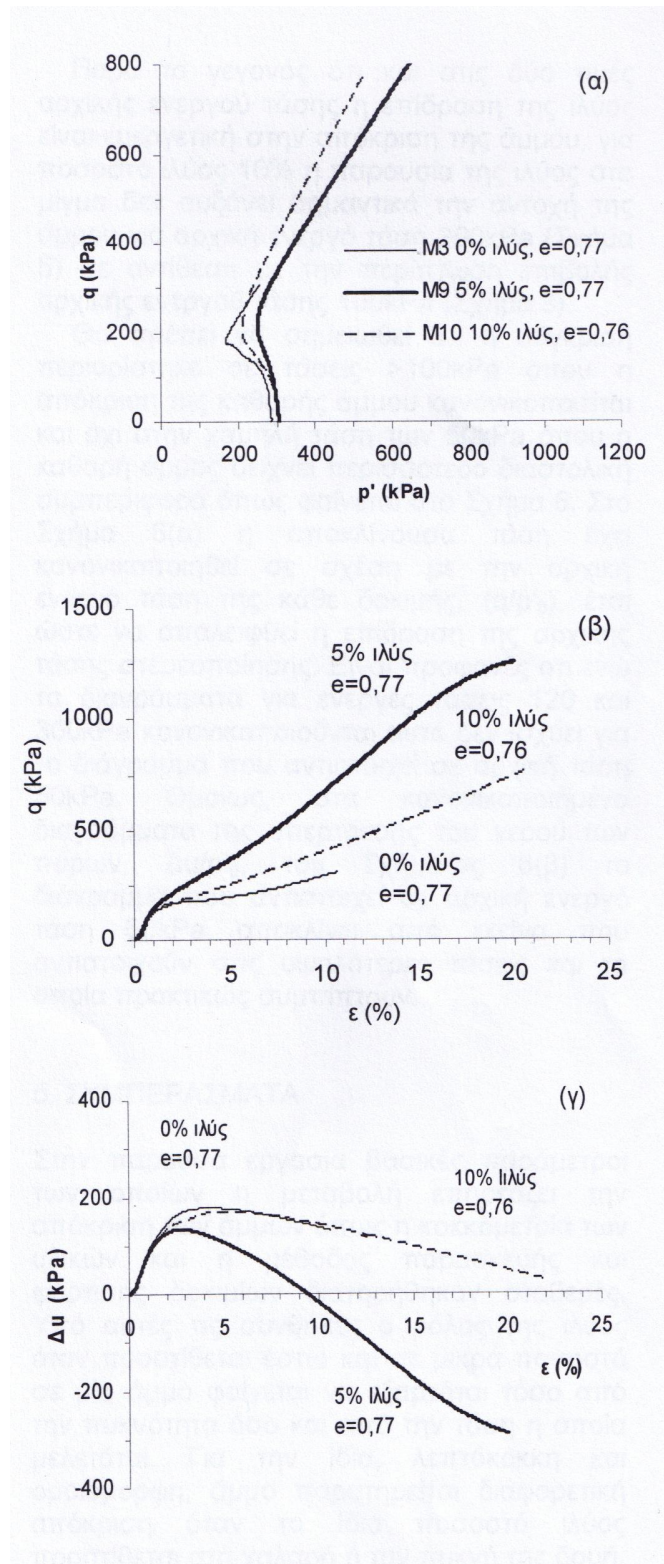


Σχήμα 4.3.8. Καμπύλες ρευστοποίησης δοκιμών άμμου M31 με $p_i' = 100\text{kPa}$: επιβαλλόμενη διατμητική τάση κανονικοποιημένη ως προς την τάση στερεοποίησης σε σχέση με τους κύκλους αστοχίας N_{IL}



Σχήμα 4.3.9. Καμπύλες ρευστοποίησης δοκιμών άμμου M31 με $p_i' = 300\text{kPa}$: επιβαλλόμενη διατμητική τάση κανονικοποιημένη ως προς την τάση στερεοποίησης σε σχέση με τους κύκλους αστοχίας N_{IL}

Στο σχήμα 4.3.10 παρουσιάζονται παλαιότερα δεδομένα για την επίδραση ιλύος σε άμμο M31, με δείκτες πόρων 0,76-0,77, για αρχική ενεργό τάση 300kPa περίπου (Γεωργιάννου, Σάκκης 2009). Όπως φαίνεται από τις διαδρομές ενεργών τάσεων (σχ. 10-α)) η παρουσία της ιλύος στο μίγμα αυξάνει την αντοχή της άμμου για ποσοστό 5%, όταν ακολουθεί όμως περαιτέρω αύξηση σε 10% η ευμενής επιρροή μειώνεται. Αντίστοιχα, στα διαγράμματα αποκλινοσών τάσεων- παραμορφώσεων και υπερπιέσεων του νερού των πόρων ως προς τις παραμορφώσεις (σχήματα 4.3.10β και 4.3.10γ). Μεταξύ των δοκιμών μεγαλύτερη τάση για συστολή εμφανίζει η καθαρή άμμος ενώ η προσθήκη της ιλύος σταθεροποιεί την απόκριση της άμμου εφόσον δεν παρατηρείται πτώση της αποκλίνουσας τάσης αλλά συνεχής αύξησή της με την παραμόρφωση. Σημειώνεται επίσης ότι το διάγραμμα που αναφέρεται στο μείγμα 10% βρίσκεται 'ανάμεσα' σε αυτά της (πιο συστολικής) καθαρής άμμου ($f=0\%$) και της σταθερότερης με ποσοστό 5%. Αυτά τα αποτελέσματα έρχονται σε συμφωνία με τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τα πειράματα στην hollow cylinder συσκευή αφού όπως είδαμε πιο πάνω (σχήμα 4.3.9) η σημαντική βελτίωση των ιδιοτήτων της άμμου με την προσθήκη κλάσματος 5% λεπτόκοκκου, αρχίζει να μειώνεται καθώς το ποσοστό αυξάνει σε 10 ή 15%. Μια αναφορά που πρέπει να γίνει ακόμα, είναι σχετικά με την ενεργό τάση p'_o στην οποία έχουν στερεοποιηθεί τα δοκίμια. Από τα δεδομένα των πειραμάτων και την παρουσίασή τους στα παραπάνω διαγράμματα, φαίνεται να υπάρχει συσχετισμός ανάμεσα στην ενεργό τάση στερεοποίησης και τις επιρροές των διαφόρων ποσοστών λεπτόκοκκων, αφού στα 50kPa, όσο ανέβαινε το ποσοστό ιλύος, τόσο βελτιωνόταν η συμπεριφορά του μείγματος, ενώ στα 100 και τα 300kPa μετά το $f = 5\%$ τα διαγράμματα είχαν αντίστροφη πορεία. Αυτή η παρατήρηση έρχεται σε συμφωνία με παλαιότερη μελέτη (Αδριανόπουλος, Μπουκοβάλας, Παπαδημητρίου 2001) η οποία είχε εντοπίσει ένα 'οριακό' σημείο για τις τάσεις στερεοποίησης, το οποίο ήταν στα 60kPa. Για τις μικρές (σε σχέση με αυτό το όριο) τάσεις η αύξηση του f (%) είχε παρατηρηθεί ότι αύξανε την αντοχή σε ρευστοποίηση ενώ για μεγαλύτερες τάσεις στερεοποίησης η επίδραση αυτή αντιστρεφόταν.



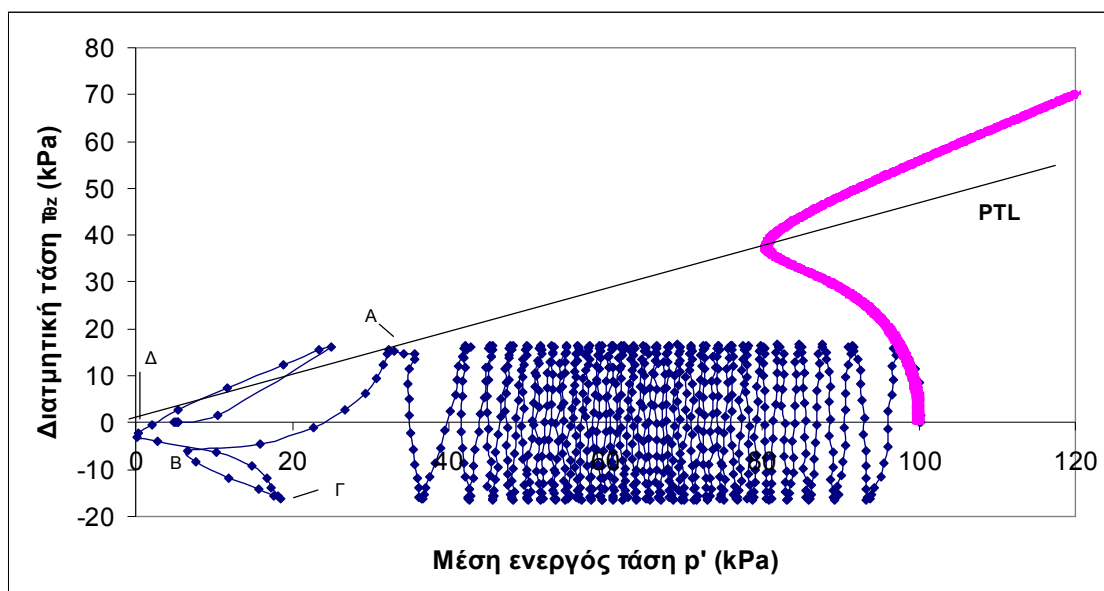
Σχήμα 4.3.10. Επίδραση ιλύος σε άμμο M31, δείκτες πόρων 0.76-0.77, για αρχική ενεργό τάση 300kPa περίπου (Γεωργιάννου, Σάκκης 2009)

4.4 Ανακυκλική και μονοτονική στρεπτική διάτμηση άμμου M31 υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης

4.4.1 Μηχανική συμπεριφορά της άμμου χωρίς προσθήκη λεπτόκοκκου υλικού

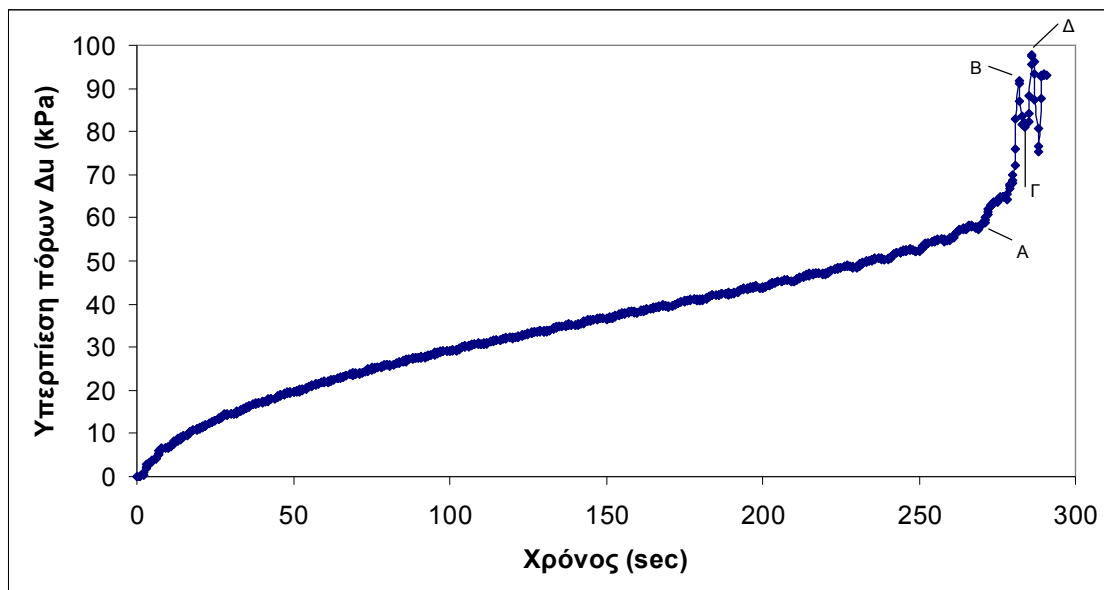
Το ακόλουθο μέρος της εργασίας περιλαμβάνει την παρουσίαση της ανακυκλικής στρεπτικής διάτμησης ισότροπα στερεοποιημένου δοκιμίου καθαρής (περιεχόμενο ποσοστό ιλύος $f=0\%$) άμμου M31 υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης. Κατά τη διάρκεια της ανακυκλικής φόρτισης του δοκιμίου, η γωνία α εναλλασσόταν μεταξύ των τιμών ± 40 μοίρες, ανάλογα με τη φορά της επιβαλλόμενης διατμητικής τάσης $\Delta\tau_{\theta z}$ και η διαδικασία τερματίστηκε όταν η πίεση του νερού των πόρων σχεδόν εξισώθηκε με την πλευρική πίεση της κυψέλης. Η συχνότητα της ανακυκλικής φόρτισης ήταν ίση με 0,1 Hz.

Στο σχήμα 4.4.1 έχει σχεδιαστεί η διαδρομή ενεργών τάσεων του εδαφικού δοκιμίου άμμου M31 με $p_i' = 100\text{kPa}$, δείκτη πόρων $e_o = 0,641$ και επιβαλλόμενη διατμητική τάση $\Delta\tau_{\theta z} = 15,775\text{kPa}$.



