

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Διπλωματική Εργασία

Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΑΝΙΣΟΤΡΟΠΙΑΣ ΛΟΓΩ ΦΟΡΤΙΣΗΣ
ΣΤΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΕΔΑΦΩΝ

υπό

ΦΑΝΗ ΦΩΤΙΑΔΟΥ

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση των
απαιτήσεων για την απόκτηση
του Διπλώματος Πολιτικού Μηχανικού

2021

© Φωτιάδου Φανή

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/32 αρ.202 παρ.2)

Ευχαριστίες,

Πρώτα απ' όλα θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτέρως την επιβλέπουσα καθηγήτρια μου, Λέκτορα κα. Καλλιόγλου, για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγηση της καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας. Εξίσου σημαντική αποδείχθηκε η βοήθεια της υποψήφιας διδάκτορας του εργαστηρίου Γεωτεχνικής Μηχανικής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, Μαρίας Γιαννακοπούλου. Ακόμη, θα ήθελα να ευχαριστήσω τα υπόλοιπα μέλη της εξεταστικής επιτροπής, τον Επίκουρο Καθηγητή κ. Εφραιμίδη, τον Επίκουρο Καθηγητή κ. Γραμμένο για τις υποδείξεις τους, καθώς και την οικογένεια μου και τους φίλους μου.

Φωτιάδου Φανή

Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΑΝΙΣΟΤΡΟΠΙΑΣ ΛΟΓΩ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΣΤΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΕΔΑΦΩΝ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη της επίδρασης της ανισοτροπίας λόγω φόρτισης στη μηχανική συμπεριφορά εδαφών. Η διαδικασία εναπόθεσης των εδαφικών κόκκων κατά την ιζηματογένεση των εδαφικών σχηματισμών στο πεδίο, σε συνδυασμό με τη γεωλογική του ιστορία συμβάλλουν στη δημιουργία μίας ανισότροπης αρχικής εδαφικής δομής. Η επακόλουθη υποβολή του εδάφους στις διάφορες εξωτερικές φορτίσεις (π.χ. σεισμικές δράσεις κλπ), στις οποίες μεταβάλλεται το μέγεθος και η διεύθυνση των κυρίων τάσεων και σε ορισμένες περιπτώσεις λαμβάνει χώρα η συνεχής στροφή των αξόνων των κυρίων τάσεων, συμβάλλει στη δημιουργία περαιτέρω ανισοτροπίας, της ανισοτροπίας λόγω φόρτισης. Η ανισοτροπία του εδάφους είναι καθοριστική ως προς τον τρόπο απόκρισής του. Στα πλαίσια αυτής της εργασίας, αρχικά, γίνεται εκτενής περιγραφή των φαινομένων της ανισοτροπίας και της μη – ομοαξονικότητας του εδάφους, που αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά των ανισότροπων εδαφικών υλικών. Ακολούθως, περιγράφονται οι συσκευές που έχουν χρησιμοποιηθεί στο παρελθόν για τη μελέτη της ανισοτροπίας του εδάφους και συμπεραίνεται ότι οι συσκευές στρεπτικής διάτμησης κοίλου κυλινδρικού δοκιμίου αποτελούν τις πλέον κατάλληλες συσκευές για την προσομοίωση της ανισότροπης εδαφικής συμπεριφοράς. Στη συνέχεια, περιγράφονται αναλυτικά τα μέρη και οι δυνατότητες της συσκευής στρεπτικής διάτμησης κοίλου δοκιμίου μικρών παραμορφώσεων της εταιρείας GDS Instruments Ltd., που βρίσκεται εγκατεστημένη στο Εργαστήριο Γεωτεχνικής Μηχανικής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας. Επίσης, αναλύονται οι διαδικασίες βαθμονόμησης των ελεγκτών πίεσης / όγκου και της διαμόρφωσης κοίλου κυλινδρικού αμμώδους δοκιμίου, που πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Γεωτεχνικής Μηχανικής. Το κύριο μέρος της εργασίας αφορά στη βιβλιογραφική ανασκόπηση των πειραματικών ερευνών της επίδρασης της ανισοτροπίας στη μηχανική συμπεριφορά διαφόρων τύπων εδαφών. Η επίδραση αυτή διερευνήθηκε με τη χρήση συσκευών στρεπτικής διάτμησης κοίλου δοκιμίου: (i) μέσω των παραμέτρων 'α' (κλίση της μέγιστης κύριας τάσης ως προς την κατακόρυφο) και 'b' (παράμετρος ενδιάμεσης κύριας τάσης) για την ανισοτροπία λόγω φόρτισης, και (ii) μέσω του συντελεστή ωθήσεων σε ηρεμία, 'K₀', για την αρχική ανισοτροπία. Καταληκτικά, με βάση τα βιβλιογραφικά δεδομένα εξάγονται συγκριτικά συμπεράσματα αναφορικά με την επίδραση της ανισοτροπίας λόγω φόρτισης και της αρχικής ανισοτροπίας στα μηχανικά χαρακτηριστικά των εδαφών, που έχουν βαρύνουσα σημασία στο σχεδιασμό γεωτεχνικών έργων.

EFFECT OF STRESS INDUCED ANISOTROPY ON THE MECHANICAL RESPONSE OF SOILS

ABSTRACT

The subject of this dissertation is the study of the effect of stress induced anisotropy on the mechanical response of soils. The deposition of soil grains during field sedimentation process and the geological history of soil sediments are the two factors controlling the initial anisotropy of soil structure. The subsequent loading of soil (e.g. seismic actions), during which the magnitude and direction of principal stresses are not constant but vary and in some case with continuous rotation of the axes of principal stresses, is responsible for the further anisotropy of soil, namely stress induced anisotropy. Both stress anisotropy and inherent anisotropy control soil behaviour. In the context of this work, a description of anisotropic and non-coaxial behaviour of soils is initially presented. Laboratory methods and apparatuses used in published works for this purpose are also presented. It is concluded that the most suitable method is the torsional shearing of hollow cylinder specimens, which can simulate the anisotropic stress conditions in soils. In the following, a detailed description of the Torsional Shear Hollow Cylinder small-strain Apparatus (HCA) established by GDS Instruments Ltd and located at the Laboratory of Geotechnical Engineering of UTH, the calibration procedures of equipment and the preparation method of sandy specimens is given. An extensive literature review on the experimental research on stress induced anisotropy on the mechanical response of various soil types using HCA is the main subject of this dissertation. In particular, the effect of: (i) parameter α (inclined angle between the major principal stress direction and vertical axis) and parameter b (parameter of intermediate principal stress) for stress induced anisotropy, and (ii) parameter K_0 (coefficient of pressure at rest) for initial stress anisotropy, on soil response under cyclic and monotonic loading and with drained and undrained conditions is presented. Finally, the comparative and combined results of the published research, which are of great importance to the geotechnical design of a variety of technical works, are presented.

Περιεχόμενα

Πίνακας Πινάκων	15
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	16
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	16
1.1 Γενικά	16
1.2 Οργάνωση της διπλωματικής εργασίας ανά κεφάλαιο	17
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	18
ΑΝΙΣΟΤΡΟΠΙΑ ΕΔΑΦΟΥΣ	18
2.1 Εισαγωγή	18
2.2 Ανισότροπη συμπεριφορά εδάφους	19
2.2.1 Ο ορισμός και τα είδη της ανισοτροπίας	19
2.2.2 Εγγενής ανισοτροπία (Inherent anisotropy)	20
2.2.3 Ανισοτροπία λόγω φόρτισης (Induced anisotropy)	25
2.2.4 Μη-ομοαξονική συμπεριφορά εδάφους (Non – Coaxial soil behavior)	31
2.3 Η επίδραση της διεύθυνσης της μέγιστης κύριας τάσης στη μηχανική συμπεριφορά των εδαφών	37
2.3.1 Εισαγωγή	37
2.3.2 Στραγγιζόμενες συνθήκες	37
2.3.3 Αστράγγιστες συνθήκες	42
2.4 Η επίδραση της παραμέτρου της ενδιάμεσης κύριας τάσης στη μηχανική συμπεριφορά των εδαφών	43
2.4.1 Εισαγωγή	43
2.4.2 Στραγγιζόμενες συνθήκες	43
2.4.3 Αστράγγιστες συνθήκες	46
2.5 Επίδραση της συνεχούς στροφής των αξόνων των κυρίων τάσεων στη μηχανική συμπεριφορά των εδαφών	47
2.5.1 Εισαγωγή	47
2.5.2 Αστράγγιστες συνθήκες	48
2.5.3 Στραγγιζόμενες συνθήκες	51
2.6 Πειραματικές συσκευές για τη μελέτη της ανισοτροπίας του εδάφους	54
2.6.1 Εισαγωγή	54
2.6.2 Πειραματικές συσκευές	54

2.6.3	Συσκευή κοίλου κυλίνδρου (HCA)	59
2.6.3.1	Υπολογισμός τάσεων και παραμορφώσεων στη συσκευή κοίλου κυλίνδρου	59
2.6.3.2	Ανομοιομορφίες στα κοίλα κυλινδρικά δείγματα.....	63
2.6.3.3	Σφάλματα διείδυσης και συμμόρφωσης μεμβράνης	64
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3	66
	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ – ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ	66
3.1	Εισαγωγή.....	66
3.2	Περιγραφή της πειραματικής διάταξης GDS ss – HCA	66
3.2.1	Γενική περιγραφή.....	66
3.2.2	Τα υποσυστήματα της πειραματικής διάταξης GDS ss – HCA	68
3.2.3	Λογισμικό GDSLAB	71
3.3	Βαθμονόμηση ελεγκτών πίεσης / όγκου	72
3.3.1	Εισαγωγή.....	72
3.3.2	Βαθμονομήσεις ελεγκτών ως προς τον όγκο	72
3.3.3	Βαθμονομήσεις ελεγκτών ως προς την πίεση.....	76
3.4	Προετοιμασία κοίλου κυλινδρικού δοκιμίου άμμου	77
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4	86
	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΑΝΙΣΟΤΡΟΠΙΑΣ ΛΟΓΩ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΣΤΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΑΜΜΩΔΩΝ ΕΔΑΦΩΝ – ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ	86
4.1	Επίδραση του K_0 στην εδαφική συμπεριφορά του πυθμένα θαλασσών λόγω των φορτίων κυματισμού	86
4.2	Επίδραση της στροφής των αξόνων των κύριων τάσεων στην εδαφική συμπεριφορά των υλικών βάσης των υποδομών σιδηροδρομικών δικτύων	99
4.3	Επίδραση της γωνίας μεταξύ του άξονα της μέγιστης κύριας τάσης και του κατακόρυφου άξονα, α , & του λόγου της ενδιάμεσης κύριας τάσης, b , σε προβλήματα επίπεδης παραμόρφωσης.....	115
4.4	Επίδραση των αρχικών παραμέτρων τάσεων, α_0 , η_0 , ρ_0 και b_0 , στην οριακή ογκομετρική διατμητική παραμόρφωση, γ_t	124
4.5	Επίδραση της ανισοτροπίας λόγω φόρτισης σε συνδυασμό με την εγγενή ανισοτροπία στη δυσκαμψία, απόσβεση, ανάπτυξη της πίεσης ύδατος και των παραμορφώσεων πυκνής άμμου.....	131
4.6	Επίδραση της ενδιάμεσης κύριας τάσης στην συμπεριφορά χαλικωδών υλικών.....	139
4.7	Επίδραση της στροφής των αξόνων των κυρίων τάσεων και της μέγιστης διατμητικής τάσης στο δυναμικό ρευστοποίησης χαλαρής άμμου	145
4.8	Επίδραση της διεύθυνσης του άξονα της κύριας τάσης στη ρευστοποίηση λύσος	157
4.9	Επίδραση της διεύθυνσης του άξονα της κύριας τάσης στη ρευστοποίηση άμμων.....	165

4.10 Επίδραση της στροφής των αξόνων των κύριων τάσεων και της μη-ομοαξονικότητας στη συμπεριφορά K_0 -στερεοποιημένης φυσικής αργίλου	172
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5	183
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	183
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	187

Πίνακας Σχημάτων

Σχήμα 2.1: Διακυμάνσεις του υδροφόρου ορίζοντα μιας αρχικά κανονικά στερεοποιημένης αργίλου.	20
Σχήμα 2.2: (α) Ανομοιογένεια του εδάφους (Norsyahariati et al., 2016), (β) Ασυνέχεια του εδάφους (Cai, 2010).	21
Σχήμα 2.3: Οι οριζόντιες στρώσεις του εδαφικού σχηματισμού στο μικρό ρέμα Ρογκοβού, Πάπιγκο.	22
Σχήμα 2.4: Οι γωνίες των μεγάλων αξόνων των κόκκων της άμμου Toyoura σε συνάρτηση με το επίπεδο της εναπόθεσης τους (Yang et al., 2008).	23
Σχήμα 2.5: Η διατμητική τάση συναρτήσει της διατμητικής παραμόρφωσης των 3 δοκιμίων της άμμου Syncrude, τα οποία διαφέρουν ως προς τη μέθοδο προετοιμασίας τους (Vaid et al., 2000)...24	24
Σχήμα 2.6: Η γωνία (δ) που σχηματίζει η μέγιστη κύρια τάση (σ_1) με την κάθετη στο επίπεδο διαστρωμάτωσης.....	25
Σχήμα 2.7: Ο λόγος των ενεργών κυρίων τάσεων (σ_1'/σ_3') συναρτήσει της μέγιστης κύριας παραμόρφωσης για διάφορες γωνίες δ της άμμου Leighton Buzzard (Wong & Arthur; 1985).....	25
Σχήμα 2.8: Επιβολή αποκλίνουσας τάσης σε κοίλο κυλινδρικό δοκίμιο εδάφους.	26
Σχήμα 2.9: (α) Επιβολή ημιτονοειδούς κυματομορφής στον πυθμένα της θάλασσας και εντατική κατάσταση εδαφικού στοιχείου της άμμου υπό τον πυθμένα της θάλασσας, (β) Διάγραμμα της διατμητικής τάσης συναρτήσει της αποκλίνουσας τάσης της άμμου σε διάφορα βάθη (z) κάτω από τον πυθμένα της θάλασσας (Ishihara & Towhata, 1983).....	27
Σχήμα 2.10: Η κοκκομετρική καμπύλη της άμμου Leighton Buzzard (Wong & Arthur, 1985).	28
Σχήμα 2.11: Το αρχικά ισότροπο επίπεδο της άμμου Leighton Buzzard (Wong & Arthur, 1985).....	28
Σχήμα 2.12: Ο λόγος των ενεργών κυρίων τάσεων (σ_1'/σ_3') ως προς τη μέγιστη κύρια παραμόρφωση (ϵ_1) κατά τα στάδια της φόρτισης - αποφόρτισης (Stress path A) και επαναφόρτισης (Stress path B) της άμμου Leighton Buzzard σε 4 διαφορετικές γωνίες $\Delta\psi$ (Wong & Arthur, 1985).	29
Σχήμα 2.13: Η ογκομετρική παραμόρφωση (ϵ_v) συναρτήσει της μέγιστης κύριας παραμόρφωσης (ϵ_1) της άμμου Leighton Buzzard σε 4 διαφορετικές γωνίες $\Delta\psi$ κατά τη διάρκεια της επαναφόρτισής της (Wong & Arthur, 1985).	29
Σχήμα 2.14: (α) Σχηματική απεικόνιση ενός τυχαίου σημείου επαφής μεταξύ των κόκκων του εδάφους και της καθέτου επί των επιπέδων που εφάπτονται στο σημείο επαφής των κόκκων του εδάφους, Η κατανομή των καθέτων επί των επιπέδων που εφάπτονται στα σημεία επαφής των κόκκων σε σχέση με την κατεύθυνση: (β) εναπόθεσης για ένα εγγενώς ανισότροπο δοκίμιο, (γ) προφόρτισης για ένα αρχικά ανισότροπο δοκίμιο (Li & Yu, 2009).....	31

