

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΙΣΟΤΡΟΠΑ ΚΑΙ ΑΝΙΣΟΤΡΟΠΑ ΣΤΕΡΕΟΠΟΙΗΜΕΝΟΥ ΚΑΟΛΙΝΗ ΣΕ ΑΞΟΝΟΣΥΜΜΕΤΡΙΚΗ ΦΟΡΤΙΣΗ



DIPLOMA THESIS

BEHAVIOR OF ISOTROPICALLY AND ANISOTROPICALLY CONSOLIDATED KAOLIN CLAY UNDER AXISYMMETRIC TRIAXIAL LOADING CONDITIONS

ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ ΜΥΛΩΝΑΣ-ΡΟΝΤΗΡΗΣ ΕΠΙΒΛΕΠΟΥΣΑ: Β.Ν. ΓΕΩΡΓΙΑΝΝΟΥ, ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ ΕΜΠ

ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΛΙΟΣ 2018

ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΙΣΟΤΡΟΠΑ ΚΑΙ ΑΝΙΣΟΤΡΟΠΑ ΣΤΕΡΕΟΠΟΙΗΜΕΝΟΥ ΚΑΟΛΙΝΗ ΣΕ ΑΞΟΝΟΣΥΜΜΕΤΡΙΚΗ ΦΟΡΤΙΣΗ

Ευχαριστίες

Ολοκληρώνοντας τη διπλωματική μου εργασία, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την κυρία Βασιλική Ν. Γεωργιάννου, Καθηγήτρια της Σχολής Πολιτικών ΕΜΠ, για την ευκαιρία που μου έδωσε να συμμετέχω ενεργά στη διεξαγωγή των εργαστηριακών δοκιμών και για την ουσιαστική της καθοδήγηση στην εκπόνηση της παρούσας εργασίας.

Θα ήθελα, επίσης, να ευχαριστήσω θερμά για την άψογη συνεργασία, τις συμβουλές και τις ευχάριστες στιγμές που περάσαμε όλο αυτό το διάστημα, την υποψήφια διδάκτορα Ελένη-Μαρία Παυλοπούλου και τον τεχνικό του Εργαστηρίου Εδαφομηχανικής κ. Στέλιο Τσεντίδη, καθώς χωρίς τη βοήθειά τους, η ολοκλήρωση της διπλωματικής εργασίας θα ήταν ανέφικτη.

Τέλος, οφείλω ένα μεγάλο "Ευχαριστώ" στους γονείς μου, που με στήριξαν ώστε να ολοκληρώσω τις σπουδές μου και στους φίλους μου που μαζί πορευτήκαμε σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μας στο Πολυτεχνείο.

Περίληψη

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας διερευνήθηκε η μηχανική συμπεριφορά του βιομηχανικού αργιλοπυριτικού ορυκτού καολινίτη. Διενεργήθηκαν δοκιμές θλίψης και εφελκυσμού σε συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης στη συσκευή τριαξονικής φόρτισης. Οι δοκιμές θλίψης εκτελέστηκαν σε ανισότροπα κανονικώς στερεοποιημένα και ισότροπα κανονικώς στερεοποιημένα και υπερστερεοποιημένα δοκίμια. Οι δοκιμές εφελκυσμού αφορούσαν ισότροπα κανονικώς στερεοποιημένα δοκίμια. Παράλληλα, διεξήχθησαν συμπληρωματικές δοκιμές μονοδιάστατης συμπίεσης στο κλασικό συμπιεσόμετρο και υπολογίσθηκαν οι σταθερές της εγγενούς συμπιεστότητας C_c*, C_s* και οι εγγενείς χαρακτηριστικές τιμές του δείκτη πόρων e₁₀₀*, e₁₀₀₀*. Συγκρίνεται η κανονικοποιημένη, με χρήση του δείκτη κενών, Ι_ν, καμπύλη του κανονικώς στερεοποιημένου υλικού με τη Θεωρητική Καμπύλη του Burland. Τα δοκίμια αναζυμωμένου καολινίτη προέρχονται από δείγμα που έχει στερεοποιηθεί αρχικώς σε διάταξη συμπιεσομέτρου διαμέτρου 152mm, μέχρι την τιμή της κατακόρυφης ενεργού τάσης σ_v'=200kPa. Το στάδιο της στερεοποίησης των δοκιμίων στην τριαξονική συσκευή γίνεται είτε με έλεγχο τάσεων είτε με έλεγχο παραμορφώσεων. Κατά την ανισότροπη στερεοποίηση των δοκιμίων επιλέχθηκαν διαφορετικές τιμές του λόγου της ελάχιστης προς τη μέγιστη κύρια ενεργό τάση Κ, με σκοπό τη διερεύνηση της επιρροής του στη συμπεριφορά των δοκιμίων στο στάδιο της διάτμησης. Περιγράφεται λεπτομερώς η διαδικασία υπολογισμού του συντελεστή ουδετέρων ωθήσεων, Κ₀, μέσω της στερεοποίησης των δοκιμίων υπό τον έλεγχο των πλευρικών παραμορφώσεων, στην τριαξονική συσκευή. Κατά την ανάλυση των αποτελεσμάτων των δοκιμών αποτιμάται η συσχέτιση των ογκομετρικών παραμορφώσεων των δοκιμίων με τις αντίστοιχες αξονικές και η επιρροή του λόγου Κ σε αυτή. Στη συνέχεια, αναλύεται εκτενώς η συμπεριφορά των δοκιμίων κατά την τριαξονική θλίψη και τον εφελκυσμό ως προς την επιρροή του λόγου υπερστερεοποίησης στην μέγιστη τιμή του λόγου τάσεων η, στην μεταβολή της πίεσης του νερού των πόρων και στην τάση για μεταβολή του όγκου που εμφανίζουν τα δοκίμια. Συγκρίνεται η συμπεριφορά των ισότροπα στερεοποιημένων δοκιμίων σε εφελκυσμό και θλίψη. Σχεδιάζεται η περιβάλλουσα αστοχίας Mohr-Coulomb για τα κανονικώς στερεοποιημένα και τα υπερστερεοποιημένα δοκίμια και υπολογίζεται η γωνία διατμητικής αντοχής φ και η συνοχή c. Υπολογίζονται οι παράμετροι τις Κρίσιμης Κατάστασης Μ, λ, Γ από τις δοκιμές των κανονικώς στερεοποιημένων δοκιμίων και προσδιορίζεται η συνολική περιβάλλουσα αστοχίας Roscoe-Hvorslev. Τέλος, στο πλαίσιο της Κρίσιμης Κατάστασης συγκρίνεται η συμπεριφορά ισότροπα και ανισότροπα στερεοποιημένων δοκιμίων καολινίτη.

Abstract

In the context of this diploma thesis, the mechanical behavior of the industrial mineral kaolin clay is investigated. Undrained compression and extension tests were performed in the triaxial apparatus. Compression tests were carried out on anisotropically normally consolidated and isotropically normally consolidated and overconsolidated samples. Extension tests were performed only on isotropically normally consolidated specimens. At the same time, additional one-dimensional compression tests were conducted in the standard oedometer apparatus, in order to determine the intrinsic compression properties C_c^* , C_s^* , e_{100}^* , e_{1000}^* of kaolin. The one-dimensional compression line, normalized with respect to the void index, Iv, is being compared to Burland's Intrinsic Compression Line. Reconstituted kaolin specimens were handtrimmed in the lathe from a sample that has initially been consolidated in a 152mm diameter consolidometer, to vertical effective stress of σ_v '=200kPa. Consolidation of the specimens in the triaxial apparatus is conducted under either stress or strain control. During anisotropic consolidation, different values of the stress ratio K were applied, in order to investigate the influence of consolidation stress ratio on the behavior of the specimens during the shearing stage. The correlation between volumetric and axial strains is also assessed in the constant K tests. Furthermore, K₀ tests performed in the triaxial apparatus with the aid of a lateral strain belt are described in detail. The behavior of the specimens during triaxial compression and extension tests is analyzed and discussed in detail, with respect to the influence of the overconsolidation ratio on the maximum value of stress ratio η , the pore pressure change and the volume change tendency of the specimens. The behavior of the isotropically consolidated samples during compression and extension is compared. The Mohr-Coulomb envelope is designated for normally consolidated and overconsolidated specimens and the peak friction angle, ϕ , and cohesion, c, are determined. Critical State parameters M, λ , Γ are specified from the tests on normally consolidated samples and the Roscoe-Hvorslev State Boundary Surface is designated. Finally, the response of kaolin after isotropic and anisotropic consolidation is examined within the framework of Critical State soil mechanics theory.

Περιεχόμενα

1	Ειδαίδια ματαγραφικά ματαγραφικά ματαγραφικά ματαγραφικά ματαγραφικά ματαγραφικά ματαγραφικά ματαγραφικά ματαγρ						
2	ΘεΩρητικά στοιχεία						
	2.1	Αργιλικά	ι εδάφη				
	2.2	2 Το αργιλικό ορυκτό καολινίτης					
	2.3	Ο ρόλος του νερού					
	2.4	Αναζυμω	Αναζυμωμένες ἀργιλοι6				
	2.5	Θεωρία κρίσιμης κατάστασης					
	2.6	Επιφάνε	a Roscoe	10			
	2.7	Επιφάνεια Hvorslev					
3	Ерг	ΆΣΤΗΡΙΑ	κές δοκιμές	15			
	3.1	Προσδιο 3.1.1	ρρισμός ειδικού βάρους Εισαγωγή	15 15			
		3.1.2	Πειραματική διαδικασία	15			
	3.2	Προσδιο 3.2.1	ρρισμός ορίων Atterberg Εισαγωγή				
		3.2.2	Πειραματικός προσδιορισμός ορίου υδαρότητας				
		3.2.3	Πειραματικός προσδιορισμός ορίου πλαστιμότητας	20			
		3.2.4	Κατάταξη του υλικού με βάση τα όρια Atterberg	21			
	3.3	Διαδικασία παρασκευής αναζυμωμένων δοκιμίων					
	3.4	Δοκιμή α 3.4.1	συμπιεσομέτρου Εισαγωγή	24 24			
		3.4.2	Πειραματική διαδικασία	25			
		3.4.3	Επεξεργασία μετρήσεων	27			
	3.5	Δокіµή т 3.5.1	τριαξονικής κυλινδρικής φόρτισης Εισαγωγή	29 29			
		3.5.2	Περιγραφή της συσκευής	29			
		3.5.3	Πειραματική διαδικασία	32			
		3.5.4	Επεξεργασία δεδομένων-Υπολογισμοί	40			
4	Апс	ΟΤΕΛΕΣΜ	ΑΤΑ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ	43			
	4.1	Αποτελέ	σματα δοκιμών συμπιεσομέτρου	43			

4.2	Αποτελέα 4.2.1	σματα δοκιμών τριαξονικής φόρτισης Εισαγωγή	49 49			
	4.2.2	Στερεοποίηση των δοκιμίων	50			
	4.2.3	Δοκιμές τριαξονικής θλίψης με εμποδιζόμενη στράγγιση σε	ισότροπα			
στερεοπο	οιημένα δ	οκίμια	67			
	4.2.4	Δοκιμές τριαξονικής θλίψης με εμποδιζόμενη στράγγιση σε ανισότροπα	κανονικώς			
στερεοπο	οιημένα δ	οκίμια	86			
	4.2.5	Δοκιμές τριαξονικού εφελκυσμού με εμποδιζόμενη στράγγιση σε	ισότροπα			
κανονικώς στερεοποιημένα δοκίμια						
	4.2.6	Σύγκριση αποτελεσμάτων				
	4.2.7	Προσδιορισμός τέμνοντος μέτρου εδαφικής δυστροπίας (E _{sec})				
5 ΣΥΜ	1ΠΕΡΑΣΜ/	ΔΤΑ	111			
Βιβλιοι	ГРАФІА		115			
Парарт	НМА		117			

1 ΕιΣΑΓΩΓΗ

Η ανάγκη για βαθύτερη κατανόηση της μηχανικής συμπεριφοράς των εδαφικών υλικών και των μηχανισμών αστοχίας που διέπουν αυτή τη συμπεριφορά σε καθεστώς μεγάλων παραμορφώσεων οδηγεί τη συνεχώς εξελισσόμενη επιστήμη της πειραματικής εδαφομηχανικής. Η σύγχρονη τεχνολογία δίνει τη δυνατότητα στους ερευνητές να διεξάγουν όλο και πιο σύνθετες δοκιμές που προσομοιώνουν πολύπλοκες εντατικές καταστάσεις με συνεχώς αυξανόμενη ακρίβεια στα αποτελέσματα. Έτσι, μπορούν να εξάγονται ασφαλέστερα συμπεράσματα για τα προβλήματα που άπτονται του ενδιαφέροντος του Μηχανικού.

Μια εργαστηριακή δοκιμή που κυριαρχεί σε πολλές δημοσιευμένες μελέτες και άρθρα του κλάδου της πειραματικής εδαφομηχανικής είναι αυτή της κυλινδρικής τριαξονικής φόρτισης. Η δοκιμή αυτή δίνει τη δυνατότητα προσέγγισης, σε σημαντικό βαθμό, των συνθηκών που επικρατούν στη φύση και καθορίζουν τη συμπεριφορά των εδαφικών υλικών.

Γύρω από αυτή συγκεκριμένα τη δοκιμή, και πάνω σε εφαρμογές της σε ότι αφορά τα στάδια της στερεοποίησης των δοκιμίων και έπειτα της υποβολής τους σε τριαξονική θλίψη ή εφελκυσμό, περιστρέφεται το ενδιαφέρον της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Σκοπός της εκπόνησής της δεν είναι μόνο η εξαγωγή συμπερασμάτων που αφορούν τα μηχανικά χαρακτηριστικά του υπό εξέταση εδαφικού υλικού αλλά κυρίως η εξοικείωση του φοιτητή με τις εργαστηριακές δοκιμές, η εμβάθυνση σε έννοιες που διδάχθηκαν στα προηγούμενα έτη του προγράμματος σπουδών και η διεύρυνση των γνώσεων σχετικά το αντικείμενο της εδαφομηχανικής.

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελείται από πέντε κεφάλαια τα οποία αναλύονται συνοπτικά στις παρακάτω παραγράφους.

Το *Κεφάλαιο 2* περιλαμβάνει μια βιβλιογραφική επισκόπηση για τα αργιλικά εδάφη και πιο συγκεκριμένα για το αργιλικό ορυκτό καολινίτης καθώς και για τον σπουδαίο ρόλο που

διαδραματίζει η αλληλεπίδραση του νερού των πόρων με τα εδαφικά στοιχεία. Επίσης, διατυπώνονται οι βασικές έννοιες που αφορούν τα αναζυμωμένα υλικά και τη Θεωρία Κρίσιμης Κατάστασης (τρισδιάστατη αναπαράσταση της καμπύλης κρίσιμης κατάστασης και επιφάνειες Roscoe-Hvorslev)

Στο *Κεφάλαιο 3* περιγράφονται αναλυτικά οι εργαστηριακές δοκιμές που διεξήχθησαν στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Συγκεκριμένα, αναλύεται η δοκιμή προσδιορισμού του ειδικού βάρους των στερεών κόκκων, G_s, του υπό εξέταση υλικού, οι δοκιμές προσδιορισμού των ορίων Atterberg, η δοκιμή συμπιεστότητας και η υπολογιστική διαδικασία με την οποία έγινε η επεξεργασία των μετρήσεων και η δοκιμή κυλινδρικής τριαξονικής φόρτισης με αναλυτική περιγραφή όλων των σταδίων (κορεσμού, στερεοποίησης, διάτμησης) και των αντίστοιχων υπολογισμών.

Στο *Κεφάλαιο 4* παρουσιάζονται και αναλύονται τα αποτελέσματα των δοκιμών μονοδιάστατης συμπίεσης, προσδιορίζονται οι εγγενείς σταθερές συμπιεστότητας και συγκρίνεται η καμπύλη μονοδιάστατης συμπίεσης του αναζυμωμένου καολινίτη με τη Θεωρητική Καμπύλη του Burland. Στη συνέχεια, παρατίθενται τα αποτελέσματα των τριαξονικών δοκιμών και αναλύεται η συμπεριφορά των δοκιμίων κατά τα στάδια της στερεοποίησης και της διάτμησης. Παρατίθεται η μεθοδολογία και τα αποτελέσματα από τη δοκιμή προσδιορισμού του συντελεστή ουδετέρων ωθήσεων, Κ₀, με έλεγχο των πλευρικών παραμορφώσεων του δοκιμίου. Στο στάδιο της διάτμησης συγκρίνεται η συμπεριφορά που παρουσιάζουν τα δοκίμια ανάλογα με τη μέθοδο στερεοποίησης τους αλλά και ως προς το λόγο υπερστερεοποίησης, OCR. Τέλος, γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων από τις δοκιμές εφελκυσμού και θλίψης, σε ισότροπα στερεοποιημένα δοκίμια με ίδιες αρχικές ενεργές τάσεις στο στάδιο της διάτμησης, ενώ τα αποτελέσματα των δοκιμών εφελκυσμού συγκρίνονται και με τα αντίστοιχα αποτελέσματα που αφορούν σε δοκιμές σε ανισότροπα στερεοποιημένα δοκίμια ΠΟυ έχουν διενεργηθεί παλαιότερα στο Εργαστήριο Εδαφομηχανικής.

Στο *Κεφάλαιο 5* παρατίθενται τα συμπεράσματα που εκπορεύονται από την ανάλυση των αποτελεσμάτων που πραγματοποιήθηκε στο *Κεφάλαιο 4.*

2

2 ΘεΩΡΗΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

2.1 Αργιλικά εδάφη

Τα αργιλικά εδάφη είναι λεπτόκοκκα εδάφη της ευρύτερης οικογένειας των ιζηματογενών εδαφών. Το κύριο κλάσμα τους έχει μέγεθος μικρότερο από 2μm (σύνηθες όριο) ενώ ο σχηματισμός τους οφείλεται στη χημική αποσάθρωση των πετρωμάτων και γι' αυτό τα σωματίδια των αργιλικών ορυκτών έχουν συνήθως διαφορετική χημική σύσταση από αυτή του πρωτογενούς ορυκτού. Ωστόσο, αργιλικά ορυκτά μπορούν να παρασκευαστούν και με εργαστηριακή σύνθεση.

Χαρακτηριστικό γνώρισμα των τυπικών αργιλικών εδαφών είναι ότι το λεπτόκοκκο κλάσμα τους αποτελείται από αργιλικά ορυκτά όπως ο μοντμοριλλονίτης, ο ιλλίτης, ο καολινίτης κ.α. Αυτά με τη σειρά τους δομούνται, κατά κανόνα, από φύλλα αργιλοπυριτικών αλάτων τα οποία πολλές φορές σχηματίζουν στιβάδες με σχήματα πλακών, νιφάδων, ράβδων ή σωλήνων. Οι στιβάδες αυτές αποτελούν τα κύρια εδαφικά στοιχεία αυτού του είδους των εδαφών και στο εξής θα αναφέρονται ως αργιλικά πλακίδια.

Τα αργιλικά πλακίδια έχουν διαστάσεις που συνήθως διαφέρουν πολύ μεταξύ τους. Συγκεκριμένα η διάμετρος ενός τέτοιου πλακιδίου μπορεί να είναι τουλάχιστον μια τάξη μεγέθους μεγαλύτερη από το πάχος του. Ως εκ τούτου, τα αργιλικά πλακοειδή στοιχεία για δεδομένη μάζα καλύπτουν πολύ μεγάλη επιφάνεια. Έτσι, λέμε ότι τα αργιλικά πλακίδια διαθέτουν μεγάλη ειδική επιφάνεια, που ορίζεται ως το συνολικό εμβαδόν της επιφάνειάς τους ανηγμένο στη μάζα τους. Για παράδειγμα, ενώ ένας κόκκος άμμου έχει ειδική επιφάνεια της τάξεως των 10⁻⁴ m²/g, το πλακίδιο του μοντμοριλλονίτη διαθέτει ειδική επιφάνεια 800 m²/g (Γκαζέτας, 2012). Η ιδιότητά τους αυτή καθορίζει σε μεγάλο βαθμό τη μηχανική συμπεριφορά ενός αργιλικού εδάφους.

Ένα επίσης πολύ σημαντικό χαρακτηριστικό των πλακοειδών αυτών στοιχείων είναι οι ηλεκτρικά φορτισμένες επιφάνειές τους. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.1 οι άνω και κάτω

μεγάλες επιφάνειες φέρουν αρνητικά φορτία ενώ οι μικρότερες πλαϊνές φέρουν ίσα και αντίθετα θετικά.



Σχήμα 2.1: Οι ηλεκτρικά φορτισμένες επιφάνειες του αργιλικού πλακιδίου (Καββαδάς, 2009)

Έτσι, εκτός από τις δυνάμεις βαρύτητας που είναι ανάλογες της μάζας των πλακιδίων, λαμβάνουν χώρα και επιφανειακές ηλεκτρικές δυνάμεις (έλξης και άπωσης) οι οποίες μάλιστα πολλές φορές υπερισχύουν επειδή τα πλακίδια έχουν μεγάλη ειδική επιφάνεια και η ένταση αυτών των δυνάμεων είναι αρκετές τάξεις μεγέθους ισχυρότερη απ' αυτή των δυνάμεων βαρύτητας. Τα παραπάνω οδηγούν στο συμπέρασμα ότι η διάταξη των πλακιδίων καθορίζει εν τέλει και τη μηχανική συμπεριφορά του εδαφικού σχηματισμού αφού μπορεί να οδηγήσει στην υπερίσχυση της μεταξύ τους άπωσης ή έλξης.

2.2 Το αργιλικό ορυκτό καολινίτης

Ο καολινίτης αποτελεί μια υποκατηγορία αργιλοπυριτικών ορυκτών με γενικό τύπο (OH)₈Si₄Al₄O₁₀. Σε αυτή εκτός από το ομώνυμο ορυκτό εμπεριέχονται και ο δικίτης, ο νακρίτης και ο αλλουσίτης. Πήρε το όνομά του από την περιοχή "Kao ling", που σημαίνει "ψηλό βουνό" και βρίσκεται στην επαρχία Jiangxi της Κίνας, όπου χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά κατά τον 3ο αιώνα μ.Χ. (Κατερινόπουλος, και συν., 1995).

Αποτελεί ένα πολύ συνηθισμένο αργιλοπυριτικό ορυκτό σε ότι αφορά τα ενδιαφέροντα του πολιτικού μηχανικού, ωστόσο σπάνια απαντάται σε καθαρή μορφή. Συνήθως, στα πρωτογενή κοιτάσματα εμπεριέχεται σε ποσοστά από 10 έως 60%. Στη στρωματογραφία του εδάφους συνήθως σχηματίζει "φακούς" ή ασυνεχή στρώματα, με σύνηθες πάχος περί τα 30m, μεταξύ παχύτερων στρωμάτων. Το ξηρό υλικό είναι εύθρυπτο με λεία υφή και λευκό χρώμα. Όταν αναμιχθεί με το νερό μαλακώνει και παρουσιάζει πλαστική συμπεριφορά για μικρές υγρασίες ενώ για ποσοστά υγρασίας άνω του 60-70% αποκτά τη μορφή παχύρευστου υγρού.

Τα δομικά στοιχεία του καολινίτη έχουν σχήμα εξάπλευρων νιφάδων με διαστάσεις περί τα 0.1-4μm x 0.05-2μm και πάχος 7.37Å. Η ειδική τους επιφάνεια ποικίλλει μεταξύ 10 και 20 m²/g, ενώ η πυκνότητα τους κυμαίνεται μεταξύ 2.60 και 2.68 t/m³ (Mitchell, 1976).

2.3 Ο ρόλος του νερού

Όπως είναι γνωστό, το έδαφος αποτελεί ένα μίγμα τριών φάσεων καθώς μεταξύ των κόκκων του δημιουργούνται κενά τα οποία στις περισσότερες περιπτώσεις πληρούνται από νερό και αέρα. Αυτή η συνύπαρξη γίνεται ακόμα πιο ιδιαίτερη στα αργιλικά εδάφη αν αναλογιστεί κανείς τις παραπάνω ιδιότητες των αργιλικών πλακιδίων σε σχέση και με τις ιδιότητες του νερού. Συγκεκριμένα, τα μόρια του νερού έχουν την ιδιότητα να λειτουργούν ως δίπολα, δηλαδή ως μόρια στα οποία υπάρχει σαφής μετατόπιση του αρνητικού φορτίου στα εντόνως ηλεκτραρνητικά άτομα οξυγόνου, με αποτέλεσμα το θετικό φορτίο να εντοπίζεται στο άτομο του υδρογόνου. Για το λόγο αυτό, τα ηλεκτρικά δίπολα του νερού έχουν την τάση να έλκονται από τις φορτισμένες επιφάνειες των πλακιδίων και να συνδέονται ισχυρά με αυτές ως "ένα σώμα".

Ο μεγαλύτερος αριθμός προσροφημένων μορίων εντοπίζεται, όπως είναι λογικό, στις αρνητικά φορτισμένες μεγάλες επιφάνειες των πλακιδίων δημιουργώντας ένα "ενιαίο" στρώμα νερού. Αυτό καλείται διπλό στρώμα νερού καθώς δημιουργείται και στις δύο μεγάλες επιφάνειες του πλακιδίου. Το πάχος του δεν είναι πάντα σαφές, ωστόσο το προσροφημένο νερό παρουσιάζει διαφορετικές ιδιότητες από αυτές του ελεύθερου νερού (π.χ. μεγαλύτερη πυκνότητα) σε απόσταση μικρότερη από 1nm από τη φορτισμένη επιφάνεια του πλακιδίου. Έξω απ' αυτό το στρώμα καθώς η έλξη των μορίων γίνεται όλο και ασθενέστερη, αυτά τείνουν να συμπεριφέρονται σαν ελεύθερα μόρια νερού. Η αύξηση της θερμοκρασίας ελαττώνει την πυκνότητα του διπλού στρώματος που περιβάλλει το πλακίδιο, καθώς όλο και περισσότερα μόρια νερού τείνουν να μεταβούν στην αέρια φάση. Αυτό συμβαίνει έως τους 110°C, καθώς από εκεί και πέρα η απώλεια νερού είναι αμελητέα, ενώ ακόμα και σε υψηλότερες θερμοκρασίες παραμένει κάποια μικρή ποσότητα νερού προσροφημένη στην επιφάνεια των πλακιδίων (Παπαχαρίσης, και συν., 2003).

2.4 Αναζυμωμένες άργιλοι

Για την πειραματική διαδικασία της παρούσας διπλωματικής εργασίας χρησιμοποιήθηκαν αναζυμωμένα δοκίμια από ορυκτό καολινίτη (για λεπτομέρειες σχετικά με την παρασκευή του υλικού των δοκιμών βλ. Ενότητα 3.3). Γι' αυτό κρίνεται σκόπιμο να διατυπωθούν κάποια βασικά στοιχεία που αφορούν τις αναζυμωμένες αργίλους και τις ιδιότητές τους.

Σύμφωνα με τον Burland (Burland, 1990), αναζυμωμένες άργιλοι θεωρούνται αυτές οι οποίες έχουν αναμιχθεί σχολαστικά με νερό μέχρι το ποσοστό υγρασίας τους να είναι ίσο ή μεγαλύτερο από το όριο υδαρότητας w_L. Ο ίδιος προτείνει ποσοστά υγρασίας για το αναζυμωμένο αργιλικό μίγμα που κυμαίνονται μεταξύ w_L και 1.5w_L (ιδανικά 1.25w_L). Το υλικό που θα χρησιμοποιηθεί θα πρέπει να αναμιχθεί κατευθείαν με νερό χωρίς να προηγηθεί φυσική ξήρανσή του ή ξήρανση σε κλίβανο. Ιδανικά, το νερό του μίγματος θα πρέπει να είναι όμοιο με αυτό που υπάρχει στην τοποθεσία απ' όπου λήφθηκε το εδαφικό δείγμα. Αφού ολοκληρωθεί η διαδικασία της ανάμιξης προτείνεται η στερεοποίηση του δοκιμίου σε συνθήκες μονοδιάστατης συμπίεσης έως την επιθυμητή αρχική ενεργό τάση.

Οι ιδιότητες των αργιλικών υλικών που έχουν μορφωθεί σύμφωνα με την παραπάνω διαδικασία ονομάζονται εγγενείς και όπως τα όρια Atterberg αποτελούν χαρακτηριστικές ιδιότητες του υλικού και όχι της κατάστασης στην οποία αυτό απαντάται στη φύση. Έτσι, για να είναι σαφής ο διαχωρισμός μεταξύ των ιδιοτήτων της φυσικής και της αναζυμωμένης αργίλου, όταν συμβολίζουμε εγγενείς ιδιότητες χρησιμοποιούμε τον αστερίσκο (*). Για παράδειγμα ο δείκτης της εγγενούς συμπιεστότητας και η εγγενής γωνία εσωτερικής τριβής συμβολίζονται ως C_c* και φ* αντίστοιχα.

Οι δοκιμές σε αναζυμωμένα δοκίμια έχουν μεγάλη σημασία σε ότι αφορά την κατανόηση της συμπεριφοράς των φυσικών εδαφών. Η απουσία φυσικής εδαφικής δομής (που αφορά τόσο τη γεωμετρική διάταξη των σωματιδίων όσο και τις μεταξύ τους ασκούμενες δυνάμεις) στα αναζυμωμένα δοκίμια, μας βοηθά να κατανοήσουμε το βαθμό στον οποίο αυτή επηρεάζει τις μηχανικές ιδιότητες των εξεταζόμενων υλικών στη φυσική τους κατάσταση (π.χ. την αντοχή, τη συμπιεστότητα κ.α.). Έτσι, συνήθως, μια πλήρης μελέτη

6

σε ότι αφορά τη διερεύνηση των παραμέτρων ενός υλικού περιλαμβάνει πειράματα τόσο σε αδιατάρακτα όσο και σε αναζυμωμένα απ' το ίδιο υλικό δοκίμια.

Ένα παράδειγμά παρουσίας εδαφικής δομής δίνεται παρακάτω στο Σχήμα 2.2 όπου φαίνονται η καμπύλη εγγενούς συμπιεστότητας και η καμπύλη συμπιεστότητας του φυσικού υλικού. Παρατηρούμε ότι η δεύτερη κείτεται στα δεξιά της πρώτης και ως εκ τούτου, για δεδομένη τιμή του δείκτη πόρων το φυσικό υλικό παραλαμβάνει σημαντικά μεγαλύτερη κατακόρυφη τάση από το αναζυμωμένο καθώς η δομή του είναι λιγότερο συμπιεστή. Στη συνέχεια, παρατηρούμε ότι μετά από ταχεία φόρτιση του φυσικού υλικού αποδιοργανώνεται η δομή του. Τέλος, για μεγαλύτερα φορτία, η καμπύλη φόρτισης τείνει να γίνει παράλληλη ή, κάποιες φορές, ακόμα και να συμπέσει με τη καμπύλη εγγενούς συμπιεστότητας έως ότου η εδαφική δομή του φυσικού υλικού αποδιοργανωθεί πλήρως.



Σχήμα 2.2: Καμπύλες μονοδιάστατης συμπίεσης της φυσικής και της αναζυμωμένης αργίλουμετάπτωση στην καμπύλη εγγενούς συμπιεστότητας με αποδιοργάνωση της εδαφικής δομής (Burland, et al., 1996)

2.5 Θεωρία κρίσιμης κατάστασης

To 1958, η μελέτη πάνω σε πειράματα απλής διάτμησης του πανεπιστημίου του Cambridge και σε δεδομένα από τριαξονικές δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν στο Imperial College London οδήγησε στη διατύπωση της "Θεωρίας της Κρίσιμης Κατάστασης" (Roscoe, et al., 1958).

Ως κρίσιμη ορίζεται η κατάσταση κατά την οποία μια εδαφική μάζα που υπόκειται σε διατμητική καταπόνηση παρουσιάζει αυξανόμενη διατμητική παραμόρφωση ενώ τα μεγέθη της μέσης ενεργού τάσης p', της αποκλίνουσας τάσης q και του δείκτη πόρων e (ή του ειδικού όγκου v=1+e) παραμένουν σταθερά. Πρόκειται για μια κατάσταση αστοχίας (δηλαδή λαμβάνει χώρα σε μεγάλες παραμορφώσεις) την οποία το έδαφος προσεγγίζει ανεξάρτητα από τη διαδρομή τάσεων που θα ακολουθήσει και η οποία ορίζεται πλήρως από τα παραπάνω μεγέθη. Διατυπώθηκε αρχικά για αναζυμωμένα αργιλικά υλικά και στη συνέχεια επεκτάθηκε στα φυσικά υλικά αλλά και στις άμμους.