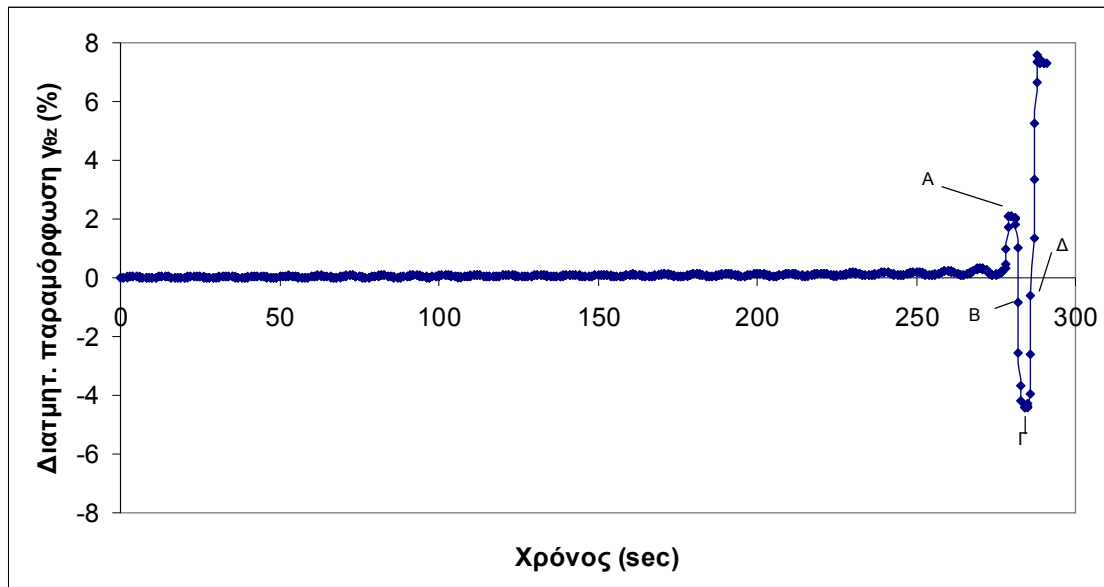
Σχήμα 4.4.1. Ανακυκλική φόρτιση ισότροπα στερεοποιημένου δοκιμίου άμμου M31 υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης με $p_i' = 100\text{kPa}$, $e_o = 0.641$ και $\Delta\tau_{\theta z} = 15,775\text{kPa}$ (διαδρομή ενεργών τάσεων)

Από τη μελέτη του σχήματος προκύπτει ότι όσο αυξάνεται ο αριθμός των κύκλων φόρτισης, τόσο η διαδρομή ενεργών τάσεων του δοκιμίου μετακινείται από τα δεξιά προς τα αριστερά και την αρχή των αξόνων λόγω της ανάπτυξης της υπερπίεσης του νερού των πόρων, ωστόσο δραματική αλλαγή στη μορφή της διαδρομής των τάσεων σημειώνεται στον εικοστό όγδοο κύκλο φόρτισης (τμήμα Α-Β-Γ-Δ των σχημάτων 4.4.1, 4.4.2, 4.4.3). Το δοκίμιο αρχικά παρουσιάζει έντονη τάση για συστολή (κλάδος ΑΒ σχήμα 4.4.2) στη συνέχεια εμφανίζει διαστολική συμπεριφορά (κλάδος ΒΓ, σχήμα 4.4.2) και τελικά οδηγείται στην αστοχία (κλάδος ΓΔ σχήμα 4.4.2) με ταυτόχρονη συσσώρευση σημαντικών διατμητικών παραμορφώσεων (σχήμα 4.4.3). Πρέπει να σημειωθεί ότι το δοκίμιο οδηγείται σε αστοχία και τελικά ρευστοποιείται στον κλάδο ΓΔ όπου η $\Delta\tau_{\theta z}$ αλλάζει κατεύθυνση. Η ασταθής συμπεριφορά του δοκιμίου κατά την αλλαγή της κατεύθυνσης της $\Delta\tau_{\theta z}$ υποδηλώνει χαρακτηριστικά έντονα ανισότροπης συμπεριφοράς. Η συμπεριφορά αυτή αντανακλά τη δομή του υλικού.



Σχήμα 4.4.2. Ανακυκλική φόρτιση ισότροπα στερεοποιημένου δοκιμίου άμμου M31 υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης με $p_i' = 100\text{kPa}$, $e_o = 0.641$ και $\Delta\tau_{\theta z} = 15,775\text{kPa}$ (υπερπίεση πόρων ως προς τον χρόνο)

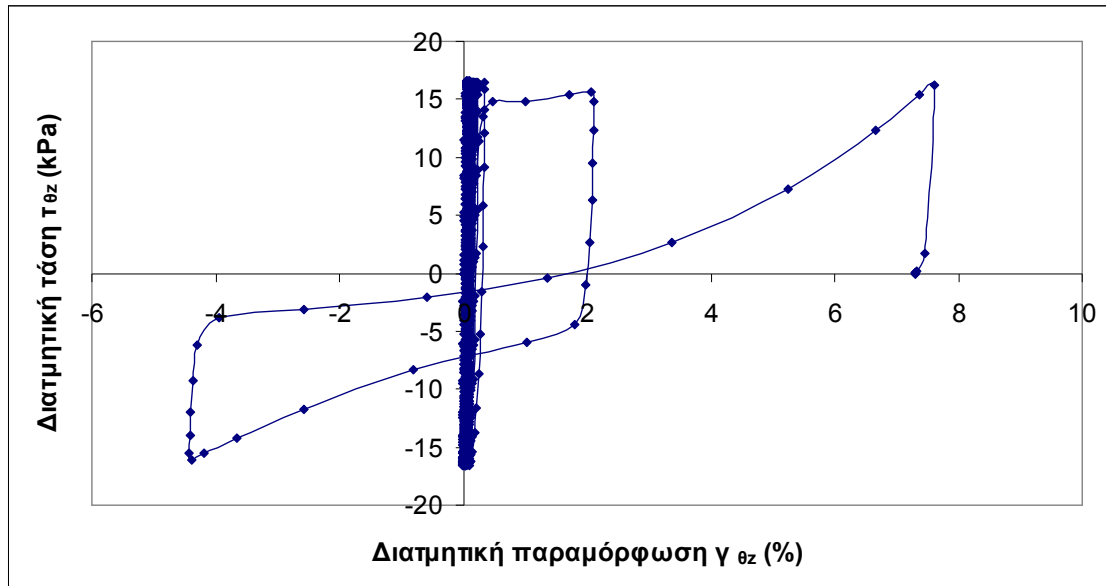
Όπως φαίνεται από το σχήμα 4.4.3, η διατμητική παραμόρφωση που αναπτύσσεται στους 27 πρώτους κύκλους της φόρτισης είναι μικρή. Ταυτόχρονα, η υπερπίεση πόρων αυξάνεται γρήγορα κατά τον πρώτο κύκλο φόρτισης αλλά ο ρυθμός αύξησης μειώνεται και σταθεροποιείται στους υπόλοιπους κύκλους (σχήμα 4.4.2). Κατόπιν, οι διατμητικές παραμορφώσεις αυξάνονται σταδιακά παραμένοντας σε χαμηλές τιμές με τη μεγαλύτερη αύξηση να σημειώνεται στον 28^ο κύκλο φόρτισης. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι μετά τον 27^ο κύκλο φόρτισης ο μηχανισμός της εξέλιξης των υπερπίεσεων πόρων αλλάζει δραστικά. η μέγιστη τιμή της υπερπίεσης πόρων σημειώνεται όταν η διατμητική παραμόρφωση πλησιάζει την τιμή 0, ενώ η διατμητική παραμόρφωση μεγιστοποιείται όταν η υπερπίεση πόρων μειώνεται. Στο τέλος του 28^{ου} κύκλου φόρτισης, η υπερπίεση πόρων τείνει να εξισωθεί με την αρχική ενεργό τάση p' .



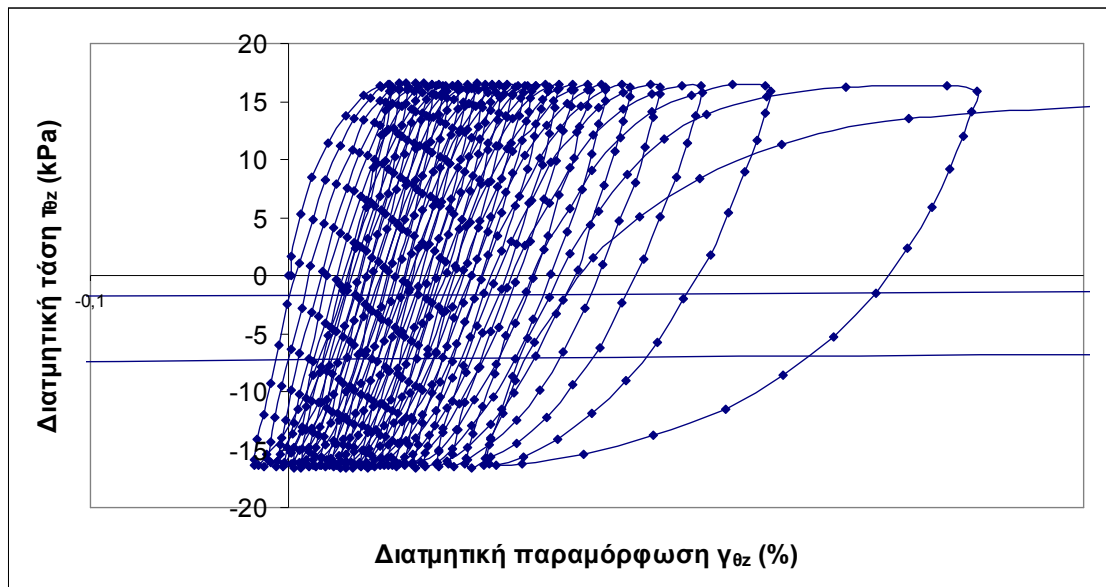
Σχήμα 4.4.3. Ανακυκλική φόρτιση ισότροπα στερεοποιημένου δοκιμίου άμμου M31 υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης με $p_i' = 100\text{kPa}$, $e_o = 0.641$ και $\Delta\tau_{oz} = 15,775\text{kPa}$ (διατμητική παραμόρφωση ως προς τον χρόνο)

Στους πρώτους κύκλους της φόρτισης η καμπύλη τάσεων παραμορφώσεων σχηματίζει μια κλειστή διαδρομή, ένα κλειστό βρόγχο (σχήμα 4.4.4) του οποίου η κλίση μειώνεται με τη φόρτιση όπως φαίνεται στο διάγραμμα για μικρότερο εύρος παραμορφώσεων (σχήμα 4.4.4β). Εν συνεχεία, όμως, καθώς η φόρτιση εξελίσσεται, η σχέση διατμητικών τάσεων και παραμορφώσεων γίνεται αρκετά περίπλοκη. Στους τελευταίους κύκλους

φόρτισης, με την αλλαγή προσήμου στη διατμητική τάση αναπτύσσονται μεγάλες διατμητικές παραμορφώσεις. σε αυτή τη φάση της δοκιμής, το δοκίμιο παρουσιάζει μειωμένη αντοχή καθώς η πίεση πόρων προσεγγίζει την αρχική ενεργό τάση (σχήμα 4.4.2).

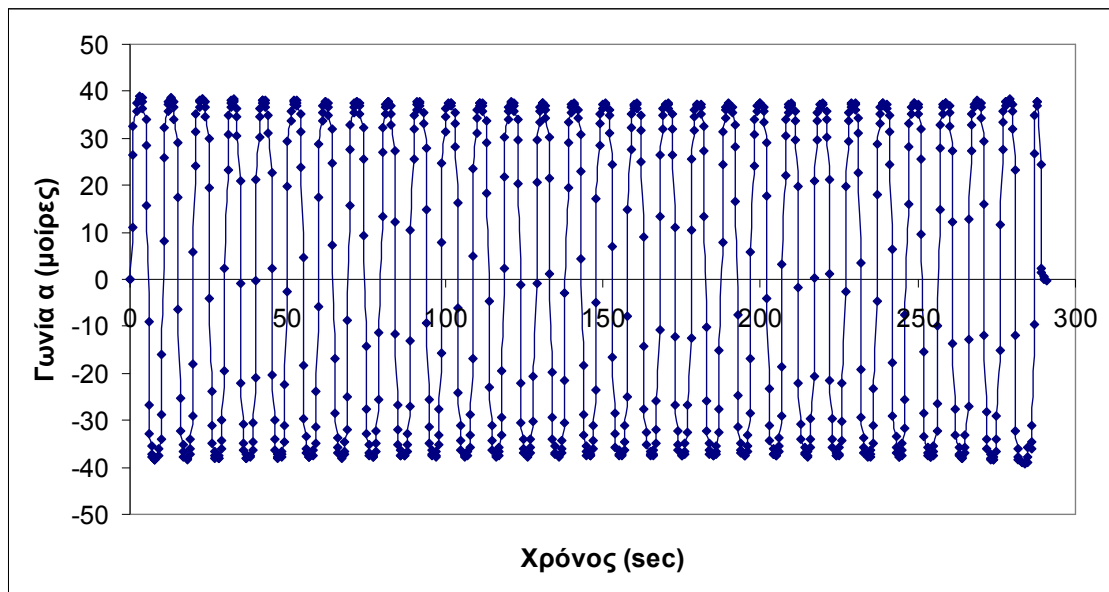


Σχήμα 4.4.4α. Ανακυκλική φόρτιση ισότροπα στερεοποιημένου δοκιμίου άμμου M31 υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης με $p_i' = 100\text{kPa}$, $e_0 = 0.641$ και $\Delta\tau_{\theta z} = 15,775\text{kPa}$ (καμπύλη τάσεων - παραμορφώσεων)



Σχήμα 4.4.4β. Μεγέθυνση του κεντρικού τμήματος του σχήματος 4α

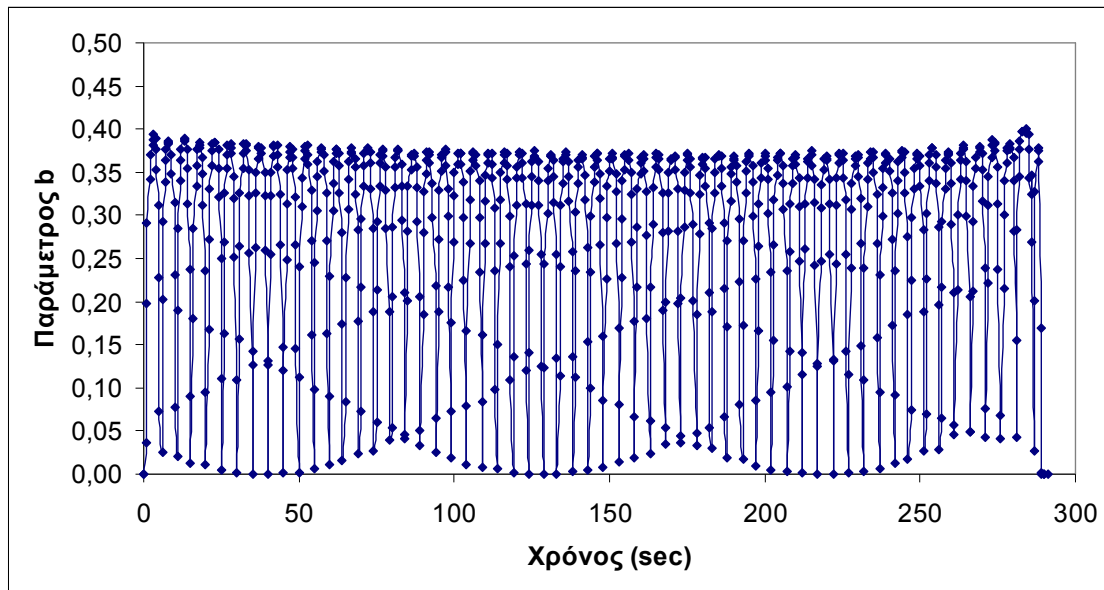
Η εξέλιξη της γωνίας α (η γωνία που σχηματίζει η κύρια τάση σ_1 με την κατακόρυφο) ως προς το χρόνο διακρίνεται στο σχήμα 4.4.5. Από τη μελέτη του σχήματος είναι προφανές ότι η γωνία α εναλλάσσεται μεταξύ των τιμών ± 40 μοίρες ανάλογα με τη φορά της επιβαλλόμενης διατμητικής τάσης $\Delta\tau_{\theta z}$ (σχήμα 4.4.1) ενώ η εναλλαγή αυτή λαμβάνει χώρα σχετικά γρήγορα (υπάρχουν κάποιες ενδιάμεσες τιμές μεταξύ των δύο ακραίων τιμών).



Σχήμα 4.4.5. Ανακυκλική φόρτιση ισότροπα στερεοποιημένου δοκιμίου άμμου M31 υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης με $p_1' = 100\text{kPa}$, $e_0 = 0.641$ και $\Delta\tau_{\theta z} = 15,775\text{kPa}$ (γωνία α ως προς τον χρόνο)

Επιπροσθέτως η παράμετρος $b = \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3}$, η οποία αντιπροσωπεύει το σχετικό μέγεθος

της ενδιάμεσης κύριας τάσης σ_2 ως προς τις τάσεις σ_1 και σ_3 , κάθε φορά που η γωνία α είναι ίση με ± 40 μοίρες αποκτά την τιμή 0,40 (σχήμα 4.4.6).