Σχήμα 2.15: Τα διανύσματα κατεύθυνσης των προσαυξητικών μεγίστων κυρίων πλαστικών παραμορφώσεων της άμμου Portaway, για τις διαδρομές μονοτονικής φόρτισης και τις διαδρομές συνδυασμένης φόρτισης (Cai, 2010).	32
Σχήμα 2.16: Σύγκριση των κατευθύνσεων των προσαυξητικών κυρίων πλαστικών (plastic strain increment direction) και των συνολικών προσαυξητικών κυρίων παραμορφώσεων (total strain increment direction) με τις κατευθύνσεις των ακτινικών διαδρομών των τάσεων της άμμου για τις δοκιμές μονοτονικής φόρτισης (Gutierrez et al., 1991).	34
Σχήμα 2.17: Σύγκριση των κατευθύνσεων των προσαυξητικών κύριων πλαστικών και των συνολικών παραμορφώσεων με τις κατευθύνσεις των διαδρομών των τάσεων της άμμου σε διάφορα επίπεδα διατμητικών τάσεων για τις δοκιμές καθαρής στρέψης (Gutierrez et al., 1991).	34
Σχήμα 2.18: Οι διαδρομές των τάσεων και τα διανύσματα κατεύθυνσης των προσαυξητικών κυρίων παραμορφώσεων της άμμου Portaway για τις τρεις ομάδες εργαστηριακών δοκιμών (Cai, 2010).	35
Σχήμα 2.19: Η μεταβολή του λόγου των ενεργών κυρίων τάσεων (σ'_1/σ'_3) σε συνάρτηση με το βαθμό μη – ομοαξονικότητας (ξ) της άμμου Leighton Buzzard για διάφορες γωνίες $\Delta\psi$ (Wong & Arthur, 1985).	35
Σχήμα 2.20: Οι γωνίες της μέγιστης κύριας τάσης (α) και της προσαυξητικής κύριας παραμόρφωσης (α_{de}) ως προς την κατακόρυφο για το: (α) εγγενώς ανισότροπο και (β) αρχικά ανισότροπο δοκίμιο άμμου (Li & Yu, 2009).	36
Σχήμα 2.21: Ο λόγος ενεργών τάσεων συναρτήσει της αποκλίνουσας παραμόρφωσης της πυκνής άμμου Τογουρα για διάφορες τιμές της παραμέτρου α (Miura et al., 1986).	38
Σχήμα 2.22: Ο μέγιστος λόγος των τάσεων συναρτήσει της παραμέτρου α για την πυκνά άμμο Τογουρα (Miura κ.α. 1986).	39
Σχήμα 2.23: Η διατμητική τάση (q) συναρτήσει (α) της διατμητικής παραμόρφωσης (γ_{oct}) και (β) της ογκομετρικής παραμόρφωσης (ϵ_{vol}) για τις δοκιμές στρεπτικής διάτμησης L0 ($\alpha=0^\circ$, $b=0.5$), L2 ($\alpha=24.5^\circ$, $b=0.5$) και L4 ($\alpha=45^\circ$, $b=0.5$) (Symes et al. (1988)).	39
Σχήμα 2.24: Ο λόγος των ενεργών τάσεων (η) και η ογκομετρική παραμόρφωση (ϵ_v) συναρτήσει της αποκλίνουσας παραμόρφωσης (ϵ_q) της αρχικά ανισότροπης άμμου σε έξι διαφορετικές τιμές της γωνίας α (Yang, 2013).	40
Σχήμα 2.25: Οι ζώνες διάτμησης που σχηματίσθηκαν στα αρχικά ανισότροπα δοκίμια της άμμου Leighton Buzzard, έπειτα από τη μονοτονική τους φόρτιση σε διάφορες γωνίες α και αποκλίνουσες παραμορφώσεις ϵ_q (Yang, 2013).	41
Σχήμα 2.26: Οι μέγιστοι λόγοι τάσεων (η_p) σε συνάρτηση με τις τιμές της παραμέτρου α για το προφορτισμένο (presheared sample) και το εγγενώς ανισότροπο δοκίμιο (non-presheared sample) της άμμου Leighton Buzzard (Yang, 2013).	41
Σχήμα 2.27: Η κανονικοποιημένη αστράγγιστη διατμητική αντοχή ως προς την αρχική ενεργό τάση (S_u/p'_o) σε συνάρτηση με την παράμετρο α' για τους δύο τύπους δοκιμών, δηλαδή το ισότροπα και το ανισότροπα στερεοποιημένο δοκίμιο άμμου (Shibuya et al., 2003b).	42
Σχήμα 2.28: Σχέσεις αποκλίνουσας τάσης ($\sigma_1-\sigma_3$) – μέγιστης κύριας παραμόρφωσης (ϵ_1) και ογκομετρικής παραμόρφωσης (ϵ_v) – ϵ_1 για διάφορες τιμές του b της άμμου Monterey: (α) υψηλής και (β) χαμηλής πυκνότητας (Lade και Duncan, 1973).	44
Σχήμα 2.29: Η γωνία διατμητικής αντοχής (ϕ') συναρτήσει της παραμέτρου b , τόσο για την πυκνή όσο και για τη χαλαρή άμμο Monterey (Lade και Duncan, 1973).	44

Σχήμα 2.30: Ο λόγος των ενεργών κυρίων τάσεων (σ_1'/σ_3') συναρτήσει της ογκομετρικής παραμόρφωσης (ϵ_{oct}) για τα τέσσερα δοκίμια της άμμου Ham River, τα οποία διαφοροποιούνται ως προς τις τιμές της παραμέτρου b (Symes, 1983).....	45
Σχήμα 2.31: Η γωνία εσωτερικής τριβής (ϕ') συναρτήσει της παραμέτρου b για τα τέσσερα δοκίμια της άμμου Ham River (Symes, 1983).....	46
Σχήμα 2.32: Η μεταβολή της αποκλίνουσας τάσης (q) ως προς τη μέση ενεργή τάση (p') κατά τη στρεπτική διάτμηση της χαλαρής άμμου Toyoura, με $\alpha=45^\circ$ και για πέντε διαφορετικές τιμές της παραμέτρου b υπό αστράγγιστες συνθήκες (Yoshimine et al., 1998).....	47
Σχήμα 2.33: Η συνεχής στροφή του άξονα της μέγιστης κύριας τάσης (σ_1) υπό σταθερή αποκλίνουσα τάση (q) στο επίπεδο τάσεων $X-Y$ ($(\sigma_{11} - \sigma_{33}) - \sigma_{13}$) (Yang, 2013).	48
Σχήμα 2.34: Η μεταβολή της αποκλίνουσας τάσης (q) συναρτήσει της γωνίας α για τις δοκιμές στρεπτικής διάτμησης με συνεχή μεταβολή της γωνίας α , υπό: (α) μονοτονικές συνθήκες και (β) ανακυκλικές συνθήκες (Symes et al., 1984).....	49
Σχήμα 2.35: (α) Η πίεση του νερού των πόρων (u) και (β) οι συνιστώσες των παραμορφώσεων συναρτήσει του αριθμού των κύκλων φόρτισης (N) για το πυκνό δοκίμιο της άμμου Toyoura (Nakata et al., 1998).	50
Σχήμα 2.36: Οι αναπτυσσόμενες ογκομετρικές παραμορφώσεις (ϵ_v) ως προς την κατεύθυνση της μέγιστης κύριας τάσης, για κάθε έναν από τους επτά συνεχόμενους κύκλους φόρτισης της πυκνής άμμου Toyoura (Miura et al., 1986).	52
Σχήμα 2.37: Οι ογκομετρικές παραμορφώσεις (ϵ_v) της πυκνής άμμου Toyoura συναρτήσει του αριθμού των κύκλων φόρτισης (N) για $b=0.1, 0.5$ και 1 (Tong et al., 2010).....	52
Σχήμα 2.38: Η μεταβολή των συνιστωσών παραμόρφωσης ($\epsilon_z, \epsilon_\theta, \epsilon_r$) συναρτήσει των κύκλων φόρτισης στην άμμο Toyoura, όπως προέκυψαν από το καταστατικό μοντέλο (διακεκομμένες γραμμές) και τις εργαστηριακές δοκιμές (συνεχείς γραμμές) για (α) $b=0.1$, (β) $b=0.5$ και (γ) $b=1$ (Tian et al.; 2018).	53
Σχήμα 2.39: Οι επιβαλλόμενες τάσεις στο κυβικό δοκίμιο εδάφους της πραγματικής τριαξονικής συσκευής (Τσομώκος, 2005).....	55
Σχήμα 2.40: Οι τάσεις στο κυλινδρικό δοκίμιο εδάφους της συσκευής τριαξονικής στρέψης (Yang, 2013).	55
Σχήμα 2.41: Τα επιβαλλόμενα φορτία στο κοίλο κυλινδρικό δοκίμιο εδάφους της τριαξονικής συσκευής στρεπτικής διάτμησης (Yang, 2013).	56
Σχήμα 2.42: Οι επιβαλλόμενες τάσεις στις επιφάνειες του: (α) κυλινδρικού (Τσομώκος, 2005) και (β) ορθογωνικού δοκιμίου (Yang, 2013) εδάφους της συσκευής απλής διάτμησης.	57
Σχήμα 2.43: Οι επιβαλλόμενες ορθές και διατμητικές τάσεις σε τέσσερις επιφάνειες του κυβικού δοκιμίου εδάφους της συσκευής άμεσης διάτμησης (Τσομώκος, 2005).....	58
Σχήμα 2.44: Οι επιβαλλόμενες φορτίσεις στο κοίλο κυλινδρικό δοκίμιο εδάφους της συσκευής κοίλου κυλίνδρου (Yang, 2013).	59
Σχήμα 2.45: (α) Οι επιβαλλόμενες φορτίσεις σε ένα κοίλο κυλινδρικό δοκίμιο εντός της συσκευής κοίλου κυλίνδρου. Οι αναπτυσσόμενες: (β) τάσεις, (γ) κύριες τάσεις, (δ) παραμορφώσεις σε ένα κομμάτι του δοκιμίου (Yang, 2013).....	60
Σχήμα 3.1: Η συσκευή GDS ss - HCA στον χώρο του εργαστηρίου Γεωτεχνικής Μηχανικής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας.....	67
Σχήμα 3.2: Σχηματική απεικόνιση της συσκευής HCA (Serra & Hooker, 2011).....	68

Σχήμα 3.3: Οι τρεις ελεγκτές πίεσης / όγκου.	70
Σχήμα 3.4: Η μονάδα ρύθμισης σήματος.	71
Σχήμα 3.5: Ο σταθερός υπολογιστής που συνδέεται με τη συσκευή GDS ss - HCA.	71
Σχήμα 3.6: Ο αποστακτήρας Hamilton WSB/4 του Εργαστηρίου Γεωτεχνικής Μηχανικής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας.	72
Σχήμα 3.7: Τοποθέτηση λιπαντικού στο εσωτερικό χείλος της βάσης του δοκιμίου.	78
Σχήμα 3.8: Τοποθέτηση του κάτω δακτυλίου συγκράτησης της εσωτερικής μεμβράνης στο εσωτερικό της βάσης του δοκιμίου.	78
Σχήμα 3.9: Τοποθέτηση του ελαστικού δακτυλίου στη βάση του άνω εξαρτήματος συγκράτησης της εσωτερικής μεμβράνης.	78
Σχήμα 3.10: Τοποθέτηση της διάταξης δακτύλιος-άνω εξάρτημα συγκράτησης της εσωτερικής μεμβράνης εντός της εσωτερικής μεμβράνης.	79
Σχήμα 3.11: Τοποθέτηση της διάταξης δακτύλιος – άνω εξάρτημα συγκράτησης της εσωτερικής μεμβράνης – εσωτερική μεμβράνη στο εσωτερικό της βάσης του δοκιμίου.	79
Σχήμα 3.12: Σφράγιση μεταξύ της εσωτερικής μεμβράνης και της βάσης του δοκιμίου με 4 βίδες.	80
Σχήμα 3.13: (α) Ο κάτω πορώδης δίσκος, οι 6 βίδες και το σταυρωτό κατσαβίδι, (β) Ο πορώδης δίσκος βιδωμένος στη βάση του δοκιμίου.	80
Σχήμα 3.14: (α) Η βιδωτή ράβδος, (β) Τοποθέτηση της βιδωτής ράβδου εντός της βάσης του δοκιμίου.	80
Σχήμα 3.15: (α) Το διαιρετό εσωτερικό καλούπι, (β) Ενσωμάτωση του εσωτερικού καλουπιού εντός της εσωτερικής μεμβράνης και συγκέντρωση της εσωτερικής μεμβράνης που προεξέχει πάνω από το εσωτερικό καλούπι με έναν ελαστικό δακτύλιο.	81
Σχήμα 3.16: Τοποθέτηση του φίλτρου στον πορώδη δίσκο της βάσης του δοκιμίου.	81
Σχήμα 3.17: (α) Η εξωτερική μεμβράνη και οι 2 ελαστικοί δακτύλιοι κυκλικής διατομής, (β) Τοποθέτηση της εξωτερικής μεμβράνης γύρω από τη βάση του δοκιμίου και σφράγιση της στη βάση με τη χρήση δύο δακτυλίων.	82
Σχήμα 3.18: (α) Το διαιρετό εξωτερικό καλούπι και οι 2 σφιγκτήρες, (β) Τοποθέτηση του εξωτερικού καλουπιού γύρω από την εξωτερική μεμβράνη και στερέωσή του με 2 σφιγκτήρες.	83
Σχήμα 3.19: Έγχυση της άμμου σε στρώσεις στην κοιλότητα μεταξύ των δύο μεμβρανών, με τη βοήθεια ενός χωνιού και ενός κουταλιού.	83
Σχήμα 3.20: (α) Ο άνω πορώδης δίσκος βιδώνεται στο καπάκι του δοκιμίου με 6 βίδες, με τη χρήση σταυρωτού κατσαβιδιού, (β) Τοποθέτηση φίλτρου στη βάση της διάταξης πορώδης δίσκος – καπάκι, (γ) Τοποθέτηση της διάταξης φίλτρο – πορώδης δίσκος – καπάκι στο άνω μέρος του δοκιμίου άμμου.	84
Σχήμα 3.21: Η εσωτερική και η εξωτερική μεμβράνη διπλώνονται και ασφαλίζονται με ελαστικούς δακτυλίους στη διάταξη διαμόρφωσης του δοκιμίου άμμου.	85
Σχήμα 4.1: Διάγραμμα και σύστημα αξόνων για την ανάλυση του φορτίου κυματισμού (Ishihara et al., 1985).	86
Σχήμα 4.2: Περιστροφή των κύριων τάσεων (κυκλική φόρτιση) (Ishihara et al., 1985).	88
Σχήμα 4.3: Μεταβολές στην παραμόρφωση εδαφικού στοιχείου στον πυθμένα λόγω της φόρτισης κυματισμού (Ishihara et al., 1985).	89
Σχήμα 4.4: Συσκευή στρεπτικής διάτμησης κούλου δοκιμίου σχεδιασμένη στο University of Tokyo (Ishihara et al., 1985).	90

Σχήμα 4.5: Αποτελέσματα δοκιμής στρεπτικής διάτμησης ελεγχόμενης παραμόρφωση για τη χαλαρή άμμο Toyoura (Ishihara et al., 1985).	92
Σχήμα 4.6: Διαδρομές κυκλικών τάσεων για τη χαλαρή άμμο Toyoura (Ishihara et al., 1985).....	93
Σχήμα 4.7: Αποτελέσματα δοκιμής στρεπτικής διάτμησης ελεγχόμενης παραμόρφωση για την πολύ πυκνή άμμο Toyoura (Ishihara et al., 1985).	94
Σχήμα 4.8: Διαδρομές κυκλικών τάσεων για την πολύ πυκνή άμμο Toyoura (Ishihara et al., 1985)....	95
Σχήμα 4.9: Συγκριτικά αποτελέσματα στην άμμο Toyoura για την επίδραση του αρχικού K_0 στο λόγο των κυκλικών τάσεων, τ_{vh}/σ'_{v0} (Ishihara et al., 1985).	96
Σχήμα 4.10: Συγκριτικά αποτελέσματα στην άμμο Toyoura για την επίδραση των κύκλων φόρτισης στο λόγο των κυκλικών τάσεων, τ_{vh}/σ'_{v0} (Ishihara et al., 1985).	97
Σχήμα 4.11: Εκτίμηση της κυκλικής τάσης στην άμμο Toyoura (Ishihara et al., 1985).....	98
Σχήμα 4.12: Συσκευή στρεπτικής διάτμησης κούλου δοκιμίου GDS σχεδιασμένη στο University of Southampton (Grabe & Clayton, 2009).	100
Σχήμα 4.13: Εγκάρσια και διαμήκης τομή σε μια τυχαία θέση της σιδηροδρομικής γραμμής (Grabe & Clayton, 2009).	101
Σχήμα 4.14: Υπολογιζόμενες τάσεις (FE) και απλοποιημένες τάσεις για τις εργαστηριακές δοκιμές εργαστηρίου, με βάση τις αναλύσεις FE για ένα στοιχείο σε βάθος 0.5 m κάτω από τη βάση του έρματος (Grabe & Clayton, 2009).....	102
Σχήμα 4.15: Φωτογραφίες μέσω ηλεκτρονικού μικροσκοπίου των εδαφικών υλικών που χρησιμοποιήθηκαν στην παρασκευή των δειγμάτων (Grabe & Clayton, 2009).....	103
Σχήμα 4.16: Κοκκομετρική ανάλυση των τεσσάρων δειγμάτων A, B, C & D (Grabe & Clayton, 2009).	103
Σχήμα 4.17: Αισθητήρες μέτρησης της τοπικής αξονικής και της ακτινικής παραμόρφωσης (Grabe & Clayton, 2009).	106
Σχήμα 4.18: Απεικόνιση των ιδεατών και των πραγματικών διαδρομών τάσεων σε κυκλικές φορτίσεις με ή χωρίς PSR ($K_0=1$) (Grabe & Clayton, 2009).....	107
Σχήμα 4.19: Ιδεατές διαδρομές τάσεων σε όρους οκταεδρικής διατμητικής τάσης για κοίλο κυλινδρικό δοκίμιο που υποβάλλεται σε κυκλική φόρτιση με ή χωρίς PSR ($K_0=1$) (Grabe & Clayton, 2009).	109
Σχήμα 4.20: Παράδειγμα πραγματικών διαδρομών τάσεων ως προς την οκταεδρική διατμητική τάση (Δοκίμια A1 & A2, 7% άργιλος) (Grabe & Clayton, 2009).....	109
Σχήμα 4.21: Πραγματικές διαδρομές τάσεων ως προς την οκταεδρική διατμητική τάση (Δοκίμια A1 & A2, 7% άργιλος) (Grabe & Clayton, 2009).	110
Σχήμα 4.22: Μεταβολής των M και ϕ' με το ποσοστό του αργιλικού κλάσματος (Grabe & Clayton, 2009).	110
Σχήμα 4.23: Ανάπτυξη της πίεσης του νερού των πόρων λόγω κυκλικής φόρτισης με και χωρίς περιστροφή των κύριων τάσεων (Υλικό A, 7% άργιλος) (Grabe & Clayton, 2009).	111
Σχήμα 4.24: Ανάπτυξη της πίεσης του νερού των πόρων λόγω κυκλικής φόρτισης με και χωρίς περιστροφή των κύριων τάσεων (Υλικό D, 24% άργιλος) (Grabe & Clayton, 2009).....	112
Σχήμα 4.25: Ανάπτυξη της πίεσης του νερού των πόρων λόγω κυκλικής φόρτισης με περιστροφή των κύριων τάσεων (Υλικά A, B, C και D) (Grabe & Clayton, 2009).	112
Σχήμα 4.26: Μόνιμη παραμόρφωση των δειγμάτων A, B, C και D ως αποτέλεσμα κυκλικής φόρτισης χωρίς περιστροφή των κύριων τάσεων (Grabe & Clayton, 2009).....	113