Οι καταστάσεις αστοχίας (δηλαδή καταστάσεις στις οποίες η αποκλίνουσα τάση λαμβάνει τη μέγιστη τιμή της) εδαφικών δοκιμίων από συγκεκριμένο υλικό τα οποία υπέστησαν τριαξονική συμπίεση με διαφορετικές αρχικές ενεργές τάσεις σχηματίζουν στο χώρο p':q:ν μια μοναδική για το υλικό αυτό καμπύλη, ανεξάρτητα από το αν τα πειράματα διεξήχθησαν υπό συνθήκες ελεύθερης ή εμποδιζόμενης στράγγισης. Η καμπύλη αυτή ονομάζεται καμπύλη κρίσιμης κατάστασης (στο εξής CSL) και έχει τη μορφή της κόκκινης συνεχούς καμπύλης του Σχήματος 2.3. Στο ίδιο σχήμα φαίνονται επίσης η καμπύλη ισότροπης συμπίεση δεν υπάρχει αποκλίνουσα τάση) και οι προβολές της CSL στα επίπεδα q:p' και ν:p'.

Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.4 (α) η προβολή της CSL στο επίπεδο q:p' είναι ευθεία γραμμή με κλίση M, ως προς τον άξονα p', που περνά απ' την αρχή των αξόνων, ενώ η προβολή του επιπέδου v:p' είναι καμπύλη γραμμή η οποία όμως μπορεί να περιγραφεί ικανοποιητικά ως μια ευθεία στο ημιλογαριθμικό διάγραμμα v:lnp'. Μάλιστα, η τελευταία είναι παράλληλη με τη γραμμή ισότροπης συμπίεσης όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.4 (β).



Σχήμα 2.3: Η καμπύλη κρίσιμης κατάστασης και η καμπύλη ισότροπης συμπίεσης στο χώρο p':q:v (πηγή: CSSM Imperial College London, Lecture 5)



Σχήμα 2.4: Προβολές της CSL στο επίπεδο p'-q (a) και στο επίπεδο Inp'-v (β)

Από τα παραπάνω Σχήματα 2.3 και 2.4 (α) καθίσταται σαφές ότι η CSL είναι μια καμπύλη που ανήκει εξ ολοκλήρου σε επίπεδο το οποίο έχει κλίση M ως προς το επίπεδο v:p' και εμπεριέχει τον άξονα v του ειδικού όγκου. Καθορίζεται δε πλήρως στο χώρο q:p':v από τις παρακάτω εξισώσεις των δύο προβολών της που μπορούν va εξαχθούν εύκολα παρατηρώντας τα Σχήματα 2.4 (α) και (β): q = Mp' $v = \Gamma - \lambda lnp'$

Οι παράμετροι Μ, Γ και λ προσδιορίζονται από τα αποτελέσματα της πειραματικής διαδικασίας και αποτελούν σταθερές του εδαφικού υλικού. Έτσι, γνωρίζοντας τη θέση της CSL στο χώρο q:p':v για ένα συγκεκριμένο έδαφος, έχουμε τη δυνατότητα να προβλέψουμε με ικανοποιητική ακρίβεια τις κύριες τάσεις και τον ειδικό όγκο τη στιγμή της αστοχίας για κανονικώς στερεοποιημένα δείγματα και ανεξαρτήτως της διαδρομής τάσεων που ακολουθείται για να οδηγηθούμε σε αυτή (Atkinson, et al., 1978).

2.6 Επιφάνεια Roscoe

Η διαδρομή τάσεων που ακολουθείται σε μια δοκιμή τριαξονικής συμπίεσης ενός κανονικώς στερεοποιημένου δοκιμίου εξαρτάται από την αρχική μέση ενεργό τάση του δοκιμίου και τις συνθήκες στράγγισης που επικρατούν κατά τη διενέργεια της δοκιμής. Συγκεκριμένα, σε δοκιμές όπου εμποδίζεται η στράγγιση, η τασική όδευση είναι καμπύλη του χώρου q:p':ν που ανήκει εξ ολοκλήρου σε επίπεδο παράλληλο στο q:p' (βλ. Σχήμα 2.5 (α)), καθόσον ο όγκος του δοκιμίου παραμένει σταθερός. Αντίστοιχα, η διαδρομή τάσεων που ακολουθείται σε συνθήκες ελεύθερης στράγγισης ανήκει σε επίπεδο με κλίση 3:1 ως προς το επίπεδο ν:p' και η μέση ενεργός τάση του δοκιμίου αυξάνεται καθώς εξελίσσεται η δοκιμή.

Έτσι, και στις δυο περιπτώσεις, αν τοποθετούσαμε στο ίδιο διάγραμμα μεγάλο αριθμό δοκιμών, οι τασικές οδεύσεις τους θα έτειναν να δημιουργήσουν μια καμπύλη επιφάνεια που ξεκινάει από τη καμπύλη ισότροπης συμπίεσης και καταλήγει στην CSL. Αποδεικνύεται δε, ότι αυτή η επιφάνεια είναι η ίδια και στις δυο περιπτώσεις, καθώς και ότι όλες οι δοκιμές τριαξονικής συμπίεσης σε κανονικώς στερεοποιημένα δοκίμια ακολουθούν διαδρομές τάσεων που ανήκουν σε αυτήν την καμπύλη επιφάνεια που καλείται επιφάνεια Roscoe (Atkinson, et al., 1978). Δηλαδή, αντιστρόφως, η τομή ενός επιπέδου το οποίο είναι παράλληλο στο επίπεδο q:p' (συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης), με την επιφάνεια Roscoe είναι η διαδρομή τάσεων που ακολουθείται κατά τη διεξαγωγή της αντίστοιχης δοκιμής για ένα κανονικώς στερεοποιημένο.



Σχήμα 2.5: *Τασικές οδεύσεις υπό αστράγγιστες (α) και υπό στραγγιζόμενες (β) συνθήκες στο χώρο q:p':v* (Atkinson, et al., 1978)

Καθίσταται λοιπόν σαφές ότι η επιφάνεια Roscoe συνδέει την καμπύλη ισότροπης συμπίεσης με την CSL και αποτελεί τμήμα (όπως θα διατυπωθεί στη συνέχεια) της συνοριακής επιφάνειας όλων των δυνατών καταστάσεων.

2.7 Επιφάνεια Hvorslev

Οι διαδρομές τάσεων που ακολουθούν τα υπερστερεοποιημένα δοκίμια δεν ανήκουν στην επιφάνεια Roscoe. Είναι καμπύλες του χώρου q:p':ν που κατά την αστοχία προσεγγίζουν την καμπύλη κρίσιμης κατάστασης διασχίζοντας μια επίπεδη επιφάνεια που καλείται επιφάνεια Hvorslev. Οι προβολές των εξιδανικευμένων τασικών οδεύσεων στο επίπεδο q:p' που αφορούν υπερστερεοποιημένα και ελαφρώς υπερστερεοποιημένα δοκίμια φαίνονται στο Σχήμα 2.6. Οι διαδρομές τάσεων είναι κατακόρυφες και αλλάζουν διεύθυνση όταν

τμήσουν την επιφάνεια Hvorslev ή την επιφάνεια Roscoe αντίστοιχα. Στη συνέχεια, συνεχίζουν διασχίζοντάς τη και προσεγγίζουν την CSL.

Βέβαια, στην πραγματικότητα η αστοχία (μέγιστη τιμή της αποκλίνουσας τάσης) είναι δυνατόν να επέλθει πριν η διαδρομή των τάσεων προλάβει να καταλήξει στην CSL, καθώς το δοκίμιο διαρρηγνύεται και δεν μπορεί πλέον να παραλάβει μεγαλύτερο φορτίο. Σε αυτό το σημείο η ανομοιομορφία των διατμητικών παραμορφώσεων γίνεται όλο και εντονότερη (συγκέντρωση παραμορφώσεων στην επιφάνεια αστοχίας) με αποτέλεσμα η ακρίβεια των υπολογισμών τάσεων και παραμορφώσεων να τίθεται υπό αμφισβήτηση.



Σχήμα 2.6: Διαδρομές τάσεων για υπερστερεοποιημένα και ελαφρώς υπερστερεοποιημένα δοκίμια-Προβολές των συνοριακών επιφανειών Roscoe-Hvorslev στο επίπεδο q:p' (Atkinson, et al., 1978)



Σχήμα 2.7: Συνολική συνοριακή επιφάνεια στο χώρο q:p':v (Atkinson, et al., 1978).

Σε κάθε περίπτωση, η επιφάνεια Hvorslev αποτελεί το σύνορο των διαδρομών τάσεων για τα υπερστερεοποιημένα δοκίμια και μαζί με την επιφάνεια Roscoe, οριοθετούν στο χώρο q:p':ν όλες τις πιθανές καταστάσεις τάσεων στις οποίες μπορεί να βρεθεί ένα δοκίμιο. Στο Σχήμα 2.7 φαίνεται η συνολική συνοριακή επιφάνεια στο χώρο q:p':ν.

Στο Σχήμα 2.8 παρουσιάζεται η συνολική συνοριακή επιφάνεια Roscoe-Hvorslev στο κανονικοποιημένο, ως προς την ισοδύναμη μέση ενεργό τάση, p_e', επίπεδο q:p'. Η p_e' υπολογίζεται προβάλλοντας το σημείο που περιγράφει την κατάσταση στην οποία βρίσκεται το δοκίμιο μια δεδομένη χρονική στιγμή (σημείο Α) στην καμπύλη ισότροπης συμπίεσης (σημείο Β), η οποία κείτεται επί του επιπέδου ν:p', και στη συνέχεια στον άξονα p', όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.9.

Η κλίση *h* της επιφάνειας Hvorslev ως προς τον οριζόντιο άξονα p'/p_e' (είναι η ίδια με την κλίση που έχει στο Σχήμα 2.6) και το σημείο τομής της *g* με τον κατακόρυφο άξονα q:p_e' αποτελούν, μαζί με τις σταθερές Μ, λ και Γ, χαρακτηριστικές σταθερές του υλικού.



Σχήμα 2.8: Κανονικοποιημένο διάγραμμα (q/p_e'):(p'/p_e') - Συνολική συνοριακή επιφάνεια Hvorslev-Roscoe



Σχήμα 2.9: Διάγραμμα v:p' - προσδιορισμός της ισοδύναμης μέσης ενεργού τάσης p_e'

3 Εργαστηριακές Δοκιμές

3.1 Προσδιορισμός ειδικού βάρους

3.1.1 Εισαγωγή

Το ειδικό βάρος των στερεών κόκκων ενός εδάφους (G_s) ή αλλιώς, το φαινόμενο βάρος των στερεών συστατικών του (γ_s) είναι το ανά μονάδα όγκου βάρος της στερεάς μάζας του υλικού, χωρίς την παρουσία κενών μεταξύ των κόκκων του. Δηλαδή, αποτελεί στην ουσία την πυκνότητα του υλικού ενός εδάφους και άρα ένα από τα βασικά χαρακτηριστικά του. Ο προσδιορισμός του συμβάλει στην ακριβέστερη τέλεση των απαιτούμενων υπολογισμών και κυρίως στον υπολογισμό του δείκτη πόρων των δοκιμίων.

Η διαδικασία πειραματικού προσδιορισμού του ειδικού βάρους ενός εδαφικού υλικού είναι σχετικά απλή (για τα δεδομένα ενός εργαστηρίου εδαφομηχανικής) αλλά προϋποθέτει συνθήκες σταθερής θερμοκρασίας και ακρίβεια στις μετρήσεις. Η μεθοδολογία που περιγράφεται στη συνέχεια αφορά λεπτόκοκκα εδαφικά υλικά και ονομάζεται μέθοδος της μικρής φιάλης (bottle method), ενώ παρόμοια είναι η διαδικασία που αφορά και τα υπόλοιπα μεγέθη κόκκων.

3.1.2 Πειραματική διαδικασία

Αρχικά, ζυγίζεται η κενή φιάλη των 100 ml, στεγνή και σε θερμοκρασία περιβάλλοντος χώρου (βάρος W₁). Μεταφέρονται εντός της φιάλης 20 g ξηρού και κονιοποιημένου υλικού και επαναλαμβάνεται η ζύγισή της (βάρος W₂). Στην περίπτωση που το υλικό δεν είναι πλήρως ξηρό, το βάρος W₂ λαμβάνεται μετά τον υπολογισμό του βάρους W₃ (επόμενο βήμα) έπειτα από ξήρανση του περιεχομένου της φιάλης μέχρι τη σταθεροποίηση του βάρους του.

Το ἐδαφος εντός της φιάλης καλύπτεται με αποσταγμένο νερό και αφήνεται για τουλάχιστον 12h. Στη συνέχεια, συμπληρώνεται νερό στη φιάλη μέχρι τα μισά και αυτή τοποθετείται είτε στο σύστημα της αντλίας κενού με πίεση μέχρι τα 10 cm Hg, είτε στην φορητή εστία για βρασμό επί 10 λεπτά. Σκοπός αυτού του βήματος είναι να γίνει όσο το δυνατόν καλύτερη απαέρωση του μίγματος νερού-εδάφους που θα οδηγήσει σε ακριβέστερα αποτελέσματα.

Αφού ολοκληρωθεί το στάδιο της εξαέρωσης, η φιάλη γεμίζεται με νερό ακριβώς μέχρι τη χαραγή πλήρωσης και ζυγίζεται εκ νέου (βάρος W₃), προσέχοντας να μην υπάρχει νερό στο εξωτερικό της. Αφού μετρηθεί η θερμοκρασία του νερού του μίγματος (t°) και καταγραφεί, η φιάλη ξεπλένεται σχολαστικά και γεμίζεται εκ νέου με νερό της αυτής θερμοκρασίας (βάρος W₄). Η παραπάνω διαδικασία επαναλαμβάνεται τουλάχιστον άλλες δύο φορές. Στο Σχήμα 3.1 φαίνεται ένα σκαρίφημα της όλης διαδικασίας που βοηθά στην ευκολότερη κατανόησή της.



Σχήμα 3.1: Σκαρίφημα των βημάτων προσδιορισμού του φαινόμενου βάρους των στερεών συστατικών εδαφικού υλικού (Παπαχαρίσης, και συν., 2003)

Ο υπολογισμός του ειδικού βάρους γίνεται από την παρακάτω σχέση που ισχύει μόνο για τη θερμοκρασία του πειράματος t° C :

$$\gamma_{s}(t^{o}) = \frac{(W_{2} - W_{1}) * \gamma_{wt^{o}}}{(W_{4} - W_{1}) - (W_{3} - W_{2})}$$

όπου η ποσότητα (W₂-W₁) είναι το καθαρό βάρος της ξηρής μάζας του εδάφους, η ποσότητα (W₄-W₁) είναι το βάρος του νερού όταν η φιάλη είναι γεμάτη μόνο με νερό, η

ποσότητα (W₃-W₂) είναι το βάρος του νερού όταν η φιάλη έχει μόνο νερό και στερεά και γ_{wt}^ο το ειδικό βάρος του νερού σε θερμοκρασία t^ο C.

Η παραπάνω σχέση μπορεί να γραφτεί και ως εξής:

$$\gamma_s(t^o) = \frac{M_s}{\frac{M_{ws}}{\gamma_{wt^o}}}$$

όπου M_s η μάζα των στερεών κόκκων, M_{ws} η μάζα του νερού που αντιστοιχεί σε όγκο ίσο με τον όγκο των στερεών. Επομένως, ο παρονομαστής της δεύτερης σχέσης μας δίνει τον όγκο των στερεών. Δηλαδή, η όλη διαδικασία ισοδυναμεί με τον προσδιορισμό, με ένα τέχνασμα, του κατά τα άλλα δύσκολα προσδιορίσιμου όγκου των στερεών.

Εάν η διαδικασία γίνεται σε θερμοκρασία διαφορετική των 20° C, τότε το αποτέλεσμα ανάγεται στη θερμοκρασία των 20° C σύμφωνα με την παρακάτω σχέση:

$$\gamma_s(20^oC) = \gamma_s(t^o) * \frac{\gamma_{wt^o}}{\gamma_{w20^o}}$$

Η ζητούμενη τιμή του φαινόμενου βάρους των στερεών κόκκων εξάγεται από το μέσο όρο των τιμών που υπολογίσθηκαν σε κάθε δοκιμή. Για τον καολινίτη που χρησιμοποιήθηκε στα πειράματα της παρούσας διπλωματικής, η τιμή που υπολογίστηκε είναι:

$$G_s = 2.61 t/m^3$$

3.2 Προσδιορισμός ορίων Atterberg

3.2.1 Εισαγωγή

Η συμπεριφορά των λεπτόκοκκων εδαφών καθορίζεται σε μεγάλο βαθμό από την ποσότητα του νερού των πόρων. Έτσι, ανάλογα με το ποσοστό υγρασίας της μια άργιλος μπορεί να εμφανίζει μεγαλύτερη ή μικρότερη συνεκτικότητα και άρα διαφορετικές μηχανικές ιδιότητες. Πράγματι, η ραγδαία αύξηση της περιεχόμενης υγρασίας μπορεί να οδηγήσει σε ραγδαία μείωση της διατμητικής αντοχής και της φέρουσας ικανότητας ενός λεπτόκοκκου εδάφους. Έχει επίσης διαπιστωθεί ότι για το ίδιο ποσοστό υγρασίας μία άργιλος μπορεί να είναι πιο μαλακή ή πιο σκληρή από μία άλλη. Δηλαδή, το κάθε υλικό έχει τη δυνατότητα να

απορροφά διαφορετικές ποσότητες νερού για να μεταβεί σε μία συγκεκριμένη κατάσταση. Έτσι, η ανάγκη σύνδεσης της περιεχόμενης υγρασίας με τη κατάσταση στην οποία μεταπίπτει η εδαφική μάζα ενός υλικού και η ανάγκη σύγκρισης των ιδιοτήτων που αποκτούν διαφορετικά εδάφη για δεδομένη τιμή του ποσοστού υγρασίας τους οδήγησαν στη εισαγωγή των ορίων Atterberg.

Τα όρια αυτά αφορούν ποσοστά υγρασίας που καλύπτουν όλες τις δυνατές καταστάσεις στις οποίες μπορεί να βρεθεί ένα εδαφικό δείγμα. Συγκεκριμένα, ένα αργιλικό δείγμα μπορεί να έχει τη μορφή εύθρυπτου στερεού, ημιστερεού, πλάστιμου στερεού ή παχύρευστου υγρού. Έτσι, η οριακή τιμή του ποσοστού υγρασίας μεταξύ του εύθρυπτου στερεού και του ημιστερεού καλείται όριο συρρίκνωσης (SL ή w_s), η αντίστοιχη τιμή που διαχωρίζει την κατάσταση ημιστερεού από αυτή του πλάστιμου στερεού καλείται όριο πλαστιμότητας (PL ή w_P) και τέλος, το αντίστοιχο ποσοστό υγρασίας μεταξύ πλάστιμου στερεού και παχύρευστου υγρού καλείται όριο υδαρότητας (LL ή w_L).

Με βάση τα παραπάνω όρια εισάγονται οι λεγόμενοι δείκτες συνεκτικότητας. Συγκεκριμένα, ως δείκτης πλαστιμότητας Ι_P ορίζεται το εύρος στο οποίο το υλικό βρίσκεται στην κατάσταση του πλάστιμου στερεού, δηλαδή:

$$I_P = w_L - w_P$$

Ο δείκτης που εκφράζει το πόσο κοντά βρίσκεται το υλικό στην κατάσταση του παχύρευστου υγρού καλείται δείκτης σχετικής υδαρότητας και υπολογίζεται από τη σχέση:

$$I_L = \frac{w - w_P}{w_L - w_P} \quad \acute{\eta} \quad I_L = \frac{w - w_P}{I_P}$$

Τα όρια Atterberg προσδιορίζονται πειραματικά, όπως θα δούμε στη συνέχεια, και βοηθούν σημαντικά στην ποιοτική περιγραφή των συνεκτικών υλικών και στην κατάταξή τους σε κατηγορίες. Αφορούν όμως αναζυμωμένα δείγματα του εδαφικού υλικού και ως εκ τούτου δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την περιγραφή ιδιοτήτων που διέπονται κατά κύριο λόγο από την ύπαρξη εδαφικής δομής.

3.2.2 Πειραματικός προσδιορισμός ορίου υδαρότητας

Το όριο υδαρότητας ενός συνεκτικού εδάφους προσδιορίζεται με χρήση της συσκευής Casagrande (βλ. παρακάτω Εικόνα 3.1). Αφού σιγουρευτούμε ότι το κύπελλο της συσκευής

κινείται μόνο κατακόρυφα κατά την πτώση του και το ύψος πτώσης του σημείου επαφής είναι 1cm μπορούμε να ξεκινήσουμε τη διαδικασία.

Λαμβάνονται 50-55 g ξηρού υλικού που διέρχεται από το κόσκινο N° 40 και αναμιγνύονται με 20-35 cc αποσταγμένου νερού μέχρι να ομογενοποιηθεί το μίγμα. Προσθήκη νερού πέραν της αρχικής γίνεται σε ποσότητα 2-3 cc κάθε φορά, εάν το μίγμα χρειαστεί περισσότερη υγρασία. Στη συνέχεια το μίγμα αφήνεται για ωρίμανση σε υγραντήρα για 1 h. Από το σύνολο του μίγματος φυλάσσονται στον υγραντήρα 15 g που θα χρησιμεύσουν αργότερα στον προσδιορισμό του ορίου πλαστιμότητας.

Έπειτα, το υλικό απλώνεται στο κύπελλο της συσκευής σε στρώση μέγιστου βάθους 1 cm, στο σημείο όπου το κύπελλο ακουμπά στη βάση. Χρειάζεται ιδιαίτερη προσοχή ώστε να μην εγκλωβιστούν φυσαλίδες αέρα. Στη συνέχεια, με τη σπαθίδα, διαχωρίζεται το δείγμα σε δύο τμήματα με μέγιστο βάθος 1 cm και πλάτος χαραγής περί τα 2 mm. Αμέσως μετά ξεκινά η περιστροφή του στρόφαλου με συχνότητα 2 κτύπων/sec χωρίς τη σταθεροποίηση της βάσης, έως ότου τα χείλη της χαραγής έρθουν σε επαφή στον πυθμένα του κυπέλλου για ένα μήκος περί τα 12.5 mm. Μόλις γίνει αυτό καταγράφεται ο αριθμός των κτύπων που απαιτήθηκαν. Σημειώνεται ότι η όλη διαδικασία από την τοποθέτηση του μίγματος μέχρι την ένωση των χειλιών της χαραγής οφείλει να εκτελεσθεί σε χρόνο λιγότερο των 3 min για να μην αφυδατωθεί σε μεγάλο βαθμό το δείγμα.



Εικόνα 3.1: Η συσκευή Casagrande και όργανα χάραξης

Από το σημείο της συνένωσης λαμβάνεται υλικό το οποίο θα τοποθετηθεί σε υποδοχέα και θα ζυγισθεί άμεσα ώστε στη συνέχεια να ξηρανθεί για τον προσδιορισμό της υγρασίας του. Η ίδια διαδικασία διεξάγεται συνολικά τρείς φορές. Σκοπός της διαδικασίας αυτής είναι η επίτευξη δειγμάτων με σύσταση τέτοια ώστε σε κάθε διεξαγωγή ο αριθμός των κτύπων να βρίσκεται στα όρια 15-25, 20-30, 25-35, ενώ σε κάθε άλλη περίπτωση χρειάζεται επανάληψη της διαδικασίας.

Για τον προσδιορισμό του ορίου υδαρότητας αρκεί να κατασκευασθεί το ημιλογαριθμικό διάγραμμα με τον αριθμό κτύπων ως τετμημένη σε λογαριθμική κλίμακα και τα αντίστοιχα ποσοστά υγρασίας από τις παραπάνω δοκιμές στη συσκευή Casagrande ως τεταγμένη. Σχεδιάζεται η γραμμή τάσης που προσεγγίζει καλύτερα τα πειραματικά σημεία και ονομάζεται ευθεία ροής. Η τεταγμένη της ευθείας αυτής που αντιστοιχεί στους 25 κτύπους είναι το ζητούμενο όριο υδαρότητας του υπό εξέταση υλικού.

Το όριο υδαρότητας του αναζυμωμένου καολινίτη που χρησιμοποιήθηκε για τους σκοπούς αυτής της διπλωματικής εργασίας προσδιορίσθηκε σύμφωνα με την παραπάνω διαδικασία και αυτή η τιμή χρησιμοποιήθηκε για όλες τις απαιτούμενες εργασίες (π.χ. παρασκευές μιγμάτων αναζυμωμένου καολινίτη). Η εν λόγω τιμή είναι:

 $w_L = 47\%$

3.2.3 Πειραματικός προσδιορισμός ορίου πλαστιμότητας

Λαμβάνονται 7.5 g μίγματος από αυτό που κατασκευάστηκε για τον προσδιορισμό του ορίου υδαρότητας και βρίσκονταν στον υγραντήρα. Το υλικό πλάθεται σε σβώλο ελλειψοειδούς μορφής και τοποθετείται σε γυάλινη πλάκα. Με την παλάμη ξεκινά να μορφώνεται κύλινδρος με ρυθμό κυλίνδρωσης περί τις 80-90 κινήσεις το λεπτό (πλήρης κίνηση μπρός-πίσω). Όταν ο κυλινδρίσκος θραυσθεί σε 3-4 κομμάτια με διάμετρο 3 mm σταματά η διαδικασία. Αν αυτό δεν συμβεί το υλικό αναζυμώνεται και ξεκινά και πάλι η ίδια διαδικασία μέχρι την επίτευξη του ζητούμενου αποτελέσματος. Τα θραυσμένα κομμάτια τοποθετούνται άμεσα σε προηγουμένως ζυγισμένο υποδοχέα για τον προσδιορισμό της υγραστίας τους. Η ίδια διαδικασία επαναλαμβάνεται για όλο το υλικό που έχει απομείνει στον υγραντήρα. Ο μέσος όρος των ποσοστών υγρασίας από όλα τα δείγματα είναι το ζητούμενο

Η τιμή του ορίου πλαστιμότητας που προσδιορίστηκε για τον αναζυμωμένο καολινίτη που χρησιμοποιήθηκε σε αυτή την εργασία, σύμφωνα με την παραπάνω διαδικασία είναι:

 $w_P = 35\%$

Κατάταξη του υλικού με βάση τα όρια Atterberg 3.2.4

Οι κατατάξεις εδαφών με βάση τα όρια Atterberg και τα παράγωγα μεγέθη (δείκτης πλαστιμότητας, δείκτης σχετικής υδαρότητας, δείκτης συνεκτικότητας) βοηθά στη διάκριση μεταξύ εδαφών παρόμοιας ή και της ίδιας κοκκομετρίας τα οποία όμως έχουν διαφορετικά χαρακτηριστικά πλαστιμότητας.

Από τις τιμές των ορίων υδαρότητας και πλαστιμότητας που παρατέθηκαν στις δύο προηγούμενες ενότητες μπορούμε πλέον να υπολογίσουμε τον δείκτη πλαστιμότητας του καολινίτη των δοκιμών και να τον χρησιμοποιήσουμε για την κατάταξή του κατά τον Casagrande (διάγραμμα πλαστιμότητας) και κατά τον Burmister.

Ο δείκτης πλαστιμότητας του υλικού υπολογίζεται από την εξίσωση της ενότητας 3.2.1:

$$I_P = 12\%$$
Βαθμός πλαστιμότητας Δείκτης πλαστιμότητας (I_P)
Έδαφος άνευ πλαστιμότητας 0
Έδαφος ελαφράς πλαστιμότητας 1 έως 5
Έδαφος μικρής πλαστιμότητας 5 έως 10
Έδαφος μέσης πλαστιμότητας 20 έως 40
Έδαφος πολύ μεγάλης
πλαστιμότητας > 40

$$I_P = 12\%$$

Πίνακας 3.1: Κατάταξη εδαφών με βάση το δείκτη πλαστιμότητας κατά τον Burmister (Παπαχαρίσης, και συν., 2003)

Έτσι, παρατηρούμε σύμφωνα με τον Burmister, ο καολινίτης που χρησιμοποιήθηκε στις δοκιμές της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί ένα έδαφος μέσης πλαστιμότητας.

Στη συνέχεια παρατίθεται το διάγραμμα πλαστιμότητας του Casagrande (Σχήμα 3.2) το οποίο κατατάσσει τα διάφορα εδάφη με βάση το δείκτη πλαστιμότητας και το όριο υδαρότητας που διαθέτουν.



Σχήμα 3.2: Διάγραμμα πλαστιμότητας Casagrande

Η μπλε κουκκίδα είναι το σημείο που αντιστοιχεί στον καολινίτη των δοκιμών. Έτσι, αυτός κατατάσσεται, με βάση το διάγραμμα Casagrande, στην κατηγορία των ανόργανων και αργιλωδών ιλύων χαμηλής πλαστιμότητας. Σημειώνεται ότι αυτή η κατάταξη αφορά τα όρια Atterberg και μόνο, και μπορεί να διαφέρει από την κατάταξη με βάση την κοκκομετρία του υλικού.

3.3 Διαδικασία παρασκευής αναζυμωμένων δοκιμίων

Σύμφωνα με το πλαίσιο που έθεσε ο Burland (Burland, 1990), η παρασκευή αναζυμωμένων δοκιμίων προϋποθέτει την ανάμιξη του αργιλικού υλικού με νερό έως ότου δημιουργηθεί ένας χυλός με ποσοστό υγρασίας που κυμαίνεται μεταξύ w_L και 1.5w_L. Είναι σημαντικό να μην χρησιμοποιηθεί από την αρχή όλη η απαιτούμενη ποσότητα νερού, έτσι ώστε στη συνέχεια να υπάρχει δυνατότητα διόρθωσης του ποσοστού υγρασίας του μίγματος. Η ανάμιξη πρέπει να είναι σχολαστική ώστε να διαλυθούν όλοι οι θρόμβοι που μπορεί να έχουν δημιουργηθεί. Το μίγμα πρέπει να παραμείνει για τουλάχιστον 2 ημέρες σκεπασμένο ώστε να γίνει πλήρης ενυδάτωση του υλικού. Έπειτα, λαμβάνεται αντιπροσωπευτικό δείγμα για τον προσδιορισμό της υγρασίας του μίγματος, με ξήρανση σε κλίβανο. Εάν χρειασθεί, προστίθεται επιπλέον νερό και το μίγμα αναμιγνύεται εκ νέου σχολαστικά. Στη συνέχεια, τίθεται σε κατάλληλη διάταξη απαέρωσης έως ότου παύσει η εμφάνιση φυσαλίδων στην επιφάνειά του.

Στη συνέχεια, το μίγμα τοποθετείται προσεκτικά, ώστε να μην εγκλεισθεί αέρας, σε κατάλληλη κυλινδρική διάταξη (μήτρα ή μεγάλο συμπιεσόμετρο, Εικόνα 3.2(α)) διαμέτρου d=151.77mm και ύψους h=205.78mm (δηλαδή συνολικής χωρητικότητας V=3723cc) με άκαμπτα τοιχώματα, ώστε να ακολουθήσει η στερεοποίησή του σε καθεστώς μονοδιάστατης συμπίεσης. Πριν την τοποθέτηση του μίγματος, τα εσωτερικά τοιχώματα του δοχείου καλύπτονται με λιπαντική ουσία, ώστε να μειωθούν οι αναπτυσσόμενες τριβές μεταξύ υλικού και τοιχώματος κατά τη φόρτιση και να διευκολυνθεί η εξόλκευση του υλικού μετά το πέρας της στερεοποίησης.

Η φόρτιση λαμβάνει χώρα στην κατακόρυφη διεύθυνση, κλιμακωτά, προσθέτοντας αρχικά μόνο το κατάλληλο χαρτί στράγγισης και την πλάκα που κατανέμει ομοιόμορφα το φορτίο στη διατομή. Στη συνέχεια, τοποθετείται επιπλέον φορτίο στον άξονα που φέρει η πλάκα προσέχοντας πάντα να μην αλλάζει η διεύθυνση εφαρμογής του. Λαμβάνονται μετρήσεις της καθίζησης σε τακτά χρονικά διαστήματα κατά τη διάρκεια της φόρτισης (συνήθως ανά 1 με 2 μέρες) και όταν η καθίζηση σταθεροποιηθεί (με ακρίβεια χιλιοστού), η διαδικασία συνεχίζεται με διπλασιασμό του φορτίου, έως ότου η καθίζηση σταθεροποιηθεί με επιβαλλόμενη τάση περί τα 200kPa. Καθ' όλη τη διάρκεια της φόρτισης, η κορυφή και η βάση της διάταξης πρέπει να καλύπτονται με νερό, ώστε το υλικό να διατηρείται συνεχώς κορεσμένο.

Τέλος, ακολουθεί η εξόλκευσή του από το συμπιεσόμετρο με τη βοήθεια κατάλληλου εργαλείου, για να ελαχιστοποιηθεί η διατάραξή του. Το υλικό βρίσκεται πλέον σε πλάστιμη κατάσταση και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μόρφωση δοκιμίων. Στην Εικόνα 3.2 (β) φαίνεται το δείγμα του καολινίτη, μετά την στερεοποίησή του στο μεγάλο συμπιεσόμετρο

και την ακόλουθη εξαγωγή του από αυτό, σε σύγκριση με ένα δοκίμιο τριαξονικής δοκιμής ύψους 76mm και διαμέτρου 38mm.