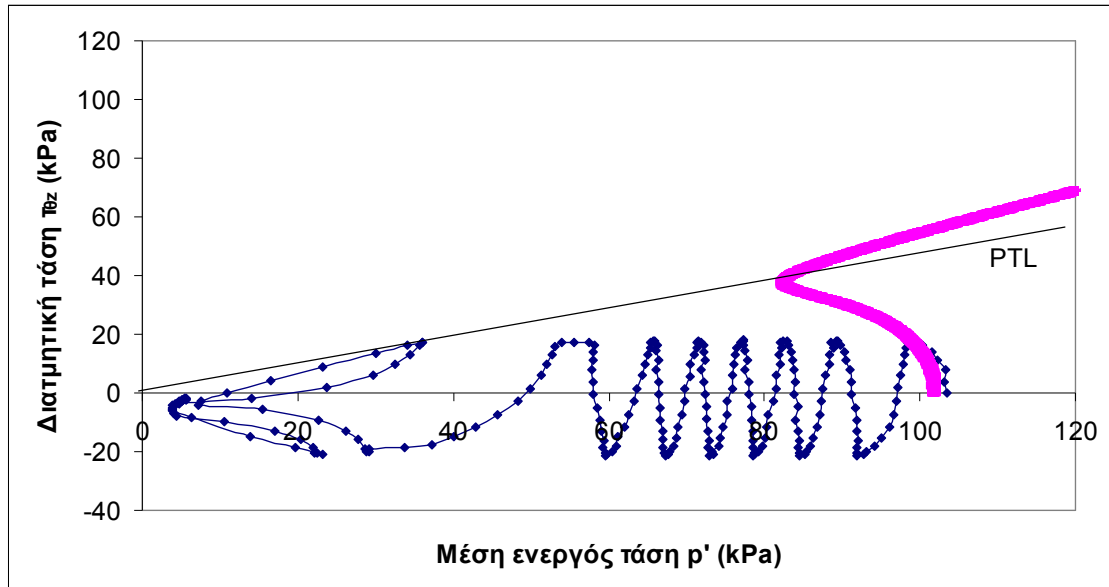
Σχήμα 4.4.6. Ανακυκλική φόρτιση ισότροπα στερεοποιημένου δοκιμίου άμμου M31 υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης με $p_1' = 100\text{kPa}$, $e_0 = 0.641$ και $\Delta\tau_{\theta z} = 15,775\text{kPa}$ (παράμετρος b ως προς τον χρόνο)

4.4.2 Η επίδραση της προσθήκης λεπτόκοκκου υλικού στη μηχανική συμπεριφορά άμμου

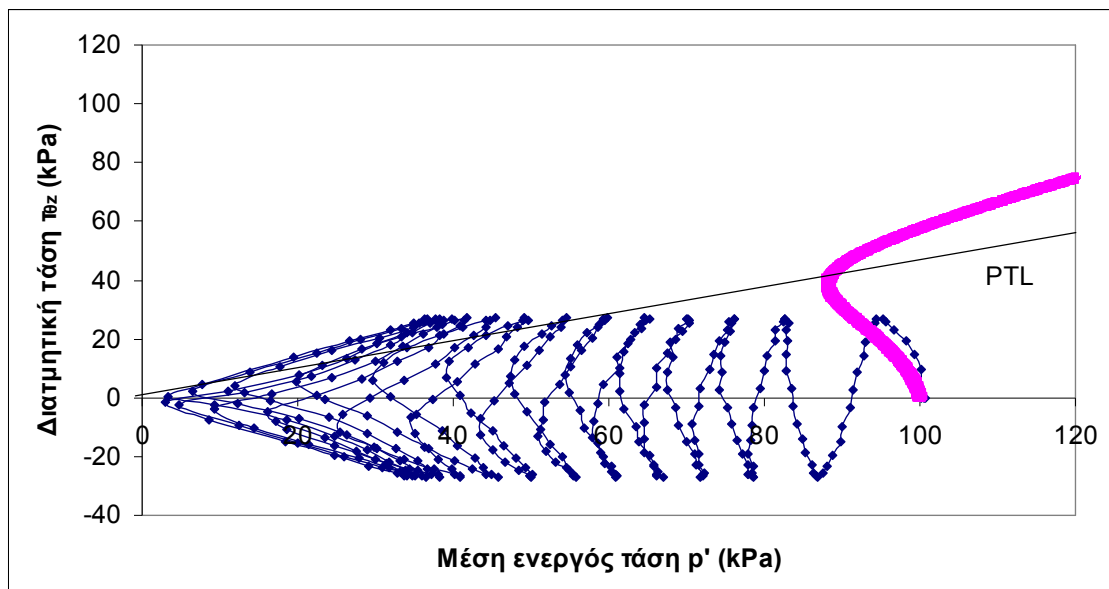
Σε αυτή τη παράγραφο παρουσιάζονται διαδρομές ενεργών τάσεων για μονοτονικές και ανακυκλικές σειρές πειραμάτων. Όλα τα δοκίμια έχουν στερεοποιηθεί σε αρχική ενεργό τάση 100kPa και έχουν συγκρίσιμους δείκτες πόρων.

Στο σχήμα 4.4.7 απεικονίζονται τα αποτελέσματα φόρτισης δοκιμίων καθαρής άμμου ($f=0\%$), με δείκτες πόρων $e=0.651$ και 0.612 (ανακυκλική και μονοτονική φόρτιση αντίστοιχα) και επιβαλλόμενη διατμητική τάση $\tau_{SA}=18.716\text{kPa}$ για το ανακυκλικό πείραμα. Στο σχήμα 4.4.8 υπάρχουν τα αντίστοιχα διαγράμματα για μείγμα άμμου και ιλύος σε ποσοστό 5%, με δείκτες πόρων $e= 0.671$ και 0.639 (ανακυκλικό - μονοτονικό) και επιβαλλόμενη διατμητική τάση $\tau_{SA}=26.796\text{kPa}$ για το ανακυκλικό πείραμα. Παρατηρούμε ότι αν και το μείγμα έχει χαλαρότερη δομή (μεγαλύτερος δείκτης πόρων) και του επιβάλλεται μεγαλύτερη διατμητική τάση από ότι στο δοκίμιο καθαρής άμμου, η αντοχή του σε ρευστοποίηση είναι σημαντικά μεγαλύτερη αφού απαιτούνται περισσότεροι κύκλοι για να επέρθει η αστοχία. Πρέπει να σημειωθεί ότι αυτή η αλλαγή της μηχανικής συμπεριφοράς τους μείγματος σε σχέση με την καθρή άμμο ταυτίζεται

με τις αλλαγές που παρατηρούνται και στις υπόλοιπες παραγράφους του Κεφαλαίου 5, όπου αναλύονται οι καμπύλες ρευστοποίησης των δοκιμών αλλά και οι η ανάπτυξη των υπερπιέσεων πόρων Δu .

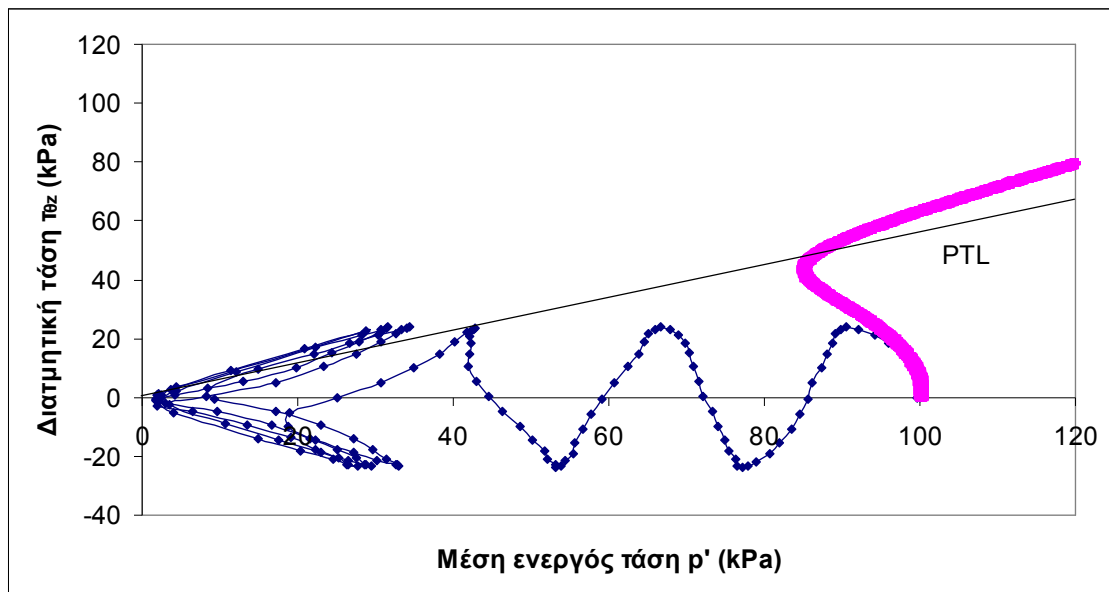


Σχήμα 4.4.7. Ανακυκλική και μονοτονική φόρτιση ισότροπα στερεοποιημένων δοκιμών καθαρής ($f=0\%$) άμμου M31 υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης με $p_i'=100\text{kPa}$ (διαδρομή ενεργών τάσεων)



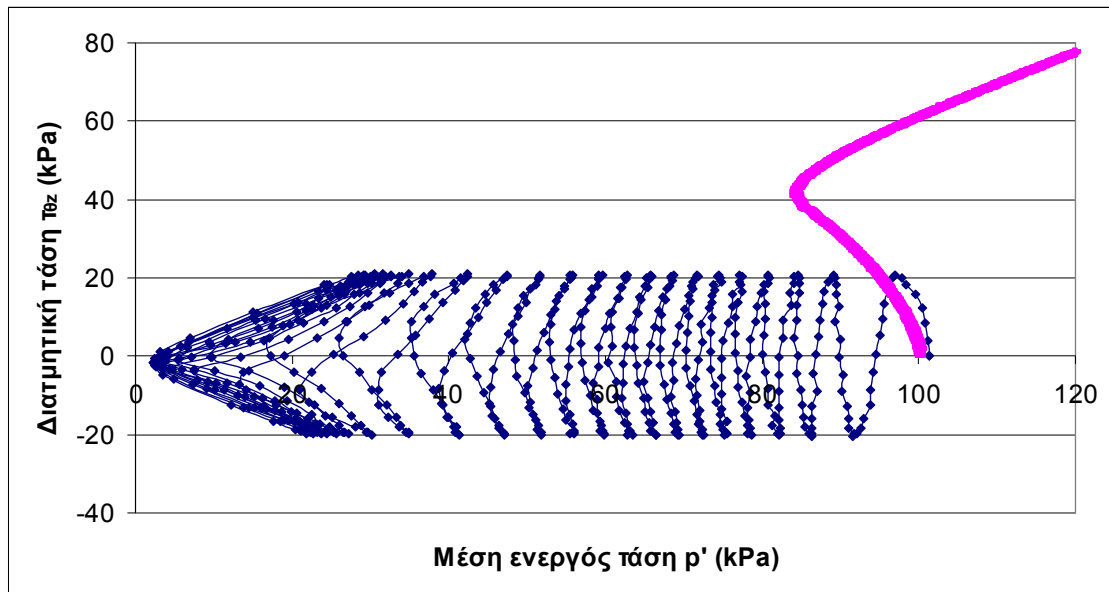
Σχήμα 4.4.8. Ανακυκλική και μονοτονική φόρτιση ισότροπα στερεοποιημένων δοκιμών ($f=5\%$) άμμου M31 υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης με $p_i'=100\text{kPa}$ (διαδρομή ενεργών τάσεων)

Στο σχήμα 4.4.9, απεικονίζεται η απόκριση μείγματος με περιεχόμενο ποσοστό ύλους 15%. Το δοκίμιο είναι ελαφρώς χαλαρότερο σε σχέση με αυτό του σχήματος 4.4.8 (δείκτης πόρων $e=0.710$), του ασκείται όμως χαμηλότερη διατμητική τάση: $\tau_{SA}=23.090\text{kPa}$. Διαπιστώνεται μια γρηγορότερη αστοχία του δοκιμίου εν συγκρίσει με αυτή του μείγματος 5% για του οποίου την αστοχία απαιτήθηκαν πολλοί περισσότεροι κύκλοι (σχήμα 4.4.8).



Σχήμα 4.4.9. Ανακυκλική και μονοτονική φόρτιση ισότροπα στερεοποιημένων δοκιμίων ($f=15\%$) άμμου M31 υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης με $p_i'=100\text{kPa}$ (διαδρομή ενεργών τάσεων)

Τέλος, για να ολοκληρωθεί η σύγκριση μεταξύ των διαφόρων περιεχομένων ποσοστών λεπτόκοκκων, ακολουθεί το σχήμα 4.4.10, όπου απεικονίζεται ανακυκλική φόρτιση (μαζί με την αντίστοιχη – όσον αφορά δείκτη πόρων και ενεργό τάση στερεοποίησης - μονοτονική) μείγματος 15% το οποίο έχει δείκτη πόρων $e=0.716$ και επιβαλλόμενη διατμητική τάση $\tau_{SA}=19.901\text{kPa}$. Συγκρίνοντάς το με το διάγραμμα του σχήματος 4.4.7, παρατηρούμε ότι το δοκίμιο καθαρής άμμου με μικρότερο δείκτη πόρων και τ_{SA} παρουσιάζει λιγότερο ανθεκτική συμπεριφορά στη ρευστοποίηση αφού η δοκιμή διαρκεί λιγότερους κύκλους φόρτισης.



Σχήμα 4.4.10 . Ανακυκλική και μονοτονική φόρτιση ισότροπα στερεοποιημένων δοκιμίων ($f=15\%$) άμμου M31 υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης με $p_i'=100\text{kPa}$ (διαδρομή ενεργών τάσεων)

Συνοψίζοντας, προκύπτει το συμπέρασμα ότι προσθήκη μικρού (5%) ποσοστού λεπτόκοκκου υλικού, βελτιώνει την συμπεριφορά της καθαρής άμμου σε αξιοσημείωτο βαθμό. Περαιτέρω αύξηση της ιλύος σε 15% έχει πλέον αντίστροφο αποτέλεσμα και μείωση της αντοχής σε ρευστοποίηση, αλλά με διατήρησή της πάντως πάνω από αυτή της καθαρής άμμου. Αυτή η συμπεριφορά, όπως αναφέρθηκε και πιο πάνω, συμβαδίζει με τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την ανάλυση για τις καμπύλες ρευστοποίησης των δοκιμίων αλλά και την ανάπτυξη υπερπιέσεων πόρων Δu , για την καθαρή άμμο αλλά και τα μείγματα.