Σχήμα 4.27: Μόνιμη παραμόρφωση των δειγμάτων A, B, C και D σε κυκλική φόρτιση, με ή χωρίς περιστροφή των αξόνων των κύριων τάσεων (Grabe & Clayton, 2009).....	114
Σχήμα 4.28: Επίδραση της περιστροφής των αξόνων των κύριων τάσεων στην ανάπτυξη των μόνιμων παραμορφώσεων με το ποσοστό του αργιλικού κλάσματος (Grabe & Clayton, 2009).	114
Σχήμα 4.29: Αξονική παραμόρφωση σε διάφορες τιμές του $\eta^* = \sigma_1' / \sigma_3'$ (δείγμα C με αργιλικό κλάσμα 14%) (Grabe & Clayton, 2009).	115
Σχήμα 4.30: Γραφική απεικόνιση των εξωτερικών και εσωτερικών δυνάμεων στο κοίλο κυλινδρικό δοκίμιο (Yoshimine et al., 2009).....	116
Σχήμα 4.31: Κοκκομετρική καμπύλη της άμμου Kartal (Yoshimine et al., 2009).....	118
Σχήμα 4.32: Αποτελέσματα δοκιμών στρεπτικής διάτμησης υπό αστράγγιστες συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης στην άμμο Kartal (Yoshimine et al., 2009).	120
Σχήμα 4.33 (αριστερά): Αποτελέσματα δοκιμής απλής διάτμησης υπό αστράγγιστες συνθήκες στην άμμο Τογουρα ($K_c = \sigma'_h / \sigma'_z = 1.0$ στην αρχική κατάσταση) (Yoshimine et al., 2009).	123
Σχήμα 4.34 (δεξιά): Αποτελέσματα δοκιμής απλής διάτμησης υπό αστράγγιστες συνθήκες στην άμμο Τογουρα ($K_c = \sigma'_h / \sigma'_z = 0.5$ στην αρχική κατάσταση) (Yoshimine et al., 2009).....	123
Σχήμα 4.35: Καταστάσεις φόρτισης του εδάφους σε διάφορα σημεία της επιφάνειας ολίσθησης. .	124
Σχήμα 4.36: Εξωτερικά φορτία που ασκούνται στο κοίλο κυλινδρικό δοκίμιο στη συσκευή στρεπτικής διάτμησης (Guoxing & Hua, 2009).....	126
Σχήμα 4.37: Εντατική κατάσταση στο εδαφικό δοκίμιο (Guoxing & Hua, 2009).....	126
Σχήμα 4.38: Καμπύλη κατανομής μεγέθους κόκκων της άμμου Nanjing (Guoxing & Hua, 2010).	126
Σχήμα 4.39: Καμπύλες της κανονικοποιημένης μεταβολής της πίεσης του νερού των πόρων, $\Delta u^* = \Delta u / \sigma'_o$, με την οριακή ογκομετρική διατμητική τάση, γ_t (Guoxing & Hua, 2010).....	128
Σχήμα 4.40: Επίδραση της παραμέτρου α_o στη γ_t (αντιστοιχεί στη $\Delta u^* = 0.2$) (Guoxing & Hua, 2010).	129
Σχήμα 4.41: Επίδραση της παραμέτρου η_o στη γ_t (αντιστοιχεί στη $\Delta u^* = 0.2$) (Guoxing & Hua, 2010).	130
Σχήμα 4.42: Επίδραση της παραμέτρου ρ_o στη γ_t (αντιστοιχεί στη $\Delta u^* = 0.2$) (Guoxing & Hua, 2010).	130
Σχήμα 4.43: Επίδραση της παραμέτρου b_o στη γ_t (αντιστοιχεί στη $\Delta u^* = 0.2$) (Guoxing & Hua, 2010).	131
Σχήμα 4.44: Εικόνα των κόκκων της άμμου Balbosar (Jafarzadeth & Zamanian, 2013).....	132
Σχήμα 4.45: Κοκκομετρική καμπύλη της άμμου Balbosar (Jafarzadeth & Zamanian, 2013).....	133
Σχήμα 4.46: Διαδρομές τάσεων (Jafarzadeth & Zamanian, 2013).	134
Σχήμα 4.47: Διακύμανση του λόγου πίεσης του νερού των πόρων σε σχέση με την αναλογία διάτμησης (Jafarzadeth και Zamanian, 2013).	135
Σχήμα 4.48: Διαδρομές τάσεων (Jafarzadeth & Zamanian, 2013).	136
Σχήμα 4.49: Μεταβολή των παραμορφώσεων στον 1° και τον 15° κύκλο φόρτισης (Jafarzadeth & Zamanian, 2013).	137
Σχήμα 4.50: Μεταβολή του μέτρου διάτμησης με τη διατμητική παραμόρφωση (Jafarzadeth & Zamanian, 2013).	138
Σχήμα 4.51: Μεταβολή του λόγου απόσβεσης με τη διατμητική παραμόρφωση (Jafarzadeth & Zamanian, 2013).	138
Σχήμα 4.52: Κοκκομετρική σύνθεση του γεωυλικού μελέτης (Xiao et al., 2014).	139

Σχήμα 4.53: Γραφική απεικόνιση των στοιχείων της τριαξονικής συσκευής (Xiao et al., 2014).	140
Σχήμα 4.54: Εγκατάσταση του εδαφικού δοκιμίου στην τριαξονική συσκευή (Xiao et al., 2014).	140
Σχήμα 4.55: Σύγκριση της συμπεριφοράς του γεωυλικού σε ξηρή και στραγγιζόμενη κατάσταση (Xiao et al., 2014).	141
Σχήμα 4.56: Συγκρίσεις τάσης-καταπόνησης, μέγιστης γωνίας τριβής και διασταλτικότητας πετρωδών υλικών από δεδομένα τριαξονικής δοκιμής (Xiao et al., 2014).	142
Σχήμα 4.57: Μεταβολή (α & c) του λόγου $\eta=q/\rho'$, (b & d) της ογκομετρικής παραμόρφωσης ϵ_v , με τη μέγιστη κύρια παραμόρφωση ϵ_1 σε διάφορα επίπεδα της σ_3 και του b (Xiao et al., 2014).	143
Σχήμα 4.58: Μεταβολή της μέγιστης γωνίας τριβής με: (α) την τιμή του b, και (b) την τάση σ_3 (Xiao et al., 2014).	144
Σχήμα 4.59: Μεταβολή της γωνίας τριβής της κρίσιμης κατάστασης με: (α) την τιμή του b, και (b) την τάση σ_3 (Xiao et al., 2014).	144
Σχήμα 4.60: Μεταβολή της γωνίας διασταλτικότητας της κρίσιμης κατάστασης με: (α) την τιμή του b, και (b) την τάση σ_3 (Xiao et al., 2014).	145
Σχήμα 4.61: Μονοτονική συμπεριφορά αμμωδών δοκιμίων που παρασκευάστηκαν με εναπόθεση στο νερό (Sivathayalan & Vaid, 2002).	146
Σχήμα 4.62: Η συσκευή HTC στο Πανεπιστήμιο του Carleton (Sivathayalan et al., 2015).	147
Σχήμα 4.63: Μεταβολή τάσεων και παραμορφώσεων με το χρόνο κατά τη διάρκεια της ανισότροπης στερεοποίησης (Sivathayalan et al., 2015).	149
Σχήμα 4.64: Μεταβολή της γωνίας α_σ με τους κύκλους φόρτισης (Sivathayalan et al., 2015).	150
Σχήμα 4.65: Μονοτονική αστράγγιστη συμπεριφορά σε διαφορετικές διαδρομές φόρτισης (Sivathayalan et al., 2015).	150
Σχήμα 4.66: Διατμητική αντοχή και γωνιά τριβή στη φάση μετάβασης (Sivathayalan et al., 2015). ..	151
Σχήμα 4.67: Προσομοίωση τριαξονικής φόρτισης ($\alpha_\sigma=0$ και απότομη μεταβολή σε $\alpha_\sigma=90^\circ$) και απλής διάτμησης ($\alpha_\sigma=+45^\circ$ και απότομη μεταβολή σε $\alpha_\sigma=-45^\circ$) με κυκλική φόρτισης (Sivathayalan et al., 2015).	153
Σχήμα 4.68: Απόκριση άμμου που υπόκειται σε ομαλή και συνεχή στροφή της κύριας τάσης αλλά και σε στροφή με άλμα (Sivathayalan et al., 2015).	154
Σχήμα 4.69: Απόκριση άμμου που υπόκειται σε συνεχή περιστροφή της κύριας τάσης σε δύο επίπεδα CSR (Sivathayalan et al., 2015).	154
Σχήμα 4.70: Μεταβολή της διατμητικής παραμόρφωσης και της πίεσης του νερού των πόρων κατά την διάρκεια κυκλικής φόρτισης (Sivathayalan et al., 2015).	155
Σχήμα 4.71: Καμπύλες αντίστασης σε ρευστοποίηση για διαφορετικές τιμές α_σ (Sivathayalan et al., 2015).	155
Σχήμα 4.72: Επίδραση της τιμής της α_σ στον αριθμό κύκλων φόρτισης στη ρευστοποίηση (Sivathayalan et al., 2015).	155
Σχήμα 4.73: Σχηματικό διάγραμμα του μεγέθους των τάσεων (Sivathayalan et al., 2015).	156
Σχήμα 4.74: Προσανατολισμός της μέγιστης κύριας τάσης και στροφή του επιπέδου της μέγιστης διατμητικής τάσης σε σχέση με το επίπεδο εναπόθεσης (Sivathayalan et al., 2015).	156
Σχήμα 4.75: Μεταβολή της t_h με τον αριθμό κύκλων φόρτισης και την κανονικοποιημένη γωνία στροφής (Sivathayalan et al., 2015).	157
Σχήμα 4.76: Συσκευή στρεπτικής διάτμησης κοίλου κυλινδρικού δοκιμίου της εταιρείας GDS (Zhenglong et al., 2017).	158

Σχήμα 4.77: Γραφική απεικόνιση της επιβαλλόμενης φόρτισης (Zhenglong et al., 2017).	158
Σχήμα 4.78: Κοκκομετρική καμπύλη ιλύος (Zhenglong et al., 2017).	159
Σχήμα 4.79: Διαδρομές τάσεων (Zhenglong et al., 2017).	161
Σχήμα 4.80: Ενδεικτικά αποτελέσματα για δοκιμή με $\alpha_{\sigma 0}=22.5^\circ$ και $CSR=0.15$ (Zhenglong et al., 2017).	162
Σχήμα 4.81: Μεταβολή του λόγου υπερπίεσης του νερού των πόρων συναρτήσει των κύκλων φόρτισης για διάφορες τιμές της $\alpha_{\sigma 0}$ και για $CSR=0.10$ (α), $CSR=0.15$ (β) & $CSR=0.20$ (γ) (Zhenglong et al., 2017).	163
Σχήμα 4.82: Μεταβολή του λόγου υπερπίεσης του νερού των πόρων συναρτήσει του κανονικοποιημένου αριθμού κύκλων φόρτισης για διάφορες τιμές του $\alpha_{\sigma 0}$ και CSR (Zhenglong et al., 2017).	163
Σχήμα 4.83: Μεταβολή της εκτροπικής παραμόρφωσης με τον αριθμό των κύκλων φόρτισης για διάφορες τιμές της $\alpha_{\sigma 0}$ και για $CSR=0.10$ (α), $CSR=0.15$ (β) & $CSR=0.20$ (γ) (Zhenglong et al., 2017).	164
Σχήμα 4.84: Σχέση του λόγου κυκλικής τάσης CSR με τον αριθμό κύκλων στην αστοχία, N_f , σε καθορισμένο επίπεδο παραμόρφωσης $\gamma_q=2.5\%$ (Zhenglong et al., 2017).	165
Σχήμα 4.85: Κοκκομετρική καμπύλη της άμμου Red Hill 110 (Diambra et al., 2019).	166
Σχήμα 4.86: Εδαφικό δοκίμιο (Diambra et al., 2019).	167
Σχήμα 4.87: Διαδρομές τάσεων για $CSR=0.12$ και $CSR=0.16$ στο επίπεδο (Diambra et al., 2019).	167
Σχήμα 4.88: Συνθήκες φόρτισης και αναπτυσσόμενες τάσεις (Diambra et al., 2019).	168
Σχήμα 4.89: Μεταβολή εκτροπικής τάσης με την παραμόρφωση, T0.16_60 (Diambra et al., 2019).	169
Σχήμα 4.90: Διαδρομή τάσεων στο επίπεδο $\tau_{\theta z}-p'$, T0.16_60 (Diambra et al., 2019).	169
Σχήμα 4.91: Ανάπτυξη της υπερπίεσης του νερού των πόρων για όλες τις δοκιμές (Diambra et al., 2019).	170
Σχήμα 4.92: Μεταβολή του αριθμού των κύκλων φόρτισης στη ρευστοποίηση με την κλίση 2ασ (Diambra et al., 2019).	170
Σχήμα 4.93: Μεταβολή του κανονικοποιημένου αριθμού των κύκλων φόρτισης στη ρευστοποίηση με την κλίση 2ασ (Diambra et al., 2019).	171
Σχήμα 4.94: Σχέση του λόγου κυκλικής τάσης CSR με τον αριθμό κύκλων στην αστοχία, N , (Diambra et al., 2019).	171
Σχήμα 4.95: Εντατικές καταστάσεις στο έδαφος κάτω από ένα επίχωμα (Wang et al., 2019).	173
Σχήμα 4.96: Εντατική κατάσταση του δοκιμίου (Wang et al., 2019).	175
Σχήμα 4.97: Διαδρομή τάσεων για κορεσμό και στερεοποίηση (Wang et al., 2019).	176
Σχήμα 4.98: Διαδρομή τάσεων στη διάτμηση (Wang et al., 2019).	176
Σχήμα 4.99: Σχέση τάσεων παραμορφώσεων στη διάτμηση (Wang et al., 2019).	177
Σχήμα 4.100: Σχέση τάσης-παραμόρφωση στο στάδιο στρεπτικής διάτμησης : (α) αξονική τάση-παραμόρφωση και (β) διατμητική τάση-καταπόνηση (Wang et al., 2019).	178
Σχήμα 4.101: Εξέλιξη της πίεσης του νερού των πόρων (Wang et al., 2019).	179
Σχήμα 4.102: Διαδρομές τάσεων στο επίπεδο $\tau_{z\theta} - (\sigma_z - \sigma_\theta)/2$ (Wang et al., 2019).	179
Σχήμα 4.103: Διαδρομές τάσεων στο επίπεδο $\tau_{z\theta} - (\sigma_z - \sigma_\theta)/2$ (Wang et al., 2019).	181
Σχήμα 4.104: Κανονικοποιημένη αστράγγιστη διατμητική αντοχή με τη γωνία α (Wang et al., 2019).	181
Σχήμα 4.105: Τάσεις και παραμορφώσεις στο εδαφικό στοιχείο (Wang et al., 2019).	181

Σχήμα 4.106: Διαγράμματα μη-ομοαξονικότητας (Wang et al., 2019).....	182
--	-----

Πίνακας Πινάκων

Πίνακας 3.1: Οι ενδείξεις όγκου της οθόνης του ελεγκτή εσωτερικής πίεσης της κυψέλης και οι αντίστοιχες ενδείξεις του νερού στον ογκομετρικό κύλινδρο κατά το άδειασμα του ελεγκτή.	73
Πίνακας 3.2: Οι ενδείξεις όγκου της οθόνης του ελεγκτή εσωτερικής πίεσης της κυψέλης και οι αντίστοιχες ενδείξεις του νερού στον ογκομετρικό κύλινδρο κατά το γέμισμα του ελεγκτή.....	74
Πίνακας 3.3: Οι ενδείξεις όγκου της οθόνης του ελεγκτή της πίεσης για τον κορεσμό του δοκιμίου και οι αντίστοιχες ενδείξεις του νερού στον ογκομετρικό κύλινδρο κατά το άδειασμα του ελεγκτή.	75
Πίνακας 3.4: Οι ενδείξεις όγκου της οθόνης του ελεγκτή της πίεσης για τον κορεσμό του δοκιμίου και οι αντίστοιχες ενδείξεις του νερού στον ογκομετρικό κύλινδρο κατά το γέμισμα του ελεγκτή.....	75
Πίνακας 3.5: Οι ενδείξεις όγκου της οθόνης του ελεγκτή της εξωτερικής πίεσης της κυψέλης και οι αντίστοιχες ενδείξεις του νερού στον ογκομετρικό κύλινδρο κατά το άδειασμα του ελεγκτή.	75
Πίνακας 3.6: Οι ενδείξεις όγκου της οθόνης του ελεγκτή της εξωτερικής πίεσης της κυψέλης και οι αντίστοιχες ενδείξεις του νερού στον ογκομετρικό κύλινδρο κατά το γέμισμα του ελεγκτή.....	76
Πίνακας 3.7: Οι ενδείξεις πίεσης του ελεγκτή πίεσης της εσωτερικής κυψέλης και οι αντίστοιχες ενδείξεις στον ελεγκτή πίεσης για τον κορεσμό του δοκιμίου.	77
Πίνακας 4.1: Φυσικές ιδιότητες των μελετηθέντων δειγμάτων.	104
Πίνακας 4.2: Αρχικές συνθήκες των δοκιμών επίπεδης παραμόρφωσης	118
Πίνακας 4.3: Τιμές της γ_i για ισότροπα στερεοποιημένες άμμους από τη βιβλιογραφία (Guoxing & Hua, 2009).....	125
Πίνακας 4.4: Αρχικές συνθήκες δοκιμών (Guoxing & Hua, 2009).....	127
Πίνακας 4.5: Εντατικά μεγέθη δοκιμών (Guoxing & Hua, 2009).....	127
Πίνακας 4.6: Διατμητική παραμόρφωση σε διάφορες πιέσεις πόρων (Guoxing & Hua, 2009).....	128
Πίνακας 4.7: Παράμετροι δοκιμών (Jafarzadeth & Zamanian, 2013).	133
Πίνακας 4.8: Αρχική εντατική κατάσταση των δοκιμών (Xiao et al., 2014).	141
Πίνακας 4.9: Μονοτονικές δοκιμές (Sivathayalan et al., 2015).....	147
Πίνακας 4.10: Κυκλικές δοκιμές (Sivathayalan et al., 2015).	148
Πίνακας 4.11: Εξισώσεις για την επεξεργασία των πειραματικών μετρήσεων (Zhenglong et al., 2017).	158
Πίνακας 4.12: Φυσικές ιδιότητες υλίου (Zhenglong et al., 2017).	159
Πίνακας 4.13: Συνθήκες φόρτισης (Zhenglong et al., 2017).	161
Πίνακας 4.14: Συνθήκες δοκιμών (Diambra et al., 2019).....	167
Πίνακας 4.15: Τεχνικά χαρακτηριστικά του εξοπλισμού DYNHCA (Wang et al., 2019).....	174
Πίνακας 4.16: Φυσικά χαρακτηριστικά της αργίλου Wenzhou (Wang et al., 2019).	174

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Γενικά

Τα περισσότερα εδάφη στη φύση παρουσιάζουν ανισότροπη αρχική εδαφική δομή, εξαιτίας της διαδικασίας εναπόθεσης των εδαφικών κόκκων κατά τη διαδικασία ιζηματογένεσης των εδαφικών σχηματισμών και της γεωλογικής τους ιστορίας. Η επακόλουθη υποβολή τους στις σύνθετες εντατικές καταστάσεις που απαντώνται στα διάφορα γεωτεχνικά προβλήματα, οι οποίες περιλαμβάνουν τρισδιάστατες φορτίσεις, με αλλαγές στο μέγεθος και στη διεύθυνση των κυρίων τάσεων και σε ορισμένες περιπτώσεις συνεχή στροφή των αξόνων των κυρίων τάσεων, δημιουργεί περαιτέρω ανισοτροπία, την ανισοτροπία λόγω φόρτισης. Χαρακτηριστικά παραδείγματα τέτοιων εντατικών καταστάσεων συναντώνται στο πεδίο κατά την επιβολή σεισμικών δράσεων στο έδαφος, ημιτονοειδών φορτίων στα εδάφη που αποτελούν τον πυθμένα των θαλασσών, φορτίων στο σώμα και στη βάση των φραγμάτων κλπ. Η ανισότροπη αρχική δομή του εδάφους και η ανισοτροπία λόγω φόρτισης συνθέτουν την ανισοτροπία του εδάφους.