Εικόνα 3.2: (a) Διάταξη μεγάλου συμπιεσομέτρου και (β) τελικό προϊόν στερεοποίησης στα 200kPa

3.4 Δοκιμή συμπιεσομέτρου

3.4.1 Εισαγωγή

Η δοκιμή συμπιεσομέτρου αποτελεί μια από τις βασικότερες και συνάμα απλούστερες δοκιμές στο εργαστήριο εδαφομηχανικής. Μας δίνει τη δυνατότητα να εξάγουμε συμπεράσματα για τη συμπιεστότητα και τη διογκωσιμότητα ενός υλικού, την τάση προφόρτισής του (και ακολούθως το βαθμό υπερστερεοποίησης), το μέγεθος και τη χρονική εξέλιξη της καθίζησης και το συντελεστή διαπερατότητάς του.

Η δοκιμή αυτή προσομοιώνει την επιβολή κατακόρυφου φορτίου σε εδαφικό σχηματισμό όπου μας ενδιαφέρει να μετρήσουμε την καθίζηση της επιφάνειάς του αλλά όχι τη φέρουσα ικανότητα αυτού. Πρόκειται για μια δοκιμή τριαξονικής έντασης, αφού πέρα από το κατακόρυφο φορτίο το δοκίμιο εντείνεται πλευρικά λόγω του άκαμπτου (όπως θα δούμε

παρακάτω) τοιχώματος (σ₂=σ₃=σ_r). Οι αναπτυσσόμενες πλευρικές τάσεις εξαρτώνται από την επιβαλλόμενη κατακόρυφη τάση και υπολογίζονται μέσω του συντελεστή ουδέτερης ώθησης (σ_r=K₀σ_z). Η παραμόρφωση λαμβάνει χώρα μόνο κατά την κατακόρυφη διεύθυνση (δηλαδή έχουμε ε_{xx}=ε_{yy}=γ_{xy}=γ_{xz}=γ_{yz}=0) και προκαλείται από την αποβολή νερού από τους πόρους του δοκιμίου κατά την επιβολή του φορτίου. Έτσι, θεωρώντας ότι το νερό των πόρων αλλά και οι κόκκοι του εδάφους είναι ασυμπίεστοι, η ογκομετρική παραμόρφωση ισούται με την κατακόρυφη παραμόρφωση του δοκιμίου (ε_{zz}=ε_v).

3.4.2 Πειραματική διαδικασία

Η προετοιμασία του πειράματος περιλαμβάνει τη μόρφωση του δοκιμίου και την συναρμολόγηση της πειραματικής διάταξης. Το δοκίμιο μπορεί να μορφωθεί είτε από υλικό σε πλάστιμη μορφή που έχει προηγουμένως συμπιεσθεί στη μήτρα μονοδιάστατης συμπίεσης (Ενότητα 3.3), είτε από υλικό σε υδαρή μορφή. Τα δοκίμια που προέρχονται από υλικό που έχει προηγουμένως στερεοποιηθεί σε τιμή της κατακόρυφης τάσης σ_v'=200 kPa έχουν διάμετρο 49.9mm και ύψος 17.6mm, ενώ τα δοκίμια που μορφώνονται από υλικό σε υδαρή μορφή έχουν διάμετρο 75mm και ύψος 19mm.

Στην πρώτη περίπτωση, το υλικό τοποθετείται σε έναν ἀκαμπτο μεταλλικό δακτύλιο γνωστών διαστάσεων πιέζοντας προσεκτικά το αιχμηρό τμήμα του πάνω στην πλάστιμη μάζα ώστε η διαταραχή που προκαλείται να είναι κατά το δυνατόν ελάχιστη. Η περισσευούμενη μάζα κόβεται με λεπτό σύρμα ώστε οι εκτεθειμένες επιφάνειες να είναι επίπεδες και λείες, ἐπειτα ζυγίζεται και τοποθετείται σε υποδοχέα για να ξηρανθεί σε κλίβανο. Μετά την ξήρανση θα υπολογισθεί το αρχικό ποσοστό υγρασίας του δοκιμίου. Ζυγίζουμε τον δακτύλιο μαζί με το δοκίμιο ώστε αφαιρώντας το βάρος του δακτυλίου (που είναι γνωστό) να υπολογίσουμε το βάρος του δοκιμίου. Στη συνέχεια, ο δακτύλιος τοποθετείται σε κυψέλη η οποία θα βιδωθεί στη συσκευή. Στο κάτω μέρος της κυψέλης υπάρχει πορόλιθος ο οποίος εξασφαλίζει την επαφή του δοκιμίου με το νερό και επομένως τη στράγγιση και τον κορεσμό του, χωρίς να διαφεύγει υλικό εκτός του δακτυλίου. Για τον ίδιο λόγο τοποθετείται πορόλιθος και στο πάνω μέρος του δακτυλίου πριν την τοποθέτηση του top-cap.

Στη δεύτερη περίπτωση, το υδαρές μίγμα, αφού δονηθεί για να αφαιρεθεί ο περιεχόμενος αέρας, αποτίθεται με προσοχή εντός του δακτυλίου ο οποίος βρίσκεται στο εσωτερικό της

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

κυψέλης (στο κάτω μέρος του δακτυλίου έχει ήδη τοποθετηθεί πορόλιθος), ώστε να μην παγιδευτούν εκ νέου φυσαλίδες. Ο δακτύλιος γεμίζεται με το μίγμα έως την άνω παρειά και η εκτεθειμένη επιφάνεια λειαίνεται με μια σπάτουλα. Η διάταξη κυψέλη-δακτύλιοςπορόλιθος ζυγίζεται πριν την τοποθέτηση του μίγματος αλλά και μετά ώστε να μπορούμε να υπολογίσουμε την αρχική μάζα του δοκιμίου.

Οι πορόλιθοι πρέπει να είναι πλήρως κορεσμένοι σε όλη τη διάρκεια της δοκιμής και γι' αυτό πριν πρέπει να εμβαπτίζονται σε νερό το όποιο θα απαερωθεί με τη βοήθεια αντλίας κενού. Πάνω από τον άνω πορόλιθο τοποθετείται το top-cap το οποίο μεταφέρει το επιβαλλόμενο φορτίο στην επιφάνεια του δοκιμίου. Μια ενδεικτική κατακόρυφη τομή της διάταξης του συμπιεσομέτρου φαίνεται στο Σχήμα 3.3.



Σχήμα 3.3: *Κατακόρυφη τομή της διάταξης της κυψέλης στη δοκιμή συμπιεσομέτρου* (Καββαδάς, 2009)

Κατά την τοποθέτηση της διάταξης στη συσκευή πρέπει να εξασφαλισθεί ότι το σύστημα top-cap-δοκίμιο-πορόλιθοι έχει οριζόντιες επιφάνειες, ώστε το επιβαλλόμενο φορτίο να είναι κατακόρυφο και οι καθιζήσεις να είναι όσο το δυνατόν πιο ομοιόμορφες κατά τη διενέργεια της δοκιμής. Στη συνέχεια, εφαρμόζεται το μηκυνσιόμετρο που θα μετρά την προκαλούμενη καθίζηση. Τέλος, σε όλη τη διάρκεια της δοκιμής η κυψέλη πρέπει να εξασφαλισθεί ότι το δοκίμιο παραμένει συνεχώς κορεσμένο. Μετά την τοποθέτηση της κυψέλης στη συσκευή, εφαρμόζεται το αρχικό φορτίο στον ειδικά διαμορφωμένο άξονα και ξεκινάει το πείραμα. Το φορτίο μεταβιβάζεται μέσω ενός βραχίονα στο top-cap και από εκεί στο δοκίμιο. Το μέγεθος του αρχικού φορτίου ποικίλλει ανάλογα με ποσοστό υγρασίας του δοκιμίου. Αυτό σημαίνει ότι σε υλικό που βρίσκεται σε υδαρή μορφή (για ποσοστά

υγρασίας ἀνω του 50-60%) πρέπει αρχικά να ολοκληρωθεί η στερεοποίηση λόγω του φορτίου του πορολίθου και του top-cap και έπειτα να προστεθεί επιπλέον φορτίο ώστε να αποφευχθεί η μετακίνηση του πορολίθου και η διαφυγή υλικού. Στις υπόλοιπες περιπτώσεις μπορούμε να ακολουθήσουμε μια συγκεκριμένη ρουτίνα φόρτισης που συνήθως περιλαμβάνει φορτία από 0.5 έως 128 ή 256kg, ανάλογα με τη συσκευή.. Σε κάθε βαθμίδα φόρτισης διπλασιάζεται το εφαρμοζόμενο φορτίο και πριν την τοποθέτησή του λαμβάνεται η αρχική μέτρηση του μηκυνσιομέτρου, που είναι και η τελική τιμή για την προηγούμενη βαθμίδα. Η χρονική διάρκεια κάθε βαθμίδας φόρτισης είναι συνήθως 24 ώρες. Εφόσον επιθυμείται ο προσδιορισμός του συντελεστή στερεοποίησης, λαμβάνονται μετρήσεις σε συγκεκριμένες χρονικές στιγμές μετά την επιβολή του φορτίου, αρχικά πυκνές (2",4",8" κλπ) και έπειτα αραιότερες (15',30',1h κλπ), έως το τέλος της εκάστοτε βαθμίδας φόρτισης (24h).

Για να μπορούμε να έχουμε μια πληρέστερη εικόνα σε ότι αφορά τη συμπεριφορά του εδαφικού υλικού σε συνθήκες μονοδιάστατης παραμόρφωσης, μετά την ολοκλήρωση της φόρτισης ή σε κάποιο ενδιάμεσο στάδιο, πραγματοποιούμε αποφόρτιση του δοκιμίου. Ακολουθώντας την αντίστροφη ακριβώς διαδικασία από αυτή της φόρτισης, αφαιρούμε φορτίο από τη συσκευή και λαμβάνουμε αρχικές και τελικές μετρήσεις σε κάθε βαθμίδα αποφόρτισης ή και ενδιάμεσες τιμές εάν θέλουμε να υπολογίσουμε συντελεστή διόγκωσης. Συνήθως παραλείπονται κάποιες βαθμίδες για την επιτάχυνση της διαδικασίας.

Μετά το τέλος της δοκιμής, αφαιρείται προσεκτικά όλο το νερό από την κυψέλη ώστε να μην επιτραπεί η εισχώρησή του εντός του δοκιμίου κατά την αφαίρεση του υπολειπόμενου φορτίου. Μετά την απομάκρυνση του τελευταίου φορτίου η κυψέλη αποσυναρμολογείται και το δοκίμιο εξάγεται από το δακτύλιο, ζυγίζεται και τοποθετείται σε υποδοχέα και στη συνέχεια σε κλίβανο για να ξηρανθεί. Μετά την ξήρανσή του ζυγίζεται εκ νέου για να υπολογισθεί η μάζα του νερού στο τέλος της δοκιμής και η μάζα των στερεών.

3.4.3 Επεξεργασία μετρήσεων

Οι μετρήσεις καθίζησης που λαμβάνονται κατά τη διενέργεια του πειράματος χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό του δείκτη πόρων στο τέλος της κάθε βαθμίδας φόρτισης. Γνωρίζοντας το εμβαδόν της επιφάνειας του δοκιμίου στο οποίο εφαρμόζεται το φορτίο, είμαστε σε θέση να υπολογίσουμε τις αναπτυσσόμενες κατακόρυφες τάσεις (σ_v=σ₁). Έτσι, μπορούμε να κατασκευάσουμε την καμπύλη μονοδιάστατης συμπίεσης του υλικού, καθώς και την καμπύλη αποφόρτισης, που συνήθως παρουσιάζονται σε ημιλογαριθμικό διάγραμμα e:lnσ_v'. Από το διάγραμμα αυτό μπορούμε να εξάγουμε τις σταθερές συμπιεστότητας του υλικού (C_c, C_r).

Το πρώτο βήμα των υπολογισμών περιλαμβάνει τον προσδιορισμό του αρχικού δείκτη πόρων (e₀). Για το σκοπό αυτό κάνουμε την παραδοχή ότι το δοκίμιο είναι πλήρως κορεσμένο και άρα οποιαδήποτε μεταβολή του όγκου του οφείλεται σε αποβολή νερού από τα κενά μεταξύ των κόκκων. Αποδεικνύεται ότι εφόσον το δοκίμιο είναι πλήρως κορεσμένο ο αρχικός δείκτης πόρων μπορεί να υπολογισθεί από τη σχέση:

$$e_0 = G_s w_0$$

όπου G_s είναι το ειδικό βάρος των στερεών κόκκων του υλικού και w₀ το υπολογισθέν ποσοστό υγρασίας στην αρχή του πειράματος σε δεκαδική μορφή. Ο υπολογισμός της συνολικής καθίζησης γίνεται αφαιρώντας από την αρχική ένδειξη του μηκυνσιομέτρου την τελική ένδειξη σε κάθε βαθμίδα φόρτισης καθώς και μια ποσότητα a_i που υπολογίζεται από τη δοκιμή συμμόρφωσης της συσκευής:

$$\Delta H_i = l_0 - l_i - \alpha_i$$

όπου ΔΗ_i η συνολική καθίζηση στη βαθμίδα φόρτισης i, l₀ η ένδειξη του μηκυνσιομέτρου στην αρχή του πειράματος, l_i η ένδειξη του μηκυνσιομέτρου στο τέλος της βαθμίδας φόρτισης i και α_i η ποσότητα συμμόρφωσης της συσκευής στην αντίστοιχη βαθμίδα. Έπειτα, υπολογίζεται η μεταβολή του δείκτη πόρων Δe_i που αντιστοιχεί στην καθίζηση ΔH_i από τη σχέση:

$$\Delta e_i = \frac{\Delta H_i}{H_0} (1 + e_0)$$

όπου Η₀ το αρχικό ύψος του δοκιμίου.

Τέλος, ο δείκτης πόρων στο τέλος κάθε βαθμίδας φόρτισης υπολογίζεται αφαιρώντας από τον αρχικό δείκτη πόρων e₀ την ποσότητα Δe_i.

Στο τέλος του πειράματος υπολογίζουμε την υγρασία του δοκιμίου και συγκρίνοντας με αυτή που προκύπτει από τους ανωτέρω υπολογισμούς μπορούμε να εξάγουμε συμπεράσματα σχετικά με την ορθότητα της τιμής του αρχικού δείκτη πόρων και να κρίνουμε εάν τελικά δικαιολογείται η παραδοχή περί πλήρως κορεσμένου δοκιμίου που κάναμε στην αρχή της υπολογιστικής διαδικασίας.

3.5 Δοκιμή τριαξονικής κυλινδρικής φόρτισης

3.5.1 Εισαγωγή

Η δοκιμή τριαξονικής κυλινδρικής φόρτισης είναι μία από τις πιο διαδεδομένες δοκιμές της πειραματικής εδαφομηχανικής. Χρησιμοποιείται σε πολλές μελέτες και επιστημονικά άρθρα για τον προσδιορισμό των μηχανικών χαρακτηριστικών των εδαφών όπως η αντοχή σε μονοτονική (θλίψη ή εφελκυσμό) και ανακυκλική φόρτιση, η γωνία τριβής, η συνοχή και ο δείκτης ουδέτερης ώθησης K₀.

Στην κυλινδρική τριαξονική συσκευή μπορούν να εκτελεστούν δοκιμές με διαφορετικές εντατικές καταστάσεις και ρυθμιζόμενους ρυθμούς εφαρμογής των φορτίων με δυνατότητα ελεύθερης αλλά και εμποδιζόμενης στράγγισης του δοκιμίου. Σε όλη τη διάρκεια των δοκιμών οι παραμορφώσεις του δοκιμίου μπορούν να μετρηθούν με τη βοήθεια μηκυνσιομέτρων μεγάλης ακρίβειας και να καταγραφούν σε ηλεκτρονικό υπολογιστή.

Καθίσταται λοιπόν σαφές ότι η συσκευή αυτή μπορεί να προσομοιώσει σε μεγάλο βαθμό τις συνθήκες που επικρατούν στη φύση και άρα τα αποτελέσματα των δοκιμών έχουν άμεση πρακτική εφαρμογή σε ότι αφορά το ενδιαφέρον του Πολιτικού Μηχανικού και όχι μόνο ερευνητικό χαρακτήρα.

3.5.2 Περιγραφή της συσκευής

Η κυλινδρική τριαξονική συσκευή αποτελείται από την πειραματική διάταξη (Σχήμα 3.4) η οποία περιγράφεται αναλυτικά στη συνέχεια και το σύστημα επιβολής των πιέσεων και των φορτίων για τη λειτουργία του οποίου θα αναφερθούν μόνο κάποια βασικά στοιχεία.

Σε ότι αφορά την πειραματική διάταξη, αυτή αποτελείται από μια διάφανη συνήθως, κυλινδρική κυψέλη από πλαστικό με μεγάλη αντοχή και από μία ακλόνητη βάση στην οποία τοποθετείται το δοκίμιο. Η κυψέλη είναι συνδεδεμένη με ένα μεταλλικό τμήμα που καταλήγει σε έναν δακτύλιο. Αυτός εφαρμόζει στο ακλόνητο τμήμα της συσκευής με τη βοήθεια κοχλιών και κλείνει ερμητικά την κυψέλη πριν αυτή γεμίσει με νερό. Το μεταλλικό
τμήμα της κυψέλης φέρει κεντρικά το έμβολο με το οποίο πραγματοποιείται η κατακόρυφη φόρτιση του δοκιμίου.

Μετά τη μόρφωση του δοκιμίου (βλ. υποενότητα 3.5.3.1) αυτό καλύπτεται από αδιαπέρατη ελαστική μεμβράνη. Στο πάνω και κάτω μέρος του τοποθετούνται άκαμπτοι πορόλιθοι, διαμέτρου ίδιας με αυτή του δοκιμίου, για να επιτρέπουν την ομαλή στράγγισή του κατά τη διάρκεια της δοκιμής χωρίς να διαφεύγει εδαφικό υλικό. Πάνω από τον άνω πορόλιθο τοποθετείται η κεφαλή (top-cap) στην οποία θα εφαρμοστεί το κατακόρυφο φορτίο μέσω του εμβόλου. Για να είναι η φόρτιση του δοκιμίου αξονοσυμμετρική απαιτείται το δοκίμιο να είναι κατακόρυφο και το σχήμα του όσο το δυνατόν πιο κυλινδρικό, το φορτίο να εφαρμόζεται κεντρικά και η τριβή μεταξύ πορολίθων και δοκιμίου να είναι περιορισμένη. Οι πορόλιθοι και η κεφαλή βρίσκονται πάντα εντός της μεμβράνης που περιβάλλει το δοκίμιο.



Σχήμα 3.4: Η συσκευή κυλινδρικής τριαξονικής φόρτισης Bishop-Wesley (Γεωργιάννου, 2010)

Η στράγγιση συντελείται τόσο στην κορυφή, δια μέσου της κεφαλής, όσο και στη βάση με τη βοήθεια οπών και σωληνίσκων, ενώ το στραγγιζόμενο νερό οδηγείται εκτός κυψέλης σε

συγκεκριμένο δοχείο. Ο όγκος του νερού που εξέρχεται ή εισέρχεται στο δοκίμιο μετριέται με τη βοήθεια μηκυνσιομέτρου που παρακολουθεί τη μεταβολή της στάθμης του δοχείου.

Η πίεση του νερού της κυψέλης αλλά και η πίεση του νερού των πόρων μπορούν να ρυθμίζονται με τη βοήθεια του συστήματος εφαρμογής των πιέσεων. Οι βαλβίδες που είναι προσαρτημένες στο κάτω μέρος της βάσης της συσκευής μπορούν να απομονώνουν το δοκίμιο και την κυψέλη από το εξωτερικό σύστημα. Για δοκιμές υπό αστράγγιστες συνθήκες η βαλβίδα της πίεσης πόρων διατηρείται κλειστή. Σε όλη τη διάρκεια της δοκιμής υπάρχει η δυνατότητα ανάγνωσης στον υπολογιστή των πιέσεων που επικρατούν στην κυψέλη και εντός του δοκιμίου.

Η βάση διαθέτει μηχανισμό με τον οποίο μπορεί, με ελεγχόμενο τρόπο, να κινείται πάνω ή κάτω, ανάλογα με τη δοκιμή, στην κατακόρυφη διεύθυνση. Η μετακίνηση μετριέται με μηκυνσιόμετρο. Το δοκίμιο ακουμπά στο ακλόνητο έμβολο και ξεκινά να παραμορφώνεται. Η δύναμη που ασκείται στην διεπιφάνεια μεταξύ κεφαλής και εμβόλου μετριέται με τη βοήθεια κατάλληλου αισθητήρα που υπάρχει ενσωματωμένος στο έμβολο. Σε αυτή την περίπτωση λέμε ότι η συσκευή λειτουργεί με επιβολή παραμόρφωσης. Υπάρχουν βεβαίως και συσκευές όπου η βάση είναι ακλόνητη και το έμβολο είναι αυτό που προσεγγίζει το δοκίμιο.

Εκτός από τον μετρητή μετακίνησης της βάσης, μπορούν να τοποθετηθούν και επιπλέον μετρητές μεγαλύτερης ακρίβειας (για μικρές παραμορφώσεις) επάνω στην μεμβράνη στο εξωτερικό του δοκιμίου. Αυτοί μπορούν να μετρούν την μεταβολή του ύψους του δοκιμίου ή της διαμέτρου του με ακρίβεια 1-2 μικρών. Εφαρμόζονται με τη βοήθεια κατάλληλης κόλλας στη μεμβράνη πριν την έναρξη του πειράματος και βρίσκονται εντός της κυψέλης καθ' όλη τη διάρκεια της δοκιμής.

Τα μετρούμενα μεγέθη πίεσης (του νερού της κυψέλης και των πόρων), εφαρμοζόμενου φορτίου, μετακίνησης της βάσης, μεταβολής του όγκου του δοκιμίου και μεταβολής των διαστάσεων του δοκιμίου καταγράφονται και χρησιμοποιούνται για τους υπολογισμούς των τάσεων και των παραμορφώσεων.

Το σύστημα εφαρμογής των πιέσεων αποτελείται από δοχεία που εμπεριέχουν νερό και αέρα που διαχωρίζονται από ένα εύκαμπτο ελαστικό μέσο (φούσκα). Διαφορετικά δοχεία αντιστοιχούν στην πίεση πόρων στο εσωτερικό του δοκιμίου, στην πίεση της κυψέλης και σε αυτή που οδηγεί σε μετακίνηση τη βάση. Ο υπό πίεση αέρας της κεντρικής παροχής του εργαστηρίου οδηγείται σε ένα σύστημα που ρυθμίζει την πίεση ανάλογα με τις ανάγκες του πειράματος (ο ρυθμιστής της πίεσης επικοινωνεί με τον Η/Υ) και από εκεί στο εσωτερικό του αντίστοιχου δοχείου. Η φούσκα μεταφέρει την πίεση στο νερό και αυτό στην πειραματική διάταξη.

3.5.3 Πειραματική διαδικασία

3.5.3.1 Μόρφωση δοκιμίου και προετοιμασία συσκευής

Σε ότι αφορά τα αργιλικά εδάφη, το υλικό από το οποίο θα μορφωθεί το δοκίμιο πρέπει να είναι σε πλάστιμη κατάσταση, ώστε να είναι εφικτή η επεξεργασία του σχήματός του. Τα δοκίμια που χρησιμοποιούνται στις δοκιμές της τριαξονικής φόρτισης έχουν κυλινδρικό σχήμα με λόγο ύψους προς διάμετρο 2, ενώ η διάμετρος εξαρτάται από τη συσκευή όπου θα πραγματοποιηθεί η δοκιμή και είναι 38 ή 50 mm.

Λαμβάνεται τμήμα της πλάστιμης μάζας από το συμπιεσμένο υλικό (ολόκληρη η διαδικασία παρασκευής στην Ενότητα 3.3) και τοποθετείται στην ειδική διάταξη της Εικόνας 3.3(α) όπου συγκρατείται στα άκρα του ενώ μπορεί να περιστρέφεται για τη διευκόλυνση της εργασίας. Με κατάλληλο εργαλείο κοπής (φαίνεται στην Εικόνα 3.3(β)), ώστε να μην προκληθεί διατάραξη του δοκιμίου, αφαιρείται υλικό περιμετρικά και δίνεται το κυλινδρικό σχήμα στο δοκίμιο. Όταν η διάμετρος πλησιάζει την απαιτούμενη για το πείραμα, τότε πολύ προσεκτικά λειαίνονται οι εναπομείνασες έντονες ακμές που έχουν δημιουργηθεί κατά την κοπή. Έπειτα, κόβεται το δοκίμιο στο ακριβές για τη δοκιμή ύψος. Το υλικό που αφαιρέθηκε μεταφέρεται σε τρείς υποδοχείς γνωστής μάζας για τον προσδιορισμό της υγρασίας του. Ο διαχωρισμός γίνεται με βάση την εγγύτητα του υλικού στο τελικώς μορφωμένο δοκίμιο. Αυτό γίνεται για να ελεγχθούν τυχόν ανομοιομορφίες που ενδεχομένως να προέκυψαν κατά την αρχική συμπύκνωση του υλικού. Τέλος, λαμβάνονται οι διαστάσεις του δοκιμίου (ύψος και διάμετρος) με ηλεκτρονικό παχύμετρο ακρίβειας εκατοστού του χιλιοστού, σε όσο το δυνατόν περισσότερα σημεία και το βάρος του.

Ακολουθεί η τοποθέτηση του δοκιμίου εντός της αδιαπέρατης ελαστικής μεμβράνης με τη βοήθεια μίας απλής διάταξης που έχει τη δυνατότητα να την κράτα με υποπίεση τεντωμένη (Εικόνα 3.3(γ)). Στο κάτω και στο πάνω μέρος τοποθετούνται πορόλιθοι οι οποίοι πρέπει να είναι πλήρως κορεσμένοι με νερό. Πάνω από τον άνω πορόλιθο τοποθετείται η κεφαλή (top-cap) η οποία μαζί με τους πορόλιθους καλύπτεται με τη μεμβράνη. Το πάχος της μεμβράνης δεν πρέπει να ξεπερνά το 1% της διαμέτρου του δοκιμίου, σύμφωνα με τις προδιαγραφές.



Εικόνα 3.3: Προετοιμασία του δοκιμίου για τη δοκιμή της κυλινδρικής τριαξονικής φόρτισης

Πριν την έναρξη της διαδικασίας κυκλοφορείται απαερωμένο και αποσταγμένο νερό σε όλους τους σωληνίσκους της συσκευής ώστε να εξασφαλισθεί ο κορεσμός του δικτύου. Το δοκίμιο τοποθετείται στη βάση της συσκευής και εξασφαλίζεται η πλήρης απομόνωσή του από το περιβάλλον της κυψέλης με τη βοήθεια ελαστικών δακτυλίων που δένουν σφιχτά τη μεμβράνη με τη βάση της συσκευής και την κεφαλή (top-cap).

Στη συνέχεια, εφαρμόζονται οι τοπικοί μετρητές (δύο για την μέτρηση του ύψους και ένας για τη μέτρηση της διαμέτρου) στο δοκίμιο κατά το δυνατόν κατακόρυφοι (ή οριζόντιοι αν πρόκειται για μετρητή της οριζόντιας παραμόρφωσης), με τρόπο τέτοιο ώστε η κίνησή του καθενός να μην επηρεάζει τους υπόλοιπους. Καταγράφονται έπειτα τα αρχικά μήκη ανοίγματος για τον κάθε μετρητή με το παχύμετρο, τα οποία θα χρησιμοποιηθούν στη συνέχεια για τους υπολογισμούς των παραμορφώσεων. Στην περίπτωση που στο τελευταίο στάδιο της δοκιμής αναμένεται να γίνει εφελκυσμός του δοκιμίου, τοποθετείται στην κεφαλή το κατάλληλο ελαστικό εξάρτημα. Τοποθετείται η κυψέλη και οι κοχλίες βιδώνονται καλά, το έμβολο προσαρμόζεται σε θέση κοντά στην κεφαλή του δοκιμίου και ελευθερώνεται η παροχή νερού από τη βαλβίδα ώστε να πληρωθεί η κυψέλη και να ξεκινήσει το πείραμα.

3.5.3.2 Το στάδιο του Κορεσμού

Σε αυτό το πρώτο στάδιο της δοκιμής επιχειρείται η πλήρωση των κενών μεταξύ των πλακιδίων με νερό και η διάλυση του αέρα που έχει εγκλωβισθεί στο σύστημα στράγγισης. Στις περισσότερες περιπτώσεις όπου τα δοκίμια προέρχονται από σωστά συμπιεσμένο υλικό, για την επίτευξη του κορεσμού αρκεί η αύξηση της πίεσης στην κυψέλη με κλειστή τη βαλβίδα της στράγγισης ώστε να μπορέσει να διαλυθεί ο λιγοστός εγκλεισμένος αέρας που υπάρχει στους πόρους, καθώς η διαλυτότητα των αερίων στο νερό αυξάνεται με την αύξηση της πίεσης.

Έπειτα, επιχειρείται έλεγχος του βαθμού κορεσμού που έχει επιτευχθεί, με τη μέθοδο του συντελεστή Β. Αυξάνεται η πίεση της κυψέλης κατά Δσ, με κλειστή τη βαλβίδα στράγγισης και εφόσον το δοκίμιο είναι πλήρως κορεσμένο, αναμένεται αύξηση της πίεσης των πόρων κατά Δu=Δσ (ιδανικά). Αυτό συμβαίνει επειδή το νερό και οι κόκκοι του δοκιμίου είναι ασυμπίεστοι σε σχέση με τον αέρα που υπάρχει στους πόρους. Εάν το δοκίμιο ήταν μερικώς κορεσμένο, μέρος της αύξησης της πίεσης των πόρων κατά Δu<Δσ. Έτσι, θεωρούμε ότι όταν ο συντελεστής B=(Δu/Δσ) έχει τιμή ίση με τη μονάδα τότε το δοκίμιο είναι πλήρως κορεσμένο. Στην πράξη, βέβαια, σπάνια παρατηρείται αυτό, οπότε κορεσμένο θεωρείται ένα δοκίμιο για το οποίο η τιμή του Β ξεπερνά το 0.95.

Στην περίπτωση που το δοκίμιο δεν είναι κορεσμένο, τότε πρέπει, αφού σταθεροποιηθεί η πίεση πόρων σε συγκεκριμένη τιμή, να ανοιχθεί η βαλβίδα στράγγισης και να επιχειρηθεί κορεσμός του δοκιμίου με ταυτόχρονη και ισόποση αύξηση της πίεσης πόρων και της πίεσης της κυψέλης. Η πίεση που απαιτείται για να διαλυθεί ο αέρας εντός των πόρων και εντός των σωληνίσκων του συστήματος στράγγισης συνήθως ξεπερνά τα 500kPa και πρέπει να διατηρηθεί περίπου για ένα εικοσιτετράωρο. Εφόσον το δοκίμιο καταστεί τελικά κορεσμένο, έχουμε τη δυνατότητα να υπολογίσουμε την ενεργό τάση του αφαιρώντας από την πίεση της κυψέλης την τιμή της πίεσης πόρων. Σημειώνεται ότι το χρονικό διάστημα που απαιτείται για να σταθεροποιηθεί η πίεση των πόρων μετά από αύξηση της πίεσης της κυψέλης με κλειστή τη βαλβίδα στράγγισης εξαρτάται από το υλικό της δοκιμής. Μπορεί να γίνει ακαριαία, σχεδόν, σε κάποιο αμμώδες υλικό αλλά στην περίπτωση των αργιλικών υλικών μπορεί να διαρκέσει ώρες.

3.5.3.3 Το στάδιο της Στερεοποίησης

Η μελέτη της διατμητικής αντοχής προϋποθέτει την κατασκευή μιας περιβάλλουσας αστοχίας απ' την οποία θα εξαχθούν τα ζητούμενα μεγέθη (γωνία τριβής, συνοχή, παράμετροι κρίσιμης κατάστασης). Για το λόγο αυτό είναι χρήσιμο να υπάρχουν αποτελέσματα από πειράματα με διαφορετικές αρχικές ενεργές τάσεις, καθώς έτσι μπορεί να καθοριστεί με πιο σαφή τρόπο η περιβάλλουσα αστοχίας. Επίσης, εάν επρόκειτο για αδιατάρακτο δοκίμιο, όπου μας ενδιαφέρει ο προσδιορισμός της διατμητικής αντοχής για κάποιο εδαφικό υλικό σε συγκεκριμένο βάθος (π.χ. το βάθος θεμελίωσης ενός έργου), σε αυτό το βήμα του πειράματος μπορεί να επιτευχθεί η απαιτούμενη ενεργός τάση.