5. Συμπεράσματα

1) Τόσο στην καθαρή άμμο όσο και στα μείγματα με ποσοστά ιλύος 5, 10 και 15% υπάρχει επιρροή της αρχικής ενεργού τάσης p'_i . Συγκεκριμένα, οι καμπύλες ρευστοποίησης κανονικοποιούνται για ενεργές τάσεις 100kPa και 300kPa αλλά τα δοκίμια που στερεοποιούνται σε αρχική ενεργό τάση 50kPa δείχνουν αύξηση της κανονικοποιημένης αντοχής τους σε ρευστοποίηση σε σχέση με τα δοκίμια που στερεοποιούνται σε μεγαλύτερες ενεργές τάσεις.

2) Η κανονικοποιημένη αντοχή σε ρευστοποίηση για ενεργό τάση 50kPa είναι περίπου διπλάσια για μείγματα με ποσοστό ιλύος 5% από εκείνη που παρατηρείται στην καθαρή άμμο και περίπου 4πλάσια για μείγματα με ποσοστό ιλύος 15% σε σχέση με την καθαρή άμμο.

3) Η επιρροή της αρχικής ενεργού τάσης είναι μικρή για τάσεις 100kPa και 300kPa ανεξαρτήτως του ποσοστού ιλύος.

4) Η επίδραση του ποσοστού ιλύος για την ίδια αρχική ενεργό τάση στην αντίσταση σε ρευστοποίηση φαίνεται να είναι ευεργετική αυξάνοντας την αντίσταση ρευστοποίησης όλων των μειγμάτων σε σχέση με την καθαρή άμμο.

5) Για πυκνά δοκίμια όπως αυτά που εξετάστηκαν για δείκτη πόρων εδαφικού σκελετού 0.60-0.70 και για αρχικές ενεργές τάσεις 100kPa και 300kPa παρατηρείται το εξής: προσθήκη κλάσματος ιλύος 5% αυξάνει την αντοχή σε ρευστοποίηση, ενώ περαιτέρω αύξηση του ποσοστού ιλύος σε 10 ή 15% έχει αρνητική επίδραση, η αντοχή μειώνεται σε σχέση με το κλάσμα 5% αλλά παραμένει πάνω από αυτή της καθαρής άμμου.

6) Για αρχική ενεργό τάση 50kPa παρατηρείται συνεχής αύξηση της αντοχής σε ρευστοποίηση με την αύξηση του ποσοστού ιλύος στην άμμο μεχρι 15%.

7) Η αντοχή σε ρευστοποίηση είναι παρόμοια για μείγματα άμμου και ιλύος σε ποσοστά 10 και 15%.

8) Οι καμπύλες υπερπίεσης πόρων Δu ρίως προς τον αριθμό κύκλων φόρτισης για την καθαρή άμμο εμφάνισαν το γνωστό από την βιβλιογραφία σχήμα με έντονη ανάπτυξη της υπερπίεσης πόρων όταν το δοκίμιο πλησιάζει την αστοχία. Η σχέση του Ishibashi (1977) προσεγγίζει τα πειραματικά αποτελέσματα ικανοποιητικά.

9) Οι αντίστοιχες καμπύλες για τα μείγματα εμφανίζουν μια αλλαγή σχήματος με αύξηση του ρυθμού ανάπτυξης των υπερπίεσεων στους αρχικούς κύκλους και μείωση του ρυθμού ανάπτυξης των υπερπίεσεων όταν το δοκίμιο πλησιάζει την αστοχία, σε σχέση με την καθαρή άμμο.

10) Οι ανωτέρω καμπύλες υπερπίεσης πόρων ως προς τον αριθμό των κύκλων φόρτισης κανονικοποιημένο με τον αριθμό των κύκλων φόρτισης κατά την αστοχία, κανονικοποιούνται σε μια καμπύλη για την καθαρή άμμο αλλά δεν κανονικοποιούνται για τα μείγματα άμμου και ιλύος.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ανδριανόπουλος, Κ. Ι., Μπουκοβάλας, Γ. Δ., Παπαδημητρίου, Α. Γ. (2001), “Επίδραση του ποσοστού ιλύος στο δυναμικό ρευστοποίησης λόγω σεισμού: μια νέα προσέγγιση”, Πρακτικά, 4ο Πανελλήνιο Συνέδριο Γεωτεχνικής και Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής, Αθήνα, Μάιος, 2: 91-98

Alarcon-Guzman, A., Leonards, G. A. and Chameau J. L. (1988): “Undrained monotonic and cyclic strength of sands”, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 114, No. 10, pp. 1089-1109.

Been K., Jefferies M.G. (1985), “A state parameter for sands”, Geotechnique, Vol.35, No.2.

Bouckovalas, G.D., and Gazetas, G. (1996), “Seismic bearing capacity of shallow foundations”, Final Report, Prenormative research in support of EC8 (CEC-Human Capital and Mobility, nr ERB CHRX-CT92-0011).

Carraro, J. A. H., Bandini, P., Salgado R., “Liquefaction resistance of clean and non-plastic silty sands based on Cone Penetration Resistance”, Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering ASCE, November 2003.

Casagrande, A. (1936), “Characteristics of Cohesionless soil affecting the stability of earth fills”, Journal of the Boston Society of Civil Engineers, reprinted in "Contributions to soil mechanics, 1925-1940", Boston Society of Civil Engineers, October 1940.

Casagrande A. (1975), “Liquefaction and cyclic deformation of sands, a critical review”, Proceeding, 5th Pan-American Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Buenos Aires, 5.

Castro, G., (1969), “Liquefaction of sands”, Ph.D.Thesis, Division of Engineering and Applied Physics, Harvard University.

Castro, G., (1975), “Liquefaction and Cyclic Mobility of Saturated Sands”, Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, 101 (GT6), p. 551-570.

Castro, G., Poulos, S.J., France, J.W., and Enos, J.L. (1982). “Liquefaction Induced by Cyclic Loading” Report Submitted to the National Science Found., Washington D.C., 80.

Chang, C.S., Kuo, C.L., and Selig E.T. (1983) , “Pore pressure development during cyclic loading”, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE 109, No1, 103-107.

Chern, J.C., (1985), “Undrained response of sands with emphasis on liquefaction and cyclic mobility”, Ph.D. Thesis, University of British Columbia, Vancouver, Canada.

Chu, J., (2003), "From strain space formulated plasticity to strain path testing: a review on strain softening of soil in Development in Geomechanics and Geotechnical Engineering", Eds. Zheng Y. R. et al., Chonging Publishing House, 42-54.

Chu, J. Leroueil, S., and Leong, W.K., (2003), "Unstable behavior of sand and its implication for slope instability", Canadian Geotechnical Journal 40, 873-885.

De Alba, P., Seed, H., and Chan, C.(1976), "Sand liquefaction in large simple shear tests", Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE 102, No.9, 909-927.

Egglezos, D.N., and Bouckovalas, G.D., (1998), "Analytical relationships for earthquake induced pore pressure in sand, clay and silt", Proceedings, 11th European Conference on Earthquake Engineering, Paris, France.

Egglezos, D.N., Bouckovalas, G.D., (1999), "Permanent strain and pore pressure relations for cyclic loading of sand", Proceedings, 2nd International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering 1, 131-136.

Evans, M.D., and Zhou, S. (1995), "Liquefaction behavior of sand-gravel composites", Journal of Geotechnical Engineering, ASCE 121, No. 3, 287-298.

Γεωργιάννου, Β.Ν., (2006) Ειδικά Θέματα Εδαφομηχανικής, Εκδόσεις Ε.Μ.Π.

Γεωργιάννου Β.Ν., Σάκκης Β., (2009) ,"Η επίδραση του ποσοστού ιλύος στην απόκριση άμμου".

Γκαζέτας, Γ., (2005) Σημειώσεις Εδαφομηχανικής, Εκδόσεις Ε.Μ.Π.

Γκαζέτας, Γ., (2007) Σημειώσεις Εδαφοδυναμικής, Εκδόσεις Ε.Μ.Π.

Γκαζέτας, Γ., (1996) Εδαφοδυναμική και σεισμική μηχανική, Ιστορικά Περιστατικά, Εκδόσεις Συμμεών.

Georgiannou V.N., Burland J.B., Hight D.W., (1990), "The undrained behaviour of clayey sands in triaxial compression and extension", Geotechnique, Vol. 40, No.3.

Georgiannou, V.N., Burland J.B., Hight D.W., (1991), "Behavior of clayey sands under undrained cyclic triaxial loading", Geotechnique, Vol. 40, No.3.

Ishibashi, I., Sherif, M.A., and Tsuchiya, C. (1997), "Pore pressure rise mechanism and soil liquefaction", Soils and Foundations 17, No.2, 17-27.

Ishihara, K., Verdugo, R., and Acacio, A.A., (1991), "Characterization of cyclic behavior of sand and post-seismic stability analysis", In proceedings of the Asian Regional Conference on soil Mechanics and Foundation Engineering, Bangkok, Thailand 2, 45-68.

Καββαδάς, Μ., (2005), Στοιχεία Εδαφομηχανικής, Εκδόσεις Ε.Μ.Π.

Konrad, J.M., (1993), “ Undrained response of loosely compacted sands during monotonic and cyclic compression tests”, *Geotechnique* 43, No.1, 69-89.

Kramer, S.L., Seed H.B., (1988), “Initiation of soil liquefaction under static loading conditions”, *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 114, No.4, pp.412-430.

Kuenza K., and Towhata, I., (2004), “Torsion shear tests on undrained deformation of gravelly soil”, *Newsletter S1*, No. 7, May 2004.

Lade, P.V., (1992), “Static instability and liquefaction of loose fine sandy slopes”, *Journal of geotechnical engineering*, ASCE 118, No. 1, 51-71.

Lee, K.L., and Albaisa, A., (1974), “Earthquake induced settlements in saturated sands”, *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE 100, No.4, 387-406.

Martin, G.R., Finn, W.D.L., and Seed H.B., (1975), “Fundamentals of liquefaction under cyclic loading”, *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE 101, No. 5, 423-438.

Mitchell R.J., and Dubin, B.I. (1986), “Pore pressure generation and dissipation in dense sands under cyclic loading”, *Canadian Geotechnical Journal* 23, 393-398.

Murthy T.G, Loukidis D., Carraro, J.A., Prezzi M., Salgado R., (2007) “Undrained monotonic response of clean and silty sands”. *Geotechnique* 57, No. 3, 273-288.

Nemat-Nasser, S., Shokooh (1979), “A unified approach to densification and liquefaction of cohesionless sand in cyclic shearing”, *Canadian Geotechnical Journal* 16, 659-678.

Παπαδοπούλου, Α., (2008), Ph. D. Thesis, “Εργαστηριακή μελέτη της συμπεριφοράς ιλυωδών άμμων σε συνθήκες μονοτονικής και ανακυκλικής φόρτισης”, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.

Pierce, W.G., (1983), “Constitutive relation of saturated sand under undrained loading”, Ph.D. Thesis, Department of civil engineering, R.P.I., Troy N.Y.

Pitman T.D., Robertson P.K., Sego D.C. (1994), “Influence of fines on the collapse of loose sands”, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 31.

Polito, C.P., Martin J.R., “Effects of nonplastic fines on the liquefaction resistance of sands”, *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, May 2001.

Poulos, S.J., 1981, “The steady state of deformation”, *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE 107 (GT5): 553-562.

Roscoe, K.H., Schofield, A.N., Wroth, C.P., (1958), "On the yielding of soils" Geotechnique, Vol.9.

Σάκκης, Β. (2009) Η Μηχανική συμπεριφορά των υλοδών άμμων στην τριαξονική συσκευή, Εκδόσεις Ε.Μ.Π.

Salgado, R., Bandini, P., Karim, A., (2000) "Shear strength and stiffness of silty sand". Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, May 2000.

Seed, H.B., Martin, G.R., and Lysmer, J., (1976), "Pore-water pressure changes during soil liquefaction", Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE 102, No.4, 323-346.

Seed, H.B., and Booker, J.R., (1977), "Stabilization of potentially liquefiable sand deposits using gravel drains", Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE 103, No.7, 757-768.

Sladen, J.A., D' Hollander R.D., Krahn J. (1985), "The liquefaction of sands, a collapse surface approach", Canadian Geotechnical Journal 22, 564-578.

Soltani- Jigheh H., Soroush A., Rezaie M., "Application of regression analysis for estimated behavior of mixed clayey soils subjected to undrained cyclic loading".

Τσομόκος, Α., (2005), "Πειραματική διερεύνηση της συμπεριφοράς εδαφικού στοιχείου σε δοκιμές στατικής και δυναμικής στρέψης κοίλου δοκιμίου", Ph. D. Thesis, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Tatsuoka, F., Pradhan, T.B. S., and Yoshi-ie, H., (1989), "A cyclic undrained simple shear testing method for soils", Geotechnical Testing Journal 12, No4, 269-280.

Vaid, Y. P., Chung, E.K.F., and Kuerbis, R.H., (1990a), "Stress path and steady state", Canadian Geotechnical Journal 27, 1-7.

Vaid, Y. P., Fisher, J.M., Kuerbis, R.H., and Negussey, D., (1990b), "Particle gradation and liquefaction", Journal of Geotechnical Engineering 116, No. 4, 698-703.

Vaid, Y. P., Sayao, A., Hou, E., and Negussey, D., (1990c) "Generalised stress path dependent behavior with a new hollow cylinder apparatus", Canadian Geotechnical Journal 27, 601-616.

Vaid, Y.P., Stedman, J.D., and Sivathayalan, S., (2001), "Confining stress and static shear effects in cyclic liquefaction", Canadian Geotechnical Journal 38, 580-591.

Zhang, J. M., Shamoto, Y., and Tokimatsu, K., (1997), "Moving critical and phase – transformation stress state lines of saturated sand during undrained cyclic shear ", Soils and foundations 37, No.2, 51-59.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

Περιγραφή της συσκευής στρεπτικής διάτμησης κοίλου δοκιμίου και η πειραματική διαδικασία

Εισαγωγή

Η συσκευή που χρησιμοποιήθηκε για την εκτέλεση των πειραμάτων είναι η συσκευή στρεπτικής διάτμησης κοίλου δοκιμίου (hollow cylinder apparatus), η οποία βρίσκεται στο εργαστήριο εδαφομηχανικής του ΕΜΠ και έχει κατασκευαστεί από την ιαπωνική εταιρεία Seiken Inc. Η συσκευή του ΕΜΠ διαφέρει από το εμπορικό μοντέλο της Seiken όσον αφορά: α) τις διαστάσεις του δοκιμίου και κατά συνέπεια του συστήματος κατακόρυφης φόρτισης, β) τη δυνατότητα ελέγχου της πίεσης στο εσωτερικό του δοκιμίου, γ) τη δυνατότητα ελέγχου της στατικής φόρτισης, π.χ. συνθήκες ανισότροπης στερεοποίησης. Η συσκευή δύναται να επιβάλει μονοτονική και ανακυκλική φόρτιση με έλεγχο της επιβαλλόμενης τάσης ή της επιβαλλόμενης παραμόρφωσης. Ηλεκτροπνευματικές μονάδες ελέγχου συνδέονται με ειδικές βαλβίδες αέρα με σκοπό τον έλεγχο των επιβαλλόμενων πιέσεων μέσα και έξω από το δοκίμιο, ενώ η ακρίβεια στη μεταβολή των πιέσεων είναι της τάξεως του 0,5 kPa. Τα δοκίμια που εξετάζονται είναι δυνατόν να είναι συμπαγή ή κοίλα. Στην παρούσα εργασία εξετάζουμε τη δεύτερη περίπτωση, τα κοίλα δοκίμια, τα οποία έχουν εξωτερική διάμετρο 70mm, εσωτερική διάμετρο 40mm και ύψος 140mm.