Η ανισοτροπία των εδαφών είναι καθοριστική ως προς τον τρόπο απόκρισής τους. Αρκετοί ερευνητές λοιπόν, έχουν καταβάλλει προσπάθειες να προσομοιώσουν πειραματικά την επίδραση της ανισοτροπίας στη μηχανική συμπεριφορά των εδαφών. Ωστόσο, λόγω της πολυπλοκότητας του φαινομένου αυτού και των τεχνικών δυσκολιών κατά την πειραματική του μελέτη, ο αριθμός των πειραματικών ερευνών που το προσομοιώνουν με επιτυχία είναι ελάχιστος και δεν υπάρχουν νόμοι καταστατικής συμπεριφοράς ευρέως αποδεκτοί και χρησιμοποιούμενοι στη γεωτεχνική πράξη, με αποτέλεσμα να απαιτείται η διεξαγωγή βασικής έρευνας για την περαιτέρω διερεύνησή του.

Η επιτυχής πειραματική προσομοίωση της ανισοτροπίας των εδαφών προϋποθέτει τη χρήση συσκευών, οι οποίες να παρέχουν τη δυνατότητα ελέγχου των μεγεθών και των διευθύνσεων των κυρίων τάσεων. Οι πλέον κατάλληλες πειραματικές διατάξεις για τη μελέτη της ανισοτροπίας των εδαφών είναι οι συσκευές στρεπτικής διάτμησης κοίλου κυλινδρικού δοκιμίου. Μία τέτοια συσκευή αποτελεί η συσκευή στρεπτικής διάτμησης κοίλου κυλινδρικού δοκιμίου της εταιρείας GDS Instruments Ltd., η οποία βρίσκεται εγκατεστημένη στο Εργαστήριο Γεωτεχνικής Μηχανικής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας.

Η διπλωματική εργασία επικεντρώνεται στη βιβλιογραφική ανασκόπηση των πειραματικών ερευνών της επίδρασης της ανισοτροπίας στη μηχανική συμπεριφορά διαφόρων τύπων εδαφών, όπως χαλικώδη εδάφη, καθαρές άμμοι, άμμοι με λεπτόκοκκα, ιλείς και αργιλικά εδάφη. Η επίδραση της ανισοτροπίας στη μηχανική συμπεριφορά των εδαφών διερευνήθηκε πειραματικά με συσκευές στρεπτικής διάτμησης κοίλου κυλινδρικού δοκιμίου: (α) μέσω των παραμέτρων 'α' (κλίση της μέγιστης κύριας τάσης ως προς την κατακόρυφο) και 'b' (παραμέτρος ενδιάμεσης κύριας τάσης) για την

ανισοτροπία λόγω φόρτισης, και (β) μέσω του συντελεστή ωθήσεων σε ηρεμία, K_0 , για την αρχική ανισοτροπία.

1.2 Οργάνωση της διπλωματικής εργασίας ανά κεφάλαιο

Στο Κεφάλαιο 1 παρουσιάζεται η οργάνωση της διπλωματικής εργασίας σε κεφάλαια, καθώς επίσης και το περιεχόμενο των κεφαλαίων της διπλωματικής εργασίας.

Στο Κεφάλαιο 2 περιγράφεται το φαινόμενο της ανισοτροπίας του εδάφους. Συγκεκριμένα, αναλύονται τα είδη της ανισοτροπίας (2.2.1), τα οποία είναι η εγγενής ανισοτροπία (2.2.2) και η ανισοτροπία λόγω φόρτισης (2.2.3) και το φαινόμενο της μη – ομοαξονικότητας του εδάφους (2.2.4). Επίσης, επισημαίνεται η εξαιρετικά σημαντική επίδραση: (α) των παραμέτρων 'α' (2.3) & 'β' (2.4) και (β) της συνεχούς στροφής των διευθύνσεων των κυρίων τάσεων (2.5) στη μηχανική συμπεριφορά των αμμωδών εδαφών, μέσα από κυρίως παλαιότερες πειραματικές και αριθμητικές μελέτες, που πραγματοποιήθηκαν χρονολογικά από το 1961 έως το 2018. Ακόμη, περιγράφονται οι πειραματικές συσκευές που έχουν χρησιμοποιηθεί για τη μελέτη της ανισοτροπίας του εδάφους, με έμφαση στις συσκευές στρεπτικής διάτμησης κοίλου κυλινδρικού δοκιμίου (2.6).

Στο Κεφάλαιο 3 περιγράφονται αναλυτικά τα κύρια υποσυστήματα και το λογισμικό (3.2) της συσκευής στρεπτικής διάτμησης κοίλου δοκιμίου μικρών παραμορφώσεων της εταιρείας GDS Instruments Ltd., που βρίσκεται εγκατεστημένη στο Εργαστήριο Γεωτεχνικής Μηχανικής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας. Επίσης, αναλύονται οι διαδικασίες βαθμονόμησης των ελεγκτών πίεσης / όγκου (3.3) και της διαμόρφωσης κοίλου κυλινδρικού αμμώδους δοκιμίου (3.4), που πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Γεωτεχνικής Μηχανικής.

Στο Κεφάλαιο 4 πραγματοποιείται βιβλιογραφική ανασκόπηση κυρίως πρόσφατων πειραματικών ερευνών (έτη: 1985 – 2019) αναφορικά με την επίδραση της ανισοτροπίας στη μηχανική συμπεριφορά διαφόρων τύπων εδαφών. Η επίδραση αυτή διερευνήθηκε με τη χρήση συσκευών στρεπτικής διάτμησης κοίλου δοκιμίου: (α) μέσω των παραμέτρων 'α' και 'β' για την ανισοτροπία λόγω φόρτισης, και (β) μέσω του συντελεστή 'Κ₀', για την αρχική ανισοτροπία.

Στο Κεφάλαιο 5 συνοψίζονται τα συγκριτικά συμπεράσματα, που εξήχθησαν από τις πειραματικές μελέτες του Κεφαλαίου 4, αναφορικά με την επίδραση της ανισοτροπίας λόγω φόρτισης και της αρχικής ανισοτροπίας στα μηχανικά χαρακτηριστικά των εδαφών, όπως είναι η διατμητική αντοχή, η αντίσταση έναντι ρευστοποίησης, η ανάπτυξη παραμορφώσεων και υπερπίεσης του νερού των πόρων των εδαφών κ.ά..

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΑΝΙΣΟΤΡΟΠΙΑ ΕΔΑΦΟΥΣ

2.1 Εισαγωγή

Η ανισοτροπία των εδαφών είναι καθοριστική ως προς τον τρόπο της απόκρισής τους. Ο τρόπος απόθεσης ενός εδαφικού υλικού σε συνδυασμό με τη γεωλογική του ιστορία (ανισότροπη στερεοποίηση) έχουν ως αποτέλεσμα τη δημιουργία μιας ανισότροπης αρχικής εδαφικής δομής. Επίσης, στα περισσότερα γεωτεχνικά προβλήματα τα εδάφη υποβάλλονται σε τρισδιάστατες φορτίσεις, οι οποίες περιλαμβάνουν αλλαγές στο μέγεθος και στη διεύθυνση των κυρίων τάσεων (σ_1 , σ_2 , σ_3) και σε ορισμένες περιπτώσεις συνεχή στροφή των αξόνων των κυρίων τάσεων. Το αποτέλεσμα είναι τα εδάφη να αναπτύσσουν περαιτέρω ανισοτροπία λόγω της φόρτισής τους.

Τέτοιες σύνθετες εντατικές καταστάσεις λαμβάνουν χώρα στο πεδίο κατά την επιβολή (α) σεισμικής δράσης στο έδαφος, όπου προκαλείται συνεχής μεταβολή των εντατικών μεγεθών με ταυτόχρονη στροφή των αξόνων των κυρίων τάσεων, (β) κυκλοφοριακών φορτίων τύπου συρμού στην εδαφική βάση των σιδηροδρομικών υποδομών, (γ) φορτίων κυματισμού που μεταφέρονται στο θαλάσσιο πυθμένα, (δ) φορτίων στα στάδια κατασκευής επιχωμάτων ή εκσκαφών στο έδαφος, όπου προκαλείται στροφή των αξόνων των κυρίων τάσεων με την αύξηση του ύψους της επίχωσης, (ε) φορτίων στο σώμα και στη βάση φραγμάτων, κλπ.

Η επιτυχής πειραματική προσομοίωση της ανισότροπης συμπεριφοράς του εδάφους και των καταστατικών νόμων που την περιγράφουν, προϋποθέτει τη χρήση συσκευών, οι οποίες να παρέχουν τη δυνατότητα ελέγχου των μεγεθών και των διευθύνσεων των κυρίων τάσεων. Συγκεκριμένα, η επίδραση της ανισοτροπίας στη μηχανική συμπεριφορά των εδαφών είναι δυνατόν να μελετηθεί πειραματικά μέσω:

(α) της παραμέτρου 'α', η οποία ορίζεται ως η κλίση της μέγιστης κύριας τάσης (σ_1) ως προς την κατακόρυφο,

(β) της παραμέτρου ενδιάμεσης κύριας τάσης 'b', η οποία περιγράφει το σχετικό μέγεθος της ενδιάμεσης κύριας τάσης (σ_2) ως προς τα μεγέθη της μέγιστης κύριας τάσης (σ_1) και της ελάχιστης κύριας τάσης (σ_3),

(γ) του συντελεστή ωθήσεων σε ηρεμία, K_0 , ο οποίος ορίζεται ως ο λόγος της ενεργής οριζόντιας τάσης προς την αντίστοιχη κατακόρυφη τάση του εδάφους.

Αρκετοί ερευνητές έχουν καταβάλλει προσπάθειες να προσομοιώσουν πειραματικά την επίδραση της ανισοτροπίας στη μηχανική συμπεριφορά του εδάφους. Ωστόσο, λόγω της πολυπλοκότητας του φαινομένου αυτού και των τεχνικών δυσκολιών κατά την πειραματική του μελέτη, ο αριθμός των ερευνών που το προσομοιώνουν με επιτυχία είναι ελάχιστος και δεν υπάρχουν νόμοι καταστατικής συμπεριφοράς ευρέως αποδεκτοί και χρησιμοποιούμενοι στη γεωτεχνική πράξη. Γίνεται αντιληπτό, λοιπόν, ότι απαιτείται βασική έρευνα για την περαιτέρω διερεύνησή του.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιείται βιβλιογραφική ανασκόπηση των πειραματικών μελετών της ανισοτροπίας λόγω φόρτισης και της αρχικής ανισοτροπίας στη μηχανική

συμπεριφορά διαφόρων τύπων εδαφών με τη μέθοδο της στρεπτικής διάτμησης και εξάγονται συγκριτικά συμπεράσματα.

Στο παρόν κεφάλαιο (Κεφάλαιο 2) μελετάται η ανισοτροπία του εδάφους. Στην υποενότητα 2.2, παρατίθενται οι ορισμοί του φαινομένου της ανισοτροπίας του εδάφους και των διάφορων ειδών εδαφικής ανισοτροπίας (υποενότητα 2.2.1), τα οποία είναι η εγγενής ανισοτροπία (υποενότητα 2.2.2) και η ανισοτροπία του εδάφους που προκαλείται λόγω των επιβαλλόμενων φορτίσεων (υποενότητα 2.2.3). Στη συνέχεια, περιγράφεται ένα από τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά της ανισοτροπίας του εδάφους, το οποίο είναι η μη ομοαξονική του συμπεριφορά (υποενότητα 2.2.4). Στις υποενότητες 2.3, 2.4 και 2.5, αναλύονται οι επιδράσεις των παραμέτρων α , β , και της συνεχούς μεταβολής της διεύθυνσης της διεύθυνσης της μέγιστης κύριας τάσης στη μηχανική συμπεριφορά των εδαφών αντίστοιχα, μέσα από τα αποτελέσματα εργαστηριακών και αριθμητικών μελετών που πραγματοποιήθηκαν στο παρελθόν. Ακολουθεί η περιγραφή των πειραματικών συσκευών που έχουν χρησιμοποιηθεί για τη μελέτη του φαινομένου της ανισοτροπίας του εδάφους και αναλύονται οι δυνατότητές τους (υποενότητα 2.6).

2.2 Ανισότροπη συμπεριφορά εδάφους

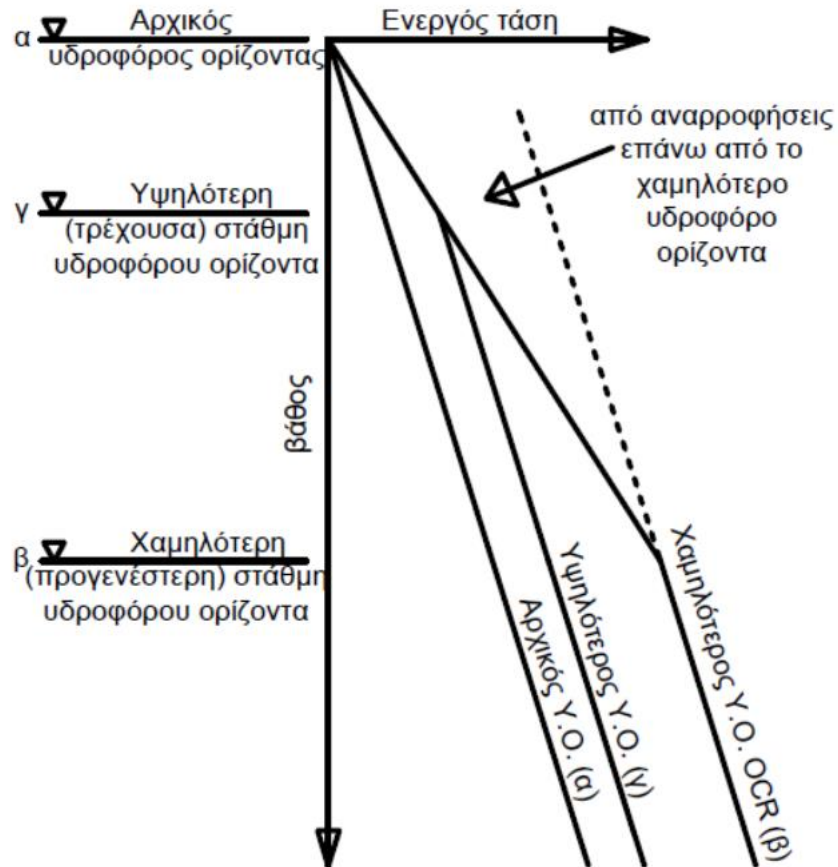
2.2.1 Ο ορισμός και τα είδη της ανισοτροπίας

Οι Casagrande και Carillo (1944) ήταν οι πρώτοι ερευνητές που επισήμαναν τη σημασία της ανισοτροπίας στην Επιστήμη της Εδαφομηχανικής. Ένα εδαφικό υλικό ορίζεται ως ανισότροπο όταν οι μηχανικές του ιδιότητες, όπως είναι η αντοχή, η δυσκαμψία και η διαστολικότητα μεταβάλλονται στις διάφορες διευθύνσεις. Η ανισοτροπία των εδαφικών υλικών χωρίζεται σε δύο μέρη, τα οποία είναι η εγγενής ανισοτροπία (inherent anisotropy) και η ανισοτροπία λόγω φόρτισης (induced anisotropy). Η εγγενής ανισοτροπία αφορά στη εδαφική δομή και η ανισοτροπία λόγω φόρτισης στις επιβαλλόμενες τάσεις ή / και παραμορφώσεις.