Στο στάδιο της στερεοποίησης επιλέγεται η τιμή της αρχικής μέσης ενεργού τάσης για την οποία θα προσδιορισθεί η διατμητική αντοχή ενός δοκιμίου, αλλά και ο τρόπος, δηλαδή η διαδρομή τάσεων με την οποία θα επιτευχθεί αυτή η τιμή. Έτσι, η στερεοποίηση του δοκιμίου μπορεί να γίνει είτε σε καθεστώς ισότροπης συμπίεσης του δοκιμίου, δηλαδή χωρίς την εφαρμογή κατακόρυφου αξονικού φορτίου, είτε με ανισότροπη συμπίεσή του (πιο κοντά στις διεργασίες της φύσης) ή ακόμα με κάποια άλλη μικτή τασική όδευση την οποία θα επιλέξει ο μελετητής. Σε κάθε περίπτωση η διαδικασία αυτή προϋποθέτει εξ ορισμού την ελεύθερη στράγγιση του δοκιμίου (ανοιχτή βαλβίδα στράγγισης) και μάλιστα οι ρυθμοί επιβολής του φορτίου κατά την ανισότροπη στερεοποίηση δεν πρέπει να ξεπερνούν μία συγκεκριμένη τιμή, για να μην προκληθούν συνθήκες διάτμησης.

Η χρονική διάρκεια της στερεοποίησης εξαρτάται από τη ζητούμενη τιμή της ενεργού τάσης και από τη φύση του υλικού. Το γεγονός ότι το δοκίμιο είναι κορεσμένο μας δίνει τη δυνατότητα να γνωρίζουμε ότι οποιαδήποτε μεταβολή του όγκου του οφείλεται καθαρά και μόνο στην αποβολή νερού από τους πόρους του και όχι σε συμπίεση του αέρα. Άρα μπορούμε να υπολογίσουμε την ογκομετρική παραμόρφωση απευθείας από τη μεταβολή της στάθμης στο αντίστοιχο δοχείο. Στην ισότροπη στερεοποίηση εφαρμόζεται μια συγκεκριμένη τιμή της αντιπίεσης πόρων, που συνήθως διατηρείται σταθερή, και η απαιτούμενη αρχική τιμή της πίεσης της κυψέλης. Η τελευταία προκαλεί άμεσα ανάπτυξη υπερπιέσεων εντός του δοκιμίου και η διαφορά πίεσης σε σχέση με την επιβαλλόμενη αντιπίεση πόρων οδηγεί το νερό σε στράγγιση. Οι κόκκοι έρχονται πιο κοντά και το δοκίμιο αποκτά μεγαλύτερη ενεργό τάση. Κατά την ολοκλήρωση του εκάστοτε βήματος της στερεοποίησης, ο ρυθμός μεταβολής της ογκομετρικής παραμόρφωσης μειώνεται σημαντικά και αυτό υποδεικνύει τη συνέχιση της διαδικασίας, μέχρι την επίτευξη της απαιτούμενης ενεργού τάσης. Σε κάθε βήμα η πίεση της κυψέλης αυξάνεται τόσο ώστε η ενεργός τάση του δοκιμίου να διπλασιασθεί κατά την ολοκλήρωσή του. Ένα παράδειγμα ισότροπης στερεοποίησης σε βήματα, για κανονικώς στερεοποιημένο δοκίμιο, φαίνεται στο Σχήμα 3.5 και αφορά τον καολινίτη της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας. Η αρχική ενεργός τάση ήταν 60kPa ενώ στο τέλος το δοκίμιο κατέληξε να διαθέτει μέση τάση 1600 kPa. Η τασική όδευση που αντιστοιχεί σε κάθε ισότροπη στερεοποίηση είναι μια ευθεία γραμμή πάνω στον άξονα της μέσης ενεργού τάσης που ξεκινά από την αρχική ενεργό του δοκιμίου, όπως προσδιορίστηκε στο στάδιο του κορεσμού, και τελειώνει στην επιθυμητή τιμή.



Σχήμα 3.5: Η ογκομετρική παραμόρφωση συναρτήσει του χρόνου στην περίπτωση ισότροπης συμπίεσης σε βήματα

Σε ότι αφορά την ανισότροπη στερεοποίηση, αυτή μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε με έλεγχο των επιβαλλόμενων τάσεων, δηλαδή με χάραξη συγκεκριμένης τασικής όδευσης, είτε με έλεγχο των παραμορφώσεων (συνήθως μηδενισμός ή ελαχιστοποίηση της αξονικής παραμόρφωσης) όπου το ακριβές μονοπάτι των τάσεων δεν μπορεί να είναι γνωστό εκ των προτέρων. Η επίτευξη συνθηκών μονοδιάστατης συμπίεσης δίνει τη δυνατότητα υπολογισμού του συντελεστή ουδετέρων ωθήσεων K₀. Η συγκεκριμένη μέθοδος αναλύεται στην ενότητα 4.2.2.1. Σε κάθε περίπτωση, μετά την επίτευξη της επιθυμητής ενεργού τάσης, το δοκίμιο διατηρείται στην ίδια κατάσταση για κάποιο διάστημα (1 με 2 μέρες) για να ολοκληρωθούν οι ερπυστικές παραμορφώσεις. Στο παρακάτω Σχήμα 3.6(α) φαίνεται η διαδρομή τάσεων, σε όρους t:s', της ανισότροπης στερεοποίησης ενός δοκιμίου καολινίτη που πραγματοποιήθηκε σε δύο βήματα. Στο πρώτο τμήμα της όδευσης (κλίση 1:1), πραγματοποιείται η μετάβαση από την αρχική ισότροπη εντατική κατάσταση (τέλος σταδίου κορεσμού), όπου ο λόγος της οριζόντιας τάσης προς την κατακόρυφη K, είναι ίσος με τη μονάδα, σε μία ανισότροπη εντατική κατάσταση μέχρι την επίτευξη του επιθυμητού λόγου K. Στη συνέχεια, η όδευση συνεχίζει επί ευθείας που περνά απ' την αρχή των αξόνων και η κλίση της αντιστοιχεί στην τιμή του λόγου K που επιτεύχθηκε, η οποία παραμένει σταθερή μέχρι την ολοκλήρωση της στερεοποίησης. Η εξίσωση που συνδέει την κλίση της διαδρομής των τάσεων στο επίπεδο t:s' με την τιμή του λόγου K είναι:

$$\frac{t}{s'} = \frac{1-K}{1+K}$$

Για λόγους σύγκρισης με την ισότροπη στερεοποίηση παρατίθεται και το διάγραμμα ογκομετρικής παραμόρφωσης συναρτήσει του χρόνου (Σχήμα 3.6(β)).

Για τον προσδιορισμό της διατμητικής αντοχής και των συναφών παραμέτρων υπερστερεοποιημένων δοκιμίων, πρέπει στο τέλος της στερεοποίησης να ακολουθήσει αποφόρτιση έως την επίτευξη του επιθυμητού βαθμού υπερστερεοποίησης (OCR). Αυτή η διαδικασία συνήθως ολοκληρώνεται γρηγορότερα και σε ότι αφορά την ισότροπη στερεοποίηση, κάποια ενδιάμεσα βήματα είναι δυνατό να παραλειφθούν.



Σχήμα 3.6: Διαδρομή τάσεων για ανισότροπη στερεοποίηση, διάγραμμα t:s' (a) και αντίστοιχη ογκομετρική παραμόρφωση συναρτήσει του χρόνου (β)

3.5.3.4 Το στάδιο της Διάτμησης

Αφού ολοκληρωθεί η στερεοποίηση του δοκιμίου και το δοκίμιο έχει πλέον την επιθυμητή τάση, ακολουθεί το στάδιο της αξονικής φόρτισής του μέχρι την αστοχία. Σε όλη τη διάρκεια της διάτμησης η πίεση της κυψέλης διατηρείται σταθερή ενώ η βάσης της συσκευής κινείται προς τα πάνω (θλίψη) με σταθερή ταχύτητα η οποία καθορίζεται στην αρχή της διαδικασίας. Έτσι, το δοκίμιο συμπιέζεται καθώς ακουμπά το ακλόνητο έμβολο και ξεκινά να παραμορφώνεται. Αυτό το στάδιο μπορεί να διεξαχθεί είτε με ελεύθερη στράγγιση του δοκιμίου είτε με απουσία στράγγισης.

Κατά την αστράγγιστη φόρτιση η βαλβίδα στράγγισης διατηρείται κλειστή και έτσι η φόρτιση του δοκιμίου γίνεται υπό σταθερό όγκο. Έτσι, η πίεση του νερού των πόρων αυξάνεται (υπερπιέσεις) στην περίπτωση κανονικά στερεοποιημένων δοκιμίων (συστολική συμπεριφορά) και μέση ενεργός τάση μειώνεται, ενώ στην περίπτωση υπερστερεοποιημένων δοκιμίων παρατηρείται αρχικά μικρή αύξηση της πίεσης πόρων και στη συνέχεια μείωσή της και ανάπτυξη υποπιέσεων, με ταυτόχρονη αύξηση της μέσης ενεργού τάσης (διαστολική συμπεριφορά). Η ταχύτητα της επιβαλλόμενης παραμόρφωσης

πρέπει να είναι αρκετά μικρή (συνήθως 0.167mm/h), ώστε οι προκαλούμενες μεταβολές των πιέσεων στο εσωτερικό του δοκιμίου να είναι συνεχώς όσο το δυνατόν πιο ομοιόμορφες και οι τυχόν διαφορές από θέση σε θέση (π.χ. λόγω τριβών με τη μεμβράνη ή λόγω ανομοιομορφίας του δοκιμίου) να εξισώνονται με την κίνηση του νερού των πόρων από θέσεις υψηλών πιέσεων προς τις αντίστοιχες θέσεις όπου επικρατούν χαμηλότερες πιέσεις.

Η φόρτιση του δοκιμίου υπό καθεστώς πλήρους στράγγισης προϋποθέτει ότι η βαλβίδα στράγγισης είναι ανοιχτή καθ' όλη τη διάρκεια της δοκιμής. Ως εκ τούτου, ο όγκος του δοκιμίου μεταβάλλεται ανάλογα με την απόκρισή του στην αξονική φόρτιση. Η ταχύτητα της επιβαλλόμενης παραμόρφωσης πρέπει σε αυτήν την περίπτωση να είναι ίση ή μικρότερη απ' ότι στην αστράγγιστη φόρτιση για να μην αναπτυχθεί υπερπίεση του νερού των πόρων κατά τη διάρκεια της δοκιμής. Σε αντίθετη περίπτωση, μπορεί να προκύψει το εξής παράδοξο: Η βαλβίδα στράγγισης να είναι ανοιχτή και παράλληλα με τη διάτμηση του δοκιμίου να παρατηρηθεί αύξηση της πίεσης πόρων σε περιοχές μακριά από την κορυφή και τη βάση του, όπου λαμβάνει χώρα η στράγγιση με αποτέλεσμα την πρόκληση έντονης ανομοιομορφίας στην πίεση πόρων εντός του δοκιμίου. Η στράγγιση του δοκιμίου γίνεται και στα δύο άκρα του ώστε να η υδραυλική κλίση κατά την ροή του νερού των πόρων από το κέντρο προς τα άκρα του δοκιμίου να είναι η ελάχιστη δυνατή. Σε συνδυασμό με τον αργό ρυθμό φόρτισης η ενεργός τάση του δοκιμίου δεν επηρεάζεται από την μεταβολή της πίεσης του νερού των πόρων κατά μήκος του δοκιμίου

Σε όλη τη διάρκεια της διάτμησης η κατακόρυφη τάση σ_z αυξάνεται, αφού αυξάνεται το φορτίο και επομένως το ίδιο κάνει και η αποκλίνουσα τάση q, μέχρι την αστοχία του δοκιμίου. Αυτή θεωρούμε ότι ορίζεται κατά σύμβαση ως η κατάσταση στην οποία παρατηρείται η μέγιστη τιμή της αποκλίνουσας τάσης, ενώ στις περισσότερες περιπτώσεις η διάρρηξη του δοκιμίου παρατηρείται αργότερα.

Η δοκιμή συνήθως ολοκληρώνεται όταν η αξονική παραμόρφωση φτάσει το 15% και αφού δημιουργηθεί το επίπεδο αστοχίας. Η βάση σταματά να μετακινείται και επιστρέφει στην αρχική της θέση, η βαλβίδα στράγγισης κλείνει (αν δεν είναι ήδη κλειστή) και η κυψέλη αδειάζει αφού μηδενισθούν οι πιέσεις στο εσωτερικό της. Το δοκίμιο αφαιρείται από τη συσκευή και τοποθετείται άμεσα σε υποδοχέα γνωστής μάζας για το προσδιορισμό της τελικής υγρασίας του, αφού πρώτα αφαιρεθούν οι πορόλιθοι, η κεφαλή και η μεμβράνη.

3.5.4 Επεξεργασία δεδομένων-Υπολογισμοί

Σε όλη τη διάρκεια της δοκιμής τριαξονικής φόρτισης το δοκίμιο υποβάλλεται σε μια ομοιόμορφη πίεση (πίεση της κυψέλης σ_c), και στην περίπτωση που εφαρμόζεται αξονικό φορτίο, σε μία επιπλέον κατακόρυφη τάση. Έτσι, η φόρτιση είναι αξονοσυμμετρική και οι άξονες των κυρίων τάσεων είναι παράλληλοι με τους άξονες του δοκιμίου. Στις περιπτώσεις όπου κατά το στάδιο της διάτμησης πραγματοποιείται συμπίεση του δοκιμίου, η μέγιστη κύρια τάση είναι η κατακόρυφη ($\sigma_1=\sigma_v$), ενώ δεν ισχύει το ίδιο σε όλες τις περιπτώσεις όπου διεξάγεται εφελκυσμός του δοκιμίου. Εάν το δοκίμιο έχει προηγουμένως στερεοποιηθεί ισοτρόπως, τότε κατά τον εφελκυσμό του η μέγιστη κύρια τάση είναι η κατακόρυφη που έχει προηγηθεί ανισότροπη στερεοποίηση, αρχικά η κατακόρυφη υπερτερεί, αλλά στη συνέχεια συμβαίνει το αντίθετο.

Η συνολική κατακόρυφη τάση που ασκείται στο δοκίμιο υπολογίζεται ως εξής:

$$\sigma_{v} = \frac{P}{A} + \sigma_{c}$$

όπου, Ρ το κατακόρυφο φορτίο, Α το εμβαδόν της διατομής του δοκιμίου και σ_c η ομοιόμορφη πίεση της κυψέλης.

Οι αντίστοιχες ενεργές τάσεις υπολογίζονται εύκολα αφαιρώντας απλά από τις ολικές την τιμή της πίεσης πόρων (δηλαδή σ_v'=σ_v-u και σ_h'=σ_c-u). Έπειτα, αφού καθορισθούν η μέγιστη και η ελάχιστη κύρια ενεργός τάση (σ₁' και σ₃'=σ₂'), μπορεί να υπολογισθεί η αποκλίνουσα τάση q και η μέγιστη διατμητική τάση t ως:

$$q = \sigma'_1 - \sigma'_3$$

και

$$t = \frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{2}$$

Οι μέση ενεργός τάση, p', και το κέντρο του κύκλου Mohr των ενεργών τάσεων, s', υπολογίζονται από τις σχέσεις:

$$p' = \frac{\sigma'_1 + 2\sigma'_3}{3}$$

$$s' = \frac{\sigma'_1 + \sigma'_3}{2}$$

Ο υπολογισμός των αναπτυσσόμενων παραμορφώσεων γίνεται με βάση τις ενδείξεις των αντίστοιχων μηκυνσιομέτρων. Έτσι, η επί τοις εκατό ογκομετρική παραμόρφωση υπολογίζεται ως:

$$\varepsilon_{v} = \frac{\Delta V}{V_{\alpha\rho\chi}} * 100\%$$

όπου ΔV η μεταβολή του όγκου του δοκιμίου, όπως υπολογίζεται από τις ενδείξεις του αντίστοιχου μηκυνσιομέτρου (volume gauge) και V_{αρχ}, η αρχική τιμή του όγκου του δοκιμίου που υπολογίζεται από τις αρχικώς μετρημένες διαστάσεις του. Η ε_ν είναι θετική στην περίπτωση που ο όγκος του δοκιμίου μειώνεται (συμπίεση), σύμφωνα με τη σύμβαση της εδαφομηχανικής.

Ο υπολογισμός των υπολοίπων παραμορφώσεων, που αφορούν τις διάφορες διευθύνσεις του δοκιμίου, γίνεται με αντίστοιχο τρόπο:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} * 100\%$$

όπου ΔΙ η μεταβολή της τιμής μιας διάστασης του δοκιμίου και Ι₀ η αντίστοιχη αρχική της τιμή. Η παραπάνω σχέση μπορεί να αφορά την αξονική παραμόρφωση που υπολογίζεται από τον εξωτερικό μετρητή (displacement), για την οποία ως Ι₀ λογίζεται το αρχικό μήκος του δοκιμίου στο τρέχον στάδιο της δοκιμής, ή τις παραμορφώσεις (ακτινικές και αξονικές) που αφορούν τις ενδείξεις των τοπικών μετρητών, για τις οποίες ως Ι₀ λογίζεται η αρχική τιμή του ανοίγματος του μετρητή (LVDT ή Radial) σε κάθε στάδιο. Αυτή υπολογίζεται από την αρχικώς μετρημένη τιμή του ανοίγματος προσθέτοντας την συνολική μεταβολή του μέχρι τη χρονική στιγμή υπολογισμού.

Η επί τοις εκατό παραμόρφωση που υπολογίζεται από τους τοπικούς μετρητές είναι ίση με την αντίστοιχη παραμόρφωση του δοκιμίου, αλλά οι μετρητές αυτοί έχουν μεγάλη ακρίβεια μόνο σε μικρές τιμές των παραμορφώσεων, μέχρι περίπου το 1 έως 2%. Στις μεγάλες παραμορφώσεις το σχήμα του δοκιμίου μεταβάλλεται σημαντικά και χάνεται η αρχική διεύθυνση τοποθέτησής τους με αποτέλεσμα οι ενδείξεις που λαμβάνονται να στερούνται ακρίβειας. Εφόσον υπολογισθούν οι παραμορφώσεις του δοκιμίου, στη συνέχεια μπορούν να υπολογισθούν και οι διαστάσεις του καθώς και ο δείκτης πόρων σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή της δοκιμής. Για την αρχική τιμή του δείκτη πόρων γίνεται η παραδοχή ότι το δοκίμιο είναι κορεσμένο καθ' όλη τη διάρκεια της δοκιμής και άρα ο υπολογισμός του δείκτη πόρων μπορεί να υπολογισθεί από την παρακάτω σχέση:

$$e_0 = G_s w_0$$

Σε οποιαδήποτε άλλη στιγμή της δοκιμής ο δείκτης πόρων μπορεί να υπολογισθεί είτε υπολογίζοντας το νέο ποσοστό υγρασίας του δοκιμίου (γνωρίζοντας τη μεταβολή της μάζας του περιεχόμενου νερού) και εφαρμόζοντας την παραπάνω σχέση, είτε μέσω της μεταβολής του δείκτη πόρων που ανάγεται στη μεταβολή του όγκου του δοκιμίου, με βάση την παρακάτω σχέση:

$$e = e_0 + \frac{\Delta V}{V_s}$$

όπου V_s ο συνολικός όγκος των στερεών κόκκων του δοκιμίου, που μπορεί να υπολογισθεί είτε στην αρχή του πειράματος, από το βάρος του δοκιμίου και το ποσοστό υγρασίας του, είτε στο τέλος, μετά από ζύγιση της ξηρής μάζας του. Οι δύο τιμές δεν πρέπει να διαφέρουν σημαντικά (συνήθως διαφέρουν κατά 1 έως 2 cc).

Τέλος, μετά τον υπολογισμό όλων των απαραίτητων μεγεθών, κατασκευάζονται τα διαγράμματα των διαδρομών τάσεων και τάσεων-παραμορφώσεων που είναι απαραίτητα για την εποπτεία της συμπεριφοράς του υπό εξέταση εδάφους και τον προσδιορισμό των παραμέτρων αντοχής, με βάση τα αποτελέσματα που προκύπτουν από μια ομάδα ομοειδών πειραμάτων. Στο επόμενο κεφάλαιο παρουσιάζονται και αναλύονται όλα τα απαραίτητα διαγράμματα και η μεθοδολογία με την οποία εξήχθησαν οι παράμετροι αντοχής του υλικού και οι παράμετροι της κρίσιμης κατάστασης.

4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ

4.1 Αποτελέσματα δοκιμών συμπιεσομέτρου

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας διεξήχθησαν τέσσερις δοκιμές συμπιεστότητας με φόρτιση ακολουθούμενη από αποφόρτιση δοκιμίων από καολινίτη, σύμφωνα με τη διαδικασία που περιγράφηκε στην υποενότητα 3.4.2. Στις τρείς εξ αυτών, τα δοκίμια προέρχονται από το δείγμα που είχε προηγουμένως υποστεί μονοδιάστατη στερεοποίηση, σε συμπιεσόμετρο διαμέτρου 15cm, σύμφωνα με τη διαδικασία παρασκευής αναζυμωμένων δοκιμίων που περιγράφηκε στην Ενότητα 3.3. Από το ίδιο υλικό προήλθαν και τα δοκίμια των δοκιμών τριαξονικής φόρτισης. Άλλη μία δοκιμή συμπιεστότητας διεξήχθη με το δοκίμιο να τοποθετείται υπό μορφή χυλού (σε υδαρή κατάσταση) στο κλασικό συμπιεσόμετρο διαμέτρου 75mm. Σκοπός είναι να διερευνηθεί η επίδραση του μεγέθους του συμπιεσομέτρου, μέσω σύγκρισης των αποτελεσμάτων μονοδιάστατης συμπίεσόμετρο, με τα αντίστοιχα αποτελέσματα από την απευθείας στερεοποίηση του δοκιμίου υπό μορφή χυλού στο κλασικό συμπιεσόμετρο.

Ο λόγος για τον οποίο κρίθηκε σκόπιμο να γίνουν δοκιμές συμπιεστότητας σε δοκίμια από το ίδιο δείγμα του αναζυμωμένου υλικού που θα χρησιμοποιηθεί στις τριαξονικές δοκιμές (υπενθυμίζεται ότι το δείγμα αυτό έχει υποστεί αρχικά μονοδιάστατη στερεοποίηση σε ενεργό τάση 200kPa), είναι για να επαληθευθεί ότι η διαδικασία της μονοδιάστατης στερεοποίησης του αναζυμωμένου, κατά Burland (Burland, 1990), υλικού ολοκληρώθηκε με επιτυχία, δηλαδή ότι το υλικό απέκτησε στο τέλος της διαδικασίας την επιθυμητή ενεργό τάση. Η επαλήθευση βασίζεται στον υπολογισμό (έστω και με αδρή προσέγγιση) της μέγιστης τάσης προφόρτισης από την καμπύλη συμπιεστότητας των ανωτέρω δοκιμίων αναζυμωμένου υλικού. Η τάση αυτή είναι 200kPa, περίπου, και είναι η αρχική ενεργός τάση

των δοκιμίων όταν τοποθετούνται στην τριαξονική συσκευή με την προϋπόθεση ότι το δοκίμιο μπορεί να αναπτύξει και να υποστηρίξει υποπιέσεις αντιστοίχου μεγέθους. Εάν το δοκίμιο έχει μικρότερη αρχική ενεργό τάση θεωρείται κανονικώς στερεοποιημένο μόνον όταν στερεοποιηθεί στην τριαξονική συσκευή σε ενεργό τάση μεγαλύτερη των 200kPa.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, σε όλες τις δοκιμές τριαξονικής φόρτισης που διενεργήθηκαν, η ενεργός τάση των δοκιμίων ξεπερνούσε την τιμή των 200kPa κατά το στάδιο της στερεοποίησης και γι' αυτό δεν παρατίθενται οι σχετικοί υπολογισμοί. Τα δε υπερστερεοποιημένα δοκίμια υποβλήθηκαν σε επαναστερεοποίηση στην τριαξονική συσκευή στα 1600kPa και στη συνέχεια σε αποφόρτιση στην επιθυμητή αρχική ενεργό τάση.

Στο Σχήμα 4.1 παρουσιάζεται το συγκεντρωτικό ημιλογαριθμικό διάγραμμα που περιέχει τις καμπύλες μονοδιάστατης συμπίεσης και διόγκωσης από όλες τις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν. Στον κατακόρυφο άξονα φαίνεται ο δείκτης πόρων, ενώ στον οριζόντιο, σε λογαριθμική κλίμακα, φαίνεται η κατακόρυφη ενεργός τάση του δοκιμίου κατά τη διάρκεια της συμπίεσης. Στο υπόμνημα παρατίθενται τα αντίστοιχα αρχικά ποσοστά υγρασίας των δοκιμίων.



Σχήμα 4.1: Καμπύλες μονοδιάστατης συμπίεσης και αποφόρτισης των δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν

Τα δοκίμια ΚΟ1, ΚΟ2 και ΚΟ3 προέρχονται από το δείγμα αναζυμωμένου υλικού που υποβλήθηκε αρχικά σε στερεοποίηση στο μεγάλο συμπιεσόμετρο σε σ_v = 200 kPa. Οι αρχικές τιμές του δείκτη πόρων των δοκιμίων ήταν e=1.200, 1.062 και 1.028 αντίστοιχα, ενώ τα δοκίμια είχαν διάμετρο 50mm και αρχικό ύψος 17.6mm κατά την τοποθέτησή τους στο κλασικό συμπιεσόμετρο για περεταίρω συμπίεση. Τα ΚΟ1 και ΚΟ3 φορτίστηκαν από τα 57 έως τα 7036kPa και έπειτα αποφορτίστηκαν μέχρι τα 112kPa. Σε ότι αφορά το KO2, η φόρτισή του στη συσκευή του συμπιεσομέτρου ξεκίνησε επίσης από τα 57kPa και έφτασε έως τα 3532kPa, από όπου και αποφορτίστηκε έως τα 443kPa. Το δοκίμιο ΚΟ4 βρισκόταν σε υδαρή κατάσταση (χυλός) κατά την έναρξη της δοκιμής με αρχικό δείκτη πόρων e=1.958, που αντιστοιχεί σε ποσοστό υγρασίας ανάμιξης w/c=75% (1.59LL), και τοποθετήθηκε στη μήτρα συμπιεσομέτρου διαμέτρου 75mm και αρχικού ύψους 19mm όπου φορτίστηκε από 2 έως 6277kPa και στη συνέχεια αποφορτίστηκε έως τα 100kPa. Σημειώνεται επίσης, ότι τα δοκίμια ΚΟ2 και ΚΟ3 προέρχονται από το ίδιο δείγμα που εξολκεύθηκε από το μεγάλο συμπιεσόμετρο με αρχικό ποσοστό υγρασίας ανάμιξης του αναζυμωμένου υλικού w/c= 70% (1.5LL), ενώ το αρχικό ποσοστό υγρασίας ανάμιξης του αναζυμωμένου υλικού του δείγματος από το οποίο προέρχεται το δοκίμιο ΚΟ1 ήταν w/c=72% (1.53LL).

Οι καμπύλες συμπίεσης των δοκιμίων KO1, KO2 και KO3 προσομοιώνουν ένα προστερεοποιημένο υλικό με τον αρχικό κλάδο σχεδόν παράλληλο με αυτόν της αποφόρτισης ενώ για κατακόρυφη τάση σ_v'>200kPa ο κλάδος συμπίεσης έχει σαφώς μεγαλύτερη κλίση που αντιστοιχεί σε κανονικώς φορτισμένο υλικό (καθώς ξεπεράστηκε η τιμή της κατακόρυφης τάσης με την οποία είχε ολοκληρωθεί η στερεοποίηση του δείγματος στο μεγάλο συμπιεσόμετρο). Μετά την υπέρβαση της μέγιστης τάσης προφόρτισης οι καμπύλες συνεχίζουν σε κλάδους με παράλληλες μεταξύ τους διευθύνσεις, γεγονός που υποδεικνύει την επαναληψιμότητα των δοκιμών, αλλά και με τη διεύθυνση της καμπύλης συμπίεσης του δοκιμίου KO4, γεγονός που υποδεικνύει ότι για αναζυμωμένο υλικό με παρόμοια αρχική υγρασία, η στερεοποίησή του στο κλασικό συμπιεσόμετρο δίνει ισοδύναμα αποτελέσματα με αρχική στερεοποίηση στο μεγάλο συμπιεσόμετρο σε σ_v'=200kPa, εξόλκευση του δείγματος και επαναφόρτιση του δοκιμίου από το ανωτέρω δείγμα στο κλασικό συμπιεσόμετρο. Το παραπάνω συμπέρασμα αποτυπώνεται εντονότερα στις περιπτώσεις των KO1 και KO4, των οποίων οι καμπύλες τείνουν να ταυτιστούν για κατακόρυφη τάση σ_v'>500kPa. Αυτό συμβαίνει διότι το υλικό από το οποίο προήλθε το δοκίμιο KO1 είχε, κατά την τοποθέτησή του στο μεγάλο συμπιεσόμετρο, ποσοστό υγρασίας πολύ κοντινό σε αυτό με το οποίο αναμίχθηκε το αναζυμωμένο υλικό του δοκιμίου KO4 (w/c=72% και w/c=75% αντίστοιχα).

Στην καμπύλη ΚΟ4 παρατηρείται αλλαγή κλίσης για τιμή της κατακόρυφης τάσης κοντά στα 10kPa, η οποία οφείλεται στην αλλαγή του ρυθμού φόρτισης κατά τη διάρκεια της δοκιμής. Συγκεκριμένα, επειδή στην πρώτη βαθμίδα φόρτισης το δοκίμιο βρίσκεται σε υδαρή κατάσταση, παραμορφώνεται έντονα μόνο υπό το βάρος της κεφαλής (top-cap) και του πορόλιθου για πέντε εικοσιτετράωρα. Στην συνέχεια, η φόρτιση συνεχίζεται με την τυπική ρουτίνα διπλασιασμού του φορτίου ανά εικοσιτετράωρο (BS1377, ASTM) οπότε ο ρυθμός φόρτισης μεταβάλλεται και παρατηρείται αλλαγή της κλίσης της καμπύλης (βλ. και (Koupέλης, 2016).

Οι καμπύλες του Σχήματος 4.1 μπορούν να κανονικοποιηθούν με χρήση του δείκτη κενών Ι_v, που εισήγαγε ο Burland (Burland, 1990). Σε ένα διάγραμμα Ι_v:σ_v', μπορούν να παρασταθούν διαφορετικά αργιλικά υλικά, με διαφορετικές τιμές αρχικών ποσοστών υγρασίας από μία καμπύλη η οποία ονομάζεται καμπύλη εγγενούς συμπιεστότητας και αφορά μόνο αναζυμωμένα υλικά. Ο υπολογισμός του δείκτη κενών γίνεται με βάση τη σχέση:

$$I_{\nu} = \frac{e - e^*_{100}}{e^*_{100} - e^*_{1000}}$$

όπου e η τιμή του δείκτη πόρων και e^{*}100, e^{*}1000, οι τιμές του δείκτη πόρων όταν η κατακόρυφη ενεργός τάση ισούται με 100kPa και 1000 kPa αντίστοιχα. Οι τιμές των e^{*}100 και e^{*}1000 υπολογίζονται ξεχωριστά για κάθε καμπύλη.

Στο Σχήμα 4.2 παρουσιάζονται σε διάγραμμα Ι_v:σ_v' οι κανονικοποιημένες καμπύλες μονοδιάστατης συμπίεσης που αντιστοιχούν στις καμπύλες του Σχήματος 4.2, καθώς και η θεωρητική καμπύλη του Burland (Burland, 1990).



Σχήμα 4.2: Οι κανονικοποιημένες καμπύλες μονοδιάστατης συμπίεσης, με βάση το δείκτη κενών Ι_ν, για όλες τις δοκιμές και η Θεωρητική Καμπύλη Burland (Burland, 1990)

Αρχικά, παρατηρείται πλήρης ταύτιση των καμπυλών KO1, KO2 και KO3, για τις οποίες παραλείπεται ο κλάδος επαναφόρτισης αφού η κανονικοποίηση αφορά μόνο κανονικώς στερεοποιημένα δοκίμια. Οι καμπύλες δείχνουν σαφή τάση για προσέγγιση της καμπύλης του αναζυμωμένου υλικού για ένα εύρος κατακόρυφων τάσεων έως και περίπου τα 2MPa.

Η σύγκριση με την καμπύλη που πρότεινε ο Burland (1990) για ένα μεγάλο αριθμό αναζυμωμένων αργίλων γίνεται με την καμπύλη που αντιστοιχεί στο αναζυμωμένο δοκίμιο KO4. Παρατηρείται, αφενός, η επιρροή του ρυθμού φόρτισης κατά τη διεξαγωγή της δοκιμής (αλλαγή της κλίσης της καμπύλης για σ_v'~10kPa) και αφετέρου, παρά τη σχετικώς μικρή απομάκρυνση των καμπυλών, μία σαφώς διαφορετική καμπυλότητα για μεγαλύτερες τάσεις. Ενώ η καμπύλη του Burland στρέφει τα κοίλα προς τα πάνω η καμπύλη που αντιστοιχεί στον καολινίτη στρέφει τα κοίλα προς τα κάτω. Αυτή η απόκλιση παρατηρείται και στις καμπύλες των δοκιμίων που επαναστερεοποιούνται σε τάσεις μεγαλύτερες των 200kPa. Το γεγονός αυτό μπορεί να αποδοθεί στη διαφορετικότητα του συγκεκριμένου καολινίτη η οποία αναδείχτηκε και από τα όρια Atterberg με βάση τα οποία το υλικό

κατατάσσεται στις αργιλώδεις ιλύες χαμηλής πλαστιμότητας, βρισκόμενο κάτω από την καμπύλη A στο διάγραμμα Casagrande (Σχήμα 3.2), ενώ οι άργιλοι στις οποίες αναφέρεται η καμπύλη του Burland βρίσκονται πάνω από την καμπύλη A. Οι Καραγιαννόπουλος (Καραγιαννόπουλος, 2011) και Γεωργιάννου (Georgiannou, et al., 2018) παρατήρησαν ότι υλικά χαμηλής πλαστιμότητας κάτω από την καμπύλη A αποκλίνουν από την καμπύλη εγγενούς συμπίεσης που περιγράφει υλικά πάνω από ή και επί της γραμμής A.