Ακολουθεί συνοπτική περιγραφή της συσκευής στρεπτικής διάτμησης κοίλου δοκιμίου και των τμημάτων που την απαρτίζουν. Στο τέλος του κεφαλαίου υπάρχουν οι εικόνες στις οποίες γίνεται αναφορά.

Γενικά χαρακτηριστικά – Μηχανισμοί - Συστήματα της συσκευής στρεπτικής διάτμησης κοίλου δοκιμίου

Η γενική όψη της συσκευής στρεπτικής διάτμησης κοίλου δοκιμίου παρουσιάζεται στα σχήματα A1 και A2. Το σχήμα A2 συνοδεύεται και από υπόμνημα όπου κατονομάζονται τα συστήματα που προσημειώνονται. Ειδικότερα, τα μέρη που απαρτίζουν τη συσκευή έχουν ως εξής:

Βάση συσκευής

Το κύριο μέρος της συσκευής, που απαρτίζεται από την τριαξονική κυψέλη και το μηχανισμό επιβολής της φόρτισης, εδράζεται σε στερεό μεταλλικό πλαίσιο το οποίο έχει διαστάσεις 700x600x105mm. Η βάση της συσκευής στηρίζεται σε τέσσερις μεταλλικές κολώνες, ενώ έχει μεγάλη ακαμψία, ώστε να πραγματοποιείται απρόσκοπτα η πειραματική διαδικασία κατά τη διάρκεια της κατακόρυφης φόρτισης. Η τριαξονική κυψέλη μπορεί και ολισθαίνει στη βάση της συσκευής με τη βοήθεια αέρα, διευκολύνοντας την παρασκευή των δοκιμίων και τη σύνδεση της κυψέλης με το σύστημα επιβολής φόρτισης.

Τριαξονική κυψέλη

Η τριαξονική κυψέλη (σχήματα A3 και A4) έχει ύψος ίσο με 835mm και διάμετρο βάσης ίση με 200 mm. Πάνω στη βάση της κυψέλης βιδώνεται η βάση του δοκιμίου η οποία διαθέτει ενσωματωμένο πορώδη δίσκο για τη στράγγιση του δοκιμίου. Στην κορυφή του δοκιμίου τοποθετείται ειδικό κάλυμμα που φέρει και αυτό πορώδη δίσκο για στράγγιση, αλλά και κυκλοφορία απαερωμένου νερού στη φάση παρασκευής του δοκιμίου. Το άνω τμήμα της τριαξονικής κυψέλης στηρίζεται στη βάση με τη βοήθεια τριών μεταλλικών ράβδων, εξασφαλίζοντας την ευθυγράμμιση των δύο άκρων του δοκιμίου. Η μέτρηση της γωνίας στρέψης κατά τη διάρκεια του πειράματος πραγματοποιείται μέσω ειδικού οργάνου που τοποθετείται σε επαφή με το άνω κάλυμμα του δοκιμίου. Τα όργανα μέτρησης του κατακόρυφου φορτίου και της στρεπτικής ροπής συνδέονται επίσης με το

κάλυμμα της κορυφής του δοκιμίου. Το δοκίμιο περιβάλλεται από το εξωτερικό περίβλημα της κυψέλης που έχει ύψος 450 mm, ενώ πάνω από το περίβλημα τοποθετείται μεταλλικός δακτύλιος στεγάνωσης του οποίου η επαφή με το περίβλημα επιτυγχάνεται με τη βοήθεια τριών μεταλλικών κοχλιών.

Η τριαξονική κυψέλη φέρει έμβολο το οποίο μπορεί να κινείται ελεύθερα στον κατακόρυφο άξονα και συνδέεται με τα συστήματα επιβολής φόρτισης της συσκευής. Η σύνδεση αυτή γίνεται μέσω ειδικού μηχανισμού που βρίσκεται στην κορυφή του εμβόλου για την απορρόφηση κραδασμών. Στο ύψος του μηχανισμού βρίσκεται και το όργανο για την καταγραφή των κατακόρυφων μετακινήσεων. Δεξιά της τριαξονικής κυψέλης υπάρχει το σύστημα που ρυθμίζει την παροχή του αέρα για την επιβολή της επιθυμητής στρεπτικής φόρτισης, καθώς και η δεξαμενή εκτόνωσης. Αριστερά της τριαξονικής κυψέλης βρίσκεται το όργανο μέτρησης μεταβολής του όγκου του δοκιμίου. Τέλος, στη βάση της τριαξονικής κυψέλης υπάρχει σύστημα βαλβίδων οι οποίες συνδέονται με τη μονάδα παροχής νερού στο δοκίμιο και την κυψέλη (σχήμα Α2.) και ρυθμίζουν:

- την πλήρωση της κυψέλης με νερό
- τον κορεσμό του δοκιμίου
- την ολίσθηση της τριαξονικής κυψέλης στη βάση της συσκευής στρεπτικής διάτμησης.

Μηχανισμός επιβολής κατακόρυφου φορτίου

Ο μηχανισμός αυτός (σχήμα Α2) λειτουργεί με την διαφορά πίεσης αέρα που διοχετεύεται σε έμβολο το οποίο συνδέεται με τη βοήθεια κοχλιών με το έμβολο φόρτισης της τριαξονικής κυψέλης. Η πίεση αυτή ελέγχεται από την κεντρική μονάδα παροχής αέρα στην οποία θα γίνει αναφορά παρακάτω.

Μηχανισμός επιβολής στρεπτικού φορτίου

Ο μηχανισμός αυτός (σχήμα A7) όπως και ο μηχανισμός επιβολής κατακόρυφου φορτίου λειτουργεί με τη διαφορά πίεσης αέρα που παρέχεται σε έμβολο στην οριζόντια θέση. Η πίεση στο έμβολο ρυθμίζεται μέσω του συστήματος τροφοδότησης και της δεξαμενής εκτόνωσης (relief tank) που βρίσκονται δεξιά της τριαξονικής κυψέλης (σχήμα A3). Το σύστημα τροφοδότησης περιλαμβάνει:

- τη βαλβίδα ενεργοποίησης (actuator drive) που είναι μονίμως στραμμένη στη θέση bal.p.
- το ρυθμιστή (regulator) της δεξαμενής αποτόνωσης (relief tank) ο οποίος καθορίζει την πίεση αέρα που θα μεταφερθεί στο μηχανισμό του εμβόλου επιβολής στρεπτικού φορτίου για τη λειτουργία του.
- τη βαλβίδα primary air pressure. Η βαλβίδα κατά τη διάρκεια της φόρτισης στρέφεται στη θέση EP TRANSDUCER IN, ενώ στο τέλος της δοκιμής στρέφεται στη θέση εκτόνωσης (exhaust).
- το όργανο μέτρησης της πίεσης του αέρα MG-J.

Κεντρική μονάδα παροχής αέρα

Η κεντρική μονάδα παροχής αέρα (σχήματα A2 και A5) όπως υποδηλώνει και η ονομασία της, ελέγχει την παροχή αέρα στα υποσυστήματα της συσκευής. Η μέγιστη πίεση που δύναται να παρέχει η συσκευή είναι της τάξεως των 8 kgf/cm^2 . Η κατανομή της πίεσης του αέρα στα διάφορα υποσυστήματα γίνεται μέσω ρυθμιστών παροχής και βαλβίδων που κατευθύνουν τον αέρα στα σημεία που χρειάζεται.

Μονάδα ηλεκτρονικού ελέγχου

Η μονάδα ηλεκτρονικού ελέγχου (σχήματα A2 και A6) επιβάλλει τον έλεγχο όσον αφορά στον τύπο της φόρτισης που θα επιβληθεί στο δοκίμιο (μονοτονική ή ανακυκλική) καθώς και το ρυθμό με τον οποίο αυτή επιβάλλεται, στο μέγεθος των κατακόρυφων και των

πλευρικών πιέσεων και επικοινωνεί με ηλεκτρονικό υπολογιστή για την καταγραφή των αποτελεσμάτων της πειραματικής δοκιμής.

Μονάδα παροχής νερού

Η συγκεκριμένη μονάδα (σχήμα A7) ρυθμίζει την κίνηση του νερού από και προς την τριαξονική κυψέλη και το εσωτερικό του δοκιμίου. Το νερό χρησιμοποιείται κυρίως για τον κορεσμό του δοκιμίου και την απαέρωση των γραμμών στράγγισης, συνεπώς είναι απαραίτητο να είναι εκ των προτέρων απαερωμένο. Η απαέρωση του νερού γίνεται στη δεξαμενή απαέρωσης (de-aired water tank) μέσω του συστήματος επιβολής αρνητικών πιέσεων (vacuum system) της κεντρικής μονάδας παροχής αέρα. Η δεξαμενή πίεσης του νερού των πόρων (back pressure tank) καθορίζει την πίεση του νερού των πόρων του δοκιμίου, ενώ η δεξαμενή πλευρικής πίεσης (lateral pressure tank) την πλευρική πίεση που εξασκείται στο δοκίμιο.

Η κυκλοφορία απαερωμένου νερού στο εσωτερικό του δοκιμίου επιτυγχάνεται μέσω των βαλβίδων που βρίσκονται στη βάση της μονάδας παροχής νερού και των βαλβίδων στη βάση της τριαξονικής κυψέλης (σχήματα A7 και A2 αντίστοιχα). Κατά τη φάση κορεσμού το νερό της δεξαμενής απαέρωσης διοχετεύεται μέσα από το δοκίμιο και στη συνέχεια καταλήγει στη δεξαμενή κενού (vacuum tank) με τη βοήθεια αρνητικών πιέσεων. Η πλήρωση της τριαξονικής κυψέλης με νερό γίνεται από εξωτερική δεξαμενή απαερωμένου νερού μέσω των βαλβίδων της βάσης της μονάδας παροχής νερού.

Καταγραφή ηλεκτρονικών δεδομένων – Η/Υ

Η συσκευή στρεπτικής διάτμησης κοίλου δοκιμίου του ΕΜΠ είναι μονίμως συνδεδεμένη με Η/Υ ο οποίος διαθέτει κατάλληλο υπολογιστικό πρόγραμμα για την αυτόματη καταγραφή των πειραματικών δεδομένων. Συγκεκριμένα γίνεται καταγραφή του αξονικού φορτίου της πλευρικής πίεσης της κυψέλης, της πίεσης πόρων του δοκιμίου του στρεπτικού φορτίου, της κατακόρυφης μετακίνησης του δοκιμίου, της γωνίας στρέψης και της μεταβολής του όγκου του δοκιμίου (συνολικά επτά κανάλια

πειραματικών δεδομένων). Για την καταγραφή των πειραματικών μετρήσεων και την εμφάνισή τους στην οθόνη του Η/Υ απαιτείται η παρεμβολή ειδικής κάρτας μεταξύ της μονάδας ηλεκτρονικού ελέγχου της συσκευής στρεπτικής διάτμησης και του Η/Υ που μετατρέπει το αναλογικό σήμα σε ψηφιακό. Πρόκειται για δυναμική κάρτα με ταχύτητα καταγραφής 100KS/s (όπου KS συντομογραφία της αγγλικής λέξης kilosamples) η οποία έχει τη δυνατότητα καταγραφής 16 αναλογικών σημάτων με ανεξάρτητη γείωση και με δυνατότητα καταγραφής 16 ψηφίων (bits). Η διακριτότητα (resolution) της κάρτας σε συνδυασμό με τον ηλεκτρικό θόρυβο επιτρέπει τον έλεγχο των τάσεων με ακρίβεια ± 0.5 kPa και του φορτίου με ακρίβεια ± 0.1 Nt. \pm .

Πειραματική διαδικασία

Στις επόμενες παραγράφους συνοψίζεται η πειραματική διαδικασία που ακολουθήθηκε κατά την εκτέλεση των πειραμάτων μονοτονικής και ανακυκλικής στρεπτικής διάτμησης κοίλου δοκιμίου.

Παρασκευή, τοποθέτηση, κορεσμός και ισότροπη στερεοποίηση δοκιμίου

Τα διαδοχικά βήματα που ακολουθούνται έχουν ως εξής:

1. Μετράται το πάχος της εσωτερικής και της εξωτερικής αδιαπέρατης ελαστικής μεμβράνης, μέσα στις οποίες περικλείεται το δοκίμιο. Η εσωτερική μεμβράνη είναι αυτή που τοποθετείται πρώτη στην κυλινδρική βάση του δοκιμίου, ενώ συγκρατείται και στεγανοποιείται εκεί με τη βοήθεια ειδικών ελαστικών δακτυλίων από καουτσούκ.
2. Η κυλινδρική βάση τοποθετείται και βιδώνεται στη βάση της τριαξονικής κυψέλης και εν συνεχεία συνδέονται οι σωληνώσεις που αποτελούν τις γραμμές στράγγισης της βάσης του δοκιμίου. Ακολουθεί η τοποθέτηση και στερέωση της εξωτερικής μεμβράνης με τρόπο όμοιο με την εσωτερική (χρησιμοποίηση δύο στεγανωτικών δακτυλίων).