Τα εδαφικά υλικά στο πεδίο, συνήθως, παρουσιάζουν έναν συνδυασμό των δυο ειδών ανισοτροπίας, δηλαδή της εγγενούς ανισοτροπίας και της ανισοτροπίας λόγω φόρτισης κατά τη γεωλογική του ιστορία, γνωστό ως αρχική ανισοτροπία (initial anisotropy). Αφού ολοκληρωθεί η διαδικασία της εναπόθεσης των κόκκων του εδάφους (εγγενώς ανισότροπο έδαφος), αυτό υποβάλλεται σε διάφορες γεωλογικές φορτίσεις, όπως είναι οι φορτίσεις λόγω της διάβρωσής του, των μεταβολών στη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα κλπ, οι οποίες προσθέτουν περαιτέρω ανισοτροπία στο έδαφος.

Στο Σχήμα 2.1 παρουσιάζεται χαρακτηριστικό παράδειγμα μεταβολής του ύψους του υδροφόρου ορίζοντα σε μία άργιλο. Συγκεκριμένα, απεικονίζεται το διάγραμμα της ενεργής τάσης σε συνάρτηση με το ύψος της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα για μία αρχικά κανονικά στερεοποιημένη άργιλο και εγγενώς ανισότροπη άργιλο. Οι ενεργές τάσεις μέσω της απόθεσης αυξάνονται όταν ο υδροφόρος ορίζοντας κατέλθει από τη στάθμη α στη στάθμη β . Οι αναρροφήσεις επάνω από τον υποβιβασμένο υδροφόρο ορίζοντα θα αυξήσουν τις ενεργές τάσεις και θα δημιουργήσουν περαιτέρω στερεοποίηση.

Σε αυτό το στάδιο το έδαφος είναι ακόμη κανονικά στερεοποιημένο. Εάν ο υδροφόρος ορίζοντας ανέβει στο ύψος της στάθμης γ , τότε οι ενεργές τάσεις του εδάφους μειώνονται μεταξύ των δύο άλλων σταθμών και το έδαφος υπερστερεοποιείται. Η μεταβολή της εντατικής κατάστασης της αργίλου προκαλεί αλλαγές στη μικροδομή της, και κατά συνέπεια του επιπέδου ανισοτροπίας της (ανισοτροπία λόγω της γεωλογικής ιστορίας του εδάφους).



Σχήμα 2.1: Διακυμάνσεις του υδροφόρου ορίζοντα μιας αρχικά κανονικά στερεοποιημένης αργίλου.

Η ανισοτροπία που εμφανίζει το έδαφος λόγω της γεωλογικής του ιστορίας προσομοιώνεται εργαστηριακά μέσω της ανισότροπης στερεοποίησής του (Κ0-στερεοποίηση) σε ειδικές πειραματικές διατάξεις.

2.2.2 Εγγενής ανισοτροπία (Inherent anisotropy)

Η εγγενής ανισοτροπία αποτελεί εγγενές χαρακτηριστικό των εδαφικών υλικών, το οποίο αφορά στην εδαφική δομή που διαμορφώνει το έδαφος κατά το στάδιο ιζηματογένεσης στο πεδίο. Η εγγενής

ανισοτροπία είναι ανεξάρτητη από τις επιβαλλόμενες τάσεις και παραμορφώσεις στο έδαφος. Τα αίτια που την προκαλούν είναι οι συνθήκες εναπόθεσης και η φύση των εδαφικών υλικών.

Η ανισοτροπία είναι δυνατόν να εμφανισθεί στη μικροκλίμακα του εδάφους με τους ακόλουθους τρόπους:

- Ανομοιογένεια στο έδαφος

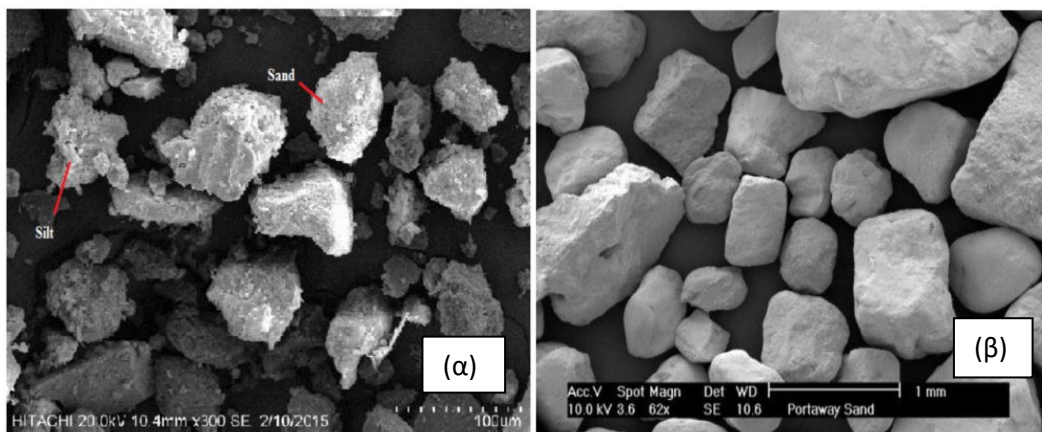
Το έδαφος συνήθως συντίθεται από διάφορους τύπους κόκκων εδάφους (κόκκοι άμμου, ιλύος, αργίλου κλπ), (Σχήμα 2.2(α)).

- Ασυνέχεια στο έδαφος

Το έδαφος αποτελείται από κόκκους, οι οποίοι είναι ασύνδετοι ή ελαφρά συνδεδεμένοι μεταξύ τους και από αέρα και νερό, που περιέχονται μεταξύ των κενών των κόκκων. Έτσι, το έδαφος ορίζεται ως ασυνεχές μέσο, με τη διάταξη των ασυνεχειών να διαφέρει ανάλογα με τον τύπο του εδάφους (Σχήμα 2.2(β)).

- Ανισοτροπία στη δομή του εδάφους

Η δομή του εδάφους ορίζεται ως ο τρόπος διάταξης των κόκκων από τους οποίους συντίθεται ένα έδαφος. Κατά τη διάρκεια της φάσης της εναπόθεσης των εδαφικών κόκκων, οι κόκκοι δέχονται τις δυνάμεις της βαρύτητας, με αποτέλεσμα να αποκτούν συγκεκριμένο προσανατολισμό και να δημιουργούν επαφές μεταξύ τους οι οποίες έχουν επίσης, συγκεκριμένο προσανατολισμό.



Σχήμα 2.2: (α) Ανομοιογένεια του εδάφους (Norsyahariati et al., 2016), (β) Ασυνέχεια του εδάφους (Cai, 2010).

Το αποτέλεσμα της προσανατολισμένης εναπόθεσης των κόκκων στη μακροκλίμακα είναι να δημιουργούνται οριζόντιες στρώσεις στο έδαφος, οι οποίες ορίζουν την εγγενώς ανισότροπη δομή του (Σχήμα 2.3).



Σχήμα 2.3: Οι οριζόντιες στρώσεις του εδαφικού σχηματισμού στο μικρό ρέμα Ρογκοβού, Πάπιγκο.

Η ανισοτροπία που παρατηρείται τόσο στη μικροκλίμακα και στη μακροκλίμακα του εδάφους, συνθέτουν την εγγενή του ανισοτροπία.

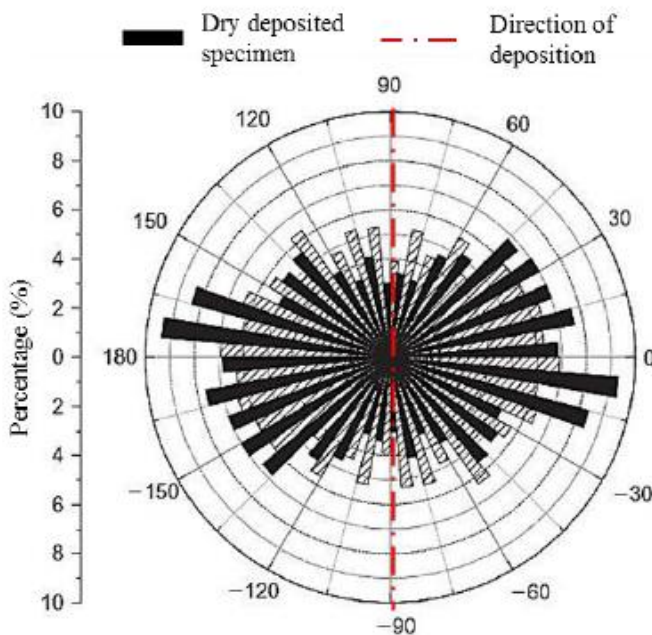
Ο Darwin (1918) πρώτος ανέφερε ότι τα δοκίμια άμμου που προετοίμασε στο εργαστήριο, αποτελούνταν από στρώσεις καθ' ύψος τους, οι οποίες ήταν κάθετες στην κατεύθυνση της εναπόθεσης. Στο εξής, πλήθος ερευνητών εκτέλεσαν πειράματα (Miura & Toki, 1982; Tatsuoka et al., 1982; Oda, 1972b & 1985) και αριθμητικές αναλύσεις (Hosseiniinia, 2012), προκειμένου να διερευνήσουν και να κατανοήσουν την εγγενώς ανισότροπη φύση του εδάφους.

Σύμφωνα με τον Oda (1972), οι εδαφικοί κόκκοι στις μεγάλες ιζηματογενείς αποθέσεις, οι οποίοι συνήθως δεν έχουν σφαιρικό σχήμα, καθιζάνουν έχοντας το μεγάλο τους άξονα κάθετο στη διεύθυνση της εναπόθεσής τους.

Οι Yang et al. (2008) προετοίμασαν ένα δοκίμιο άμμου Τογουρα με τη μέθοδο της ξηρής απόθεσης και στη συνέχεια, εισήγαγαν εποξειδική ρητίνη σε αυτό, επιβάλλοντάς το σε χαμηλές διαφορικές πιέσεις εντός μίας τριαξονικής κυψέλης. Ακολούθως, το δοκίμιο κόπηκε σε μικρά κομμάτια, τα οποία ελήφθησαν από διάφορα σημεία της κατακόρυφης τομής του και χρησιμοποιήθηκαν σε αναλύσεις ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης (SEM). Στο διάγραμμα του Σχήματος 2.4 παρουσιάζονται οι γωνίες των μεγάλων αξόνων των κόκκων σε συνάρτηση με το επίπεδο της εναπόθεσής τους. Η διεύθυνση της εναπόθεσης παρουσιάζεται με κόκκινο χρώμα, ενώ με μαύρο χρώμα παριστάνονται τα διάφορα κομμάτια του δοκιμίου εδάφους. Από το Σχήμα 2.4 παρατηρείται ότι οι κόκκοι της άμμου προσανατολιζόταν προς την οριζόντια διεύθυνση.

Ακόμη, ο Hosseininia (2012) απέδειξε μέσω της εκτέλεσης δισδιάστατων αναλύσεων διακριτών στοιχείων ότι οι μεγάλοι άξονες των κόκκων ακανόνιστου σχήματος ενός εδάφους, το οποίο

υποβλήθηκε σε διαξονική συμπίεση, έτειναν να είναι κάθετοι στον άξονα εφαρμογής της φόρτισης. Το αποτέλεσμα ήταν να δημιουργηθεί μια εγγενώς ανισότροπη δομή στο έδαφος και συγκεκριμένα, σταθερές στήλες κόκκων εδάφους, οι οποίες μετέφεραν το επιβαλλόμενο φορτίο.



Σχήμα 2.4: Οι γωνίες των μεγάλων αξόνων των κόκκων της άμμου Toyoura σε συνάρτηση με το επίπεδο της εναπόθεσης τους (Yang et al., 2008).

Ωστόσο, πλήθος ερευνητών, όπως οι Kallstenius & Bergani (1961), Oda (1981), Oda & Iwashita (1999) και Oda (1972b) ανέφεραν ότι η εγγενής ανισοτροπία δεν εμφανίζεται μόνο στα εδαφικά υλικά που αποτελούνται από κόκκους ακανόνιστου σχήματος, αλλά και σε αυτά με κόκκους σφαιρικού σχήματος.

Οι Kallstenius & Bergani (1961) διαμόρφωσαν συσσωματώματα από σφαιρικούς κόκκους γυαλιού με τη μέθοδο της ξηρής απόθεσης και παρατήρησαν ότι ο αριθμός των κόκκων που βρίσκονται σε επαφή με το κατακόρυφο επίπεδο διαφέρει από τον αριθμό κόκκων που βρίσκονται σε επαφή με το οριζόντιο επίπεδο. Έτσι, απέδειξαν την ανισοτροπία που αναπτύσσεται στις επαφές μεταξύ των σφαιρικών κόκκων.

Οι Li & Yu (2009) εκτελώντας μια σειρά από δισδιάστατες αριθμητικές αναλύσεις διακριτών στοιχείων, διερεύνησαν την ανισοτροπία που αναπτύσσεται στις επαφές μεταξύ των δισδιάστατων εδαφικών κόκκων κυκλικής διατομής κατά τη διάρκεια προετοιμασίας δοκιμίου αμμώδους εδάφους με μία μέθοδο, παρόμοια με αυτή της ξηρής απόθεσης που εφαρμόζεται στο εργαστήριο. Οι ερευνητές παρατήρησαν ότι οι κάθετες στα επίπεδα που επαφτόταν στα σημεία επαφής των κόκκων προσανατολιζόταν προς τη διεύθυνση της εναπόθεσης.

Το φαινόμενο της εγγενούς ανισοτροπίας στο έδαφος είναι δυνατόν να επηρεάσει τη μηχανική του συμπεριφορά. Η μελέτη της μηχανικής συμπεριφοράς των εγγενών ανισότροπων αμμωδών εδαφών αποτέλεσε αντικείμενο πολλών εργαστηριακών ερευνών (Philips & May 1967; Oda & Konishi 1974; Miura & Toki, 1982; Tatsuoka et al., 1982; Oda, 1972b & 1985; Miura et al. 1986, Gutierrez et al. 1991,

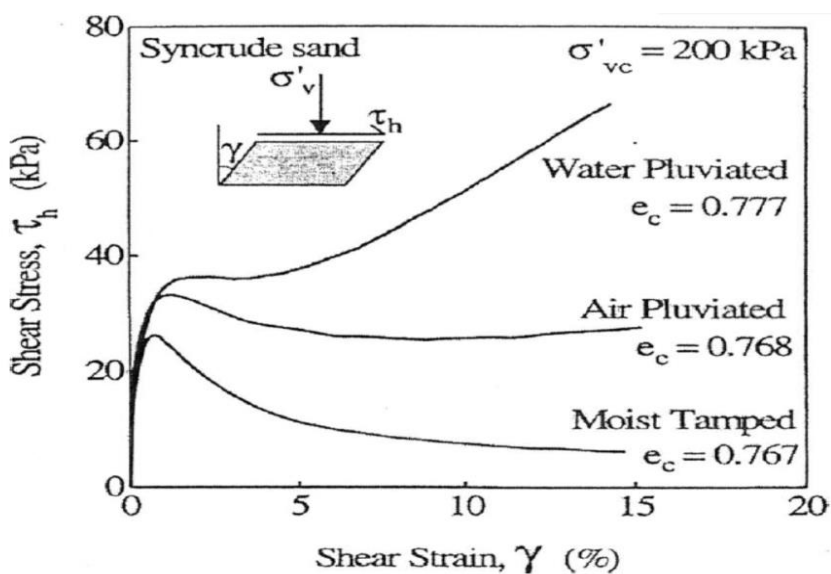
Lade et al. 2008), αλλά και αριθμητικών προσομοιώσεων και αναλύσεων (Li & Yu 2009, Sazzad & Suzuki 2010, Mahmood & Iwashita 2010; Schweiger, 2009).

Η επίδραση της εγγενούς ανισοτροπίας στη μηχανική συμπεριφορά του εδάφους μελετάται εργαστηριακά, μέσω της εκτέλεσης πειραμάτων στα οποία εφαρμόζονται διαφορετικές μέθοδοι προετοιμασίας δοκιμίων και πειραμάτων στα οποία μεταβάλλεται η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ της διεύθυνσης της μέγιστης κύριας τάσης και του επιπέδου εναπόθεσης του εδάφους.

Όσον αφορά στα πειράματα στα οποία χρησιμοποιούνται διαφορετικές μέθοδοι προετοιμασίας δοκιμίων, ενδεικτικά, οι Vaid et al. (2000) πραγματοποίησαν δοκιμές απλής διάτμησης υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης σε δοκίμια της άμμου Syncrude, τα οποία διαμορφώθηκαν με τις ακόλουθες 3 διαφορετικές μεθόδους:

1. Water pluviation (εμβάπτιση στο νερό)
2. Air pluviation
3. Moist tamping (συμπύκνωση υγρής άμμου σε διαδοχικές στρώσεις)

Από τις δοκιμές προέκυψε ότι τα δοκίμια που παρασκευάστηκαν με τη μέθοδο της εμβάπτισης στο νερό παρουσίασαν τη μεγαλύτερη αντοχή, αυτά με τη μέθοδο 'air pluviation' τη μέση αντοχή και τέλος, αυτά με τη μέθοδο της συμπύκνωσης υγρής άμμου σε διαδοχικές στρώσεις τη μικρότερη αντοχή.



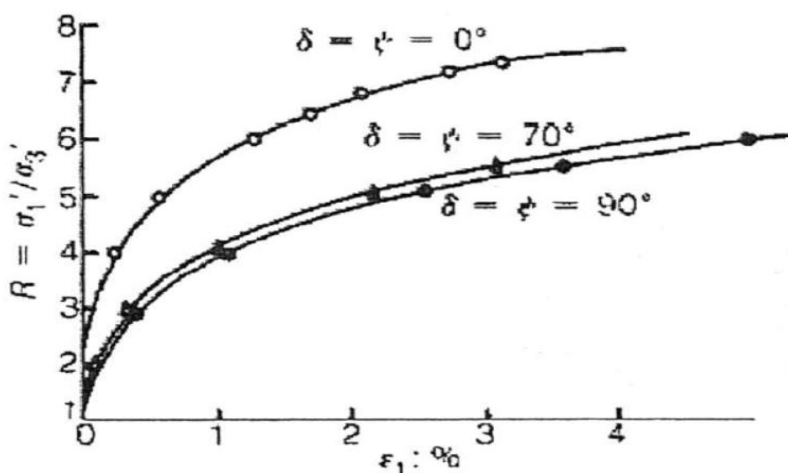
Σχήμα 2.5: Η διατμητική τάση συναρτήσει της διατμητικής παραμόρφωσης των 3 δοκιμίων της άμμου Syncrude, τα οποία διαφέρουν ως προς τη μέθοδο προετοιμασίας τους (Vaid et al., 2000).