Ονομασία	Αρχικό ποσοστό	e [*] 100	e [*] 1000	C [*] _c	C [*] s
δοκιμής	υγρασίας (%)				
KO1	45.98	1.177	0.771	0.406	0.177
KO2	40.69	1.089	0.692	0.397	0.108
KO3	39.38	1.029	0.628	0.401	0.153
KO4	75	1.159	0.772	0.387	0.193
Μἑσες τιμἑς	-	1.114	0.716	0.398	0.158

Πίνακας 4.1: Τιμές εγγενών χαρακτηριστικών από τις δοκιμές συμπιεστότητας

Για κάθε μία από τις πειραματικές καμπύλες εξήχθησαν οι εγγενείς χαρακτηριστικές τιμές του δείκτη πόρων e^{*}₁₀₀, e^{*}₁₀₀₀, καθώς οι εγγενείς δείκτες συμπιεστότητας C^{*}_c και διόγκωσης C^{*}_s. Οι τιμές των δεικτών C^{*}_c και C^{*}_s υπολογίσθηκαν ως οι κλίσεις των κλάδων φόρτισης, που αντιστοιχούν σε κανονικώς φορτισμένα δοκίμια, και αποφόρτισης, αντίστοιχα, από το διάγραμμα e:σ_v'. Τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα των υπολογισμών παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.1. Στην τελευταία σειρά του πίνακα παρατίθενται οι μέσες τιμές των ανωτέρω εγγενών χαρακτηριστικών.

4.2 Αποτελέσματα δοκιμών τριαξονικής φόρτισης

4.2.1 Εισαγωγή

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα όλων των δοκιμών τριαξονικής φόρτισης που διεξήχθησαν στα πλαίσια της παρούσας εργασίας. Η παρουσίαση θα γίνει σε δύο σκέλη που αφορούν το στάδιο της στερεοποίησης και το στάδιο της διάτμησης. Τα δοκίμια προέρχονται από δείγμα που είχε προηγουμένως υποστεί μονοδιάστατη στερεοποίηση μέχρι τα 200kPa, σύμφωνα με τη διαδικασία παρασκευής αναζυμωμένων δοκιμίων που περιγράφηκε στην Ενότητα 3.3.

Κατά την τριαξονική φόρτιση τα δοκίμια στερεοποιήθηκαν είτε ανισότροπα, δηλαδή με επιβολή κατακόρυφης τάσης μεγαλύτερης από την πίεση της κυψέλης, είτε ισότροπα, με επιβολή ίδιας αξονικής και πλευρικής τάσης. Το στάδιο της διάτμησης περιλαμβάνει αστράγγιστες δοκιμές θλίψης και εφελκυσμού για τα ισότροπα στερεοποιημένα δοκίμια και δοκιμές θλίψης για τα ανισότροπα στερεοποιημένα δοκίμια. Συγκεκριμένα, διεξήχθησαν 12 δοκιμές θλίψης σε ανισότροπα στερεοποιημένα δοκίμια και 7 δοκιμές θλίψης έναντι 2

Κατά το στάδιο της ανισότροπης στερεοποίησης, τρία δοκίμια στερεοποιήθηκαν με έλεγχο των ακτινικών παραμορφώσεων, που προσομοιώνει συνθήκες μονοδιάστατης συμπίεσης, για τον προσδιορισμό του συντελεστή ουδετέρων ωθήσεων K₀. Για τα υπόλοιπα δοκίμια ακολουθήθηκε μια τυπική τασική όδευση, όπως αυτή του Σχήματος 3.6(α). Όλα τα ανισότροπα στερεοποιημένα δοκίμια εισέρχονται στο στάδιο της διάτμησης κανονικώς στερεοποιημένα.

Σε ότι αφορά τα ισότροπα στερεοποιημένα δοκίμια, τέσσερα εξ αυτών εισέρχονται στο στάδιο της διάτμησης όντας υπερστερεοποιημένα με διαφορετικές τιμές του δείκτη υπερστερεοποίησης OCR. Συγκεκριμένα, τρία δοκίμια επαναστερεοποιήθηκαν έως την τιμή της μέσης ενεργού τάσης p'=1600kPa και στη συνέχεια αποφορτίστηκαν σε διαφορετικές τιμές της μέσης ενεργού τάσης ώστε να επιτευχθούν διαφορετικές τιμές του λόγου υπερστερεοποίησης OCR=4, 8 και 10. Ένα ακόμη δοκίμιο τοποθετήθηκε στην τριαξονική συσκευή και φορτίστηκε στην αρχική του τάση p'=100kPa, η οποία, δεδομένου ότι στο συμπιεσόμετρο είχε φορτιστεί με σν'=200kPa, το καθιστά υπερστερεοποιημένο (OCR=2 σε όρους κατακόρυφης ενεργού τάσης), ενώ τα υπόλοιπα είναι κανονικώς στερεοποιημένα σε διάφορες τάσεις μεγαλύτερες των 200kPa έως και 1600kPa.

Για την ανάλυση των αποτελεσμάτων κατασκευάζονται τα διαγράμματα διαδρομών τάσεων και τάσεων-παραμορφώσεων, προσδιορίζονται οι περιβάλλουσες Mohr-Coulomb και υπολογίζονται οι γωνίες διατμητικής αντοχής καθώς και η συνοχή που εμφανίζουν τα υπερστερεοποιημένα δοκίμια. Όλα τα δοκίμια φορτίστηκαν σε μεγάλες παραμορφώσεις και διερευνήθηκε εάν εμφανίζουν συνθήκες κρίσιμης κατάστασης κατά την αστοχία η οποία προσδιορίστηκε στον μέγιστο λόγο των τάσεων q/p'. Τέλος, μορφώνονται τα διαγράμματα q:p' και v:p' με τις προβολές της Καμπύλης Κρίσιμης Κατάστασης και το κανονικοποιημένο διάγραμμα (q/p_e'):(p/p_e'), στα οποία αποτυπώνεται η συνολική περιβάλλουσα επιφάνεια για το συγκεκριμένο υλικό (επιφάνεια Hvorslev-Roscoe), ενώ υπολογίζονται και οι αντίστοιχες παράμετροι Μ, Γ, λ, g και h (για τους ορισμούς των παραμέτρων αυτών βλ. Ενότητες 2.5 και 2.7)

4.2.2 Στερεοποίηση των δοκιμίων

4.2.2.1 Ανισότροπη στερεοποίηση με έλεγχο της πλευρικής παραμόρφωσης στην Τριαξονική συσκευή

Η ανισότροπη στερεοποίηση στην Τριαξονική συσκευή με έλεγχο των παραμορφώσεων και συγκεκριμένα με περιορισμό, στο ελάχιστο, της πλευρικής παραμόρφωσης, δημιουργεί συνθήκες μονοδιάστατης συμπίεσης του δοκιμίου, από τα αποτελέσματα της οποίας μπορεί να εξαχθεί η τιμή του συντελεστή ουδετέρων ωθήσεων K₀. Σε αυτή τη διαδικασία δεν είναι δυνατό να προκαθορισθεί η διαδρομή τάσεων που θα ακολουθήσει το δοκίμιο, όμως με τον κατάλληλο προγραμματισμό του λογισμικού μέσω του οποίου εκτελούνται οι δοκιμές, μπορούν να εξασφαλισθούν, σε μεγάλο βαθμό, οι συνθήκες μονοδιάστατης παραμόρφωσης του δοκιμίου. Η διαδρομή τάσεων καταγράφεται και είναι απόρροια των ανωτέρω συνθηκών. Απαραίτητη για τη διεξαγωγή της μονοδιάστατης στερεοποίησης είναι η τοποθέτηση του τοπικού μετρητή πλευρικής παραμόρφωσης (radial strain belt) στο δοκίμιο, πριν την έναρξη του πειράματος.

Στο λογισμικό της τριαξονικής συσκευής εισάγονται τα απαραίτητα δεδομένα που αφορούν στις αρχικές διαστάσεις του δοκιμίου, στο εύρος των επιτρεπόμενων πλευρικών παραμορφώσεων (0.002%) και στους ρυθμούς με τους οποίους θα μεταβάλλονται η κατακόρυφη και η οριζόντια τάση. Αφού εκτιμηθεί ένας αρχικός λόγος της ενεργού οριζόντιας προς την κατακόρυφη τάση Κ, δίνεται η εντολή οι τάσεις να αυξάνουν υπό τον ανωτέρω σταθερό λόγο και ξεκινά η στερεοποίηση του δοκιμίου.

Εάν αυτή η φόρτιση οδηγεί σε μεταβολή της διαμέτρου του δοκιμίου, όταν ξεπεραστεί το προκαθορισμένο εύρος πλευρικής παραμόρφωσης, ο λόγος των επιβαλλομένων τάσεων αλλάζει. Συγκεκριμένα, εάν η διάμετρος του δοκιμίου αυξηθεί και η πλευρική παραμόρφωση ξεπεράσει το επιτρεπτό όριο, προκαλείται αύξηση της οριζόντιας τάσης για να επανέλθει η πλευρική παραμόρφωση στην αρχική της τιμή (συνήθως η τιμή αυτή είναι το μηδέν). Σε αυτό το στάδιο ο λόγος Κ αυξάνεται. Αντιθέτως, εάν η αρχική φόρτιση τείνει να μειώσει την διάμετρο του δοκιμίου, η αύξηση τη κατακόρυφης τάσης επαναφέρει την πλευρική παραμόρφωση στην αρχική μηδενική τιμή. Σε αυτό το στάδιο ο λόγος Κ μειώνεται. Σε κάθε περίπτωση η φόρτιση συνεχίζεται έως ότου η πλευρική παραμόρφωση επανέλθει στην τιμή αναφοράς και η διαδικασία στερεοποίησης επαναλαμβάνεται με νέα τιμή του λόγου Κ. Έτσι, σε κάθε επανάληψη, ο λόγος διορθώνεται, όταν απαιτείται, μέχρι την επίτευξη της επιθυμητής μέσης ενεργού τάσης από την οποία θα ξεκινήσει το στάδιο της διάτμησης. Σημειώνεται εδώ, ότι κατά τη διάρκεια της στερεοποίησης, η μέση ενεργός τάση του δοκιμίου αυξάνεται (ή παραμένει κατά διαστήματα σταθερή) ενώ η αποκλίνουσα τάση μπορεί ενίστε να μειώνεται, προκειμένου να διασφαλίζεται η συνθήκη της μηδενικής πλευρικής παραμόρφωσης. Οι διαδρομές τάσεων που ακολουθήθηκαν κατά την εφαρμογή της παραπάνω μεθόδου στερεοποίησης φαίνονται στα διαγράμματα του Σχήματος 4.4 (α, β και γ).

Και στις τρείς περιπτώσεις, το αρχικό τμήμα έχει κλίση 1:1 μέχρι την επίτευξη της επιθυμητής αρχικής τιμής του λόγου Κ. Στη συνέχεια, ξεκινά η επαναληπτική διαδικασία φόρτισης που περιγράφεται από το τεθλασμένο τμήμα της τασικής όδευσης. Παρατηρείται, ότι στα μεγαλύτερα τμήματα των κλάδων μονοδιάστατης συμπίεσης η όδευση κινείται γύρω από μία ευθεία γραμμή που περνά από την αρχή των αξόνων, από την κλίση της οποίας μπορεί να υπολογισθεί η τιμή του συντελεστή ουδετέρων ωθήσεων Κ₀, σύμφωνα με την εξίσωση που διατυπώθηκε στην υποενότητα 3.5.3.3. Στο Σχήμα 4.3 (γ) διακρίνονται επίσης τμήματα όπου ο λόγος Κ διατηρήθηκε σταθερός κατά τη φόρτιση, τα οποία σχεδόν ωθήσεων Κ₀ (φαίνεται στο σχήμα με διακεκομμένη γραμμή).



Σχήμα 4.3: Διαδρομές τάσεων κατά τη στερεοποίηση των δοκιμίων υπό το καθεστώς μονοδιάστατης συμπίεσης στην τριαξονική συσκευή

Στην βιβλιογραφία έχει αναφερθεί (Carrión, 2016) ότι κατά τον υπολογισμό του συντελεστή ουδετέρων ωθήσεων K₀, πρέπει να γίνεται διάκριση ανάλογα με το αν το υλικό είναι κανονικώς στερεοποιημένο ή υπερστερεοποιημένο. Έτσι, στα πλαίσια της παρούσας

διπλωματικής εργασίας, υπολογίζεται μόνο η τιμή του συντελεστή ουδετέρων ωθήσεων Κ₀ που αφορά στο κανονικώς στερεοποιημένο υλικό, δηλαδή λαμβάνονται υπ' όψη τα δεδομένα που αφορούν τιμές της κατακόρυφης ενεργού τάσης σ'_v>200kPa.

Στο Σχήμα 4.4 φαίνονται τα διαγράμματα που περιγράφουν τη διακύμανση της τιμής του K₀ σε σχέση με την κατακόρυφη ενεργό τάση σ'_ν για τις παραπάνω τρείς δοκιμές. Παρατηρείται, ότι στην περίπτωση του ACK₀-4 υπάρχει διαφοροποίηση στη διακύμανση του K₀ όταν η τιμή της κατακόρυφης τάσης ξεπερνά την σ'_ν=250kPa, κάτι που ενδεχομένως υποδεικνύει μια διαφορετική συμπεριφορά του δοκιμίου που πλέον βρίσκεται στον κλάδο κανονικής φόρτισης. Αντιθέτως, σε ότι αφορά στο δοκίμιο ACK₀-2, το οποίο φορτίζεται μέχρι την κατακόρυφη τάση σ'_ν=516kPa, ο συντελεστής K₀ δείχνει μια ενιαία συμπεριφορά (σ'_{ν-max}=230kPa), οπότε δεν υπάρχει σαφής εικόνα για τη διακύμανση του K₀ στον κλάδο της στερεοποίησης που αντιστοιχεί σε επαναφόρτιση.





(y)

Σχήμα 4.4: Διακύμανση της τιμής του K₀ κατά την ανισότροπη στερεοποίηση των δοκιμίων με έλεγχο των πλευρικών παραμορφώσεων συναρτήσει της κατακόρυφης ενεργού τάσης σ'_ν

Η τιμή του συντελεστή ουδετέρων ωθήσεων που προτείνεται με βάση τα αποτελέσματα της πειραματικής διαδικασίας είναι K_0 =0,687. Η τιμή αυτή, εάν ίσχυε η σχέση του Jaky (Jaky, 1944) K_0 =1-sinφ, υποδεικνύει ότι η γωνία διατμητικής αντοχής είναι φ=18.26 μοίρες. Η τιμή αυτή θα συγκριθεί με την τιμή που μετρήθηκε στις δοκιμές διάτμησης που περιγράφονται στις Ενότητες 4.2.3 και 4.2.4. Αξίζει να σημειωθεί ότι στην περίπτωση του ACK₀-3 το μεγαλύτερο μέρος της στερεοποίησης διεξάγεται ενόσω το υλικό βρίσκεται στον κλάδο επαναφόρτισης (σ'_v<200kPa) και επομένως κατά τον υπολογισμό της προτεινόμενης τιμής του K_0 δεν λαμβάνονται υπ' όψη τα δεδομένα από αυτή τη δοκιμή.

Ο ισχυρισμός ότι η παραπάνω διαδικασία στερεοποίησης των δοκιμίων έγινε σε συνθήκες μονοδιάστατης συμπίεσης επαληθεύεται εάν όντως προκύπτει από τα αποτελέσματα ότι η πλευρική παραμόρφωση των δοκιμίων διατηρείται σε πολύ χαμηλά επίπεδα κατά τη στερεοποίησή τους. Στο Σχήμα 4.5 φαίνεται το διάγραμμα της πλευρικής παραμόρφωσης συναρτήσει της μέσης τάσης s' για όλα τα δοκίμια.



Σχήμα 4.5: Διάγραμμα ακτινικής παραμόρφωσης συναρτήσει της μέσης ενεργού τάσης s' για όλα τα δοκίμια

Η μέγιστη πλευρική παραμόρφωση που παρατηρείται, αφορά το δοκίμιο ACK₀-4 και είναι της τάξης 0.05% κατ' απόλυτη τιμή, ενώ τα υπόλοιπα δοκίμια παραμορφώνονται ακόμα λιγότερο, με το ACK₀-3 να εμφανίζει μέγιστη παραμόρφωση μικρότερη από 0.02% και το ACK₀-2 να παραμορφώνεται κατά μία τάξη μεγέθους λιγότερο, περί τα 0.0013% κατά μέγιστο (σε όρους απολύτων τιμών). Μάλιστα, φαίνεται ότι μετά την τιμή s'=200kPa και το ACK₀-4 παρουσιάζει παραμορφώσεις της ίδιας τάξης μεγέθους με το ACK₀-2. Αν συγκρίνει κανείς με το διάγραμμα του Σχήματος 4.4 (γ) θα παρατηρήσει ότι το πολύ μικρό εύρος παραμορφώσεων αντιστοιχεί στο τμήμα της τασικής όδευσης όπου ο λόγος Κ διατηρείται περίπου σταθερός, κάτι που σημαίνει ότι σε εκείνο το διάστημα το δοκίμιο στερεοποιήθηκε πράγματι υπό συνθήκες μονοδιάστατης συμπίεσης.

Άλλος ένας τρόπος να επαληθευθεί ο ισχυρισμός ότι κατά τη στερεοποίηση επικρατούν συνθήκες μονοδιάστατης συμπίεσης είναι να συγκριθούν οι ογκομετρικές παραμορφώσεις των δοκιμίων που αναπτύσσονται κατά τη διάρκεια της στερεοποίησης με τις αντίστοιχες αξονικές.

Στο Σχήμα 4.6 παρουσιάζεται η συσχέτιση της ογκομετρικής παραμόρφωσης των δοκιμίων με την αξονική. Οι καμπύλες περιγράφουν μόνο το στάδιο της στερεοποίησης με περιορισμό των πλευρικών παραμορφώσεων και για τον λόγο αυτόν δεν ξεκινούν από την αρχή των αξόνων. Εκτός από τις καμπύλες στερεοποίησης και τις αντίστοιχες προσεγγιστικές ευθείες έχει σχεδιασθεί και η ευθεία με κλίση 1:1 για τη διευκόλυνση της σύγκρισης. Παρατηρείται, ότι οι καμπύλες προσεγγίζονται πολύ καλά από ευθείες γραμμές με κλίσεις πολύ κοντινές στην κλίση 1:1 (βλ. σχετικές διακεκομμένες γραμμές και υπόμνημα). Αυτό υποδεικνύει ότι σχεδόν το σύνολο της ογκομετρικής παραμόρφωσης αποδίδεται στην αξονική παραμόρφωση του δοκιμίου, όπως ακριβώς συμβαίνει και στη δοκιμή συμπιεσομέτρου.



Σχήμα 4.6: Διάγραμμα ογκομετρικής παραμόρφωσης σε συνάρτηση με την αξονική παραμόρφωση των δοκιμίων κατά τη μονοδιάστατη στερεοποίηση στην τριαξονική συσκευή

Τέλος, στο Σχήμα 4.7 παρουσιάζεται το ημιλογαριθμικό διάγραμμα e:σ_v' που αφορά τα στάδια μονοδιάστατης στερεοποίησης στην τριαξονική συσκευή σε σύγκριση με τμήμα της καμπύλης KO4 της μονοδιάστατης συμπίεσης του χυλού που παρουσιάστηκε στο Σχήμα 4.1. Αρχικά, επαληθεύεται ότι τα δοκίμια είναι προστερεοποιημένα σε κατακόρυφη τάση προστερεοποίησης περίπου 200kPa (η μέγιστη τάση στην οποία υποβλήθηκαν τα δοκίμια κατά τη στερεοποίηση του χυλού στο μεγάλο συμπιεσόμετρο για την προετοιμασία του

δείγματος από το οποίο μορφώνονται τα δοκίμια των πειραμάτων στην τριαξονική συσκευή), καθώς παρατηρείται αλλαγή της κλίσης της καμπύλης φόρτισης για τα δοκίμια ACK₀-2 και ACK₀-4. Η στερεοποίηση του ACK₀-3 σταματά σε τιμή της κατακόρυφης τάσης σ_v'=230kPa, παρόλα αυτά η καμπύλη του δείχνει να ακολουθεί αυτή του ACK₀-4. Για κατακόρυφη τάση μεγαλύτερη των 300kPa, οι καμπύλες των ACK₀-2 και ACK₀-4 τείνουν να προσεγγίσουν την καμπύλη φόρτισης του KO4 που αφορά κανονικώς στερεοποιημένο υλικό. Έτσι, αν και τα δεδομένα από τη στερεοποίηση στην τριαξονική συσκευή αφορούν ένα μικρό εύρος τάσεων, φαίνεται ότι οι καμπύλες έχουν μια τυπική μορφή καμπυλών συμπιεσομέτρου.



Σχήμα 4.7: Σύγκριση καμπυλών μονοδιάστατης συμπίεσης στην τριαξονική συσκευή με την καμπύλη φόρτισης του συμπιεσομέτρου ΚΟ4

4.2.2.2 Ισότροπη Στερεοποίηση

Η ισότροπη στερεοποίηση στην Τριαξονική συσκευή πραγματοποιήθηκε σε βήματα, όπως περιγράφηκε στην υποενότητα 3.5.3.3. Στο Σχήμα 4.8 παρατίθενται τα αποτελέσματα στερεοποίησης 8 δοκιμίων σε ημιλογαριθμικό διάγραμμα ειδικού όγκου ν, συναρτήσει της μέσης ενεργού τάσης p'. Σημειώνεται ότι τα δοκίμια προέρχονται από το δείγμα χυλού που στερεοποιήθηκε σε κατακόρυφη τάση 200kPa, όπως προαναφέρθηκε. Παρατηρείται αλλαγή στις κλίσεις των καμπυλών στερεοποίησης, η οποία στις περισσότερες περιπτώσεις συντελείται για τιμές της μέσης ενεργού τάσης p'(=σ_v'=σ_c')>200kPa. Αυτή η αλλαγή οφείλεται στο γεγονός ότι όλα τα δοκίμια είναι προστερεοποιημένα και εμφανίζουν κλάδο επαναφόρτισης. Για τιμές της p' μεγαλύτερες από 200 έως 300 kPa παρατηρείται ότι οι καμπύλες αποκτούν παράλληλες διευθύνσεις και συγκλίνουν προς την καμπύλη του κανονικώς στερεοποιημένου υλικού (ICL), η οποία έχει κλίση λ_{NC}=0.150.



Σχήμα 4.8: Αποτελέσματα ισότροπης στερεοποίησης και καμπύλη ισότροπης συμπίεσης του (IC)

Τα δοκίμια TIC-5, TIC-6 και TIC-7 φορτίστηκαν έως την τάση p'=1600kPa και στη συνέχεια αποφορτίστηκαν σε διαφορετικές τελικές τάσεις για να ελεγχθεί η επιρροή του βαθμού υπερστερεοποίησης (OCR) στην αντοχή των δοκιμίων. Συγκεκριμένα, το TIC-5 αποφορτίστηκε έως τα 400kPa (OCR=4), το TIC-6 έως τα 200kPa (OCR=8) και το TIC-7 έως τα 160kPa (OCR=10). Στο Σχήμα 4.9 φαίνονται οι κλάδοι αποφόρτισης των παραπάνω δοκιμίων. Κατά την αποφόρτιση, οι καμπύλες των δοκιμίων ταυτίζονται και δίνουν τη δυνατότητα υπολογισμού, με αρκετά μεγάλη ακρίβεια, της μέσης καμπύλης αποφόρτισης (Swelling Line), που παρουσιάζεται στο διάγραμμα με κόκκινο χρώμα. Η κλίση της καμπύλης αυτής είναι λ_s=0.06.

Σε ότι αφορά τις παραμορφώσεις κατά την ισότροπη στερεοποίηση, ενδιαφέρον παρουσιάζει η συσχέτιση μεταξύ ογκομετρικής και αξονικής παραμόρφωσης των δοκιμίων, η οποία φαίνεται στο Σχήμα 4.10, αλλά και η συσχέτιση της αξονικής με την πλευρική παραμόρφωση που παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.11.



Σχήμα 4.9: Καμπύλες αποφόρτισης των δοκιμίων ΤΙC-5, ΤΙC-6, ΤΙC-7 και καμπύλες ισότροπης συμπίεσης και ισότροπης διόγκωσης



Σχήμα 4.10: Ογκομετρική παραμόρφωση συναρτήσει της αξονικής παραμόρφωσης των δοκιμίων κατά την ισότροπη στερεοποίηση

Στο Σχήμα 4.10, η συσχέτιση μεταξύ ογκομετρικής και αξονικής παραμόρφωσης αποτυπώνεται με τη μορφή καμπυλών, που όμως μπορούν να περιγραφούν από ευθείες με ενιαία κλίση που περνούν από την αρχή των αξόνων. Η μορφή των καμπυλών οφείλεται στη μέθοδο της στερεοποίησης που ακολουθήθηκε, η οποία έγινε σε βήματα με διπλασιασμό, στις περισσότερες περιπτώσεις, της ισότροπης πίεσης της κυψέλης.

Παρατηρείται, ότι οι καμπύλες των TIC-2, TIC-3 και TIC-6 συγκλίνουν προς την διακεκομμένη ευθεία με κλίση 3:1, ενώ και η καμπύλη του TIC-8 βρίσκεται αρκετά κοντά, με λίγο μικρότερη κλίση. Με ακόμα μικρότερη κλίση παρουσιάζεται η καμπύλη του TIC-9. Η σύγκριση με την ευθεία με κλίση 3:1 γίνεται ώστε να δοθεί έμφαση στην ισότροπη συμπεριφορά που φαίνεται να παρουσιάζουν τα δοκίμια κατά τη στερεοποίηση τους, παρά το γεγονός ότι προέρχονται από δείγμα το οποίο έχει προηγουμένως στερεοποιηθεί ανισότροπα υπό το καθεστώς της μονοδιάστατης παραμόρφωσης έως τα 200kPa.

Στο Σχήμα 4.11 η συσχέτιση μεταξύ της πλευρικής και της αξονικής παραμόρφωσης αποτυπώνεται με τη μορφή καμπυλών παρόμοιου σχήματος με αυτές που παρουσιάσθηκαν στο Σχήμα 4.10. Παρατηρείται απόκλιση μεταξύ των καμπυλών τόσο μεταξύ τους όσο και ως προς τη διακεκομμένη ευθεία που αντιστοιχεί σε κλίση 1:1 και αναφέρεται στην ιδανική ισότροπη συμπεριφορά. Τα δοκίμια TIC-2 και TIC-3, σε αντίθεση με την εικόνα που παρουσιάζουν στο διάγραμμα του Σχήματος 4.11, φαίνεται να απομακρύνονται από την ευθεία με κλίση 1:1 για τιμές της αξονικής παραμόρφωσης περί το 1.5%, ενώ η καμπύλη του TIC-8 δείχνει να συμβαδίζει με αυτή, κάτι που αντιβαίνει σε όσα σχολιάσθηκαν με αφορμή το προηγούμενο διάγραμμα. Τέλος, περισσότερο κοντά στη συμπεριφορά που παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.10 δείχνει να βρίσκεται το δοκίμιο TIC-9, το οποίο εμφανίζει μεγαλύτερη ανισοτροπία από τα υπόλοιπα δοκίμια, λαμβάνοντας υπ' όψη τη συνολική εικόνα από τα δύο διαγράμματα.

Σημειώνεται, ότι στο Σχήμα 4.11 δεν παρατίθενται τα αποτελέσματα που αφορούν στο δοκίμιο TIC-6, καθώς σε αυτό το πείραμα δε χρησιμοποιήθηκε τοπικός μετρητής της αξονικής παραμόρφωσης.



Σχήμα 4.11: Πλευρική παραμόρφωση συναρτήσει της αξονικής παραμόρφωσης των δοκιμίων κατά την ισότροπη στερεοποίηση

4.2.2.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων στερεοποίησης

Στην υποενότητα αυτή συγκρίνονται τα αποτελέσματα από διαφορετικές δοκιμές στερεοποίησης με σκοπό την καλύτερη εποπτεία της συμπεριφοράς του υλικού στο στάδιο αυτό. Η σύγκριση αφορά τις μεθόδους της ανισότροπης στερεοποίησης στην τριαξονική συσκευή (έλεγχος πλευρικών παραμορφώσεων αλλά και έλεγχος τάσεων) και το συμπιεσόμετρο, καθώς και την ισότροπη στερεοποίηση που διεξήχθη στην τριαξονική συσκευή, και τα αποτελέσματα που παρουσιάσθηκαν στης προηγούμενες ενότητες του παρόντος κεφαλαίου.

Στο Σχήμα 4.12 φαίνονται οι κανονικοποιημένες, ως προς τη μέγιστη κατακόρυφη ενεργό τάση συμπίεσης σ'_{v-max}, καμπύλες αποφόρτισης του Σχήματος 4.9 μαζί με τις αντίστοιχες καμπύλες αποφόρτισης που προέκυψαν από δοκιμές στο κλασικό συμπιεσόμετρο, σε δοκίμια αρχικά υπό μορφή χυλού (σε υδαρή κατάσταση) με διαφορετικά αρχικά ποσοστά υγρασίας. Στον κατακόρυφο άξονα βρίσκεται η διαφορά του ειδικού όγκου από την ελάχιστη τιμή ν_{min}, που αντιστοιχεί στην μέγιστη κατακόρυφη ενεργό



Σχήμα 4.12: Κανονικοποιημένες καμπύλες αποφόρτισης για τα (IC) δοκίμια και οι αντίστοιχες καμπύλες από τις δοκιμές του συμπιεσομέτρου για δοκίμια υπό μορφή χυλού

Στο υπόμνημα του διαγράμματος παρατίθενται τα ποσοστά υγρασίας ανάμιξης του αναζυμωμένου υλικού ως προς το όριο υδαρότητάς του, τόσο για τα τρία δοκίμια του συμπιεσομέτρου (1.40LL, 1.47LL, 1.59LL) όσο και για τα τρία ισοτρόπως στερεοποιημένα δοκίμια, που προέρχονται από το ίδιο δείγμα που στερεοποιήθηκε αρχικώς στο μεγάλο συμπιεσόμετρο (1.50LL).

Παρατηρείται η ταύτιση των καμπυλών των ισοτρόπως στερεοποιημένων δοκιμίων, ενώ η καμπύλη που αντιστοιχεί σε αρχικό ποσοστό υγρασίας 1.59LL βρίσκεται λίγο υψηλότερα από αυτές. Χαμηλότερα στο διάγραμμα τοποθετούνται οι καμπύλες με αρχικά ποσοστά υγρασίας 1.47LL και 1.40LL οι οποίες επίσης δεν ταυτίζονται μεταξύ τους. Παρατηρείται παρόμοια συμπεριφορά του υλικού κατά την αποφόρτιση ανεξαρτήτως της μεθόδου που ακολουθείται, ενώ ο τρόπος που παρατίθενται οι καμπύλες στο διάγραμμα δείχνει την ενδεχόμενη επιρροή του αρχικού ποσοστού υγρασίας σε αυτή τη συμπεριφορά.

Στο Σχήμα 4.13 παρατίθεται το ομαδοποιημένο διάγραμμα στερεοποίησης του υλικού των δοκιμών. Περιλαμβάνει ενδεικτικές δοκιμές από όλες τις προαναφερθείσες μεθόδους στερεοποίησης, για λόγους σύγκρισης.

Συγκεκριμένα, παρουσιάζονται 3 δοκιμές στερεοποίησης που διεξήχθησαν με έλεγχο των επιβαλλόμενων τάσεων (AC-8, 11 και 15) με διαφορετικές τιμές του λόγου K των κυρίων τάσεων, μία δοκιμή με έλεγχο των πλευρικών παραμορφώσεων (ACK₀-2), η δοκιμή ισότροπης στερεοποίησης για το δοκίμιο TIC-6 καθώς και μία δοκιμή συμπιεσομέτρου με το δοκίμιο να βρίσκεται σε υδαρή κατάσταση με αρχική υγρασία 1.47LL (w/c=69.09%). Τέλος, έχει σχεδιασθεί και η μέση καμπύλη ισότροπης συμπίεσης που παρουσιάσθηκε στα προηγούμενα Σχήματα 4.8 και 4.9, καθώς και οι μετατοπισμένες παράλληλες σε αυτήν ευθείες που φαίνονται στο διάγραμμα με διακεκομμένη γραμμή.