3. Γύρω από την εξωτερική ελαστική μεμβράνη και μέσα από την εσωτερική κλείνουν ειδικά μεταλλικά καλούπια. Μέσω της μονάδας παροχής αέρα επιβάλλεται αρνητική πίεση της τάξεως των 20 kPa στο κενό μεταξύ της εξωτερικής μεμβράνης και του καλουπιού. Με αυτό τον τρόπο η μεμβράνη αναρροφάται, «κολλάει» στα τοιχώματα και αποκτά την απαιτούμενη κυλινδρική μορφή.
4. Δια μέσου των γραμμών στράγγισης περνάει απιονισμένο και απαερωμένο νερό με το οποίο πληρώνεται ο χώρος του δοκιμίου. Χρησιμοποιώντας χωνί με προσαρτημένο σωλήνα διαμέτρου 1.5cm, αποτίθεται σε υγρή μορφή η άμμος στον ίδιο χώρο ώστε να διασφαλιστεί ο καλύτερος κορεσμός του. Η απόθεση του δείγματος γίνεται από ύψος το οποίο μεταβάλλεται διαρκώς, ούτως ώστε η απόσταση από την επιφάνεια της άμμου που έχει ήδη εναποτεθεί και συνεπώς η ενέργεια πρόσπτωσης να διατηρείται σταθερή. Με αυτόν τον τρόπο εξασφαλίζεται κατά το δυνατό η ομοιομορφία και η επαναληπτικότητα του δοκιμίου. Αυτή η μέθοδος παρασκευής του δοκιμίου προτάθηκε από τους Bishop και Henkel (1957), ονομάζεται «εμβάπτιση στο νερό» (pluviation through water) και είναι κατάλληλη για την παρασκευή χαλαρών δοκιμίων. Δοκίμια πυκνότερης δομής παρασκευάζονται με εναπόθεση όλης της ποσότητας της άμμου ή σε τρεις διαδοχικές στρώσεις και ισόποσα χτυπήματα του εξωτερικού μεταλλικού καλουπιού ανά στρώση. Στη συνέχεια, η κορυφή του δείγματος επιπεδοποιείται, τοποθετείται ειδικό κάλυμμα με άκαμπτο πορώδη δίσκο και συνδέεται η γραμμή στράγγισης της κορυφής του δοκιμίου.
5. Μέσω της γραμμής στράγγισης της κορυφής του δοκιμίου επιβάλλεται στο δοκίμιο αρνητική πίεση της τάξεως των 30 kPa και καταγράφεται η μεταβολή του όγκου του. Η αρνητική πίεση, που ισοδυναμεί με μέση ενεργό τάση $p' = 30\text{kPa}$, προσδίδει αντοχή στο δοκίμιο και καθίσταται δυνατή η αφαίρεση των ειδικών μεταλλικών καλουπιών που το συγκρατούσαν. Μετά την αφαίρεση των ειδικών μεταλλικών καλουπιών μετράται η εξωτερική διάμετρος και το ύψος του δοκιμίου με μηκυσιόμετρο ακρίβειας 0,01 mm. Στη συνέχεια συνδέεται το τμήμα της συσκευής με το οποίο θα επιβληθεί η εξωτερική φόρτιση και ακολουθεί η διέλευση απαερωμένου νερού μέσα από το δοκίμιο (το νερό

- εισέρχεται από τις γραμμές στράγγισης στη βάση του δοκιμίου και εξέρχεται από τη γραμμή στράγγισης στην κορυφή του). Με αυτόν τον τρόπο εξασφαλίζεται ο πλήρης κορεσμός του δοκιμίου και των γραμμών στράγγισης.
6. Τοποθετείται το εξωτερικό περίβλημα της κυψέλης και σφίγγονται όλοι οι κοχλίες, ώστε να επιτευχθεί η στεγάνωση του θαλάμου. Κατόπιν ανοίγεται η βαλβίδα παροχής νερού και γεμίζει ο θάλαμος με νερό.
 7. Ακολουθεί η διαδικασία αύξησης της πλευρικής πίεσης της κυψέλης με ταυτόχρονη ισόποση αύξηση της πίεσης πόρων, ώστε η ενεργός τάση του δοκιμίου να διατηρείται κάθε φορά σταθερή και ίση με 30 kPa. Για τις σειρές πειραμάτων που έγιναν, η τελική τιμή της πλευρικής πίεσης ήταν ίση με 400 kPa ενώ της πίεσης πόρων ίση με 370 kPa. Κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας (αλλά και αργότερα κατά την ισότροπη στερεοποίηση του δοκιμίου) το αξονικό φορτίο διατηρείται σταθερό μέσω της επιβολής πίεσης ισορροπίας. Με τον τρόπο αυτό, η μεταβολή της πίεσης $\Delta\sigma$ επί του δοκιμίου γίνεται ισότροπα.
 8. Για τον έλεγχο του βαθμού κορεσμού του δοκιμίου χρησιμοποιείται η παράμετρος B του Skempton (1954). Κατά τη μέθοδο αυτή, εάν σε ένα πλήρως κορεσμένο εδαφικό στοιχείο ασκηθεί ισότροπα και υπό αστράγγιστες συνθήκες μία μεταβολή τάσης $\Delta\sigma$, τότε σε αυτό αναπτύσσονται υπερπίεσεις πόρων $\Delta u = \Delta\sigma$. Στην περίπτωση που αυτό δεν είναι πλήρως κορεσμένο, αναπτύσσονται υπερπίεσεις πόρων $\Delta u < \Delta\sigma$. Στα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν θεωρήθηκε ότι έχει επιτευχθεί πλήρης κορεσμός του δοκιμίου για τιμές της παραμέτρου B μεγαλύτερες από 0,97, οι οποίες συνήθως προέκυπταν μετά από διάστημα μερικών ωρών από την παρασκευή του δοκιμίου.
 9. Το δοκίμιο στερεοποιείται ισότροπα μεταβάλλοντας την πλευρική πίεση και ταυτόχρονα, μέσω της πίεσης ισορροπίας, την αξονική πίεση και διατηρώντας σταθερή την πίεση πόρων. Στα πειράματα που εκτελέστηκαν η τελική τιμή της μέσης ενεργού τάσης p' έλαβε τιμές από 50 kPa έως 300 kPa.
 10. Μετά την ισότροπη στερεοποίηση ακολουθεί περίοδος ηρεμίας του δοκιμίου διάρκειας 12 ωρών (δευτερεύουσα στερεοποίηση). Η περίοδος αυτή διατηρείται σταθερή για όλα τα δοκίμια, ώστε η ιστορία φόρτισης πριν από τη διάτμηση να είναι κοινή.

11. Την περίοδο ηρεμίας διαδέχεται η διαδικασία φόρτισης του δοκιμίου σε στρέψη. Η φόρτιση του δοκιμίου γίνεται υπό συνθήκες εμποδιζόμενης ή ελεύθερης στράγγισης με τη βοήθεια της βαλβίδας στράγγισης (βαλβίδα specimen low) η οποία παραμένει κλειστή ή ανοιχτή αντίστοιχα. Όλα τα δοκίμια φορτίζονται υπό συνθήκες ελεγχόμενης τάσης (με έλεγχο, δηλαδή, του στρεπτικού φορτίου και όχι της επιβαλλόμενης παραμόρφωσης). Κατά τη διάρκεια της μονοτονικής φόρτισης η διαδικασία τερματίζεται όταν το μέγεθος του στρεπτικού φορτίου φτάσει σε μια ορισμένη τιμή μέχρι την οποία το δοκίμιο έχει επιδείξει τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της συμπεριφοράς του. Κατά την ανακυκλική φόρτιση η διαδικασία για τα πειράματα εμποδιζόμενης στράγγισης τερματίζεται όταν η πίεση πόρων εξισώνεται σχεδόν με την πλευρική πίεση της κυψέλης, ενώ για τα πειράματα ελεύθερης στράγγισης έπειτα από ικανό αριθμό κύκλων φόρτισης.

Φόρτιση του δοκιμίου

Το επόμενο στάδιο μετά την παρασκευή, τον κορεσμό και τη στερεοποίηση του δοκιμίου είναι η φόρτισή του. Όλα τα πειράματα της διπλωματικής εργασίας, μονοτονικά και ανακυκλικά, πραγματοποιήθηκαν μέσω του σερβοελεγκτή EO-290U. Στο Σχήμα A8 παριστάνεται ο σερβοελεγκτής με όλους τους διακόπτες σημειωμένους με την κανονική, αλλά και με κωδική ονομασία, ώστε να είναι πιο εύκολη η αναφορά τους μέσα στο κείμενο. Επίσης, στο σχήμα A9 παρουσιάζεται εκ νέου η γενική όψη της συσκευής στρεπτικής διάτμησης.

- Δοκιμή μονοτονικής στρέψης

Επιλέγεται η ταχύτητα της φόρτισης από την γεννήτρια στατικών συναρτήσεων (slope generator) που βρίσκεται στο κέντρο του σερβοελεγκτή EO-290U. Η ταχύτητα φόρτισης καθορίζεται από τους διακόπτες S3 και S2 (σχήμα A8). Για παράδειγμα, αν ο διακόπτης S2 στραφεί πλήρως δεξιόστροφα (10 πλήρεις στροφές) και ο διακόπτης S3 τοποθετηθεί στη θέση 100 τότε η ταχύτητα φόρτισης είναι 100%/MIN, δηλαδή η ηλεκτρική τάση

μεταβάλλεται με ρυθμό 5V/MIN. Η ταχύτητα σχετίζεται με το μέγεθος (στρεπτικό φορτίο ή γωνία στρέψης) που επιλέγεται από τον διακόπτη T20.

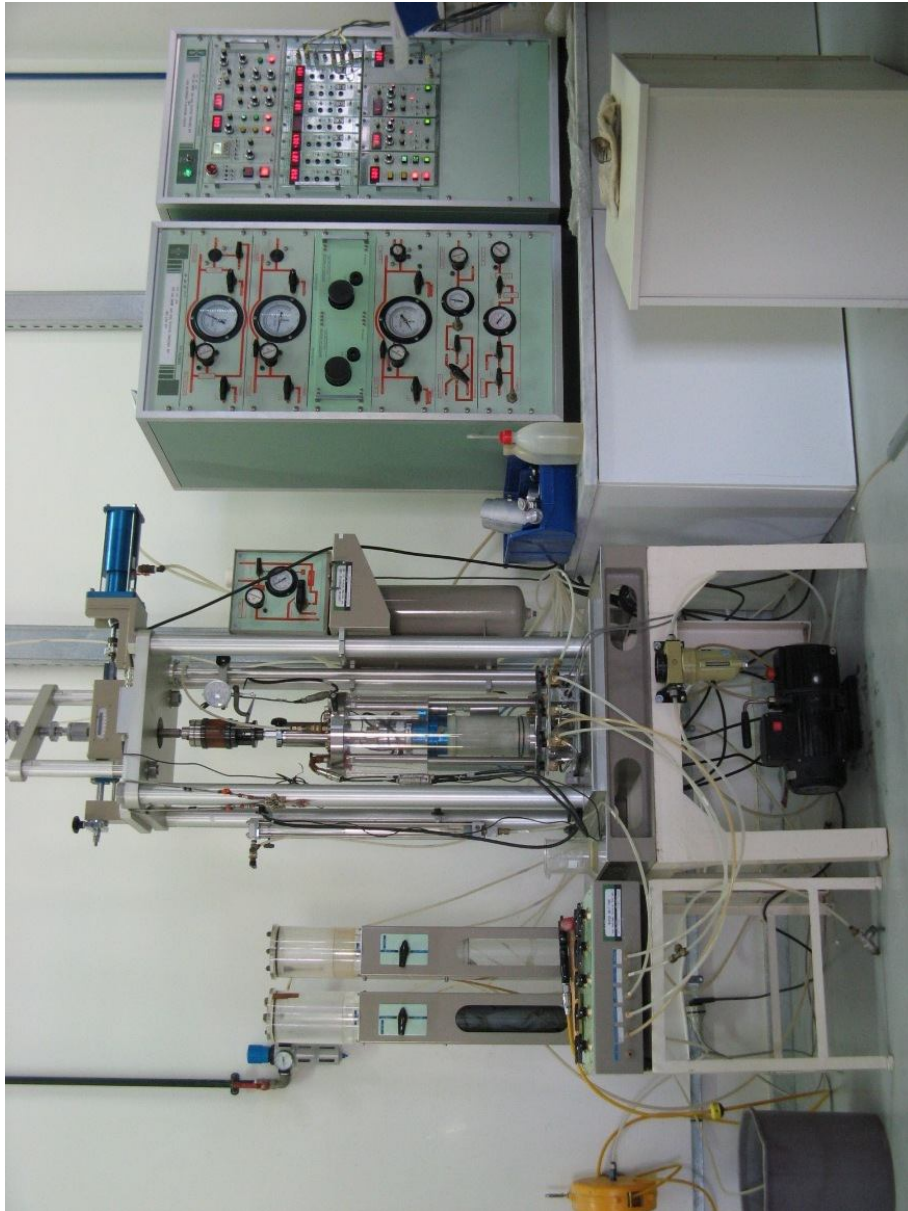
Για να ξεκινήσει η φόρτιση πιέζεται το κουμπί LOAD της γεννήτριας στατικών συναρτήσεων (σχήμα A8). Για να σταματήσει η φόρτιση πιέζεται το κουμπί STOP. Για την αποφόρτιση του δοκιμίου χρησιμοποιείται το κουμπί UNLOAD. Πάντα προηγείται το πάτημα του κουμπιού STOP και μετά του UNLOAD. Τέλος, το κουμπί RESET μηδενίζει απευθείας το επιβαλλόμενο φορτίο.

- Δοκιμή ανακυκλικής στρέψης

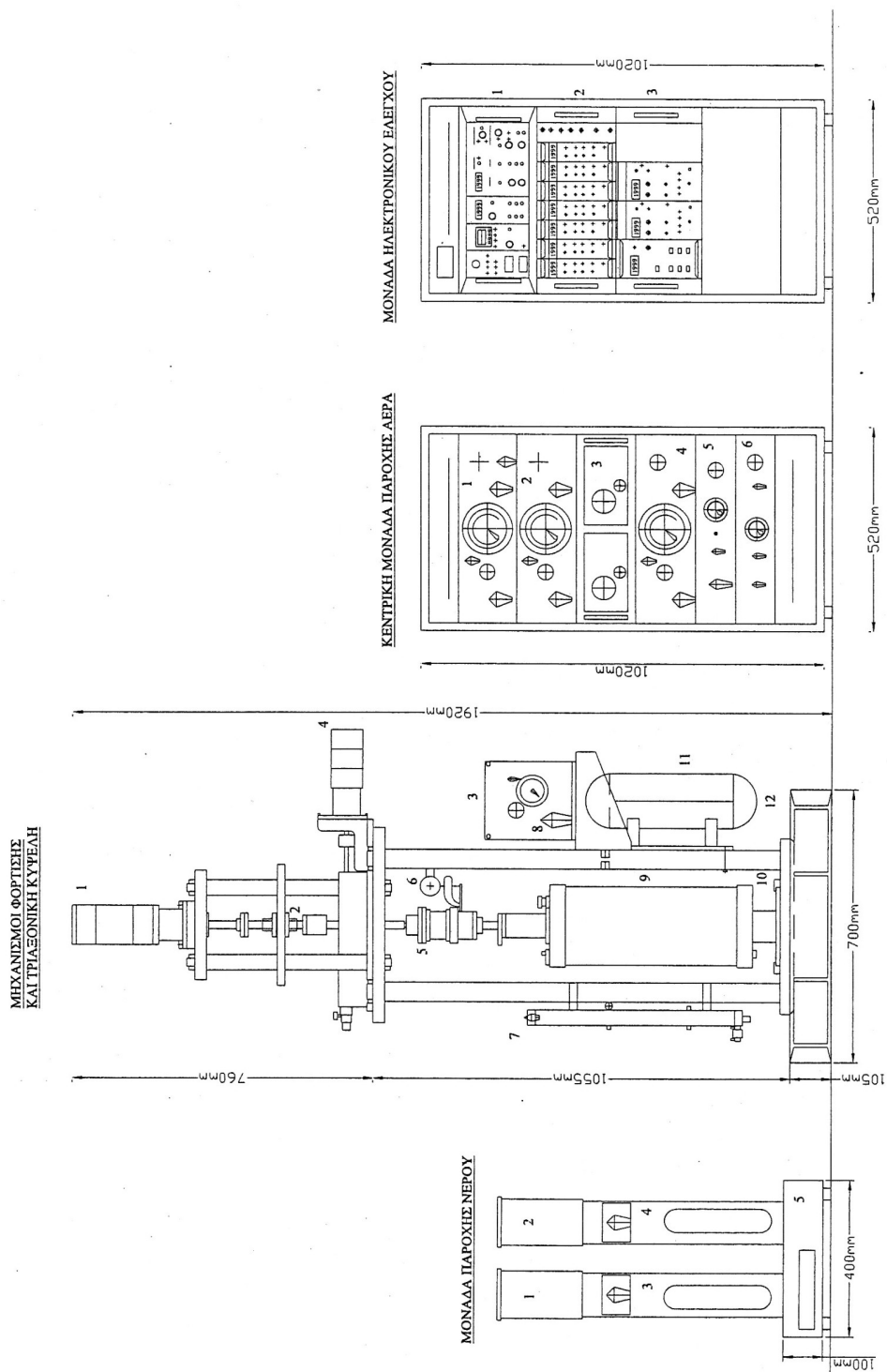
Η επιλογή της κυματομορφής, της συχνότητας του κύματος, καθώς και ο αριθμός των κύκλων φόρτισης γίνεται μέσω της γεννήτριας δυναμικών συναρτήσεων (DYNAMIC FUNCTION GENERATOR) που βρίσκεται στο αριστερό τμήμα του σερβοελεγκτή EO-290U.