Όσον αφορά στα πειράματα στα οποία μεταβάλλεται η γωνία που σχηματίζει το επίπεδο διαστρωμάτωσης του υλικού με τη διεύθυνση επιβολής της φόρτισης, οι Wong & Arthur (1985) εκτέλεσαν δοκιμές άμεσης διάτμησης υπό συνθήκες ελεύθερης στράγγισης σε πυκνά δοκίμια της άμμου Leighton Buzzard, στα οποία μετέβαλαν τη διεύθυνση απόθεσης των κόκκων της άμμου. Οι ερευνητές απέδειξαν ότι η διατμητική αντοχή της άμμου υπό συνθήκες ελεύθερης στράγγισης

(μέγιστη τιμή του λόγου των ενεργών κυρίων τάσεων) μεταβαλλόταν με τη γωνία δ (γωνία που σχημάτιζε η μέγιστη κύρια τάση με την κάθετη στο επίπεδο διαστρωμάτωσης, Σχήμα 2.6). Συγκεκριμένα, ο λόγος των ενεργών κυρίων τάσεων (σ_1'/σ_3') κατά την αστοχία μειωνόταν με την αύξηση της γωνίας δ (Σχήμα 2.7).



Σχήμα 2.6: Η γωνία (δ) που σχηματίζει η μέγιστη κύρια τάση (σ_1) με την κάθετη στο επίπεδο διαστρωμάτωσης.



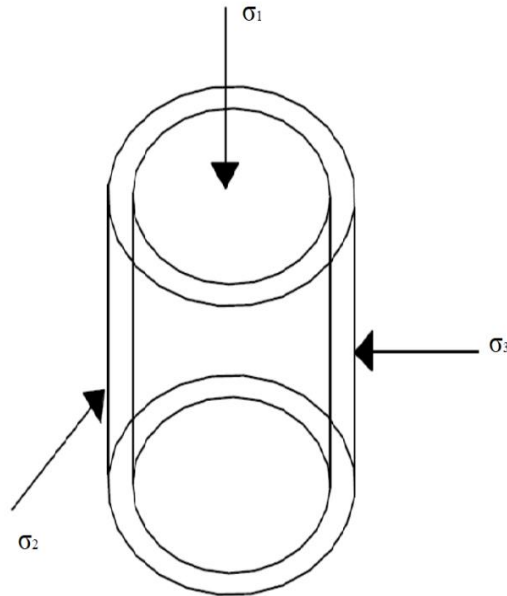
Σχήμα 2.7: Ο λόγος των ενεργών κυρίων τάσεων (σ_1'/σ_3') συναρτήσει της μέγιστης κύριας παραμόρφωσης για διάφορες γωνίες δ της άμμου Leighton Buzzard (Wong & Arthur; 1985).

Ωστόσο, η εγγενής ανισοτροπία του εδάφους μεταβάλλεται συνεχώς κατά τη φόρτισή του και είναι δυνατόν να εξαφανισθεί καθώς αυτό υποβάλλεται σε μεγάλες ή απότομες αλλαγές τάσεων. Οι απότομες αλλαγές στην εντατική κατάσταση δύναται να προκαλέσουν μεταβολές στις επαφές μεταξύ των κόκκων, καταστρέφοντας τις σταθερές στήλες που σχηματίστηκαν για να αναλαμβάνουν και να μεταφέρουν τα επιβαλλόμενα φορτία. Αξίζει να σημειωθεί ότι αφού το έδαφος φθάσει τη μέγιστη διατμητική του αντοχή, η εγγενής ανισότροπη δομή του εξαφανίζεται.

2.2.3 Ανισοτροπία λόγω φόρτισης (Induced anisotropy)

Η ανισοτροπία λόγω φόρτισης (induced anisotropy) εμφανίζεται στα εδάφη λόγω της διάτμησης και της πλαστικής τους παραμόρφωσης. Η διάτμηση επιβάλλεται στο έδαφος μέσω μίας αποκλίνουσας τάσης (q) (Εξίσωση 2.1, Σχήμα 2.8).

$$q = \sqrt{0.5 ((\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2)} \quad (2.1)$$

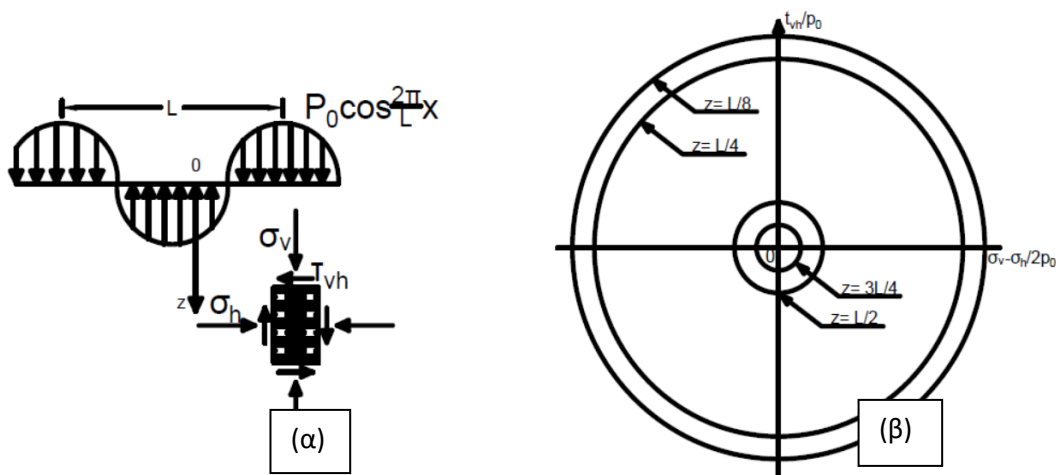


Σχήμα 2.8: Επιβολή αποκλίνουσας τάσης σε κούλο κυλινδρικό δοκίμιο εδάφους.

Όπως προαναφέρθηκε στην υποενότητα 2.1, τα εδάφη υποβάλλονται συνήθως σε τρισδιάστατες ανισότροπες εξωτερικές φορτίσεις (αποκλίνουσα τάση q) με ταυτόχρονη (συνεχή) στροφή των αξόνων των κυρίων τάσεων.

Ένα τέτοιο χαρακτηριστικό παράδειγμα εντατικής κατάστασης στο πεδίο εμφανίζεται σε εδάφη του πυθμένα της θάλασσας, τα οποία δέχονται τις φορτίσεις των κυματισμών. Οι Ishihara & Towhata (1983) προσπάθησαν να προσομοιώσουν πειραματικά την ανισότροπη συμπεριφορά μιας άμμου του πυθμένα της θάλασσας, στην οποία υποβάλλεται η ημιτονοειδής κυματομορφή του Σχήματος 2.9 (α). Στο Σχήμα 2.9 (β) απεικονίζεται η απόκριση της άμμου σε διάφορα βάθη κάτω από τον πυθμένα της θάλασσας. Στο Σχήμα 2.9 (β) η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ του οριζοντίου επιπέδου και οποιουδήποτε νοητού διανύσματος ξεκινά από το κέντρο ενός κύκλου και έχει μέτρο ίσο με την ακτίνα του αντιπροσωπεύει την παράμετρο '2α'. Σε κάθε κύκλο, ο οποίος αντιπροσωπεύει ένα ορισμένο βάθος στο έδαφος, η παράμετρος '2α' αλλάζει συνεχώς και με ανακυκλικό τρόπο λαμβάνοντας τιμές στο εύρος 0 - 360°, υποδηλώνοντας έτσι την ανισότροπη συμπεριφορά της συγκεκριμένης άμμου.

Οι Oda (1972a) και Wong & Arthur (1985), Li & Yu (2009) απέδειξαν ότι τα αμμώδη εδάφη είναι δυνατόν να εμφανίσουν ανισοτροπία λόγω φόρτισης, εξαιτίας της φόρτισης, αποφόρτισης και επαναφόρτισής τους.



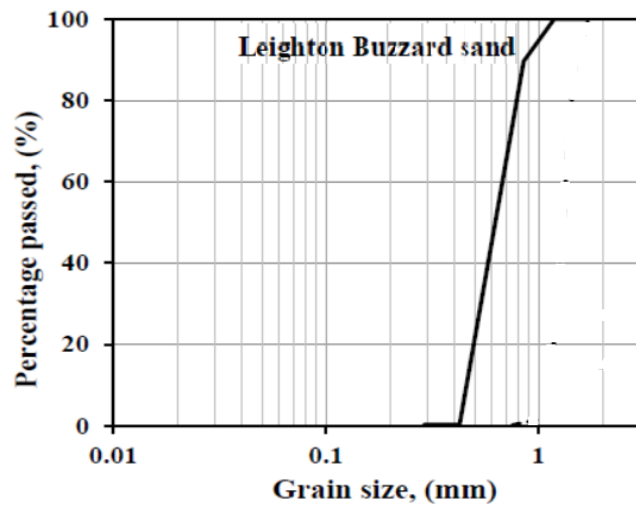
Σχήμα 2.9: (α) Επιβολή ημιτονοειδούς κυματομορφής στον πυθμένα της θάλασσας και εντατική κατάσταση εδαφικού στοιχείου της άμμου υπό τον πυθμένα της θάλασσας, (β) Διάγραμμα της διατμητικής τάσης συναρτήσει της αποκλίνουσας τάσης της άμμου σε διάφορα βάθη (z) κάτω από τον πυθμένα της θάλασσας (Ishihara & Towhata, 1983).

Οι Wong και Arthur (1985) διερεύνησαν πειραματικά την επίδραση της ανισοτροπίας λόγω φόρτισης στη μηχανική συμπεριφορά τεσσάρων δοκιμών της πυκνής άμμου Leighton Buzzard. Η κοκκομετρική καμπύλη της άμμου παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.10. Προκειμένου να μελετήσουν μεμονωμένα το φαινόμενο της ανισοτροπίας λόγω φόρτισης, χωρίς δηλαδή τις επιδράσεις την εγγενούς ανισοτροπίας, πραγματοποιήθηκε η έγχυση της άμμου σε επίπεδο κάθετα στη διεύθυνση του επιπέδου της παραμόρφωσης, καθώς το επίπεδο αυτό αποτελεί ένα αρχικά ισότροπο επίπεδο (Σχήμα 2.11). Αφού τα δοκίμια άμμου στερεοποιήθηκαν ισότροπα, υποβλήθηκαν σε διάτμηση ($\sigma'_1/\sigma'_3 \neq 1$) στο αρχικά ισότροπο επίπεδο της άμμου, και έπειτα αποφορτίστηκαν στην ισότροπη κατάσταση τάσεων ($\sigma'_1/\sigma'_3 = 1$). Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε επαναφόρτιση των δοκιμών σε διαφορετικές κατευθύνσεις της σ_1 από εκείνη που είχαν στο στάδιο της φόρτισής τους.

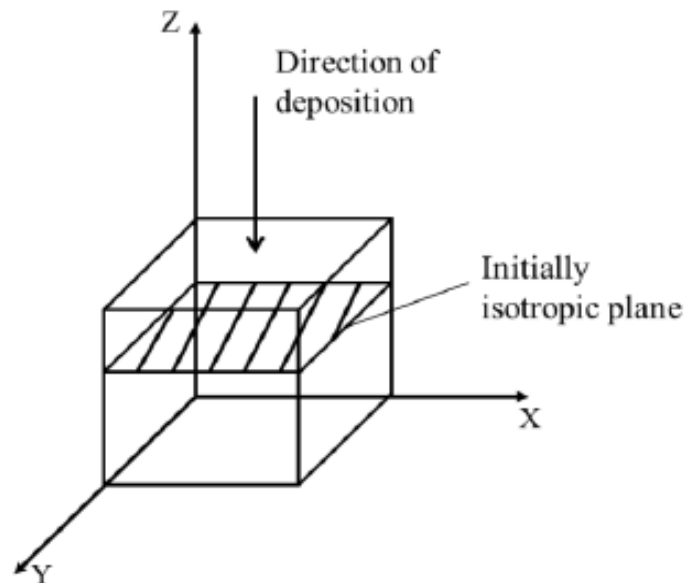
Στο Σχήμα 2.12 παρουσιάζεται ο λόγος των ενεργών κυρίων τάσεων ($\frac{\sigma'_1}{\sigma'_3}$) σε συνάρτηση με τη μέγιστη κύρια παραμόρφωση της άμμου (ϵ_1) για τα στάδια της φόρτισης - αποφόρτισης (Stress path a) και επαναφόρτισης (Stress path b). Η παράμετρος $\Delta\psi$ στο Σχήμα 2.12 αντιπροσωπεύει τη μεταβολή (σε μοίρες) της κατεύθυνσης της σ_1 από το στάδιο φόρτισης - αποφόρτισης στο στάδιο επαναφόρτισης. Συγκεκριμένα, μελετήθηκαν τέσσερις διαδρομές τάσεων, οι οποίες διαφέρουν ως προς τη διεύθυνση της σ_1 κατά τη διάρκεια του σταδίου επαναφόρτισης της άμμου. Στο Σχήμα 2.13 παρουσιάζεται η ογκομετρική παραμόρφωση (ϵ_v) ως προς την ϵ_1 της άμμου για τις τέσσερις αυτές διαφορετικές διευθύνσεις της σ_1 .

Από τα Σχήματα, παρατηρείται ότι καθώς η διεύθυνση της σ_1 στο στάδιο της επαναφόρτισης αποκλίνει από τη διεύθυνση της σ_1 στο στάδιο της φόρτισης (αύξηση $\Delta\psi$), η άμμος συστέλλεται περισσότερο και η δυσκαμψία της ολοένα και μειώνεται, παρόλο που ο λόγος των ενεργών κύριων τάσεων στην αστοχία παραμένει περίπου σταθερός σε όλες τις διευθύνσεις επαναφόρτισης ($\frac{\sigma'_1}{\sigma'_3} = 7.15 \div 7.55$). Τα

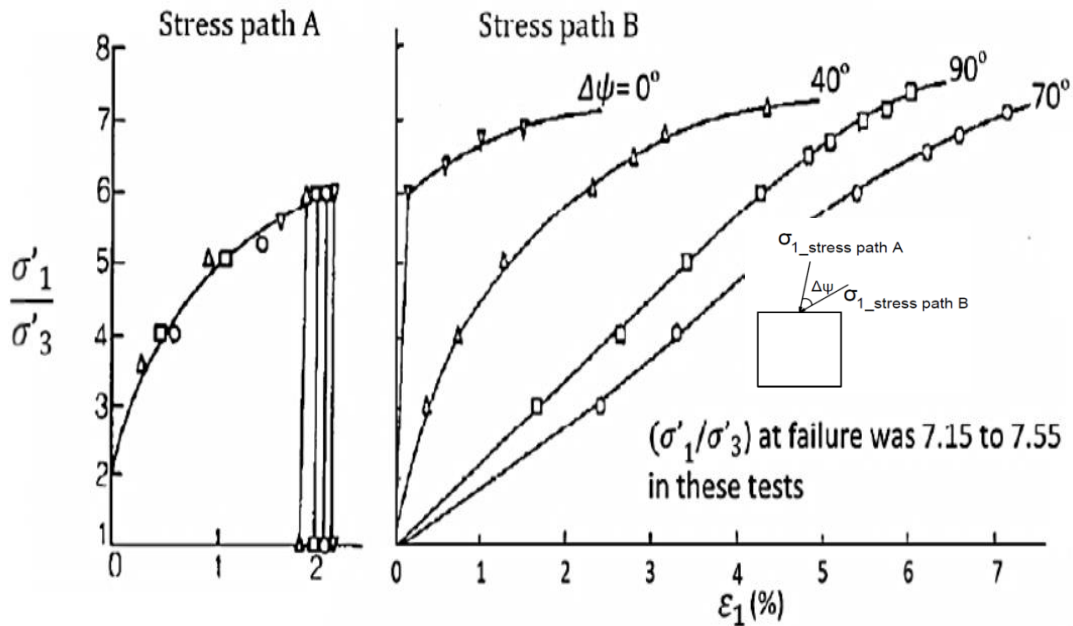
αποτελέσματα έδειξαν λοιπόν, την ανάπτυξη ανισοτροπίας λόγω φόρτισης στα δοκίμια άμμου, όπως επίσης και την εξαιρετικά σημαντική επίδρασή της στη μηχανική τους συμπεριφορά.



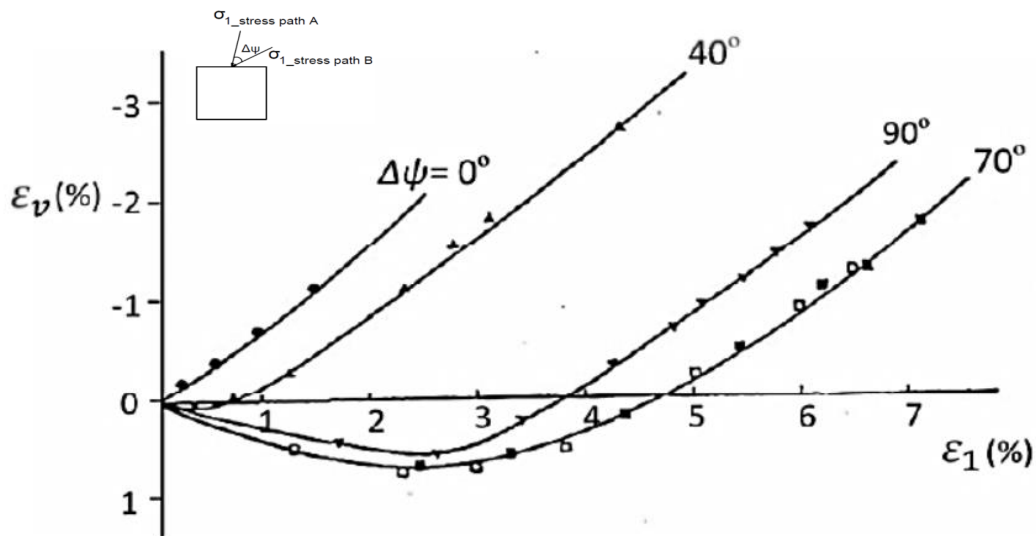
Σχήμα 2.10: Η κοκκομετρική καμπύλη της άμμου Leighton Buzzard (Wong & Arthur, 1985).