Αρχικά, πρέπει να σημειωθεί ότι η καμπύλη ICL και η καμπύλη που αντιστοιχεί στο δοκίμιο KO-5 αφορούν στο κανονικώς στερεοποιημένο υλικό. Η διαφοροποίηση η οποία παρατηρείται στην καμπύλη του KO-5 αποδίδεται (σύμφωνα με όσα αναφέρονται στην Ενότητα 4.1) στην αλλαγή του ρυθμού φόρτισης κατά τη διάρκεια της δοκιμής που οφείλεται στην πολύ υδαρή μορφή του δοκιμίου.

Όλες οι υπόλοιπες καμπύλες αφορούν υπερστερεοποιημένο υλικό από διαφορετικά δείγματα που συμπιέσθηκαν στο μεγάλο συμπιεσόμετρο σύμφωνα με τη διαδικασία που περιγράφηκε στην Ενότητα 3.3. Φαίνεται ότι όλες οι καμπύλες διαθέτουν κλάδο επαναφόρτισης, με πιο ήπια κλίση σε σχέση με τον κλάδο της κανονικής φόρτισης, ο οποίος στα μεν ανισότροπα στερεοποιημένα δοκίμια που συμπιέσθηκαν με έλεγχο των τάσεων τελειώνει σε τιμές τη κατακόρυφης τάσης κοντά στα 200kPa, ενώ για το ισότροπα στερεοποιημένο δοκίμιο, TIC-6, αυτή η μετάβαση στον κλάδο της κανονικής φόρτισης γίνεται σε μεγαλύτερη τιμή που προσεγγίζει τα 500kPa. Η διαφοροποίηση αυτή ενδεχομένως να οφείλεται στον διαφορετικό τρόπο φόρτισης των δοκιμίων στην τριαξονική συσκευή. Παρόμοια συμπεριφορά ως προς την επαναφόρτιση με τα υπόλοιπα ανισότροπα, (AC), στερεοποιημένα δοκίμια φαίνεται να έχει και το δοκίμιο ACK₀-2, το οποίο υπόκειται σε φόρτιση υπό τον περιορισμό των πλευρικών παραμορφώσεων.

Παρά τις διαφορές μεταξύ των κλάδων επαναφόρτισης, οι κλάδοι φόρτισης τείνουν να προσεγγίσουν ευθείες παράλληλες με την μέση καμπύλη της ισότροπης συμπίεσης (ICL), κάτι που επιβεβαιώνεται και με βάση τη βιβλιογραφία (Gens, 1982). Μια ιδιαιτερότητα διακρίνεται ωστόσο, στην περίπτωση του KO-5 όπου σε μεγάλες τάσεις (>3MPa) η καμπύλη φόρτισής του δείχνει να απομακρύνεται από την ICL.



Σχήμα 4.13: Ομαδοποιημένο διάγραμμα στερεοποίησης με βάση όλες τις μεθόδους που ακολουθήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας
Σε αυτό το σημείο κρίνεται σκόπιμο να συγκριθούν οι καμπύλες ογκομετρικής παραμόρφωσης συναρτήσει της αξονικής παραμόρφωσης, οι οποίες παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.14 και αφορούν δοκίμια που στερεοποιήθηκαν στην τριαξονική συσκευή με βάση τις μεθόδους που αναπτύχθηκαν προηγουμένως. Σε αυτό το διάγραμμα έχουν σχεδιασθεί και οι τιμές του λόγου των κυρίων τάσεων Κ, ο οποίος διατηρήθηκε σταθερός κατά τη διάρκεια του σταδίου της στερεοποίησης στην κάθε δοκιμή, ώστε να δοθεί έμφαση στην ανισοτροπία που προσδίδει στο υλικό ο τρόπος με τον οποίο αυτό στερεοποιείται.



Σχήμα 4.14: Ογκομετρική παραμόρφωση συναρτήσει της αξονικής παραμόρφωσης των δοκιμίων που στερεοποιήθηκαν με διαφορετικές τιμές του λόγου κυρίων τάσεων Κ

Οι τιμές του λόγου K=1 αντιστοιχούν στις καμπύλες των ισότροπα στερεοποιημένων δοκιμίων (που παρουσιάσθηκαν προηγουμένως στο Σχήμα 4.10) και έχουν εντονότερες κλίσεις ως προς τον άξονα της αξονικής παραμόρφωσης, που προσεγγίζουν, σε κάποιες περιπτώσεις, την ευθεία με κλίση 3:1 που αντιστοιχεί στην ιδανική ισότροπη συμπεριφορά. Οι υπόλοιπες καμπύλες ανήκουν σε δοκίμια που στερεοποιήθηκαν ανισότροπα με μικρότερες τιμές του λόγου K και εμφανίζουν ηπιότερες κλίσεις ως προς τον οριζόντιο άξονα, όσο η τιμή του K μειώνεται. Ιδιάζουσα συμπεριφορά έχει η καμπύλη που αντιστοιχεί σε K=0.56, η οποία αρχικά ταυτίζεται με την διακεκομμένη ευθεία με κλίση 1:1 και έπειτα η κλίση της μειώνεται αισθητά ώστε τελικά να γίνει ηπιότερη από αυτές που αντιστοιχούν σε K=0.61. Επίσης, εντονότερη κλίση, από αυτή που αναμενόταν, έχει η καμπύλη που αντιστοιχεί σε K=0.66, η οποία είναι σχεδόν παράλληλη με την τεθλασμένη καμπύλη που αντιστοιχεί σε K=0.69 και αφορά σε δοκίμιο που στερεοποιήθηκε ανισότροπα με έλεγχο των πλευρικών παραμορφώσεων.

Από τα παραπάνω συνάγεται ότι η συμπεριφορά των δοκιμίων, όσον αφορά στις παραμορφώσεις κατά τη στερεοποίηση, καθορίζεται σε μεγάλο βαθμό από τον τρόπο με τον οποίο αυτά φορτίζονται, χωρίς να παίζει καθοριστικό ρόλο η αρχική τους ανισότροπη στερεοποίηση στα 200kPa. Έτσι, φαίνεται ότι η ανισότροπη στερεοποίησή τους οδηγεί σε μεγαλύτερες αξονικές παραμορφώσεις για την ίδια ογκομετρική παραμόρφωση σε σχέση με την ισότροπη στερεοποίηση, κάτι που επιβεβαιώνεται και από την ελαστική θεωρία.

Αξίζει να σημειωθεί ότι οι καμπύλες οι οποίες αντιστοιχούν σε τιμές του Κ κοντά στην τιμή του K₀=0.687 (με εξαίρεση αυτή που αντιστοιχεί σε K=0,56), που προσδιορίστηκε με βάση τη μέθοδο που αναπτύχθηκε στην υποενότητα 4.2.2.1, έχουν κλίσεις κοντινές στην κλίση 1:1 της διακεκομμένης ευθείας, που αντιστοιχεί σε συνθήκες μονοδιάστατης συμπίεσης.

4.2.3 Δοκιμές τριαξονικής θλίψης με εμποδιζόμενη στράγγιση σε ισότροπα στερεοποιημένα δοκίμια

4.2.3.1 Κανονικώς στερεοποιημένα δοκίμια (OCR=1)

Στην παρούσα υποενότητα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από τρείς δοκιμές τριαξονικής θλίψης υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης για τα κανονικώς στερεοποιημένα δοκίμια TIC-2, TIC-3 και TIC-4. Οι καμπύλες ισότροπης στερεοποίησης για τα δοκίμια αυτά φαίνονται στο προηγούμενο Σχήμα 4.8. Στο στάδιο της διάτμησης, τα τρία δοκίμια έχουν αρχικές μέσες ενεργές τάσεις p_i'=400, 650 και 1600 kPa και οι δείκτες πόρων τους διατηρούνται σταθεροί (εμποδιζόμενη στράγγιση) με τιμές e=0.959, 0.860 και 0.767, αντίστοιχα. Τα πειράματα διενεργήθηκαν κρατώντας σταθερή την πίεση της κυψέλης και επιβάλλοντας κατακόρυφη μετακίνηση στα δοκίμια, η οποία οδήγησε σε κατακόρυφη επιφόρτισή τους, χωρίς να επιτρέπεται η διαφυγή νερού από το εσωτερικό τους.

Στο Σχήμα 4.15 παρουσιάζονται οι διαδρομές τάσεων των τριών δοκιμών διάτμησης στο επίπεδο q:p'. Οι διαδρομές ξεκινούν από σημεία πάνω στον άξονα p', καθώς στην αρχή της διάτμησης η αποκλίνουσα τάση είναι μηδενική και τερματίζουν στα σημεία όπου η

αποκλίνουσα τάση q λαμβάνει τη μέγιστη τιμή της, τα οποία κατά σύμβαση αντιπροσωπεύουν την αστοχία του δοκιμίου. Οι τρείς καμπύλες ομοιάζουν, με την διατμητική αντοχή των δοκιμίων να αυξάνεται όσο αυξάνεται η αρχική μέση ενεργός τάση, γεγονός που υποδηλώνει την επαναληψιμότητα των δοκιμών. Οι διατμητικές αντοχές που αναπτύσσονται είναι c_u=103.3, 177.5 και 312.5 kPa για τα TIC-2, TIC-3 και TIC-4 αντίστοιχα.

Παρατηρείται, επίσης, μείωση της μέσης ενεργού τάσης καθ' όλη τη διάρκεια των δοκιμών η οποία οφείλεται στην δημιουργία υπερπιέσεων στο νερό των πόρων, λόγω της αύξησης της τιμής του επιβαλλόμενου κατακόρυφου φορτίου και της εμποδιζόμενης στράγγισης.



Σχήμα 4.15: Διαδρομές τάσεων των κανονικώς στερεοποιημένων δοκιμίων στο επίπεδο q:p'

Αυτή η συμπεριφορά είναι χαρακτηριστική των κανονικώς στερεοποιημένων δοκιμίων, τα οποία υπόκεινται σε διάτμηση με εμποδιζόμενη στράγγιση και υποδηλώνει τάση για μείωση του όγκου τους. Οι παραπάνω διαδρομές τάσεων, ως καμπύλες του χώρου q:p':v, ανήκουν σε παράλληλα μεταξύ τους επίπεδα (undrained planes), τα οποία είναι παράλληλα και με το επίπεδο q:p' του Σχήματος 4.15, καθένα από τα οποία αντιστοιχεί σε διαφορετική, σταθερή τιμή του ειδικού όγκου v (Atkinson, et al., 1978). Στο Σχήμα 4.16 φαίνονται οι προβολές των τασικών οδεύσεων για τα τρία δοκίμια στο επίπεδο v:p', το οποίο αποτελεί τη βάση του χώρου q:p':v όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.5(a). Στην ουσία πρόκειται για τρία ευθύγραμμα τμήματα των οποίων η αρχή αντιστοιχεί σε μηδενική τιμή της αποκλίνουσας τάσης και το τέλος στη μέγιστη τιμή αυτής. Τα βέλη δείχνουν τη φορά που αντιστοιχεί στην εξέλιξη του πειράματος ώστε να υπάρχει πλήρης αντιστοιχία με το Σχήμα 4.15.



Σχήμα 4.16: Προβολές των διαδρομών τάσεων των κανονικώς στερεοποιημένων δοκιμίων στο επίπεδο v:p'

Στο Σχήμα 4.17 φαίνονται οι καμπύλες υπερπιέσεων πόρων συναρτήσει της αξονικής παραμόρφωσης των δοκιμίων. Στο διάγραμμα παρατηρείται ότι όσο μεγαλύτερη είναι η αρχική μέση ενεργός τάση, τόσο εντονότερη αύξηση προκαλείται στην πίεση των πόρων, δηλαδή τα δοκίμια εμφανίζουν εντονότερη συστολική συμπεριφορά. Ο ρυθμός αύξησης των υπερπιέσεων είναι μεγάλος για παραμορφώσεις της τάξεως του 1-1,5% για όλα τα δοκίμια ενώ παρατηρείται συνεχής μείωσή του κατά τη διάρκεια του πειράματος. Η σταθεροποίηση των υπερπιέσεων λαμβάνει χώρα σε τιμές αξονικής παραμόρφωσης περί τα 6-8% για τα TIC-2 και TIC-3, ενώ για το TIC-4 η σταθεροποίηση αυτή επέρχεται σε παραμόρφωση κοντά στο 10%. Οι μέγιστες τιμές των υπερπιέσεων πόρων είναι dU=185, 300 και 839 kPa για τα TIC-2, TIC-3 και TIC-4 αντίστοιχα.



Σχήμα 4.17: Διάγραμμα αναπτυσσόμενων υπερπιέσεων πόρων συναρτήσει της αξονικής παραμόρφωσης

Στο Σχήμα 4.18 φαίνονται οι κανονικοποιημένες, ως προς την αρχική μέση ενεργό τάση, p_i', καμπύλες υπερπιέσεων πόρων σε συνάρτηση με την αξονική παραμόρφωση για τα τρία δοκίμια. Παρατηρείται σύμπτωση των καμπυλών των δοκιμίων TIC-2 και TIC-3, για τις οποίες η μέγιστη τιμή της κανονικοποιημένης πίεσης πόρων είναι dU/p_i'=0.45, ενώ η καμπύλη του TIC-4 φτάνει σε λίγο υψηλότερη τιμή dU/p_i'=0.52. Φαίνεται, δηλαδή, ότι κατ' αναλογία με την αρχική ενεργό του τάση το TIC-4 αναπτύσσει υψηλότερες υπερπιέσεις πόρων σε σχέση με τα υπόλοιπα δύο δοκίμια. Το γεγονός αυτό οδηγεί σε μεγαλύτερη μείωση της μέσης ενεργού τάσης του TIC-4 κατά τη διάρκεια του πειράματος με αποτέλεσμα η μέγιστη τιμή της αποκλίνουσας τάσης να είναι μικρότερη από την αναμενόμενη.

Πράγματι, αυτή η διαφοροποίηση επαληθεύεται παρατηρώντας το διάγραμμα της κανονικοποιημένης αποκλίνουσας τάσης, q/p_i', συναρτήσει της αξονικής παραμόρφωσης των δοκιμίων, στο Σχήμα 4.19. Φαίνεται, ότι ενώ υπάρχει κάποια σύγκλιση των καμπυλών των TIC-2 και TIC-3, σε ένα εύρος παραμορφώσεων έως το 8%, η καμπύλη που αντιστοιχεί στο δοκίμιο TIC-4 βρίσκεται κάτω από τις δύο αυτές καμπύλες σε όλο το φάσμα των παραμορφώσεων.



Σχήμα 4.18: Κανονικοποιημένες καμπύλες υπερπιέσεων πόρων συναρτήσει της αξονικής παραμόρφωσης



Σχήμα 4.19: *Κανονικοποιημένες καμπύλες του λόγου αποκλίνουσας τάσης προς αρχική μέση* ενεργό τάση συναρτήσει της αξονικής παραμόρφωσης

Η μέγιστη τιμή της κανονικοποιημένης αποκλίνουσας τάσης είναι q/pi'=0.38 για το δοκίμιο TIC-4, εν αντιθέσει με τα TIC-2 και TIC-3 που εμφανίζουν μέγιστες τιμές q/pi'=0.48 και 0.55 αντίστοιχα. Ως εκ τούτου, και με βάση τα προαναφερθέντα, θα περιμέναμε το σημείο αστοχίας του δοκιμίου TIC-4 στο Σχήμα 4.15, να αντιστοιχεί σε μεγαλύτερες τιμές των q και p' (πιο ψηλά και δεξιά στο διάγραμμα).

Στο παρακάτω Σχήμα 4.20 είναι εμφανής η αναλογικότητα μεταξύ μέγιστης αποκλίνουσας τάσης q και αρχικής μέσης ενεργού τάσης p_i', η οποία εκφράστηκε με αφορμή και το διάγραμμα του Σχήματος 4.15. Οι τρείς καμπύλες έχουν παρόμοια μορφή, με την αποκλίνουσα τάση να αυξάνεται αρχικά με μεγάλους ρυθμούς, οι οποίοι βαίνουν μειούμενοι κατά την εξέλιξη των δοκιμών. Δηλαδή, παρατηρείται ότι η συμπεριφορά της αποκλίνουσας τάσης κατά τη διάρκεια του πειράματος ομοιάζει με αυτήν της υπερπίεσης πόρων, με τη διαφορά ότι ενώ οι καμπύλες υπερπιέσεων πόρων τείνουν να σταθεροποιηθούν, αυτές της αποκλίνουσας τάσης εμφανίζουν μέγιστο (εν μέσω μικρής σταθεροποίησης της αποκλίνουσας τάσης) και συνεχίζουν με έναν πτωτικό κλάδο πριν την τελική σταθεροποίησή τους σε μία παραμένουσα αντοχή, σε παραμορφώσεις κοντά στο 14%.



Σχήμα 4.20: Διάγραμμα αποκλίνουσας τάσης σε συνάρτηση με την αξονική παραμόρφωση των δοκιμίων

Ο πτωτικός αυτός κλάδος των καμπυλών που παρουσιάζεται σε παραμορφώσεις μεγαλύτερες του 10-12% οφείλεται στη θραύση των δοκιμίων, τα οποία αδυνατούν πλέον να ανταποκριθούν στην επιβαλλόμενη από τη συσκευή παραμόρφωση (strain control). Κατά συνέπεια, επειδή το αναπτυσσόμενο φορτίο προκύπτει ως αντίσταση των δοκιμίων στην επιβολή της κατακόρυφης παραμόρφωσης, παρατηρείται απότομη μείωση της τιμής του μετά τη θραύση αυτών. Έτσι, η επιβαλλόμενη παραμόρφωση οδηγεί τα δύο τεμάχη του δοκιμίου σε σχετική μετακίνηση (ως στερεά σώματα), η οποία διενεργείται στη ζώνη διατμητικής αστοχίας (shear band), με αποτέλεσμα να μη μπορεί να παραληφθεί επιπλέον φορτίο και μάλιστα το δοκίμιο να οδηγείται σε αποδιοργάνωση στην περιοχή της διατμητικής αστοχίας. Η σταθεροποίηση των υπερπιέσεων πόρων, ωστόσο, δεν αποτρέπεται καθώς η πίεση του νερού των πόρων μετράται στα άκρα του δοκιμίου, μακριά δηλαδή από την περιοχή διατμητικής αστοχίας. Στην Εικόνα 4.1, φαίνεται, από την παραμόρφωση της ελαστικής μεμβράνης, η επιφάνεια διατμητικής αστοχίας που δημιουργήθηκε κατά τη θραύση δοκιμίου που φορτίστηκε σύμφωνα με την προαναφερθείσα διαδικασία στην τριαξονική συσκευή. Διακρίνεται επίσης, στα άκρα της επιφάνειας αστοχίας, η σχετική ολίσθηση που έχει λάβει χώρα μεταξύ των δύο τεμαχών του δοκιμίου κατά τη συνέχιση επιβολής κατακόρυφης μετακίνησης μετά τη θραύση του.

Η αποδιοργάνωση στην οποία υπόκεινται τα δοκίμια κατά τη θραύση δεν επιτρέπει τη σταθεροποίηση της τιμής της αποκλίνουσας τάσης και κατ' επέκταση την πλήρη προσέγγιση της κρίσιμης κατάστασης (σε ότι αφορά τη σταθεροποίηση της αποκλίνουσας τάσης), η οποία όμως υποδεικνύεται σε κάποιο βαθμό από τη σταθεροποίηση των υπερπιέσεων πόρων εντός των δοκιμίων. Επίσης, επιφυλάξεις θα πρέπει να τηρούνται ως προς τον υπολογισμό των τρεχουσών διαστάσεων των δοκιμίων, καθώς οι υπολογιζόμενες παραμορφώσεις κοντά στη θραύση, υπόκεινται σε έλλειψη ακρίβειας λόγω της έντονης ανομοιομορφίας που επικρατεί εντός του δοκιμίου.

Ως εκ τούτου, τα σημεία αστοχίας για τις τρείς παραπάνω δοκιμές που περιγράφηκαν και αναλύθηκαν, παρουσιάζονται στα επόμενα διαγράμματα των Σχημάτων 4.21 και 4.22, στα επίπεδα q:p' και v:p' αντίστοιχα. Σημειώνεται ότι στο Σχήμα 4.22 ο άξονας p' έχει τεθεί σε λογαριθμική κλίμακα. Με βάση τα σημεία αυτά σχεδιάστηκαν οι προσεγγιστικές ευθείες (best fit lines) που αποτελούν τις προβολές της Καμπύλης Κρίσιμης Κατάστασης (CSL) στα δύο επίπεδα που παρουσιάζονται.



Εικόνα 4.1: Η επιφάνεια διατμητικής αστοχίας (shear band) που εμφανίζεται κατά τη θραύση ενός δοκιμίου που φορτίστηκε στην τριαξονική συσκευή με εμποδιζόμενη στράγγιση - σχετική μετακίνηση των δύο τεμαχών του δοκιμίου



Σχήμα 4.21: Σημεία αστοχίας στις δοκιμές διάτμησης για τα δοκίμια TIC-2, TIC-3 και TIC-4, στο επίπεδο q:p' και προβολή της καμπύλης κρίσιμης κατάστασης (CSL)

Με αυτόν τον τρόπο ορίζεται πλήρως η θέση της CSL στο χώρο q:p':v, σύμφωνα με όσα έχουν αναφερθεί στην Ενότητα 2.5 και κατ' αντιστοιχία με το Σχήμα 2.4. Η προβολή της CSL, στο επίπεδο q:p', περνά από την αρχή των αξόνων και έχει κλίση M=0.74.

Σημειώνεται, ότι σύμφωνα με το σκεπτικό που αναπτύχθηκε προηγουμένως σχετικά με τη συμπεριφορά του δοκιμίου TIC-4 κατά την αστοχία, το σημείο που αντιστοιχεί σε αυτό το δοκίμιο δεν συμπεριλήφθηκε στον προσδιορισμό της CSL στο επίπεδο q:p'. Η προβολή της CSL στο επίπεδο v:p' έχει κλίση λ_{CSL}=0.153, ενώ η τιμή του ειδικού όγκου όταν η μέση ενεργός τάση είναι p'=1kPa προκύπτει Γ=2.82.



Σχήμα 4.22: Ημιλογαριθμικό διάγραμμα v:p' με τα σημεία αστοχίας στις δοκιμές διάτμησης για τα δοκίμια TIC-2, TIC-3 και TIC-4, και προβολή της CSL

Οι κύκλοι Mohr κατά την αστοχία για τα τρία δοκίμια και οι κορυφές τους, παρουσιάζονται μαζί με την περιβάλλουσα αστοχίας Mohr-Coulomb στο Σχήμα 4.23. Η περιβάλλουσα ορίζεται ως ευθεία που περνά από την αρχή των αξόνων (c=0 για κανονικώς στερεοποιημένα δοκίμια) και αποτελεί την κοινή εφαπτομένη των κύκλων αστοχίας για τα δοκίμια TIC-2 και TIC-3. Η γωνία διατμητικής αντοχής προσδιορίζεται από την κλίση της περιβάλλουσας ως προς τον άξονα της ορθής τάσης, σ', και η τιμή που προτείνεται είναι φ_p=19.2°. Στο διάγραμμα αυτό είναι εμφανές ότι ενώ η περιβάλλουσα που υπολογίζεται περιγράφει ικανοποιητικά την κοινή εφαπτομένη των κύκλων των TIC-2 και TIC-3, ο

αντίστοιχος κύκλος του TIC-4 έχει μικρότερη ακτίνα απ' αυτή που θα ταίριαζε στη λύση που προτείνεται. Σε αντίθετη περίπτωση, όπου θα συνυπολογίζονταν και αυτός ο κύκλος αστοχίας, η περιβάλλουσα θα αποκτούσε μικρότερη κλίση με αποτέλεσμα να τέμνει τελικά τους άλλους δύο κύκλους.

Το γεγονός ότι η περιβάλλουσα αστοχίας προκύπτει ως η κοινή εφαπτόμενη μόνο δύο κύκλων οδηγεί σε μια αβεβαιότητα ως προς την προτεινόμενη γωνία τριβής. Για το λόγο αυτό, η τιμή που προτείνεται με βάση τις παραπάνω δοκιμές θα συγκριθεί με αυτή που θα προκύψει από επόμενες ενότητες στις οποίες θα παρουσιασθούν και θα αναλυθούν τα αποτελέσματα περισσότερων δοκιμών σε ισότροπα υπερστερεοποιημένα δοκίμια (OCR>1, υποενότητα 4.2.3.2) και σε ανισότροπα κανονικώς στερεοποιημένα (OCR=1) δοκίμια (στην Ενότητα 4.2.4).



Σχήμα 4.23: Διάγραμμα τ:σ' των κύκλων Mohr αστοχίας και περιβάλλουσα αστοχίας Mohr-Coulomb (φ_P=19.2°, c=0)

4.2.3.2 Υπερστερεοποιημένα Δοκίμια (OCR>1)

Στην παρούσα υποενότητα παρατίθενται τα αποτελέσματα από τέσσερις δοκιμές τριαξονικής θλίψης, υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης για τα υπερστερεοποιημένα δοκίμια TIC-1, TIC-5, TIC-6 και TIC-7. Οι καμπύλες ισότροπης στερεοποίησης για τα δοκίμια TIC-5, TIC-6 και TIC-7 φαίνονται στο Σχήμα 4.8 και οι καμπύλες αποφόρτισης στο Σχήμα 4.9, ενώ στην υποενότητα 4.2.2.2 περιγράφεται η διαδικασία στερεοποίησης και αποφόρτισής τους έως τις τελικές τιμές της μέσης ενεργού τάσης p'=400, 200 και 160 kPa (αντιστοιχούν σε OCR=4, 8 και 10) αντίστοιχα. Σχετικά με το δοκίμιο TIC-1, υπενθυμίζεται ότι φορτίστηκε ισοτρόπως στην τριαξονική συσκευή έως την τιμή της μέσης ενεργού τάσης p'=100kPa, η οποία αντιστοιχεί σε βαθμό υπερστερεοποίησης (OCR=2). Στο στάδιο της διάτμησης οι δείκτες πόρων των δοκιμίων διατηρούνται σταθεροί (εμποδιζόμενη στράγγιση) με τιμές e=1,024, 0.785, 0.888 και 0.891, για τα TIC-1, TIC-5, TIC-6 και TIC-7 αντίστοιχα. Οι δοκιμές διενεργήθηκαν με επιβολή παραμόρφωσης και κρατώντας σταθερή την πίεση της κυψέλης, ακριβώς όπως έγινε και με τα κανονικώς στερεοποιημένα δοκίμια.

Στο Σχήμα 4.24 φαίνονται οι διαδρομές τάσεων των παραπάνω δοκιμίων στο επίπεδο q:p'. Οι καμπύλες των TIC-5, 6 και 7 έχουν τυπική συμπεριφορά που αντιστοιχεί σε υπερστερεοποιημένο υλικό. Αποτυπώνεται σαφώς η αύξηση της μέσης ενεργού τάσης κατά τη διάρκεια των δοκιμών, η οποία (όπως θα παρουσιασθεί και στη συνέχεια) οφείλεται στη μείωση των πιέσεων ύδατος εντός των πόρων των δοκιμίων. Η καμπύλη που αντιστοιχεί στο εντόνως υπερστερεοποιημένο δοκίμιο, TIC-7, είναι πιο απότομη σε σχέση με τις υπόλοιπες, οι οποίες εμφανίζουν επίσης διαφορά στην απόκλισή τους από την κατακόρυφο. Φαίνεται δηλαδή, ότι όσο μειώνεται η τιμή του OCR, οι καμπύλες τείνουν να γίνουν όλο και πιο κατακόρυφες μέχρι ενός σημείου όπου η συμπεριφορά τους αλλάζει και πάλι και τείνει να ομοιάσει με αυτή του κανονικώς στερεοποιημένου υλικού.

Αντιθέτως με τα τρία προαναφερθέντα δοκίμια, το TIC-1, παρουσιάζει μια μικτή συμπεριφορά. Δηλαδή, αρχικά, παρά την αύξηση του κατακόρυφου φορτίου, που τείνει να αυξήσει τη μέση ενεργό τάση, φαίνεται πως η μέση ενεργός τάση του δοκιμίου μειώνεται και αυτό οφείλεται σε δημιουργία υπερπιέσεων ικανή να υπερκαλύψει αυτή την αύξηση της μέσης ενεργού τάσης. Αυτή η συμπεριφορά θυμίζει, τουλάχιστον μέχρι ενός σημείου, αυτή που παρουσιάζουν τα κανονικώς στερεοποιημένα δοκίμια. Στη συνέχεια, η καμπύλη του TIC-1 τείνει να ομοιάσει με τις καμπύλες των πιο έντονα υπερστερεοποιημένων δοκιμίων

και η αλλαγή αυτή συνοδεύεται από μικρή αύξηση της μέσης ενεργού τάσης (βλ. και Σχήμα 4.25).



Σχήμα 4.24: Διαδρομές τάσεων των υπερστερεοποιημένων δοκιμίων στο επίπεδο q:p'

Κατ' αντιστοιχία με το Σχήμα 4.16, που αφορά τα κανονικώς στερεοποιημένα δοκίμια παρουσιάζονται, στο Σχήμα 4.25 οι προβολές των παραπάνω διαδρομών τάσεων στο επίπεδο v:p'. Τα βέλη δείχνουν τις κατευθύνσεις των τασικών οδεύσεων κατά την εξέλιξη των δοκιμών. Σημειώνεται ότι η κλίμακα του άξονα p' σε αυτό το γράφημα είναι η ίδια με αυτή του Σχήματος 4.24. Η διαφορετική συμπεριφορά του TIC-1 σε σχέση με τα υπόλοιπα δοκίμια είναι εμφανής και σε αυτό το διάγραμμα, όπου φαίνεται ότι η μέση ενεργός τάση του δοκιμίου αυτού διατηρείται πρακτικά στα ίδια επίπεδα κατά τη διάρκεια της δοκιμής.

Η μεταβολή της αποκλίνουσας τάσης, q, ως προς την αξονική παραμόρφωση των δοκιμίων αποτυπώνεται στο Σχήμα 4.26, όπου για λόγους σύγκρισης παρατίθεται και η σχετική καμπύλη του δοκιμίου TIC-4. Υπενθυμίζεται ότι η τελική τιμή της μέσης ενεργού τάσης κατά τη στερεοποίηση του TIC-4 είναι η ίδια με την αντίστοιχη μέγιστη τιμή για τα TIC-5, 6 και 7 (p'=1600kPa).



Σχήμα 4.25: Προβολές των διαδρομών τάσεων για τα κανονικώς στερεοποιημένων δοκιμίων στο επίπεδο v:p'

Η αρχή της αναλογίας, ως προς την παρατηρούμενη αντοχή των δοκιμίων, τηρείται σε ότι αφορά τα TIC-4, 5, 6 και 7. Οι καμπύλες των υπερστερεοποιημένων δοκιμίων ομοιάζουν μεταξύ τους παρουσιάζοντας μέγιστο και ακολουθώντας έναν πτωτικό κλάδο που οδηγεί σε παραμένουσα αντοχή. Σε αντίθεση με τα υπερστερεοποιημένα δοκίμια, η μέγιστη τιμή της αποκλίνουσας τάσης για το TIC-4, εμφανίζεται σε μια περιοχή όπου η αποκλίνουσα τάση διατηρείται περίπου σταθερή (σε εύρος παραμορφώσεων 8-12%).

Το δοκίμιο TIC-1, καθότι ελαφρώς υπερστερεοποιημένο, εμφανίζει τυπική συμπεριφορά κανονικώς στερεοποιημένου υλικού με σταθεροποίηση της αποκλίνουσας τάσης σε τιμή της αξονικής παραμόρφωσης περί το 4%. Η αντοχή του είναι μικρότερη και από αυτή που εμφανίζει το TIC-7, διότι ξεκινά τη διάτμηση με μικρότερη αρχική τιμή της μέσης ενεργού τάσης (p'=100kPa έναντι p'=160kPa που αντιστοιχεί στο TIC-7).

Ο ισχυρισμός ότι τα δοκίμια TIC-5, 6 και 7 παρουσιάζουν τυπική συμπεριφορά υπερστερεοποιημένου υλικού, επαληθεύεται παρατηρώντας το γράφημα που απεικονίζει τη μεταβολή της πίεσης των πόρων εντός των δοκιμίων (συγκριτικά με την αρχική της τιμή) ως προς την επιβαλλόμενη αξονική παραμόρφωση, στο Σχήμα 4.27.