- Η επιλογή της συχνότητας γίνεται από τους διακόπτες F8 και F7 (σχήμα A8).
- Η επιλογή της κυματομορφής (μεταξύ ημιτονοειδούς, ορθογωνικής και τριγωνικής) γίνεται μέσω του διακόπτη F3 (σχήμα A8).
- Η επιλογή του αριθμού των κύκλων φόρτισης γίνεται μέσω του preset counter.
- Το εύρος της δυναμικής φόρτισης καθορίζεται από το διακόπτη T26 (σχήμα A8).
- Για να ξεκινήσει η δυναμική φόρτιση πιέζεται το κουμπί T27 (σχήμα A8). Για να σταματήσει η δυναμική φόρτιση πιέζεται το κουμπί T28 (εκτός και αν έχει συμπληρωθεί ο απαιτούμενος αριθμός κύκλων φόρτισης οπότε και σταματάει αυτόματα).

Η διαδικασία που ακολουθείται για την επαναφορά του εμβόλου του μηχανισμού στρεπτικού φορτίου στη θέση του μετά από την μονοτονική ή την ανακυκλική φόρτιση έχει ως εξής: ξεσφίγγονται οι κοχλίες του εμβόλου και στρέφεται ο διακόπτης T10 (σχήμα A8) αριστερόστροφα μέχρι το έμβολο να αρχίσει να μετακινείται από τα αριστερά προς τα δεξιά έως την αρχική του θέση. Τότε μηδενίζεται η ηλεκτρική τάση της σερβοβαλβίδας EP-2 και στη συνέχεια στρέφεται η βαλβίδα V16 αριστερόστροφα (θέση εκτόνωσης).



Σχήμα Α1. Γενική όψη συσκευής στρεπτικής διάτμησης κοίλου δοκιμίου



Σχήμα Α2. Γενική όψη συσκευής στρεπτικής διάτμησης κοίλου δοκιμίου

Συστήματα της συσκευής στρεπτικής διάτμησης κούλου δοκιμίου

(υπόμνημα σχήματος 2)

Η συσκευή στρεπτικής διάτμησης κούλου δοκιμίου όπως φαίνεται και στο Σχήμα Α2. αποτελείται από:

I) Τους μηχανισμούς επιβολής φόρτισης (αξονικής ή στρεπτικής) μαζί με την τριαξονική κυψέλη:

1. Μηχανισμός επιβολής κατακόρυφου φορτίου
2. Σύστημα καθορισμού της θέσης του εμβόλου, που μεταβιβάζει την κατακόρυφη φόρτιση
3. Σύστημα τροφοδότησης για την επιβολή στρεπτικού φορτίου
4. Μηχανισμός επιβολής στρεπτικού φορτίου
5. Μηχανισμός απορρόφησης των κραδασμών
6. Όργανο καταγραφής κατακόρυφων μετακινήσεων με εύρος 200mm
7. Όργανο μέτρησης μεταβολής του όγκου με μέγιστη χωρητικότητα 50ml
8. Βαλβίδα για την τροφοδότηση του συστήματος ενεργοποίησης της στρεπτικής φόρτισης με αέρα
9. Τριαξονική κυψέλη
10. Βάση τριαξονικής κυψέλης
11. Δεξαμενή εκτόνωσης με χωρητικότητα 5lt
12. Βάση της συσκευής

II) Μονάδα παροχής νερού

1. Δεξαμενή απαέρωσης με χωρητικότητα 1lt (όριο αντοχής σε αρνητική πίεση $1 \frac{kgf}{cm^2}$)
2. Δεξαμενή επιβολής αρνητικών πιέσεων με χωρητικότητα 1,5lt (όριο αντοχής σε αρνητική πίεση $1 \frac{kgf}{cm^2}$)

3. Δεξαμενή υποπίεσης με χωρητικότητα 2lt και όριο αντοχής $10 \frac{kgf}{cm^2}$
4. Δεξαμενή πλευρικής πίεσης με χωρητικότητα 2lt και όριο αντοχής $10 \frac{kgf}{cm^2}$
5. Βάση η οποία περιέχει τις βαλβίδες που καθορίζουν την κίνηση του νερού

III) Κεντρική μονάδα παροχής αέρα

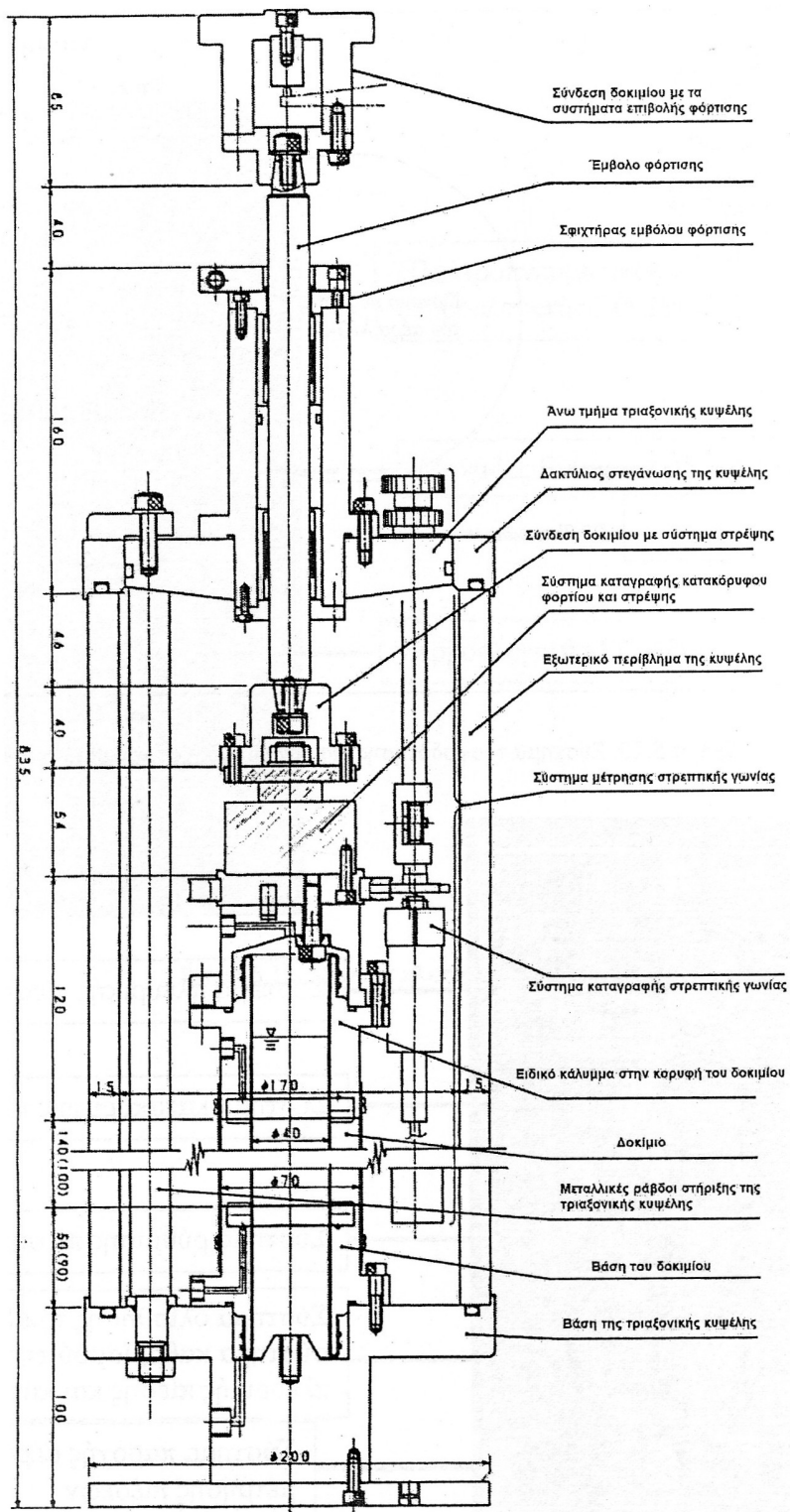
1. Σύστημα πλευρικής πίεσης και υποπίεσης
2. Σύστημα κατακόρυφης πίεσης
3. Σύστημα ρύθμισης πίεσης αέρα
4. Σύστημα ολίσθησης τριαξονικής κυψέλης και σύστημα καθορισμού της σχέσης μεταξύ πλευρικής και κατακόρυφης πίεσης
5. Σύστημα παροχής αέρα και σύστημα μέτρησης πιέσεων
6. Σύστημα επιβολής αρνητικών πιέσεων

IV) Μονάδα ηλεκτρονικού ελέγχου

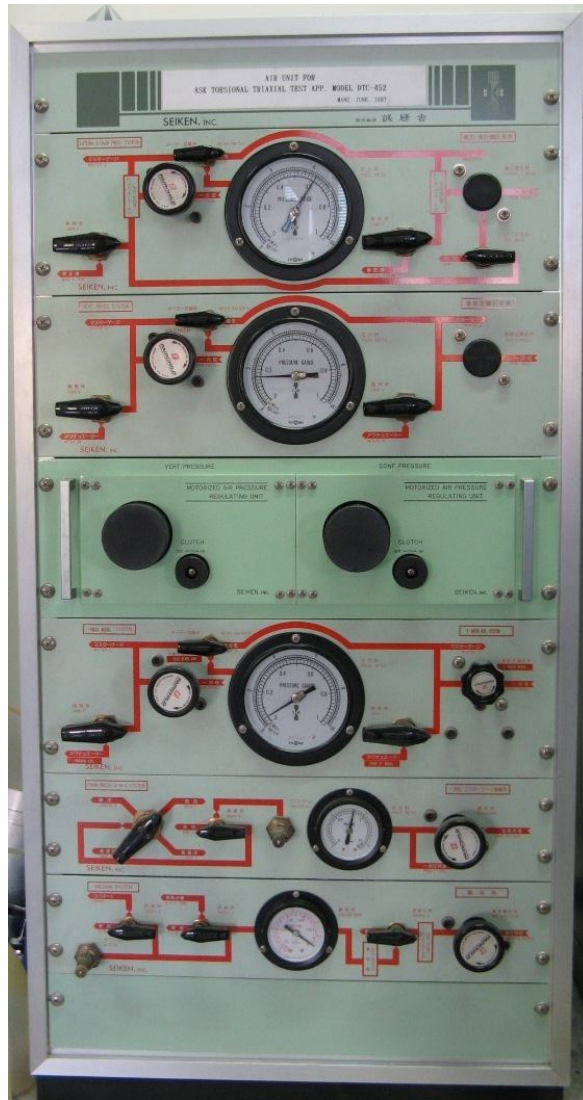
1. Ηλεκτροπνευματικός σερβοελεγκτής EO – 290U
2. Μονάδες ενίσχυσης
3. Σερβοελεγκτής EO- 470U



Σχήμα Α3. Τριαξονική κυψέλη (διακρίνεται στο κέντρο της συσκευής). Δεξιά πάνω βρίσκεται το σύστημα τροφοδότησης για την επιβολή στρεπτικού φορτίου και από κάτω η δεξαμενή εκτόνωσης



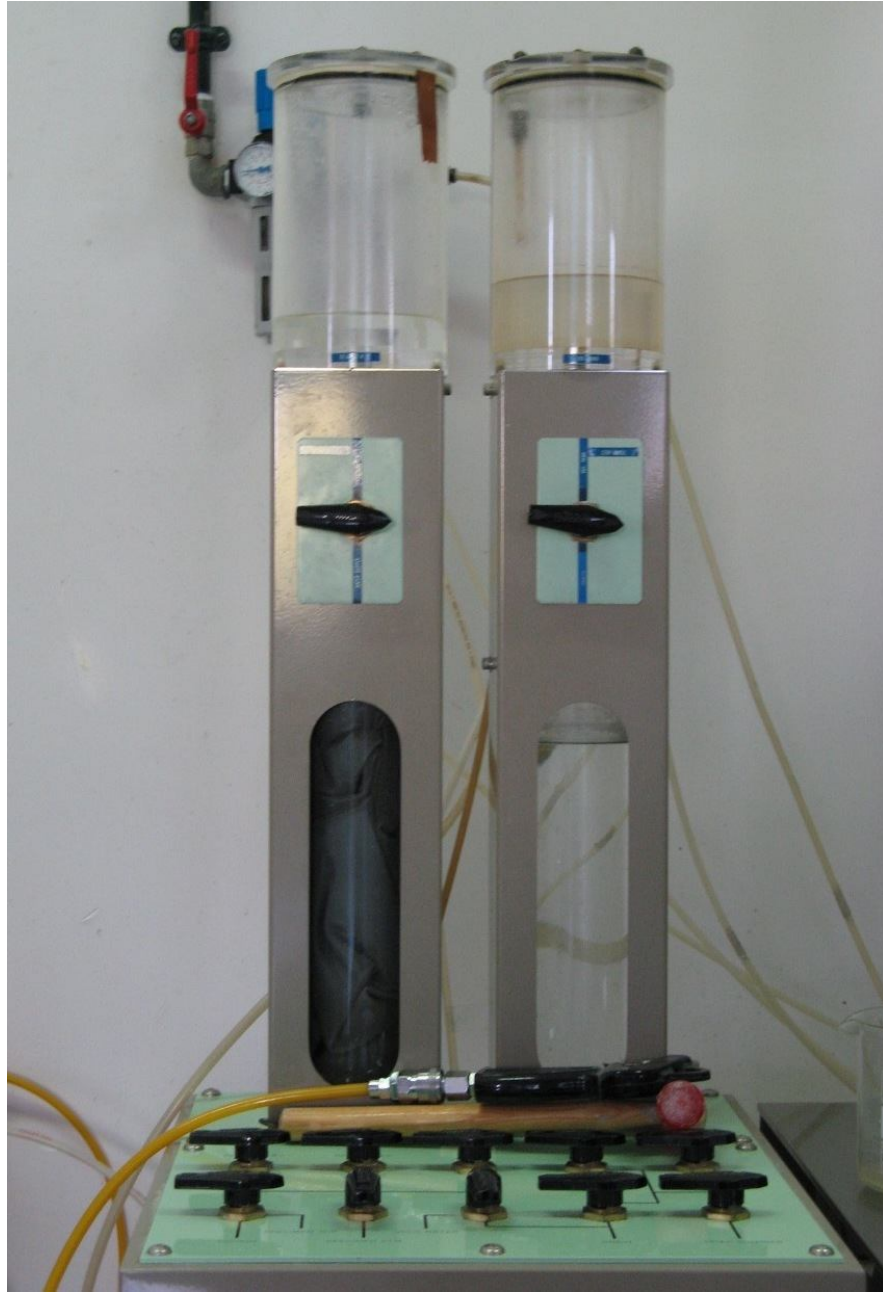
Σχήμα Α4. Τριαξονική κυψέλη (διαστάσεις σε mm)