Σχήμα 2.11: Το αρχικά ισότροπο επίπεδο της άμμου Leighton Buzzard (Wong & Arthur, 1985).



Σχήμα 2.12: Ο λόγος των ενεργών κυρίων τάσεων (σ'_1/σ'_3) ως προς τη μέγιστη κύρια παραμόρφωση (ϵ_1) κατά τα στάδια της φόρτισης - αποφόρτισης (Stress path A) και επαναφόρτισης (Stress path B) της άμμου Leighton Buzzard σε 4 διαφορετικές γωνίες $\Delta\psi$ (Wong & Arthur, 1985).

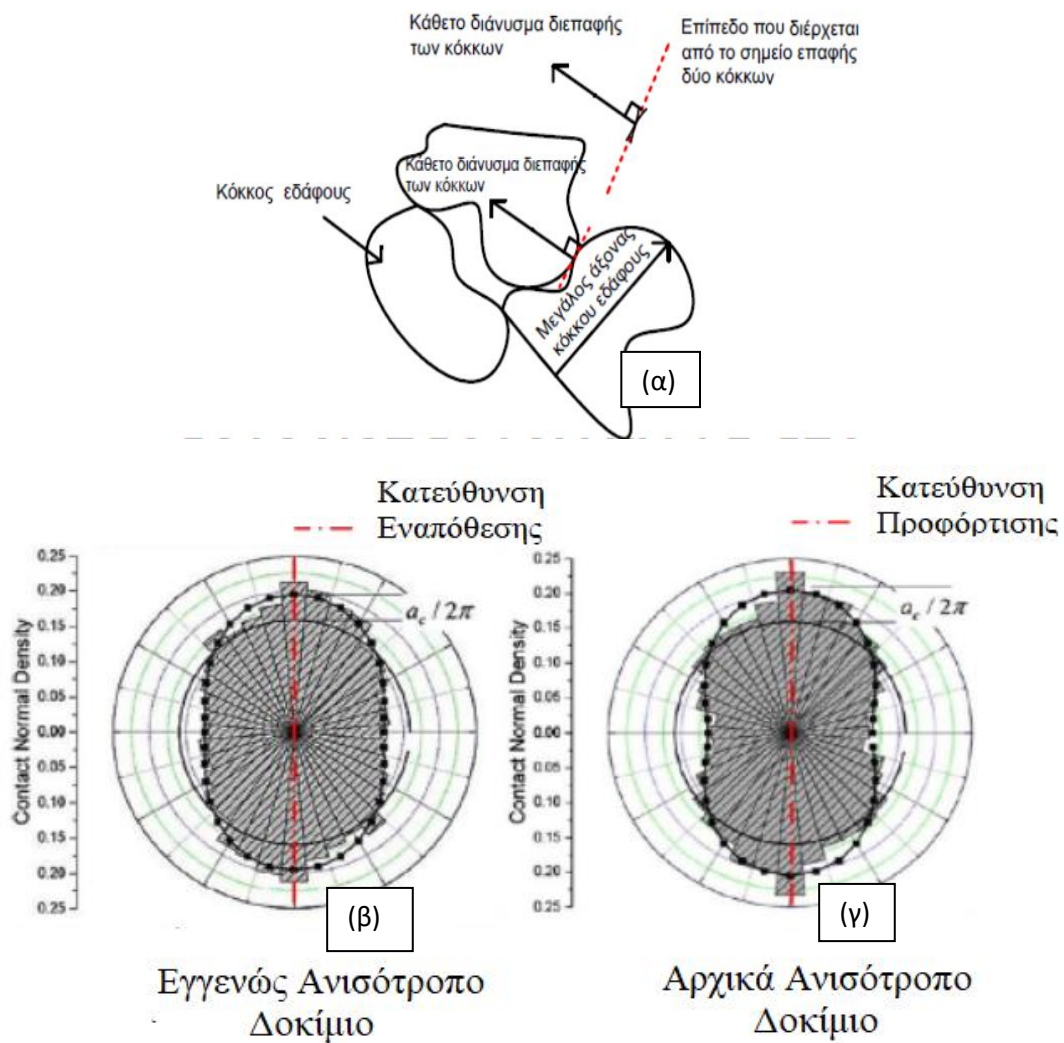


Σχήμα 2.13: Η ογκομετρική παραμόρφωση (ϵ_v) συναρτήσει της μέγιστης κύριας παραμόρφωσης (ϵ_1) της άμμου Leighton Buzzard σε 4 διαφορετικές γωνίες $\Delta\psi$ κατά τη διάρκεια της επαναφόρτισής της (Wong & Arthur, 1985).

Ο Oda (1972) εκτελώντας αναλύσεις μικροσκοπίας, παρατήρησε ότι η μικροδομή του εδάφους μεταβαλλόταν συνεχώς κατά τη διάρκεια της διάτμησής του, καθώς οι κάθετες επί των επιπέδων που επαφτόταν στα σημεία επαφής των κόκκων (contact normals, Σχήμα 2.14 (α)) έτειναν να γίνουν παράλληλες με τη διεύθυνση της σ_1 , ενώ εκείνες που ήταν κάθετες σε αυτή όλο και μειωνόταν. Οι Li

& Yu (2009) υποστήριξαν περαιτέρω την παρατήρηση του Oda (1972), μέσω των δισδιάστατων αναλύσεων διακριτών στοιχείων που πραγματοποίησαν σε ένα εγγενώς ανισότροπο δοκίμιο άμμου και σε ένα αρχικά ανισότροπο δοκίμιο άμμου. Το αρχικά ανισότροπο δοκίμιο άμμου, δημιουργήθηκε υποβάλλοντάς την εγγενώς ανισότροπη άμμο σε διάτμηση, με τη διεύθυνση της σ_1 παράλληλη με τη διεύθυνση της εναπόθεσης και στη συνέχεια, αποφορτίζοντάς τη υπό ελεγχόμενη παραμόρφωση στην ισότροπη κατάσταση. Στο Σχήμα 2.14 παρουσιάζονται οι κατανομές των καθέτων επί των επιπέδων που εφάπτονταν στα σημεία επαφής των κόκκων για το εγγενώς ανισότροπο δοκίμιο (Σχήμα 2.14 (β)) και για το προφορτισμένο δοκίμιο άμμου (Σχήμα 2.14 (γ)). Από το Σχήμα 2.14 (γ) παρατηρείται ότι δημιουργήθηκαν νέα σημεία επαφής μεταξύ των σωματιδίων, στα οποία οι κάθετες επί των επιπέδων στα σημεία επαφής συνέπιπταν με τον άξονα της μέγιστης κύριας παραμόρφωσης (κατακόρυφος άξονας), ενώ τα σημεία επαφής στα οποία οι κάθετες επί των επιπέδων στα σημεία επαφής ήταν κάθετες στον άξονα της μέγιστης κύριας παραμόρφωσης (οριζόντιος άξονας) μειώθηκαν.

Η μικροδομή του εδάφους μεταβάλλεται συνεχώς κατά τη διάρκεια της διάτμησής του. Συγκεκριμένα, το έδαφος τείνει να σχηματίζει στήλες, οι οποίες θα μπορούν να παραλαμβάνουν τις επιβαλλόμενες φορτίσεις. Όταν όμως, το έδαφος φθάσει στη μέγιστή του τάση, οι στήλες που έχουν διαμορφωθεί καταστρέφονται, με αποτέλεσμα να αλλάζει και πάλι η μικροδομή του. Έτσι, η ανισοτροπία λόγω φόρτισης επηρεάζει σε μικρό βαθμό ή δεν επηρεάζει την εσωτερική γωνία τριβής του εδάφους.



Σχήμα 2.14: (α) Σχηματική απεικόνιση ενός τυχαίου σημείου επαφής μεταξύ των κόκκων του εδάφους και της καθέτου επί των επιπέδων που εφάπτονται στο σημείο επαφής των κόκκων του εδάφους, Η κατανομή των καθέτων επί των επιπέδων που εφάπτονται στα σημεία επαφής των κόκκων σε σχέση με την κατεύθυνση: (β) εναπόθεσης για ένα εγγενώς ανισότροπο δοκίμιο, (γ) προφόρτισης για ένα αρχικά ανισότροπο δοκίμιο (Li & Yu, 2009).

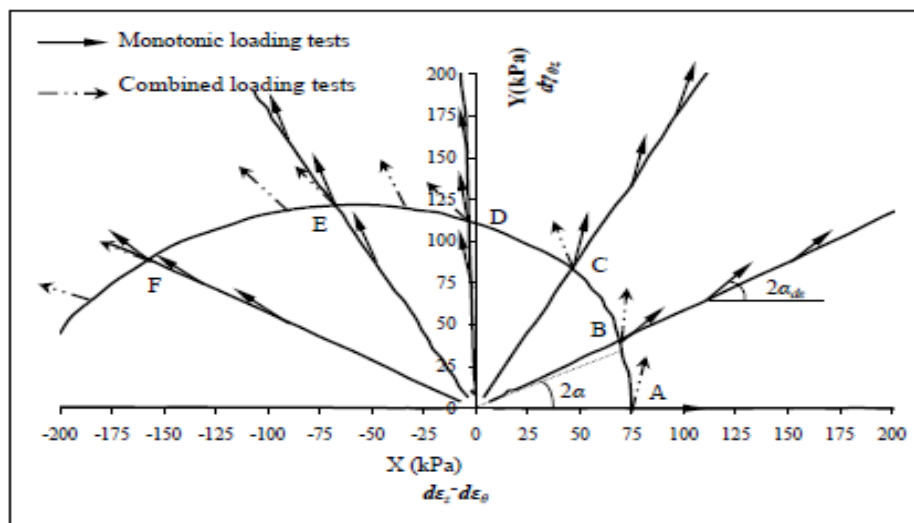
2.2.4 Μη-ομοαξονική συμπεριφορά εδάφους (Non – Coaxial soil behavior)

Πλήθος ερευνητών (Wong & Arthur; 1985, Gutierrez et al; 1991, Yang & Yu; 2006, Li & Yu; 2009, Ibraim et al; 2010, Cai; 2010) ασχολήθηκε, τόσο μέσω πειραματικών μελετών, όσο και μέσω αριθμητικών αναλύσεων, με το φαινόμενο της μη – ομοαξονικής συμπεριφοράς των εδαφών.

Η μη – ομοαξονικότητα αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά των ανισότροπων εδαφικών υλικών και ορίζεται ως η μη ταύτιση των διευθύνσεων των κυρίων τάσεων με τις

διευθύνσεις των προσαυξητικών κύριων πλαστικών παραμορφώσεων κατά τη διάρκεια της πλαστικής παραμόρφωσης των εδαφών (Yu, 2008).

Στο Σχήμα 2.15 παρουσιάζεται ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα εμφάνισης μη – ομοαξονικής συμπεριφοράς στην άμμο Portaway από τη μελέτη της Cai (2010). Η Cai (2010), μεταξύ άλλων, εκτέλεσε δοκιμές διάτμησης υπό σταθερή κατεύθυνση της σ_1 (monotonic loading tests / δοκιμές μονοτονικής φόρτισης) και δοκιμές στις οποίες πραγματοποιούνταν αύξηση της διατμητικής τάσης με ταυτόχρονη στροφή του άξονα της μέγιστης κύριας τάσης (combined loading tests / δοκιμές συνδυασμένης φόρτισης). Τα μαύρα βελάκια στο Σχήμα 2.15 αντιπροσωπεύουν τα διανύσματα κατεύθυνσης των προσαυξητικών μεγίστων κυρίων πλαστικών παραμορφώσεων της άμμου, η οποία υποβλήθηκε σε δοκιμές μονοτονικής φόρτισης, ενώ τα βελάκια με τις διακεκομμένες γραμμές παριστάνουν τα αντίστοιχα διανύσματα για τις δοκιμές συνδυασμένης φόρτισης. Από το Σχήμα 2.15 παρατηρείται το μέγεθος της γωνίας 'α', που αντιπροσωπεύει τη γωνία της μέγιστης κύριας τάσης της άμμου ως προς την κατακόρυφο, διέφερε από το μέγεθος της γωνίας 'α_{de}', δηλαδή της γωνίας της προσαυξητικής μέγιστης κύριας παραμόρφωσης της άμμου ως προς την κατακόρυφο, και για τους δύο τύπους δοκιμών. Αξίζει να σημειωθεί ότι ο βαθμός των αποκλίσεων αυτών, δηλαδή ο βαθμός της μη – ομοαξονικότητας, μεταβαλλόταν για τα διάφορα σημεία των διαδρομών των τάσεων των δύο τύπων δοκιμών.



Σχήμα 2.15: Τα διανύσματα κατεύθυνσης των προσαυξητικών μεγίστων κυρίων πλαστικών παραμορφώσεων της άμμου Portaway, για τις διαδρομές μονοτονικής φόρτισης και τις διαδρομές συνδυασμένης φόρτισης (Cai, 2010).

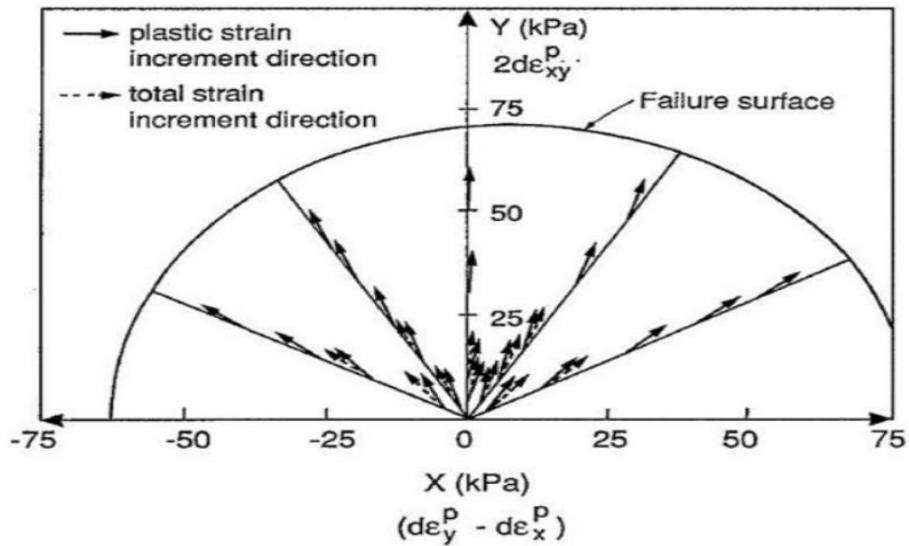
Η μη – ομοαξονική συμπεριφορά στο έδαφος είναι δυνατόν να εμφανισθεί σε εγγενώς ανισότροπα, αρχικά ανισότροπα εδάφη και σε εδάφη ανισότροπα λόγω φόρτισης.

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα συμπεράσματα πειραματικών και αριθμητικών μελετών που πραγματοποιήθηκαν αναφορικά με τη μη – ομοαξονικότητα σε ανισότροπα αμμώδη εδάφη.

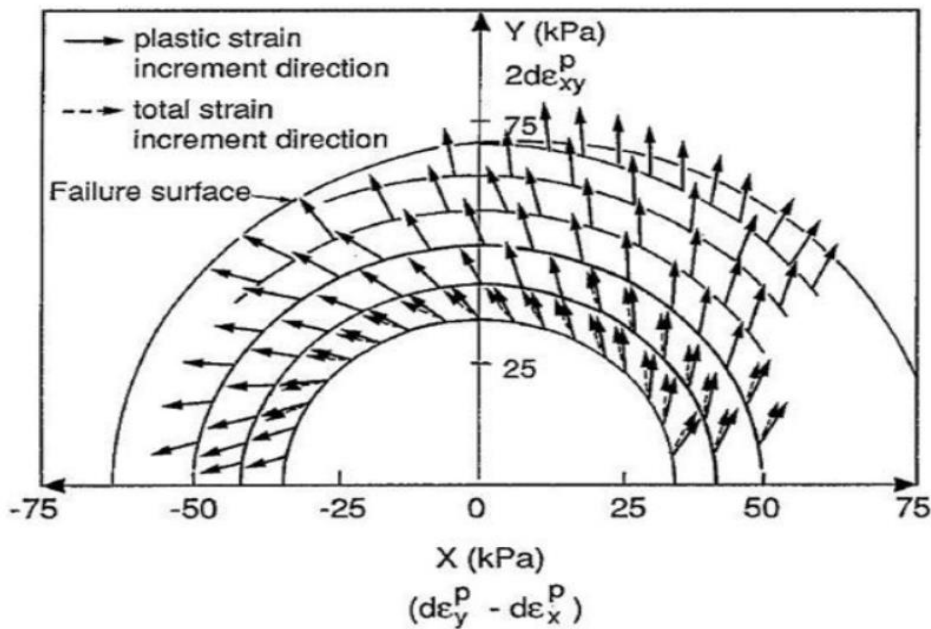
- Εγγενώς ανισότροπα αμμώδη εδάφη

Οι Gutierrez et al. (1991) μελέτησαν πειραματικά τη μη – ομοαξονικότητα μίας άμμου, εκτελώντας δοκιμές μονοτονικής φόρτισης υπό σταθερή διεύθυνση της σ_1 σε κάθε δοκιμή και δοκιμές καθαρής στρέψης στη συσκευή κοίλου κυλίνδρου. Στο Σχήμα 2.16 παρουσιάζονται οι διαδρομές των τάσεων της άμμου σε διάφορες κατευθύνσεις της σ_1 για τις δοκιμές μονοτονικής φόρτισης. Στο Σχήμα 2.17 παρουσιάζονται οι διαδρομές των τάσεων της άμμου σε διάφορα επίπεδα διατμητικής τάσης για τις δοκιμές καθαρής στρέψης. Η παραμόρφωση της άμμου αποτελούνταν από μία συνιστώσα ελαστικής και από μία συνιστώσα πλαστικής παραμόρφωσης. Τα μαύρα συνεχή βελάκια στα Σχήματα 2.16 & 2.17 αντιπροσωπεύουν τις κατευθύνσεις των προσαυξητικών κυρίων πλαστικών παραμορφώσεων, ενώ τα βελάκια με τις διακεκομμένες γραμμές αντιπροσωπεύουν τις κατευθύνσεις των προσαυξητικών κυρίων ελαστικών και πλαστικών παραμορφώσεων (συνολικών παραμορφώσεων). Από τα αποτελέσματα των δύο τύπων δοκιμών, αποδείχθηκε η μη – ομοαξονική συμπεριφορά της άμμου. Συγκεκριμένα, ο βαθμός μη – ομοαξονικότητας της άμμου ήταν μεγαλύτερος στις δοκιμές καθαρής στρέψης συγκριτικά με τις δοκιμές μονοτονικής φόρτισης, καθώς οι γωνίες των προσαυξητικών πλαστικών παραμορφώσεων (α_{de}) απέκλιναν περισσότερο από τις γωνίες της μέγιστης κύριας τάσης (α) στις δοκιμές καθαρής στρέψης.