Σχήμα 4.26: Διάγραμμα αποκλίνουσας τάσης συναρτήσει της αξονικής παραμόρφωσης για τα υπερστερεοποιημένα δοκίμια και το κανονικώς στερεοποιημένο TIC-4



Σχήμα 4.27: Διάγραμμα μεταβολής της υπερπίεσης πόρων συναρτήσει της αξονικής παραμόρφωσης, για τα υπερστερεοποιημένα δοκίμια

Οι καμπύλες έχουν παρόμοιο σχήμα παρουσιάζοντας μέγιστη τιμή (θετική μεταβολή της πίεσης, δηλαδή δημιουργία υπερπίεσης) και στη συνέχεια πτωτικούς κλάδους μέχρι την επίτευξη μιας σταθερής κατάστασης. Τα μέγιστα παρατηρούνται σε τιμές της αξονικής παραμόρφωσης περί το 3-4% για όλες τις καμπύλες και οι μέγιστες τιμές των υπερπιέσεων πόρων είναι dU=30.4, 40.4, 5.6 και 27kPa για τα TIC-1, 5, 6 και 7 αντίστοιχα. Η αρχική αύξηση της πίεσης πόρων των δοκιμίων αντανακλά τη συστολική συμπεριφορά που αυτά εμφανίζουν σε μικρές τιμές των αξονικών παραμορφώσεων. Εν συνεχεία, η συμπεριφορά τους αλλάζει (για παραμορφώσεις μεγαλύτερες του 4%) και τα δοκίμια εμφανίζουν τάση για διαστολή. Η αλλαγή αυτή, ωστόσο, δεν είναι το ίδιο έντονη σε όλα τα δοκίμια.

Το TIC-1 δείχνει ελαφρά τάση για διαστολή, με την τιμή της υπερπίεσης πόρων να σταθεροποιείται κοντά στα 15kPa για αξονική παραμόρφωση περί το 12%. Τα υπόλοιπα δοκίμια έχουν αρκετά πιο απότομους πτωτικούς κλάδους και όλα αναπτύσσουν πιέσεις χαμηλότερες της αρχικής τιμής πίεσης πόρων κατά τη διάρκεια της δοκιμής. Συγκεκριμένα, την πιο μεγάλη μεταβολή των πιέσεων πόρων παρουσιάζει το TIC-5, το οποίο αναπτύσσει dU=-18kPa (συνολική μεταβολή 58kPa, συγκριτικά με τη μέγιστη τιμή της υπερπίεσης πόρων) και έπειτα το TIC-7 για το οποίο το μέγεθος είναι dU=-28kPa (συνολική μεταβολή 55kPa). Ως προς το δοκίμιο TIC-6, οι μεταβολές ως προς την αρχική πίεση πόρων φτάνουν την τιμή dU=-47kPa που αντιστοιχεί σε συνολική μεταβολή της πίεσης πόρων ίση με 53kPa.

Ωστόσο, με βάση το παραπάνω γράφημα του Σχήματος 4.27, δεν μπορούν να βγουν συμπεράσματα ως προς την επιρροή του βαθμού υπερστερεοποίησης (OCR) στην εμφάνιση διαστολικής συμπεριφοράς εκ μέρους των δοκιμίων, καθώς οι αρχικές τιμές της μέσης ενεργού τάσης στην αρχή της διάτμησης είναι διαφορετικές για κάθε ένα από αυτά. Η απαραίτητη σύγκριση της διαστολικής συμπεριφοράς των δοκιμίων γίνεται με βάση το κανονικοποιημένο, ως προς την αρχική μέση ενεργό τάση στο στάδιο της διάτμησης, p_i', διάγραμμα της μεταβολής της πίεσης πόρων που παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.28.

Σε αυτό το γράφημα, δίχως να υπεισέρχεται η επιρροή της αρχικής μέσης ενεργού τάσης, παρατηρείται ότι ο πτωτικός κλάδος της καμπύλης του TIC-7 έχει τη μεγαλύτερη κλίση από όλες τις καμπύλες που αντιστοιχούν στα υπερστερεοποιημένα δοκίμια. Επίσης, το εύρος της κανονικοποιημένης μεταβολής της πίεσης πόρων κατά τη μετάβαση από τη μέγιστη τιμή των υπερπιέσεων (τέλος φάσης συστολής) στην πλήρη ανάπτυξη των μειωμένων πιέσεων (πλήρης διαστολή), είναι το μεγαλύτερο για το δοκίμιο αυτό. Την αμέσως μικρότερη κλίση έχει ο πτωτικός κλάδος που αντιστοιχεί στο TIC-6 και έπειτα ακολουθεί το TIC-5, ενώ αντιστοίχως μειώνεται και το εύρος της μετάβασης από τη συστολική στη διαστολική συμπεριφορά για τα δοκίμια αυτά. Σε ότι αφορά το δοκίμιο TIC-1, διαφαίνεται και σε αυτό το γράφημα η μικτή συμπεριφορά που σχολιάστηκε προηγουμένως, με αφορμή την τασική του όδευση στο Σχήμα 4.24. Παράλληλα, σημειώνεται ότι με την κανονικοποίηση η καμπύλη του συγκεκριμένου δοκιμίου πλησιάζει αυτή του κανονικώς στερεοποιημένου TIC-4, χωρίς βέβαια να υπάρχει κάποια ομοιότητα μεταξύ των δύο καμπυλών.



Σχήμα 4.28: Κανονικοποιημένο, ως προς την αρχική μέση ενεργό τάση p_i', διάγραμμα μεταβολής της πίεσης πόρων συναρτήσει της αξονικής παραμόρφωσης, για τα υπερστερεοποιημένα δοκίμια

Από τα παραπάνω συνάγεται ότι η αύξηση του OCR οδηγεί σε εντονότερα διαστολική συμπεριφορά. Ωστόσο, αυτή δεν εκφράζεται, στην προκειμένη περίπτωση, μέσω της μέγιστης τιμής της κανονικοποιημένης υποπίεσης πόρων, καθώς φαίνεται, ότι για το δοκίμιο TIC-6 η απόλυτη τιμή του μεγέθους αυτού είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη του δοκιμίου TIC-7, αν και το τελευταίο αντιστοιχεί σε μεγαλύτερη τιμή του λόγου OCR. Η ένταση της διαστολικής συμπεριφοράς υποδεικνύεται από τη μορφή των καμπυλών (κλίση του πτωτικού κλάδου) και το εύρος μετάβασης από τη φάση της συστολής στη φάση της διαστολής.

Στο διάγραμμα του Σχήματος 4.29 παρουσιάζονται οι καμπύλες του λόγου των τάσεων, η(=q/p'), σε σχέση με την αξονική παραμόρφωση.



Σχήμα 4.29: Διάγραμμα του λόγου τάσεων, η, συναρτήσει της αξονικής παραμόρφωσης για τα υπερστερεοποιημένα δοκίμια και το κανονικώς στερεοποιημένο TIC-4

Εξετάζοντας τις καμπύλες των δοκιμίων TIC-4, 5, 6 και 7 φαίνεται ότι το έντονα υπερστερεοποιημένο TIC-7 υπερισχύει των υπολοίπων ως προς την αντοχή ενώ το κανονικώς στερεοποιημένο TIC-4 υστερεί, όπως αναμενόταν με βάση τη βιβλιογραφία (Gens, 1982). Οι κανονικοποιημένες καμπύλες των TIC-5 και TIC-6 φαίνεται να ταυτίζονται για μεγάλο εύρος παραμορφώσεων (έως το 8-9%), γεγονός που έρχεται σε αντιδιαστολή με τους βαθμούς υπερστερεοποίησης που διαθέτουν τα δοκίμια αυτά (βλ. προηγούμενα μη κανονικοποιημένα διαγράμματα). Δηλαδή, θα αναμενόταν η καμπύλη του δοκιμίου TIC-5 να βρίσκεται πιο κοντά σε αυτή του κανονικώς στερεοποιημένου υλικού. Ως προς τις μέγιστες τιμές του λόγου η, το TIC-6 φαίνεται ότι υπερτερεί ελαφρώς του TIC-5.

Η καμπύλη του TIC-1 ομοιάζει σχηματικά με αυτή του κανονικώς στερεοποιημένου TIC-4, ωστόσο εμφανίζει πολύ μεγαλύτερη μέγιστη τιμή του λόγου η από την αντίστοιχη καμπύλη του δοκιμίου αυτού. Η διακύμανση της μέγιστης τιμής του λόγου των τάσεων, η_{peak}, ως προς το λόγο υπερστερεοποίησης για τα δοκίμια TIC-4, 5, 6 και 7 φαίνεται στο Σχήμα 4.30 (α).



Σχήμα 4.30: (a) Διακύμανση της μέγιστης τιμής του λόγου η, η_{peak}, ως προς τον λόγο υπερστερεοποίησης OCR - (β) διακύμανση της τιμής της αξονικής παραμόρφωσης για η=η_{peak}, συναρτήσει του λόγου υπερστερεοποίησης OCR

Στο διάγραμμα 4.30 (α) συνοψίζεται η ανάλυση που διατυπώθηκε με αφορμή το γράφημα του Σχήματος 4.29. Η αύξηση του λόγου υπερστερεοποίησης οδηγεί σε αύξηση της μέγιστης τιμής του λόγου η, καθώς τα εντόνως υπερστερεοποιημένα δοκίμια παρουσιάζουν πιο πυκνή δομή και άρα μεγαλύτερη αντοχή κατά τη διαδικασία της διάτμησης. Για τον ίδιο ακριβώς λόγο οι παραμορφώσεις που αντιστοιχούν στις μέγιστες τιμές του λόγου η δείχνουν τάση μείωσης (με την μικρή ιδιομορφία που υπογραμμίστηκε προηγουμένως ως προς τα OCR=4 και OCR=8), όσο αυξάνεται η τιμή του λόγου υπερστερεοποίησης (Σχήμα 4.30 (β)).

Οι κύκλοι Mohr αστοχίας μαζί με την περιβάλλουσα Mohr-Coulomb παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.31 για τα υπερστερεοποιημένα δοκίμια. Η περιβάλλουσα ορίζεται ως η κοινή εφαπτόμενη ευθεία στους κύκλους αστοχίας των δοκιμίων. Η γωνία διατμητικής αντοχής υπολογίζεται φ=19.7° και είναι αρκετά κοντά στην τιμή φ=19.2° που υπολογίστηκε για τα κανονικώς στερεοποιημένα δοκίμια, ενώ το υλικό εμφανίζει μικρή συνοχή c=7.17kPa.



Σχήμα 4.31: Διάγραμμα τ:σ' των κύκλων Mohr κατά την αστοχία και περιβάλλουσα αστοχίας Mohr-Coulomb (φ_P=19.7°, c=7.17kPa) για τα υπερστερεοποιημένα δοκίμια

4.2.4 Δοκιμές τριαξονικής θλίψης με εμποδιζόμενη στράγγιση σε ανισότροπα κανονικώς στερεοποιημένα δοκίμια

4.2.4.1 Ανάλυση του συνόλου των αποτελεσμάτων

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από 12 δοκιμές διάτμησης σε δοκίμια που προηγουμένως στερεοποιήθηκαν ανισότροπα με έλεγχο των επιβαλλόμενων τάσεων. Οι τασικές οδεύσεις κατά τη στερεοποίηση είναι όμοιες με αυτή του Σχήματος 3.6 (a), η οποία περιγράφεται στην υποενότητα 3.5.3.3. Σημειώνεται ότι τα περισσότερα δοκίμια στερεοποιήθηκαν με διαφορετικές τιμές του λόγου των κυρίων τάσεων, Κ, έτσι ώστε να εξετασθεί η επιρροή του στη συμπεριφορά των δοκιμίων κατά τη διάτμηση. Όλες οι πληροφορίες σχετικά με τη στερεοποίηση και τη διάτμηση των δοκιμίων παρατίθενται στον σχετικό πίνακα του Παραρτήματος. Τα πειράματα διενεργήθηκαν κρατώντας σταθερή την πίεση της κυψέλης και επιβάλλοντας κατακόρυφη μετακίνηση στα δοκίμια.

Στο Σχήμα 4.32 παρουσιάζονται οι διαδρομές τάσεων των δοκιμίων στο επίπεδο q:p'. Οι τασικές οδεύσεις ξεκινούν από σημεία τα οποία ανήκουν σε ευθείες με διαφορετικές κλίσεις που περνούν από την αρχή των αξόνων. Οι ευθείες αυτές αντιστοιχούν σε διαφορετικές τιμές του λόγου των κυρίων τάσεων, Κ. Όπως φαίνεται στο γράφημα, όσο αυξάνεται η κλίση της ευθείας την οποία ακολουθεί η τασική όδευση τόσο μειώνεται η τιμή του λόγου των κυρίων τάσεων, Κ. Όπως φαίνεται στον άξονα ρ') αντιστοιχεί στην ισότροπη στερεοποίηση (K=1). Είναι εμφανής η μείωση της μέσης ενεργού τάσης κατά την εξέλιξη των δοκιμών, η οποία οφείλεται στην ανάπτυξη υπερπιέσεων στους πόρους των δοκιμίων, συμπεριφορά που αντιστοιχεί σε κανονικώς στερεοποιημένο υλικό, όπως αναφέρθηκε με αφορμή και τις δοκιμές σε ισότροπα στερεοποιημένα δοκίμια.

Στο Σχήμα 4.33 φαίνονται οι αναπτυσσόμενες υπερπιέσεις πόρων στο εσωτερικό των δοκιμίων ως προς την αξονική παραμόρφωση. Οι καμπύλες παρουσιάζουν όμοια συμπεριφορά, με απότομους αρχικούς κλάδους και κλίσεις οι οποίες βαίνουν μειούμενες μέχρι τη σταθεροποίηση των υπερπιέσεων κατά την προσέγγιση της κρίσιμης κατάστασης. Η μορφή των παραπάνω καμπυλών είναι η ίδια με αυτή που είχε αποτυπωθεί στο Σχήμα 4.17, όπως αναμενόταν, αφού και στις δύο περιπτώσεις οι καμπύλες αφορούν κανονικώς στερεοποιημένα δοκίμια.



Σχήμα 4.32: Διαδρομές τάσεων στο επίπεδο q:p' για τα ανισότροπα στερεοποιημένα δοκίμια



Σχήμα 4.33: Διάγραμμα υπερπιέσεων πόρων συναρτήσει της αξονικής παραμόρφωσης των δοκιμίων

Συνάγεται δηλαδή ότι ο τρόπος στερεοποίησης (ή διαφορετικά, ο λόγος Κ υπό τον οποίο γίνεται η στερεοποίηση) δεν επηρεάζει τη μορφή των καμπυλών υπερπίεσης πόρων για τα κανονικώς στερεοποιημένα δοκίμια.

Στο Σχήμα 4.34 παρουσιάζονται οι καμπύλες της κανονικοποιημένης, ως προς την αρχική μέση ενεργό τάση p_i', μεταβολής της πίεσης πόρων. Το γράφημα δείχνει μία τάση για συγκέντρωση των καμπυλών, που ωστόσο, συνοδεύεται από κάποια διασπορά. Κατά τη σταθεροποίηση των υπερπιέσεων πόρων, οι οριζόντιοι κλάδοι των καμπυλών δείχνουν να συγκλίνουν σε τιμή της κανονικοποιημένης πίεσης κοντά στο 0.2, ενώ οι καμπύλες που αντιστοιχούν στα AC-12, 21 και 23 σταθεροποιούνται σε τιμές κοντά στο 0.15, 0.12 και 0.27 αντίστοιχα.



Σχήμα 4.34: Διάγραμμα κανονικοποιημένων υπερπιέσεων πόρων συναρτήσει της αξονικής παραμόρφωσης των δοκιμίων

Στο Σχήμα 4.35 φαίνονται οι καμπύλες του λόγου τάσεων, η, ως προς την αξονική παραμόρφωση των δοκιμίων. Καθότι πρόκειται για ανισότροπα στερεοποιημένα δοκίμια, οι καμπύλες ξεκινούν από σημεία πάνω στον άξονα q/p'. Η κλίση τους είναι μεγάλη αρχικά (για παραμορφώσεις 1-2%) και στη συνέχεια μειώνονται καθώς το δοκίμιο πλησιάζει στην κρίσιμη κατάσταση. Στα περισσότερα δοκίμια όπως τα AC-7, 12 και 20, ενώ παρατηρείται τάση για σταθεροποίηση του λόγου η, φαίνεται ότι η θραύση των δοκιμίων την αποτρέπει, όπως ακριβώς παρατηρήθηκε και με αφορμή τα κανονικώς στερεοποιημένα ισότροπα δοκίμια. Κατά τη σταθεροποίηση της τιμής του η, οι καμπύλες συγκεντρώνονται σε ένα εύρος τιμών μεταξύ η=0.65 και 0.85, εύρος εντός του οποίου βρίσκονται και οι καμπύλες των ισότροπα στερεοποιημένων δοκιμίων (βλ. Σχήμα 4.50). Συμπεραίνεται από τα παραπάνω, ότι ανεξαρτήτως μεθόδου στερεοποίησης, τα κανονικώς στερεοποιημένα δοκίμια παρουσιάζουν ενιαία συμπεριφορά κατά την αστοχία και την προσέγγιση της κρίσιμης κατάστασης.



Σχήμα 4.35: Διάγραμμα λόγου τάσεων, η, συναρτήσει της αξονικής παραμόρφωσης

Στο Σχήμα 4.36 παρουσιάζονται τα σημεία αστοχίας των παραπάνω δοκιμών στο επίπεδο q:p', μαζί με την προβολή της Καμπύλης Κρίσιμης Κατάστασης. Η τιμή της κλίσης M=0.77, που προσδιορίζεται με βάση τα αποτελέσματα αυτά, είναι αρκετά κοντά στην τιμή M=0.74 που υπολογίστηκε για τα ισότροπα στερεοποιημένα δοκίμια (βλ. Σχήμα 4.21).



Σχήμα 4.36: Σημεία αστοχίας κατά τη διάτμηση των ανισότροπα στερεοποιημένων δοκιμίων στο επίπεδο q:p'

Οι προβολές των σημείων αστοχίας στο επίπεδο v:p', μαζί με την προβολή της CSL, που ορίστηκε με βάση τα σημεία αυτά φαίνονται στο Σχήμα 4.37. Η κλίση της CSL προσδιορίζεται ως λ=0.155 και είναι κοντά στην τιμή λ=0.153 που υπολογίστηκε με βάση τα σημεία αστοχίας των ισότροπα στερεοποιημένων δοκιμίων (βλ. Σχήμα 4.22), ενώ το ίδιο ισχύει και για την τιμή της σταθεράς Γ, η οποία είναι Γ=2.87 για τα ανισότροπα στερεοποιημένα δοκίμια.

Στο Σχήμα 4.38 παρουσιάζονται οι κορυφές των κύκλων Mohr αστοχίας στο επίπεδο τ:σ', με βάση τις οποίες προσδιορίζεται η περιβάλλουσα Mohr-Coulomb. Αξίζει να σημειωθεί, ότι ο προσδιορισμός της περιβάλλουσας Mohr-Coulomb για τα ανισότροπα στερεοποιημένα δοκίμια γίνεται σύμφωνα με τη μέθοδο που προτείνει ο Hvorslev (Hvorslev, 1960) και ισοδυναμεί με τον προσδιορισμό της με τη μέθοδο της κοινής εφαπτομένης των κύκλων αστοχίας, που χρησιμοποιήθηκε για τα ισότροπα στερεοποιημένα δοκίμια. Η συγκεκριμένη μέθοδος ταιριάζει καλύτερα στην περίπτωση που τα δεδομένα από τις δοκιμές είναι πολλά και ο σχεδιασμός των κύκλων αστοχίας κρίνεται δυσχερής.



Σχήμα 4.37: Σημεία αστοχίας για τα ανισότροπα στερεοποιημένα δοκίμια και προβολή της CSL στο ημιλογαριθμικό διάγραμμα του επιπέδου v:p'



Σχήμα 4.38: Διάγραμμα τ:σ' των κορυφών κύκλων Mohr αστοχίας και περιβάλλουσα αστοχίας Mohr-Coulomb

Ως προς την εφαρμογή της μεθόδου, φέρεται η ευθεία που προσεγγίζει καλύτερα τις κορυφές των κύκλων Mohr (μέθοδος των ελαχίστων τετραγώνων), η οποία έχει κλίση β_s ως προς τον άξονα σ'. Η γωνία τριβής φ υπολογίζεται ως:

$$\varphi = \sin^{-1}(\tan(\beta_s))$$

Με βάση τα παραπάνω η τιμή της γωνίας τριβής που προτείνεται είναι φ=19.9°.

4.2.4.2 Η επιρροή της αρχικής τιμής της μέσης ενεργού τάσης

Σε αυτή την υποενότητα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα τριών από τις παραπάνω δοκιμές για τις οποίες ο λόγος των κυρίων τάσεων, Κ, κατά τη στερεοποίηση των δοκιμίων, λαμβάνει την τιμή K=0.63. Τα δοκίμια εισέρχονται στη φάση της διάτμησης έχοντας διαφορετικές μέσες ενεργές τάσεις.

Σκοπός της σύγκρισης, μεταξύ των τριών αυτών δοκιμών, είναι η διερεύνηση της επιρροής της αρχικής τιμής της μέσης ενεργού τάσης στην αντοχή των δοκιμίων και στο μέγεθος των υπερπιέσεων πόρων που αναπτύσσονται κατά τη διαδικασία της διάτμησης. Υπενθυμίζεται ότι αντίστοιχη σύγκριση έγινε και για τα τρία ισότροπα κανονικώς στερεοποιημένα δοκίμια, δηλαδή για την τιμή του λόγου κυρίων τάσεων K=1 (βλ. υποενότητα 4.2.3.1).

Στο Σχήμα 4.39 παρουσιάζονται για καλύτερη εποπτεία οι διαδρομές των τάσεων στο επίπεδο q:p' για τα τρία δοκίμια, οι οποίες παρουσιάσθηκαν προηγουμένως μαζί με τις υπόλοιπες καμπύλες στο Σχήμα 4.32.

Στο Σχήμα 4.40 φαίνονται οι καμπύλες της αποκλίνουσας τάσης ως προς την αξονική παραμόρφωση των δοκιμίων. Οι τρείς καμπύλες έχουν παρόμοια μορφή η οποία αναλύθηκε με αφορμή το σχετικό διάγραμμα της προηγούμενης υποενότητας. Αυτό που αξίζει να σημειωθεί όσον αφορά το γράφημα αυτό είναι ότι η αύξηση της αρχικής μέσης ενεργού τάσης προκαλεί αύξηση της αντοχής του δοκιμίου. Αντίστοιχη συμπεριφορά είχαν παρουσιάσει και τα ισότροπα στερεοποιημένα δοκίμια. Έτσι, διαφαίνεται ότι η αρχή της αναλογίας τηρείται όσον αφορά την αντοχή των κανονικώς στερεοποιημένων δοκιμίων, ανεξαρτήτως της τιμής του λόγου Κ που επιλέγεται στο στάδιο της στερεοποιήσης.



Σχήμα 4.39: Διαδρομές τάσεων στο επίπεδο q:p' για τα δοκίμια AC-9, 13 και 16 που στερεοποιήθηκαν με K=0.63



Σχήμα 4.40: Διάγραμμα αποκλίνουσας τάσης συναρτήσει της αξονικής παραμόρφωσης των δοκιμίων

Τα ίδια συμπεράσματα, αυτή τη φορά ως προς τις αναπτυσσόμενες υπερπιέσεις πόρων στο εσωτερικό των δοκιμίων, προκύπτουν παρατηρώντας το Σχήμα 4.41. Φαίνεται, μάλιστα, και στα δύο διαγράμματα η τάση που έχουν οι καμπύλες του AC-16 να πλησιάζουν αυτές του AC-9, καθότι αντιστοιχούν σε κοντινές τιμές της αρχικής μέσης ενεργού τάσης.



Σχήμα 4.41: Διάγραμμα υπερπιέσεων πόρων συναρτήσει της αξονικής παραμόρφωσης των δοκιμίων

4.2.5 Δοκιμές τριαξονικού εφελκυσμού με εμποδιζόμενη στράγγιση σε ισότροπα κανονικώς στερεοποιημένα δοκίμια

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από δύο δοκιμές εφελκυσμού υπό αστράγγιστες συνθήκες σε ισότροπα στερεοποιημένα δοκίμια, που διεξήχθησαν στην τριαξονική συσκευή. Ο εφελκυσμός των δοκιμίων επιτυγχάνεται με τη χρήση ειδικού εξαρτήματος το οποίο εφαρμόζει στο top-cap, ακριβώς πριν ξεκινήσει το σχετικό στάδιο της δοκιμής.

Πρόκειται για τα δοκίμια TIC-8 και TIC-9, τα οποία στερεοποιήθηκαν σε τάσεις p'=400 και 650kPa αντίστοιχα, ώστε η συμπεριφορά τους στον εφελκυσμό να συγκριθεί με αυτή που παρουσιάστηκε για τα TIC-2 και TIC-3. Υπενθυμίζεται ότι τα τελευταία δοκιμάστηκαν σε θλίψη, ξεκινώντας στο στάδιο της διάτμησης από τις αντίστοιχες αρχικές μέσες ενεργές τάσεις (400 και 650kPa). Οι καμπύλες ισότροπης στερεοποίησης των TIC-8 και 9 βρίσκονται

στο συγκεντρωτικό διάγραμμα της ισότροπης στερεοποίησης του Σχήματος 4.8. Ο δείκτης πόρων κατά τη δοκιμή εφελκυσμού είναι e=0.974 και e=0.92 για τα TIC-8 και 9 αντίστοιχα. Στο Σχήμα 4.42 παρουσιάζονται οι διαδρομές τάσεων των δοκιμίων στο επίπεδο q:p'.



Σχήμα 4.42: Διαδρομές τάσεων στο επίπεδο q:p' για τα δοκίμια TIC-8 και TIC-9

Τα δύο δοκίμια έχουν όμοια συμπεριφορά στον εφελκυσμό. Οι τασικές οδεύσεις φαίνεται να κινούνται προς τις μικρότερες τιμές της μέσης ενεργού τάσης καθ' όλη τη διάρκεια των δοκιμών. Το TIC-9 παρουσιάζει μεγαλύτερη αντοχή από το TIC-8 καθώς διαθέτει μεγαλύτερη αρχική μέση ενεργό τάση. Οι κανονικοποιημένες, ως προς τη αρχική μέση ενεργό τάση, p_i', τασικές οδεύσεις του Σχήματος 4.43 ταυτίζονται σε μεγάλο βαθμό, ωστόσο παρατηρείται εμφανής διαφοροποίηση τους κοντά στην αστοχία, καθώς το TIC-8 εμφανίζει μεγαλύτερη κανονικοποιημένη αντοχή.

Στο Σχήμα 4.44 φαίνεται η συσχέτιση του λόγου των τάσεων η με την αξονική παραμόρφωση των δοκιμίων. Οι δύο καμπύλες ταυτίζονται για ένα εύρος παραμορφώσεων έως το -4%. Έπειτα η καμπύλη του TIC-8 συνεχίζει καθοδικά μέχρι την εμφάνιση ελαχίστου



Σχήμα 4.43: Κανονικοποιημένες, ως προς την αρχική μέση ενεργό τάση, διαδρομές τάσεων



Σχήμα 4.44: Διάγραμμα του λόγου των τάσεων *η* συναρτήσει της αξονική παραμόρφωσης των δοκιμίων

η=-1.3, σε παραμόρφωση περί το -12%, ενώ αυτή του TIC-9 δείχνει τάση για σταθεροποίηση κοντά στην τιμή η=-0.9 πριν τη θραύση. Έτσι, η διαφορετική συμπεριφορά

που σημειώθηκε με βάση το γράφημα των κανονικοποιημένων διαδρομών τάσεων είναι εμφανής και εδώ. Σημειώνεται ότι καθότι πρόκειται για δύο κανονικώς στερεοποιημένα δοκίμια, θα αναμενόταν οι καμπύλες στο η:ε_a να βρίσκονται κοντά για μεγαλύτερο διάστημα στη δοκιμή και οι ελάχιστες τιμές του λόγου *η* να είναι παρόμοιες.

Έντονη διαφοροποίηση παρατηρείται και ως προς τη μεταβολή της πίεσης πόρων εντός των δύο δοκιμίων. Στα σχετικά γραφήματα των Σχημάτων 4.45 και 4.46 φαίνεται ότι τα δοκίμια εμφανίζουν, για μικρές τιμές της αξονικής παραμόρφωσης (περί το -1%), τάση για διαστολή, με την ανάπτυξη πιέσεων μικρότερων της αρχικής, της τάξης των 10kPa για το TIC-8 και 30kPa για το TIC-9. Στη συνέχεια όμως η συμπεριφορά τους αλλάζει και η πίεση των πόρων αρχίζει να αυξάνεται, γεγονός που υποδηλώνει τάση για συστολή, η οποία συνεχίζεται για το υπόλοιπο των δοκιμών. Οι καμπύλες που αντιστοιχούν στο TIC-8 δείχνουν τάση για σταθεροποίηση της πίεσης πόρων για παραμορφώσεις μεταξύ 4% και 13% (κατ 'απόλυτη τιμή), ενώ για παραμορφώσεις μεγαλύτερες του 13% παρατηρείται και πάλι αύξησή της. Αντίθετα, οι πιέσεις πόρων για το TIC-9 φαίνεται, μετά την αρχική μείωση που προαναφέρθηκε, να αυξάνονται συνεχώς έως το τέλος της δοκιμής.



Σχήμα 4.45: Καμπύλες μεταβολής της πίεσης πόρων συναρτήσει της αξονικής παραμόρφωσης των δοκιμίων

Έτσι, ενώ αρχικά οι καμπύλες της κανονικοποιημένης μεταβολής της πίεσης πόρων δείχνουν να συμβαδίζουν, στη συνέχεια (για παραμορφώσεις μεγαλύτερες του 7% κατ' απόλυτη τιμή) αποκλίνουν αρκετά μεταξύ τους.



Σχήμα 4.46: Καμπύλες της κανονικοποιημένης μεταβολής της πίεσης πότων συναρτήσει της αξονικής παραμόρφωσης των δοκιμίων

4.2.6 Σύγκριση αποτελεσμάτων

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζονται ομαδοποιημένα γραφήματα, από τα αποτελέσματα που αναλύθηκαν στις προηγούμενες Ενότητες 4.2.3, 4.2.4 και 4.2.5. Παρατίθενται τα κανονικοποιημένα, ως προς την ισοδύναμη μέση ενεργό τάση, p_e', διαγράμματα q:p' για τα ισότροπα και τα ανισότροπα στερεοποιημένα δοκίμια. Με βάση το κανονικοποιημένο διάγραμμα που αφορά στα ισότροπα στερεοποιημένα δοκίμια ορίζεται η περιβάλλουσα επιφάνεια Hvorslev-Roscoe, μέσω υπολογισμού των παραμέτρων g,h (βλ. Σχήμα 2.8) Έπειτα, παρουσιάζονται οι καμπύλες ίσης αξονικής παραμόρφωσης για τα ισότροπα στερεοποιημένα δοκίμια. Ακολουθούν, τα διαγράμματα q:p' και ν:p' με τα σημεία αστοχίας όλων των κανονικώς στερεοποιημένων δοκιμίων και το αντίστοιχο ομαδοποιημένο διάγραμμα η:ε_a. Τέλος, γίνεται σύγκριση της συμπεριφοράς των ισότροπα στερεοποιημένων δοκιμίων σε εφελκυσμό και θλίψη, αλλά και σύγκριση των αποτελεσμάτων εφελκυσμού με αποτελέσματα από παλαιότερες δοκιμές εφελκυσμού σε ανισότροπα στερεοποιημένα δοκίμια (Κουρέλης, 2016).

4.2.6.1 Ισότροπα στερεοποιημένα δοκίμια

Στο Σχήμα 4.47 φαίνεται το κανονικοποιημένο, ως προς την ισοδύναμη μέση ενεργό τάση, pe', διάγραμμα q:p' για τα ισότροπα στερεοποιημένα δοκίμια.



Σχήμα 4.47: Κανονικοποιημένο ως προς την ισοδύναμη μέση ενεργό τάση p_e' διάγραμμα q:p' επιφάνειες Hvorslev και Roscoe - Καμπύλη Κρίσιμης Κατάστασης (CSL)

Στο παραπάνω γράφημα φαίνονται οι διαδρομές τάσεων των ισότροπα στερεοποιημένων δοκιμίων στο κανονικοποιημένο επίπεδο (q/pe'):(p'/pe'). Η ισοδύναμη μέση ενεργός τάση υπολογίζεται από την καμπύλη ισότροπης συμπίεσης (ICL) του Σχήματος 4.8, ως η μέση ενεργό τάση που αντιστοιχεί στο δείκτη πόρων του κάθε δοκιμίου ξεχωριστά (βλ. Σχήμα 2.9). Φαίνονται επίσης οι επιφάνειες Hvorslev, που είναι το σύνορο των τασικών οδεύσεων για τα υπερστερεοποιημένα δοκίμια, και Roscoe, που είναι το σύνορο των διαδρομών τάσεων για τα κανονικώς στερεοποιημένα δοκίμια (Atkinson, et al., 1978). Οι δύο επιφάνειες τέμνονται στο σημείο του γραφήματος που αντιστοιχεί στην Καμπύλη Κρίσιμης Κατάστασης (CSL). Έχει σχεδιασθεί για λόγους πληρότητας και η προβολή της CSL στο επίπεδο αυτό με κλίση M=0.74 που υπολογίστηκε από τα σημεία αστοχία των TIC-2 και 3. Στα αριστερά της, η επιφάνεια Hvorslev περιορίζεται από την διακεκομμένη ευθεία (tension cut-off) με κλίση 3:1, που είναι η μεγαλύτερη τιμή την οποίαν μπορεί να λάβει ο λόγος q/p' όταν το έδαφος δεν μπορεί να παραλάβει εφελκυστικές τάσεις (σ_1 ', σ_3 ' ≥0). Η κλίση της ευθείας αυτής είναι το όριο του λόγου q/p' όταν η ελάχιστη κύρια ενεργός τάση τείνει να λάβει την τιμή σ_3 '=0.