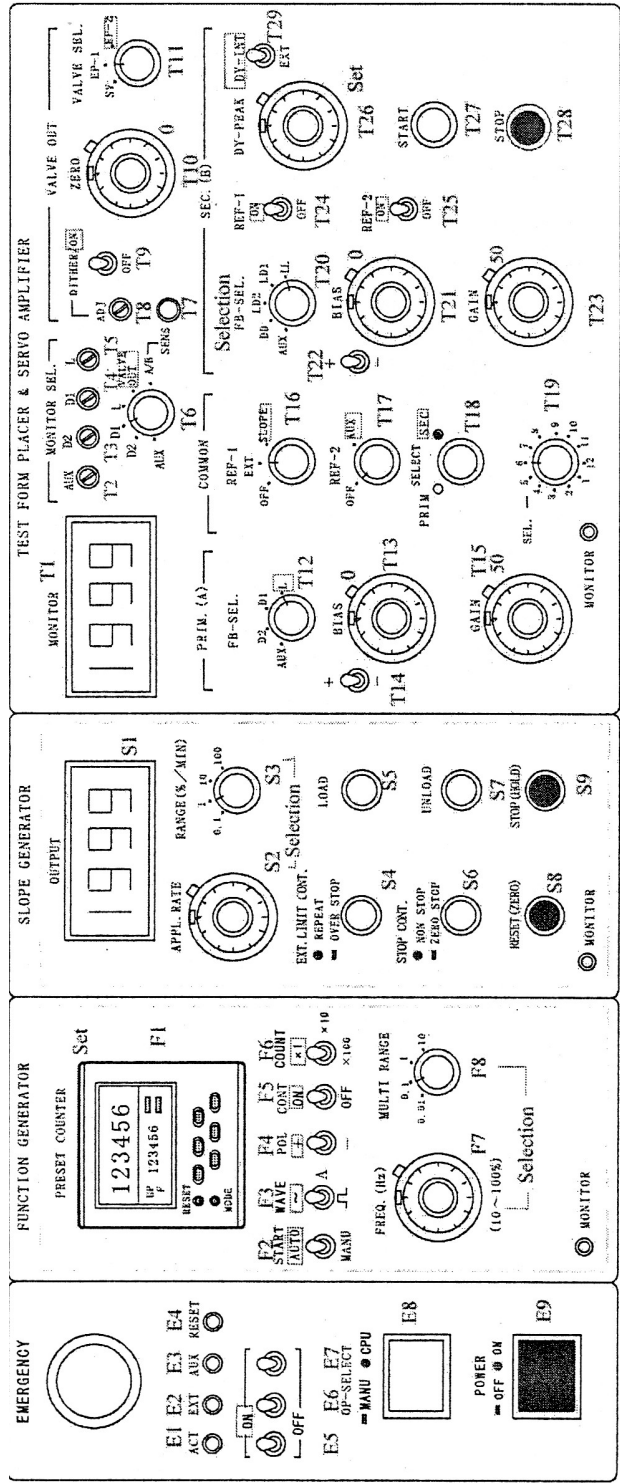
Σχήμα Α5. Κεντρική μονάδα παροχής αέρα



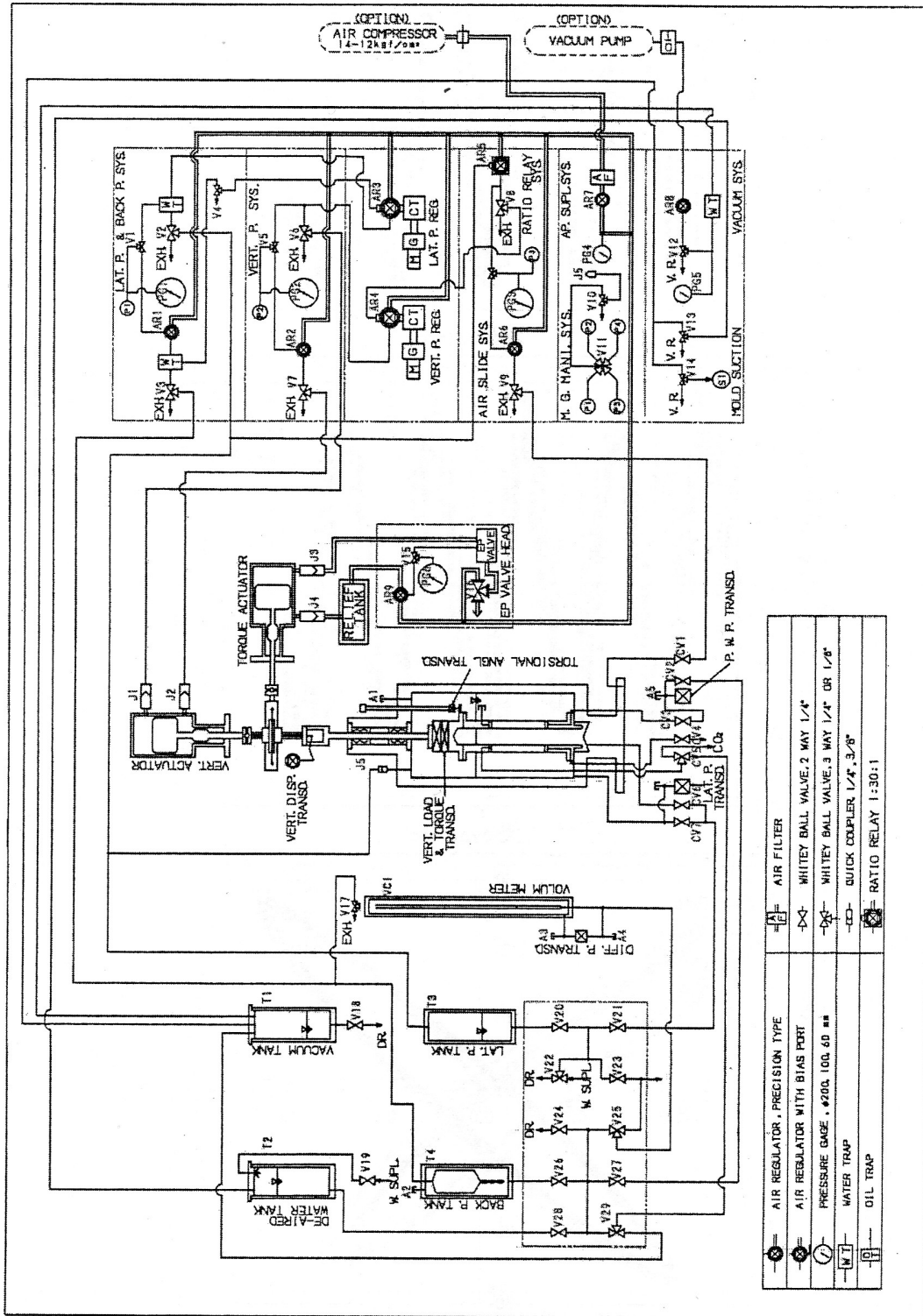
Σχήμα Α6. Μονάδα ηλεκτρονικού ελέγχου



Σχήμα Α7. Μονάδα παροχής νερού



Σχήμα Α8. Διακόπτες σερβοελεγκτή ΕΟ – 290U



Σχήμα Α9. Γενική όψη συσκευής στρεπτικής διάτμησης κώλου δοκιμίου

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

Πίνακες Πειραμάτων

A/A	Φόρτιση	Ποσοστό Ιλύος (%)	Μέση ενεργός τάση (kPa)	Αρχικός δείκτης πόρων	Τελικός δείκτης πόρων	Συνθήκες στράγγισης
1	Μονοτον. στρεπτ. διάτμηση	0	100	0,639	0,632	Εμποδιζόμενη
2	Μονοτον. στρεπτ. διάτμηση	5	100	0,639	0,639	Εμποδιζόμενη
3	Μονοτον. στρεπτ. διάτμηση	15	100	0,724	0,719	Εμποδιζόμενη

Πίνακας Γ.1 Μονοτονικές δοκιμές

A/A	Φόρτιση	Ποσοστό Ιλύος (%)	Μέση ενεργός τάση (kPa)	$\tau_{sa} / \rho' i$	N_{PL}	D_r (%)	Δείκτης πόρων	Συνθήκες στράγγισης
1	Ανακυκλ. στρεπτ. διάτμηση	0	50	0,1415	53	57,04	0,675	Εμποδιζόμενη
2	Ανακυκλ. στρεπτ. διάτμηση	0	50	0,1672	31	66,49	0,643	Εμποδιζόμενη
3	Ανακυκλ. στρεπτ. διάτμηση	0	50	0,1919	8	69,54	0,632	Εμποδιζόμενη
4	Ανακυκλ. στρεπτ. διάτμηση	0	50	0,1447	77	62,50	0,656	Εμποδιζόμενη
5	Ανακυκλ. στρεπτ. διάτμηση	0	50	0,1677	36	61,58	0,659	Εμποδιζόμενη
6	Ανακυκλ. στρεπτ. διάτμηση	0	50	0,1879	6	61,43	0,665	Εμποδιζόμενη
7	Ανακυκλ. στρεπτ. διάτμηση	5	50	0,1572	188	47,09	0,709	Εμποδιζόμενη
8	Ανακυκλ. στρεπτ. διάτμηση	5	50	0,2032	13	47,09	0,719	Εμποδιζόμενη
9	Ανακυκλ. στρεπτ. διάτμηση	5	50	0,2289	20	50,48	0,691	Εμποδιζόμενη
10	Ανακυκλ. στρεπτ. διάτμηση	5	50	0,2990	13	63,14	0,655	Εμποδιζόμενη
11	Ανακυκλ. στρεπτ. διάτμηση	5	50	0,3743	9	65,40	0,649	Εμποδιζόμενη
12	Ανακυκλ. στρεπτ. διάτμηση	5	50	0,4091	13	65,24	0,653	Εμποδιζόμενη
13	Ανακυκλ. στρεπτ. διάτμηση	5	50	0,4384	6	67,60	0,659	Εμποδιζόμενη
14	Ανακυκλ. στρεπτ. διάτμηση	15	50	0,3064	54	49,79	0,702	Εμποδιζόμενη
15	Ανακυκλ. στρεπτ. διάτμηση	15	50	0,3298	31	55,20	0,683	Εμποδιζόμενη
16	Ανακυκλ. στρεπτ. διάτμηση	15	50	0,3844	20	65,84	0,645	Εμποδιζόμενη
17	Ανακυκλ. στρεπτ. διάτμηση	15	50	0,4460	18	62,86	0,664	Εμποδιζόμενη
18	Ανακυκλ. στρεπτ. διάτμηση	15	50	0,4737	6	43,90	0,718	Εμποδιζόμενη
19	Ανακυκλ. στρεπτ. διάτμηση	0	100	0,1535	29	68,60	0,635	Εμποδιζόμενη
20	Ανακυκλ. στρεπτ. διάτμηση	0	100	0,1809	8	65,45	0,646	Εμποδιζόμενη
21	Ανακυκλ. στρεπτ. διάτμηση	0	100	0,1253	112	59,77	0,666	Εμποδιζόμενη
22	Ανακυκλ. στρεπτ. διάτμηση	0	100	0,2078	1	70,84	0,628	Εμποδιζόμενη
23	Ανακυκλ. στρεπτ. διάτμηση	0	100	0,1702	4	61,62	0,659	Εμποδιζόμενη
24	Ανακυκλ. στρεπτ. διάτμηση	0	100	0,1271	50	64,54	0,649	Εμποδιζόμενη
25	Ανακυκλ. στρεπτ. διάτμηση	5	100	0,2668	13	69,90	0,671	Εμποδιζόμενη
26	Ανακυκλ. στρεπτ. διάτμηση	5	100	0,2950	9	67,34	0,667	Εμποδιζόμενη

Πίνακας Γ.2α Ανακυκλικές δοκιμές

27	Ανακυκλ. στρεπτ. διάτμηση	5	100	0,3174	5	52,68	0,698	Εμποδιζόμενη
28	Ανακυκλ. στρεπτ. διάτμηση	5	100	0,3206	5	55,97	0,698	Εμποδιζόμενη
29	Ανακυκλ. στρεπτ. διάτμηση	5	100	0,3485	8	72,74	0,658	Εμποδιζόμενη
30	Ανακυκλ. στρεπτ. διάτμηση	10	100	0,1987	30	45,88	0,721	Εμποδιζόμενη
31	Ανακυκλ. στρεπτ. διάτμηση	10	100	0,2449	6	55,22	0,719	Εμποδιζόμενη
32	Ανακυκλ. στρεπτ. διάτμηση	10	100	0,2700	5	33,30	0,775	Εμποδιζόμενη
33	Ανακυκλ. στρεπτ. διάτμηση	15	100	0,1964	23	48,95	0,716	Εμποδιζόμενη
34	Ανακυκλ. στρεπτ. διάτμηση	15	100	0,2308	30	82,69	0,663	Εμποδιζόμενη
35	Ανακυκλ. στρεπτ. διάτμηση	15	100	0,2318	5	52,14	0,711	Εμποδιζόμενη
36	Ανακυκλ. στρεπτ. διάτμηση	0	300	0,1118	186	71,22	0,626	Εμποδιζόμενη
37	Ανακυκλ. στρεπτ. διάτμηση	0	300	0,1525	13	69,98	0,631	Εμποδιζόμενη
38	Ανακυκλ. στρεπτ. διάτμηση	0	300	0,1744	3	66,61	0,642	Εμποδιζόμενη
39	Ανακυκλ. στρεπτ. διάτμηση	5	300	0,1742	94	67,61	0,654	Εμποδιζόμενη
40	Ανακυκλ. στρεπτ. διάτμηση	5	300	0,2162	11	73,27	0,715	Εμποδιζόμενη
41	Ανακυκλ. στρεπτ. διάτμηση	5	300	0,2212	27	68,35	0,650	Εμποδιζόμενη
42	Ανακυκλ. στρεπτ. διάτμηση	5	300	0,2377	28	73,44	0,631	Εμποδιζόμενη
43	Ανακυκλ. στρεπτ. διάτμηση	5	300	0,2671	19	85,75	0,634	Εμποδιζόμενη
44	Ανακυκλ. στρεπτ. διάτμηση	10	300	0,1656	34	71,33	0,648	Εμποδιζόμενη
45	Ανακυκλ. στρεπτ. διάτμηση	10	300	0,1793	13	51,81	0,716	Εμποδιζόμενη
46	Ανακυκλ. στρεπτ. διάτμηση	10	300	0,2168	11	78,19	0,697	Εμποδιζόμενη
47	Ανακυκλ. στρεπτ. διάτμηση	15	300	0,1755	79	56,30	0,695	Εμποδιζόμενη
48	Ανακυκλ. στρεπτ. διάτμηση	15	300	0,1876	23	61,71	0,686	Εμποδιζόμενη
49	Ανακυκλ. στρεπτ. διάτμηση	15	300	0,1954	17	49,62	0,723	Εμποδιζόμενη
50	Ανακυκλ. στρεπτ. διάτμηση	15	300	0,2145	35	58,43	0,690	Εμποδιζόμενη

Πίνακας Γ.2β Ανακυκλικές δοκιμές