Παρατηρείται, ότι οι διαδρομές τάσεων για τα υπερστερεοποιημένα δοκίμια σταματούν σε σημεία μακριά από αυτό που αντιστοιχεί στην CSL. Δηλαδή φαίνεται ότι δεν έχουν καταφέρει να προσεγγίσουν την Κρίσιμη Κατάσταση, πιθανότατα λόγω πρώιμης θραύσης τους. Η επιφάνεια Hvorslev έχει κλίση h=0.601 και τέμνει τον άξονα q/p_e' στην τιμή g=0.094. Η παράμετροι g, h είναι σταθερές του υλικού (βλ. Σχήμα 2.8).

Στο Σχήμα 4.48 φαίνεται το ίδιο κανονικοποιημένο διάγραμμα (q/p_e'):(p'/p_e'), με τις καμπύλες ίσης παραμόρφωσης των δοκιμίων, που σχεδιάστηκαν για παραμορφώσεις 0.05, 0.1, 0.2, 0.5, 0.75, 1, 1.5, 2.5 και 5%.



Σχήμα 4.48: Καμπύλες ίσης παραμόρφωσης στο κανονικοποιημένο διάγραμμα (q/p_e'):(p'/p_e')

Οι καμπύλες ίσης παραμόρφωσης φαίνεται ότι πυκνώνουν για μικρές τιμές της παραμόρφωσης και στη συνέχεια αραιώνουν όσο οι παραμορφώσεις των δοκιμίων αυξάνονται. Επίσης, σε μικρές τιμές της παραμόρφωσης (της τάξης του 0.05%) τείνουν να

γίνουν παράλληλες με τον οριζόντιο άξονα p'/pe', σε μία περιοχή του διαγράμματος που αντιστοιχεί σε μικρές τιμές του λόγου υπερστερεοποίησης (OCR), ενώ σε μεγάλες παραμορφώσεις (5%) η κλίση τους προσεγγίζει αυτή της προβολής της CSL. Για μεγάλες τιμές του OCR οι καμπύλες τείνουν να συγκεντρωθούν σε ένα σημείο του επιπέδου το οποίο σύμφωνα με τον Gens (Gens, 1982), είναι η αρχή των αξόνων. Ωστόσο, στο παρόν διάγραμμα , ενώ υπάρχει τάση για συγκέντρωση των καμπυλών στην περιοχή των υψηλών OCR, το σημείο συγκέντρωσης των καμπυλών φαίνεται να είναι διαφορετικό από την αρχή των αξόνων.

4.2.6.2 Κανονικώς στερεοποιημένα δοκίμια

Στο Σχήμα 4.49 φαίνονται οι κανονικοποιημένες διαδρομές τάσεων, (q/p_e'):(p'/p_e'), για τα ισότροπα κανονικώς στερεοποιημένα TIC-2, 3, 4 και για τα ανισότροπα κανονικώς στερεοποιημένα AC-11 και 12 τα οποία έχουν στερεοποιηθεί υπό το σταθερό λόγο K=0.61.



Σχήμα 4.49: *Κανονικοποιημένες διαδρομές τάσεων (q/p_e'):(p'/p_e'), για ισότροπα τα* στερεοποιημένα δοκίμια TIC-2,3,4 (K=1) και για τα ανισότροπα στερεοποιημένα δοκίμια AC-11,12 (K=0.61), AC-17 (K=0.66) και AC-20 (K=0.73)

Οι διαδρομές τάσεων για τα ανισότροπα στερεοποιημένα δοκίμια, βρίσκονται μακριά από την επιφάνεια που δημιουργούν οι αντίστοιχες διαδρομές των ισότροπα στερεοποιημένων δοκιμίων με εξαίρεση την τασική όδευση του AC-20 που αντιστοιχεί σε λόγο K=0.73.
Δηλαδή, παρότι όλα τα δοκίμια είναι κανονικώς στερεοποιημένα, φαίνεται ότι ενδεχομένως υπάρχουν διαφορετικά σύνορα (Roscoe) ανάλογα με την τιμή του λόγου Κ που επιλέγεται κατά τη στερεοποίηση. Αυτό έρχεται σε αντίθεση με τη Θεωρία της Κρίσιμης Κατάστασης, η οποία προβλέπει ενιαίο σύνορο για τα κανονικώς στερεοποιημένα δοκίμια, ανεξαρτήτως της τασικής όδευσης που ακολουθήθηκε κατά τη στερεοποίηση ενός δοκιμίου.

Βέβαια, τα όσα προαναφέρθηκαν δεν αποτελούν παρά μια απλή ένδειξη για την ύπαρξη διαφορετικών συνόρων ανάλογα με το τον λόγο K με τον οποίο γίνεται η στερεοποίηση. Περαιτέρω έρευνα πάνω στο ζήτημα αυτό είναι αναγκαίο να γίνει, για να αποδειχθεί ότι αληθεύει ο παραπάνω ισχυρισμός για το συγκεκριμένο υλικό. Δοκιμές διάτμησης σε ανισότροπα στερεοποιημένα δοκίμια, με διαφορετικούς λόγους K, θα βοηθούσαν ώστε να γίνει πιο σαφής η συμπεριφορά που παρουσιάζει το υλικό των δοκιμών. Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας οι τιμές του λόγου K των ανισότροπα στερεοποιημένων δοκιμίων ήταν αρκετά κοντινές (0.61-0.73), οπότε τα αποτελέσματα δεν μπορούν να δημιουργήσουν ένα ισχυρό πλαίσιο πάνω στο οποίο θα μπορούσε να βασιστεί ο ισχυρισμός που αναπτύχθηκε. Παρόμοια συμπεριφορά με αυτή που ενδεχομένως αφορά και το παρόν υλικό, έχει αναφερθεί στη βιβλιογραφία από τον Gens (Gens, 1982).

Στο Σχήμα 4.50 παρουσιάζεται το διάγραμμα του λόγου τάσεων η συναρτήσει της επιβαλλόμενης αξονικής παραμόρφωσης για όλα τα κανονικώς στερεοποιημένα δοκίμια (ισότροπα και ανισότροπα). Όπως αναφέρθηκε και με αφορμή την ανάλυση των αποτελεσμάτων των ΑC δοκιμίων στην Ενότητα 4.2.4, φαίνεται ότι ανεξαρτήτως τρόπου στερεοποίησης των δοκιμίων οι μέγιστες τιμές του λόγου η, κυμαίνονται σε ένα εύρος μεταξύ η=0.63 και η=0.85. Παρατηρείται, επίσης, ότι οι καμπύλες των TIC-2, 3 και 4 εμφανίζουν τις μέγιστες τιμές του λόγου η σε μεγαλύτερες τιμές της αξονικής παραμόρφωσης από τα AC δοκίμια.

102



Σχήμα 4.50: Διάγραμμα η:ε_a για όλα τα κανονικώς στερεοποιημένα δοκίμια

Στα επόμενα διαγράμματα των Σχημάτων 4.51 και 4.52 παρουσιάζονται συγκεντρωμένα όλα τα σημεία αστοχίας των κανονικώς στερεοποιημένων ΙC και AC δοκιμίων μαζί με την προβολή της CSL στα επίπεδα q:p' και v:p'. Επιπροσθέτως, στο διάγραμμα v:p' έχουν τοποθετηθεί και η καμπύλη ICL που αντιστοιχεί στην ισότροπη συμπίεση.

Παρατηρείται, ότι τα σημεία αστοχίας των ΙC δοκιμίων βρίσκονται πολύ κοντά σε αυτά των AC δοκιμίων και στα δύο διαγράμματα, με εξαίρεση το σημείο που αντιστοιχεί στο δοκίμιο TIC-4 το οποίο απομακρύνεται αρκετά από την προβολή της CSL. Άλλωστε για τη συγκεκριμένη διαφοροποίηση έχει γίνει μνεία στην υποενότητα 4.2.3.1.

Φαίνεται, επίσης, στο διάγραμμα v:p', ότι η κλίση της προβολής της CSL είναι πολύ κοντινή σε αυτή της καμπύλης ICL, κάτι που συμβαδίζει με τη Θεωρία της Κρίσιμης Κατάστασης, όπου οι δύο καμπύλες είναι παράλληλες στο ημιλογαριθμικό διάγραμμα v:p' (βλ. Σχήμα 2.4).



Σχήμα 4.51: Διάγραμμα q:p' με τα σημεία αστοχίας για το σύνολο των κανονικώς στερεοποιημένων δοκιμίων (AC & IC)



Σχήμα 4.52: Διάγραμμα v:p' με τα σημεία αστοχίας για το σύνολο των κανονικώς στερεοποιημένων δοκιμίων (AC & IC) - καμπύλη στερεοποίησης ICL - προβολή της CSL

4.2.6.3 Παρατηρήσεις σχετικά με τις δοκιμές εφελκυσμού στα ΙC δοκίμια

Στο Σχήμα 4.53 παρατίθεται το διάγραμμα q:p' που αφορά τις δοκιμές θλίψης και εφελκυσμού των ισότροπα στερεοποιημένων δοκιμίων TIC-2, 3, 8 και 9, που παρουσιάσθηκαν στις Ενότητες 4.2.3.1 και 4.2.5. Πρόκειται για ζεύγη δοκιμών, όπου τα δοκίμια ξεκινούν από τις ίδιες τιμές της μέσης ενεργού τάσης, p'=400 και 650kPa, με σκοπό τη διερεύνηση της συμπεριφοράς του υλικού ως προς την αντοχή του, στα δύο είδη δοκιμών.

Στο γράφημα έχει σχεδιασθεί επίσης η προβολή της CSL με κλίση M=0.74 που υπολογίστηκε για τα IC δοκίμια, αλλά και η συμμετρική της ως προς τον άξονα p' για λόγους σύγκρισης. Παρατηρείται ότι τα δοκίμια TIC-8 και 9 εμφανίζουν μεγαλύτερες τιμές της αποκλίνουσας τάσης από τα TIC-2 και 3, ενώ παράλληλα οι τασικές οδεύσεις τους σταματούν σε μικρότερες τιμές της μέσης ενεργού τάσης.



Σχήμα 4.53: Διάγραμμα διαδρομών τάσεων στο επίπεδο q:p' για τα κανονικώς στερεοποιημένα δοκίμια TIC-2, 3, 8 και 9

Παρόμοια συμπεριφορά έχει αναφέρει και ο Κουρέλης (Κουρέλης, 2016) σε αντίστοιχες δοκιμές σε ανισότροπα στερεοποιημένα δοκίμια. Τα σημεία αστοχίας των δοκιμών εφελκυσμού που παρουσίασε σε ανισότροπα στερεοποιημένα δοκίμια, μαζί με αντίστοιχα που προσδιορίστηκαν από τις παραπάνω δύο δοκιμές TIC-8 και 9, παρουσιάζονται στο επόμενο Σχήμα 4.54, στο επίπεδο q:p'. Στο διάγραμμα φαίνεται επίσης η προβολή της CSL με κλίση M=0.86 που υπολόγισε ο Κουρελής.

Παρατηρείται ότι ενώ το σημείο αστοχίας του TIC-9 βρίσκεται πάνω στην προβολή της CSL, το αντίστοιχο σημείο του TIC-8 αποκλίνει αρκετά. Συνεπώς, επειδή τα σημεία αστοχίας για τα ισότροπα στερεοποιημένα δοκίμια είναι μόνο δύο, δεν μπορεί να διατυπωθεί ασφαλές συμπέρασμα ως προς τη συσχέτιση της συμπεριφορά IC και AC δοκιμίων κατά τον εφελκυσμό.



Σχήμα 4.54: Σημεία αστοχίας ΑC δοκιμίων σε εφελκυσμό μαζί με τα αντίστοιχα για τα IC δοκίμια *TIC-8 και 9, στο επίπεδο q:p' - προβολή της CSL (M=0.86)* (Κουρἑλης, 2016)

4.2.7 Προσδιορισμός τέμνοντος μέτρου εδαφικής δυστροπίας (E_{sec})

Η εδαφική δυστροπία ορίζεται ως η αντίσταση του εδάφους στην επιβαλλόμενη παραμόρφωση (Γκαζέτας, 1988). Δεδομένου ότι η συσχέτιση τάσεων-παραμορφώσεων αποτυπώνεται έντονα μη γραμμική, όπως αποδείχτηκε άλλωστε με βάση τα αποτελέσματα

των δοκιμών, αξίζει σε αυτό το σημείο να γίνει μια αναφορά στον τρόπο υπολογισμού του τέμνοντος μέτρου εδαφικής δυστροπίας και της συμπεριφοράς του σε ένα εύρος αξονικών παραμορφώσεων έως και το 1%.

Για τον υπολογισμό των παραμορφώσεων, απαραίτητη κρίνεται η τοποθέτηση δύο τοπικών μετρητών (LVDT) στο δοκίμιο, οι οποίοι μετρούν με μεγαλύτερη ακρίβεια την επιβαλλόμενη σε αυτό παραμόρφωση σε σχέση με τον εξωτερικό μετρητή, στο εύρος που ενδιαφέρει τον υπολογισμό του E_{sec}. Κι αυτό διότι στις πολύ μικρές παραμορφώσεις, τα σφάλματα που υπεισέρχονται στον υπολογισμό τους βάσει του εξωτερικού μετρητή, επηρεάζουν σημαντικά το μέγεθός τους. Αντιθέτως, οι τοπικοί μετρητές λόγω της θέσης τους στο κέντρο του δοκιμίου μετρούν την παραμόρφωση αυτού χωρίς την επιρροή της παραμορφωσιμότητας της ίδιας της συσκευής ή της ανομοιομορφίας των παραμορφώσεων που προκαλείται στα άκρα λόγω της επαφής με τα άκαμπτα τμήματα της συσκευής.

Το τέμνον μέτρο εδαφικής δυστροπίας υπολογίζεται από το διάγραμμα αποκλίνουσας τάσης συναρτήσει της αξονικής παραμόρφωσης στο στάδιο της διάτμησης, ως η κλίση της ευθείας που ενώνει την καμπύλη τάσεων-παραμορφώσεων με την αρχή των αξόνων, για παραμορφώσεις έως το 1%. Έτσι, οι υπολογιζόμενες τιμές του μέτρου E_{sec} αποτελούν το λόγο της αποκλίνουσας τάσης προς την αντίστοιχη αξονική παραμόρφωση. Στο Σχήμα 4.55 φαίνεται η διακύμανση της τιμής του E_{sec} συναρτήσει της επιβαλλόμενης αξονικής παραμόρφωσης στο Ε_{sec} συναρτήσει της επιβαλλόμενης αξονικής παραμόρφωσης.

Παρατηρείται ότι κάποιες καμπύλες ξεκινούν από μικρότερη τιμής της παραμόρφωσης εν αντιθέσει με κάποιες άλλες. Αυτό συμβαίνει διότι για κάποιες δοκιμές δεν υπήρχε η απαραίτητη ακρίβεια στον υπολογισμό της τιμής του E_{sec} για παραμορφώσεις μικρότερες από 0.002%. Οι μέγιστες τιμές του E_{sec} είναι μεταξύ 460 και 510 MPa, για παραμορφώσεις κοντά στο 0.001%, ενώ παρατηρείται ραγδαία μείωση της τιμής του για παραμορφώσεις έως και το 0.02%. Για τιμές της αξονικής παραμόρφωσης μεγαλύτερες του 0.02% όλες οι καμπύλες τείνουν να σταθεροποιηθούν, ενώ σε παραμορφώσεις της τάξης του 1% βρίσκονται όλες εντός του εύρους τιμών του E_{sec} 8 έως 20MPa.

Στη συνέχεια παρατίθεται το διάγραμμα του κανονικοποιημένου, ως προς τη μέση ενεργό τάση των δοκιμίων, τέμνοντος μέτρου δυστροπίας σε συνάρτηση με την αξονική παραμόρφωση (Σχήμα 4.56). Με αυτόν τον τρόπο απαλείφεται η επιρροή της ενεργού τάσης των δοκιμίων.



Σχήμα 4.55: Διακύμανση της τιμής του E_{sec} συναρτήσει της αξονικής παραμόρφωσης για τα ισότροπα στερεοποιημένα δοκίμια TIC-2, 3 και τα ανισότροπα στερεοποιημένα AC-8, 11, 16, 21



Σχήμα 4.56: Διακύμανση της κανονικοποιημένης τιμής E_{sec}/p' συναρτήσει της αξονικής παραμόρφωσης για τα ισότροπα στερεοποιημένα δοκίμια TIC-2, 3 και τα ανισότροπα στερεοποιημένα AC-8, 11, 16, 21

Διαφαίνεται, ότι για παραμορφώσεις μικρότερες του 0.01% οι καμπύλες τείνουν να απομακρυνθούν σε σχέση με τις αντίστοιχες του Σχήματος 4.55, ενώ αναμενόταν να συμβεί το αντίθετο. Ωστόσο, για παραμορφώσεις μεγαλύτερες του 0.02% φαίνεται ότι όντως οι καμπύλες συγκλίνουν συγκρίνοντας με το προηγούμενο σχήμα.

5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Οι δοκιμές που διεξήχθησαν στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας είχαν ως στόχο την διερεύνηση της συμπεριφοράς του βιομηχανικού ορυκτού καολινίτη κατά τα στάδια της στερεοποίησης και της διάτμησης στη συσκευή τριαξονικής φόρτισης. Σε αυτή τη βάση διενεργήθηκαν μονοτονικές δοκιμές θλίψης και εφελκυσμού καθώς και συμπληρωματικές δοκιμές στο κλασικό συμπιεσόμετρο. Η ανάλυση των αποτελεσμάτων των παραπάνω δοκιμών οδήγησε στη διατύπωση των κατωτέρω συμπερασμάτων:

- Οι καμπύλες συμπιεσομέτρου είναι παράλληλες μεταξύ τους ανεξάρτητα από το αρχικό ποσοστό υγρασίας των δοκιμίων. Η καμπύλη του κανονικώς στερεοποιημένου υλικού δεν εμφανίζει τυπική συμπεριφορά αναζυμωμένης αργίλου, με μορφή ανάποδου "S" και σημείο καμπής, αλλά αντιθέτως στρέφει τα κοίλα προς τα κάτω σε όλο το εύρος των τάσεων. Η κανονικοποιημένη καμπύλη δείχνει διαφορετική συμπεριφορά σε σχέση με την Θεωρητική Καμπύλη Burland, κυρίως όσον αφορά την καμπυλή του καολινίτη υπερβαίνει τη Θεωρητική Καμπύλη Burland, κυρίως η κανονικοποιημένη καμπύλη του καολινίτη υπερβαίνει τη Θεωρητική Καμπύλη
- Οι κλάδοι φόρτισης και αποφόρτισης εμφανίζουν σημαντικές διαφορές στις κλίσεις με τους δείκτες εγγενούς συμπιεστότητας και διόγκωσης να λαμβάνουν τις τιμές C_c*=0.398 και C_s*=0.158. Παρατηρείται δε ομοιότητα στις κλίσεις κατά την αποφόρτιση και την επαναφόρτιση. Οι εγγενείς χαρακτηριστικές τιμές του δείκτη πόρων είναι e₁₀₀*=1.114 και e₁₀₀₀*=0.716.
- Κατά τη στερεοποίηση των δοκιμίων στην τριαξονική συσκευή υπό τον έλεγχο των πλευρικών παραμορφώσεων προσεγγίζονται ικανοποιητικά οι συνθήκες συμπιεσομέτρου για το κανονικώς στερεοποιημένο υλικό (σ_v'>200kPa), καθώς η μέγιστη τιμή της αναπτυσσόμενης πλευρικής παραμόρφωσης δεν υπερβαίνει την

τιμή 0.005%. Παράλληλα, οι κλίσεις των καμπυλών στο διάγραμμα ε_v:ε_a δείχνουν ότι σχεδόν το σύνολο της ογκομετρικής παραμόρφωσης αποδίδεται σε αξονική παραμόρφωση των δοκιμίων. Για τους παραπάνω λόγους θεωρείται ασφαλής ο υπολογισμός του λόγου ουδετέρων ωθήσεων, K₀, για το κανονικώς στερεοποιημένο υλικό. Η τιμή που προτείνεται είναι K₀=0.687.

- Κατά τη στερεοποίηση των δοκιμίων με έλεγχο των τάσεων παρατηρείται ότι η τιμή του λόγου Κ επηρεάζει σημαντικά τη σχέση της ογκομετρικής με την αξονική παραμόρφωση. Στα ισότροπα στερεοποιημένα δοκίμια (K=1) οι κλίσεις των καμπυλών στο διάγραμμα ε_v:ε_a είναι πολύ κοντά στην τιμή 3:1 που αντιστοιχεί στην ιδανικώς ισότροπη συμπεριφορά, ενώ δεν φαίνεται να ισχύει το ίδιο για όλα τα δοκίμια σε ότι αφορά τη συσχέτιση της πλευρικής με την αξονική παραμόρφωση. Έτσι, συμπεραίνεται ότι η αρχική στερεοποίηση, κατά την μόρφωση του δείγματος από το οποίο προέρχονται τα δοκίμια (σ_v'=200kPa), έχει μικρή επιρροή στη συμπεριφορά των δοκιμίων κατά την ισότροπη στερεοποίηση, σε τάσεις μεγαλύτερες της ανωτέρω τιμής.
- Οι καμπύλες των ογκομετρικών προς τις αξονικές παραμορφώσεις για τα ανισότροπα στερεοποιημένα δοκίμια (K<1) δείχνουν ότι μείωση της τιμής του λόγου Κ συνεπάγεται μείωση της κλίσης των αντίστοιχων καμπυλών. Για δοκίμια που στερεοποιήθηκαν με τιμές του λόγου Κ κοντά στην τιμή K₀=0.69 οι κλίσεις των καμπυλών πλησιάζουν την τιμή 1:1.
- Οι καμπύλες της ισότροπης στερεοποίησης του κανονικώς στερεοποιημένου υλικού παρουσιάζουν μικρή διασπορά, οπότε με ασφάλεια σχεδιάζεται η μέση καμπύλη στερεοποίησης (ICL) με κλίση λ_c=0.150 και N=2.86 στο επίπεδο v:p'. Ακόμη μικρότερη διασπορά παρουσιάζουν οι καμπύλες ισότροπης αποφόρτισης για τις οποίες υπολογίζεται η κλίση λ_s=0.06.
- Τα τμήματα των καμπυλών στερεοποίησης που αφορούν το κανονικώς στερεοποιημένο υλικό, στο επίπεδο ν:σ_v', είναι παράλληλα με την καμπύλη της ισότροπης στερεοποίησης ανεξαρτήτως μεθόδου στερεοποίησης.
- Η μέγιστη τιμή του λόγου τάσεων, η, για όλα τα κανονικώς στερεοποιημένα δοκίμια, βρίσκεται εντός του εύρους 0.63-0.85, ανεξαρτήτως μεθόδου στερεοποίησής τους, αλλά δεν μπορεί να εκτιμηθεί, με βάση τα υπάρχοντα αποτελέσματα, η επιρροή του λόγου Κ στην τιμή αυτή.

- Τα κανονικώς στερεοποιημένα δοκίμια παρουσιάζουν μια τυπική συμπεριφορά με τάση για συστολή καθ' όλη τη διάρκεια της δοκιμής, η οποία γίνεται εντονότερη όσο αυξάνεται η αρχική ενεργός τάση του δοκιμίου.
- Τα κανονικώς στερεοποιημένα δοκίμια φαίνεται ότι προσεγγίζουν την κρίσιμη κατάσταση για αξονικές παραμορφώσεις 3-4% για τα ανισότροπα στερεοποιημένα και 5-7% για τα ισότροπα στερεοποιημένα δοκίμια. Ωστόσο, φαίνεται ότι η πλήρης επίτευξη της κρίσιμης κατάστασης αποτρέπεται από τη δημιουργία επιπέδου αστοχίας στα δοκίμια.
- Για τα ισότροπα στερεοποιημένα δοκίμια, οι προβολές της CSL στα επίπεδα q:p' και v:p' έχουν κλίσεις M=0.74 και λ=0.153 αντίστοιχα, ενώ υπολογίζεται Γ=2.82.
- Για τα ανισότροπα στερεοποιημένα δοκίμια, οι προβολές της CSL στα επίπεδα q:p' και v:p' έχουν κλίσεις M=0.77 και λ=0.155 αντίστοιχα, ενώ υπολογίζεται Γ=2.87.
- Οι τιμές της κλίσης λ της CSL που προκύπτουν για τα κανονικώς στερεοποιημένα δοκίμια είναι πολύ κοντά στην τιμή λ=0.150 που αφορά την καμπύλη της ισότροπης συμπίεσης, κάτι που συνάδει με τη Θεωρία της Κρίσιμης Κατάστασης.
- Η περιβάλλουσα αστοχίας Mohr-Coulomb για τα ισότροπα κανονικώς στερεοποιημένα δοκίμια είναι ευθεία γραμμή και η γωνία διατμητικής αντοχής υπολογίζεται φ=19.2°, χωρίς συνοχή.
- Η περιβάλλουσα αστοχίας Mohr-Coulomb για τα ανισότροπα κανονικώς στερεοποιημένα δοκίμια είναι ευθεία γραμμή και η γωνία διατμητικής αντοχής υπολογίζεται φ=19.9°, χωρίς συνοχή.
- Τα ισότροπα υπερστερεοποιημένα δοκίμια εμφανίζουν τυπική συμπεριφορά με αρχική τάση για συστολή την οποία διαδέχεται τάση για διαστολή, σε τιμές της αξονικής παραμορφώσεις περί το 2-3%, που γίνεται εντονότερη όσο αυξάνεται ο λόγος υπερστερεοποίησης OCR.
- ≻ Παρατηρείται τάση για αύξηση της μέγιστης τιμής του λόγου η όσο αυξάνεται η τιμή του OCR για τιμές του OCR≥4.
- Διαφαίνεται ότι η επαναστερεοποίηση στην τριαξονική δοκιμή σε τάσεις μικρότερες από την αρχική τάση στερεοποίησης στο συμπιεσόμετρο, οδηγεί σε ιδιάζουσα συμπεριφορά υπερστερεοποιημένου δοκιμίου, όπως αυτή του δοκιμίου TIC-1, κυρίως σε ότι αφορά τη μέγιστη τιμή του λόγου η.

- Η περιβάλλουσα αστοχίας Mohr-Coulomb για τα ισότροπα υπερστερεοποιημένα δοκίμια είναι ευθεία γραμμή και η γωνία διατμητικής αντοχής υπολογίζεται φ=19.7°, ενώ παρατηρείται η ύπαρξη μικρής συνοχής c=7.17kPa.
- Στο κανονικοποιημένο, ως προς την ισοδύναμη μέση ενεργό τάση, διάγραμμα q:p', για τα κανονικώς στερεοποιημένα δοκίμια, φαίνεται ότι οι διαδρομές τάσεων δεν συγκλίνουν σε μία καμπύλη - σύνορο Roscoe, αλλά τα σύνορα είναι διαφορετικά ανάλογα με τιμή του λόγου Κ κατά τη στερεοποίηση. Ωστόσο, το παραπάνω αποτελεί απλώς ένδειξη και για να στοιχειοθετηθεί πλήρως απαιτούνται περισσότερες δοκιμές σε δοκίμια που έχουν στερεοποιηθεί με διαφορετικές τιμές του λόγου Κ.
- Η εφαρμογή της σχέσης του Jaky για το εύρος τιμών της γωνιάς διατμητικής αντοχής που προσδιορίστηκε οδηγεί σε τιμές του συντελεστή ουδετέρων ωθήσεων K₀=0.66-0.671, οι οποίες είναι μικρότερες από την τιμή που υπολογίζεται με τη μέθοδο στερεοποίησης στην τριαξονική συσκευή K₀=0.687, αλλά παραμένουν σχετικά κοντινές.

<u>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</u>

Atkinson, J. H. and Bransby, P. L. 1978. "The Mechanics of Soils". Maidenhead, UK : Mc Graw Hill Company, 1978.

Burland, J. B. 1990. "On the compressibility and shear strength of natural clays". *Geotechnique.* 1990, 40 (3), pp. 329-378.

Burland, J. B., et al. 1996. "A laboratory study of the strength of four stiff clays". *Geotechnique.* 1996, 46 (3), pp. 491-514.

Carrión, M. 2016. *"The effects of the structure on the mechanical behaviour of young Holocene alluvial materials from the Bormida River (Italy) and Turia River (Spain)".* Valencia : UPV, 2016. PhD Thesis.

Gens, A. 1982. *"Stress-strain and strength charasteristics of a low plasticity clay".* London : Imperial College of Science and Technology, 1982. PhD Thesis.

Georgiannou, V. N., et al. 2018. "Compression and Strength Characteristics of Two Silts of Low and High Plasticity". *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering.* 2018, 144 (7).

Hvorslev, **M. J. 1960.** "Physical components of the shear strength of saturated clays". Research Conference on Shear Strength of Cohesive Soils, 1960, pp. 169-358.

Jaky, J. 1944. "The coefficient of earth pressure at rest". *Journal of the Society of Hungarian Architects and Engineering.* 1944, 78 (22), pp. 355-358.

Mitchell, J. K. 1976. "Fundamentals of Soil Behavior". New York : John Wiley & Sons, Inc., 1976.

Roscoe, K. H., Schofield, A. N. and Wroth, C. P. 1958. "On the yielding of soils". *Geotechnique.* 1958, 8, pp. 22-53.

Γεωργιάννου, Β. Ν. 2010. "Ειδικά Θέματα Εδαφομηχανικής". Αθήνα : ΕΜΠ, 2010.

Γκαζέτας, Γ. 2012. "Σημειώσεις Εδαφομηχανικής". Αθήνα : Τομέας Γεωτεχνικής, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ, 2012. -. 1988. "Σκέψεις για μια πιο Ορθολογημένη Ελληνική Γεωτεχνική Ορολογία". 1988.
Πρακτικά 1ου Πανελληνίου συνεδρίου Γεωτεχνικής, Τόμος 3, Αναδημοσιευμένο στο βιβλίο:
"Σημειώσεις Εδαφομηχανικής".

Καββαδάς, Μ. 2009. "Στοιχεία Εδαφομηχανικής". Αθήνα : Εκδόσεις Συμεών, 2009.

Καραγιαννόπουλος, Ν. 2011. *"Πειραματική διερεύνηση ιδιοτήτων αργίλων στο συμπιεσόμετρο".* Αθήνα : s.n., 2011. Διπλωματική εργασία.

Κατερινόπουλος, Α. και Σταματάκης, Μ. 1995. "Εφαρμοσμένη Ορυκτολογία-Πετρολογία: Τα Βιομηχανικά Ορυκτά και Πετρώματα και οι Χρήσεις τους". Αθήνα : Τμήμα Γεωλογίας, Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών, 1995.

Κουρέλης, Ι. 2016. *"Τριαξονικές δοκιμές σε ανισότροπα στερεοποιημένο καολίνη".* Αθήνα : s.n., 2016. Διπλωματική Εργασία.

Παπαχαρίσης, Ν., Γραμματικόπουλος, Ι. και Μάνου-Ανδρεάδη, Ν. 2003. *"Γεωτεχνική Μηχανική".* Β' Έκδοση. Θεσσαλονίκη : Εκδοτικός Οίκος Αδελφών Κυριακίδη, 2003.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Α) Χαρακτηριστικά Ανισότροπα στερεοποιημένων δοκιμίων

Όνομα δοκιμίου	p' (kPa)	е	К	OCR	
	(τἑλος στερ/σης)	(τἑλος στερ/σης)	(στερ/σης)		
AC-7	277	1.041	0.66	1	
AC-9	370	1.018	0.63	1	
AC-11	379	0.971	0.61	1	
AC-12	378	0.964	0.61	1	
AC-13	135	1.063	0.64	1	
AC-14	378	0.967	0.61	1	
AC-15	567	0.858	0.66	1	
AC-16	320	1.020	0.62	1	
AC-17	323	0.983	0.66	1	
AC-20	354	1.010	0.68	1	
AC-21	418	0.936	0.73	1	
AC-23	325	0.942	0.65	1	

B) Χαρακτηριστικά Ισότροπα στερεοποιημένων δοκιμίων

	p' (kPa)	e	OCR
Ονομά οσκιμίου	(τἑλος στερ/σης)	(τἑλος στερ/σης)	
TIC-1	95.69	1.024	2
TIC-2	407	0.962	1
TIC-3	648	0.893	1
TIC-4	1589	0.758	1
TIC-5	397	0.835	4
TIC-6	200	0.888	8
TIC-7	161	0.891	10
TIC-8	401	0.974	1
TIC-9	644	0.920	1