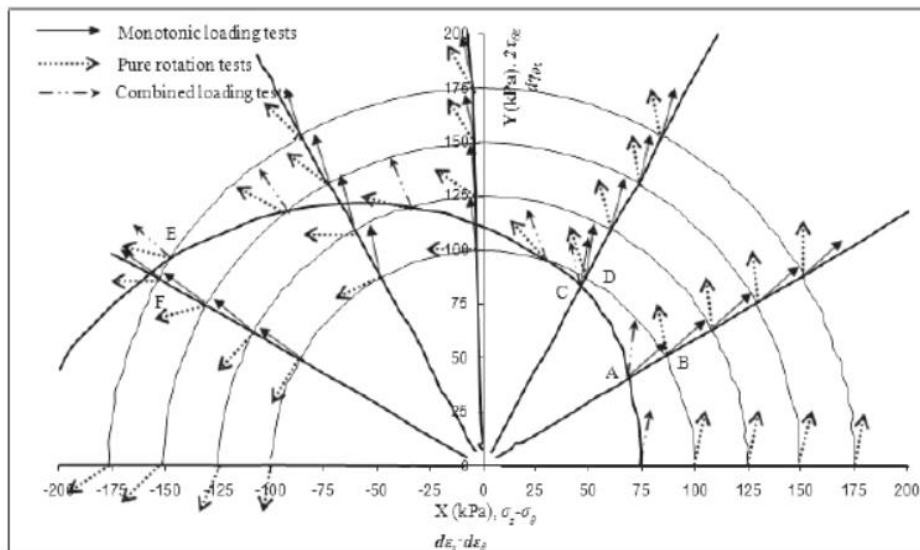
Η Cai (2010), κατά τη διάρκεια εκπόνησης της διδακτορικής της διατριβής, μεταξύ άλλων, μελέτησε πειραματικά τη μη – ομοαξονική συμπεριφορά μίας εγγενώς ανισότροπης άμμου, της άμμου Portaway. Συγκεκριμένα, εκτέλεσε τρεις ομάδες εργαστηριακών δοκιμών στην άμμο στη συσκευή κοίλου κυλίνδρου. Η πρώτη ομάδα των εργαστηριακών δοκιμών αποτελούνταν από δοκιμές μονοτονικής φόρτισης, στις οποίες η q αυξανόταν διαρκώς, ενώ η κατεύθυνση της σ_1 ως προς την κατακόρυφο και το μέγεθος της παραμέτρου b ήταν σταθερές σε κάθε δοκιμή. Η δεύτερη ομάδα αποτελούνταν από δοκιμές καθαρής στρέψης, στις οποίες η q διατηρούνταν σταθερή κατά τη διάρκεια των δοκιμών. Η τρίτη ομάδα αποτελούνταν από δοκιμές στις οποίες εκτελούνταν στροφή των αξόνων των κυρίων τάσεων με παράλληλη αύξηση της q . Στο Σχήμα 2.18 παρουσιάζονται οι διαδρομές των τάσεων της άμμου Portaway για τις τρεις ομάδες δοκιμών στο χώρο των τάσεων $X - Y$ ($(\sigma_z - \sigma_\theta) - 2\tau_{\theta z}$) και τα αντίστοιχα διανύσματα κατευθύνσεων των προσαυξητικών κυρίων παραμορφώσεων. Από τα αποτελέσματα των δοκιμών αποδείχθηκε η μη – ομοαξονική συμπεριφορά της άμμου. Συγκεκριμένα, αποδείχθηκε ότι ο βαθμός της μη – ομοαξονικότητας στις δοκιμές μονοτονικής φόρτισης ήταν αρκετά χαμηλός σε σχέση με τους βαθμούς μη – ομοαξονικότητας που παρατηρήθηκαν στις άλλες δύο ομάδες δοκιμών. Τέλος, διαπιστώθηκε ότι και στις τρεις ομάδες δοκιμών η συμπεριφορά του εδάφους γινόταν όλο και πιο ομοαξονική καθώς αυτό έτεινε προς την αστοχία.



Σχήμα 2.16: Σύγκριση των κατευθύνσεων των προσαυξητικών κυρίων πλαστικών (plastic strain increment direction) και των συνολικών προσαυξητικών κυρίων παραμορφώσεων (total strain increment direction) με τις κατευθύνσεις των ακτινικών διαδρομών των τάσεων της άμμου για τις δοκιμές μονοτονικής φόρτισης (Gutierrez et al., 1991).



Σχήμα 2.17: Σύγκριση των κατευθύνσεων των προσαυξητικών κύριων πλαστικών και των συνολικών παραμορφώσεων με τις κατευθύνσεις των διαδρομών των τάσεων της άμμου σε διάφορα επίπεδα διατμητικών τάσεων για τις δοκιμές καθαρής στρέψης (Gutierrez et al., 1991).

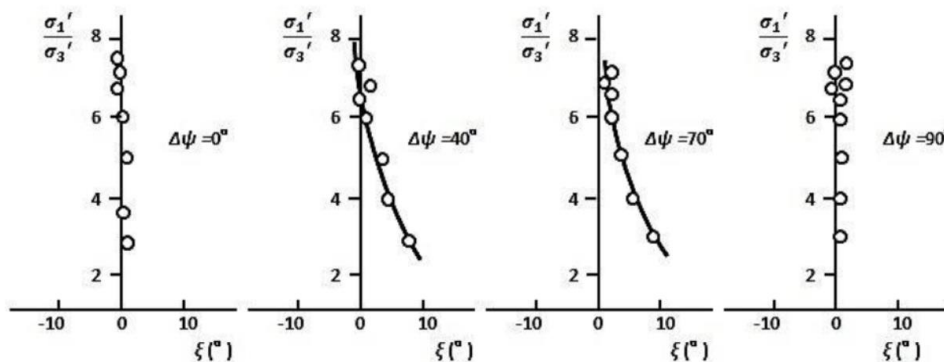


Σχήμα 2.18: Οι διαδρομές των τάσεων και τα διανύσματα κατεύθυνσης των προσαυξητικών κυρίων παραμορφώσεων της άμμου Portaway για τις τρεις ομάδες εργαστηριακών δοκιμών (Cai, 2010).

- Αμμώδη εδάφη, ανισότροπα λόγω φόρτισης

Οι Wong και Arthur (1985), μεταξύ άλλων, μελέτησαν τη μεταβολή του λόγου των σ_1'/σ_3' συναρτήσει του βαθμού μη – ομοαξονικότητας (ξ) σε 4 δοκίμια της ανισότροπης λόγω φόρτισης πυκνής άμμου Leighton Buzzard, τα οποία επαναφορτίστηκαν σε διαφορετικές διευθύνσεις $\Delta\psi$ το κάθε ένα (Σχήμα 2.19). Συγκεκριμένα, η παράμετρος $\Delta\psi$ στο Σχήμα 2.19, αντιπροσωπεύει τη μεταβολή (σε μοίρες) της κατεύθυνσης της σ_1 από το στάδιο φόρτισης – αποφόρτισης στο στάδιο επαναφόρτισης.

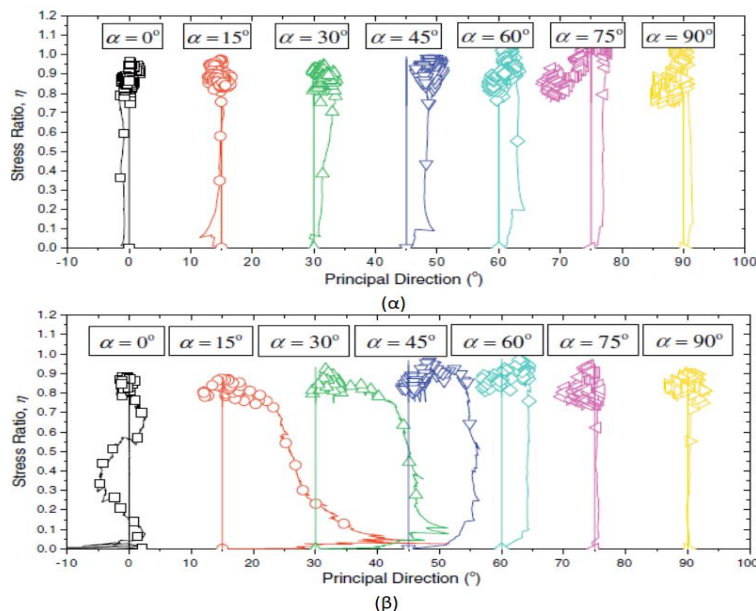
Από το Σχήμα 2.19 αποδεικνύεται ότι η παράμετρος ξ ολοένα και μειώνεται με την αύξηση του λόγου σ_1'/σ_3' , με αποτέλεσμα η συμπεριφορά της να γίνεται σχεδόν ομοαξονική καθώς το έδαφος πλησιάζει προς την αστοχία. Ακόμη, η παράμετρος ξ είναι μεγαλύτερη για τις ενδιάμεσες γωνίες $\Delta\psi$, δηλαδή για $\Delta\psi = 40^\circ$ και $\Delta\psi = 70^\circ$. Σε παραπλήσια αποτελέσματα κατέληξαν επίσης οι Roscoe et al. (1967).



Σχήμα 2.19: Η μεταβολή του λόγου των ενεργών κυρίων τάσεων (σ_1'/σ_3') σε συνάρτηση με το βαθμό μη – ομοαξονικότητας (ξ) της άμμου Leighton Buzzard για διάφορες γωνίες $\Delta\psi$ (Wong & Arthur, 1985).

- Αρχικά ανισότροπα αμμώδη εδάφη

Οι Li και Yu (2009) μελέτησαν τη μη – ομοαξονική συμπεριφορά ενός εγγενώς ανισότροπου και ενός αρχικά ανισότροπου δοκιμίου άμμου σε μονοτονική διάτμηση, εκτελώντας δισδιάστατες αναλύσεις διακριτών στοιχείων. Αρχικά, διαμορφώθηκαν δύο εγγενώς ανισότροπα και ισότροπα στερεοποιημένα δοκίμια άμμου. Το ένα από τα δύο δοκίμια άμμου υποβλήθηκε σε διάτμηση με τη διεύθυνση της σ_1 να είναι κατακόρυφη και εν συνεχεία, αποφορτίστηκε στην ισότροπη κατάσταση τάσεων, αναπτύσσοντας έτσι περαιτέρω ανισοτροπία, λόγω της προφόρτισής του. Τελικά, τα δύο δοκίμια άμμου υποβλήθηκαν σε διάτμηση σε διάφορες κατευθύνσεις της προσαυξητικής παραμόρφωσης. Στο Σχήμα 2.20 απεικονίζεται ο λόγος των ενεργών κυρίων τάσεων ($\eta = \sigma_1'/\sigma_3'$) σε συνάρτηση με τη γωνία α και τη γωνία της προσαυξητικής κύριας παραμόρφωσης (α_{de}) για το εγγενώς ανισότροπο δοκίμιο (Σχήμα 2.20 (α)) και για το προφορτισμένο δοκίμιο άμμου (Σχήμα 2.20 (β)). Από το Σχήμα 2.20 προκύπτει ότι η εγγενώς ανισότροπη άμμος συμπεριφερόταν σχεδόν ομοαξονικά όταν $\alpha = 0^\circ$ ή 90° (μικρή απόκλιση μεταξύ των γωνιών α και α_{de}), ενώ ο βαθμός μη – ομοαξονικότητας αυξανόταν για τιμές που κυμαινόταν μεταξύ των δύο προαναφερθεισών τιμών της γωνίας α . Για την αρχικά ανισότροπη άμμο προκύπτει ότι συμπεριφερόταν σχεδόν ομοαξονικά όταν επαναφορτίστηκε σε κάθετη διεύθυνση σε σχέση με τη διεύθυνση της προφόρτισης ($\alpha = 90^\circ$) και ότι ο βαθμός μη – ομοαξονικότητας ήταν μεγαλύτερος για γωνίες α μικρότερες των 90° . Ακόμη, παρατηρήθηκε ότι ο βαθμός της μη – ομοαξονικότητας στις δοκιμές μονοτονικής διάτμησης ήταν πολύ μικρότερος στο εγγενώς ανισότροπο δοκίμιο συγκριτικά με το αρχικά ανισότροπο δοκίμιο άμμου. Τέλος, τα δύο δοκίμια άμμου συμπεριφερόταν σχεδόν ομοαξονικά καθώς πλησίαζαν στην αστοχία τους ($\eta = \eta_{max}$).



Σχήμα 2.20: Οι γωνίες της μέγιστης κύριας τάσης (α) και της προσαυξητικής κύριας παραμόρφωσης (α_{de}) ως προς την κατακόρυφο για το: (α) εγγενώς ανισότροπο και (β) αρχικά ανισότροπο δοκίμιο άμμου (Li & Yu, 2009).

2.3 Η επίδραση της διεύθυνσης της μέγιστης κύριας τάσης στη μηχανική συμπεριφορά των εδαφών

2.3.1 Εισαγωγή

Τα περισσότερα εδάφη στο πεδίο είναι αρχικά ανισότροπα και συνήθως υποβάλλονται σε τρισδιάστατη ανισότροπη φόρτιση ($\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$), με ταυτόχρονη (συνεχή) στροφή των αξόνων των κυρίων τάσεων. Συγκεκριμένα, η επίδραση της διεύθυνσης του άξονα της μέγιστης κύριας τάσης (σ_1) στη μηχανική συμπεριφορά του εδάφους είναι δυνατόν να διερευνηθεί πειραματικά μέσω της παραμέτρου 'α'. Η παράμετρος 'α' ορίζεται ως η κλίση της μέγιστης κύριας τάσης (σ_1) του εδάφους ως προς την κατακόρυφο.

Κατά τη διάρκεια των τελευταίων δεκαετιών, αρκετοί ερευνητές έχουν καταβάλει προσπάθειες, έτσι ώστε να αξιολογηθεί η επίδραση της μεταβολής της διεύθυνσης της σ_1 στη μηχανική συμπεριφορά του εδάφους, αποδεικνύοντας τελικά την εξαιρετικά σημαντική της επιρροή (Wong και Arthur, 1985; Miura, 1986; Shibuya et al., 2003; Yang, 2013).

Στη διπλωματική εργασία πραγματοποιείται βιβλιογραφική ανασκόπηση μελετών αναφορικά με την επίδραση της παραμέτρου α στη μηχανική συμπεριφορά των εδαφών.

2.3.2 Στραγγιζόμενες συνθήκες

Οι Arthur και Menzies (1972), Oda (1972), Symes (1983), Miura et al. (1986), Symes et al. (1988) και Yang (2013) διερεύνησαν τις επιδράσεις της διεύθυνσης των αξόνων των κυρίων τάσεων στη μηχανική συμπεριφορά αμμωδών εδαφών.

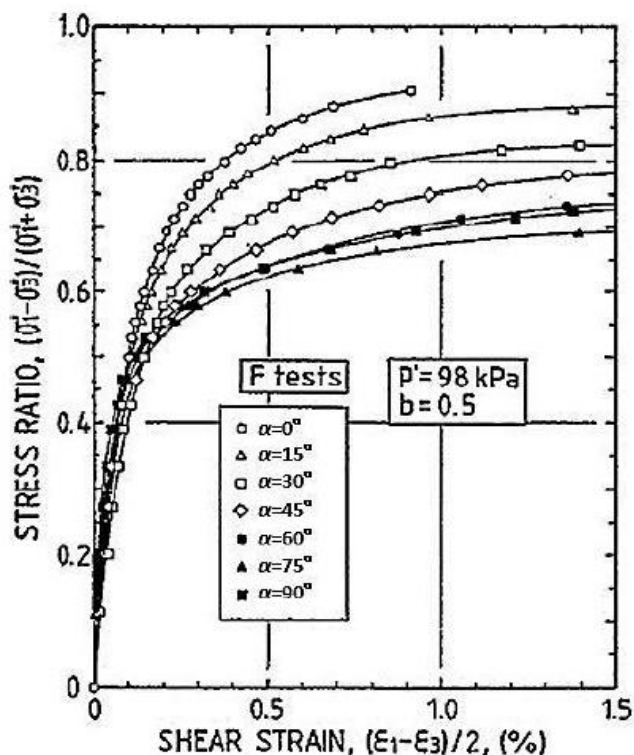
Οι Miura et al. (1986) εκτέλεσαν μια σειρά από δοκιμές κοίλου κυλίνδρου υπό στραγγιζόμενες συνθήκες στην πυκνή άμμο Τογουρα. Αφού τα δοκίμια στερεοποιήθηκαν ισότροπα, υποβλήθηκαν σε μονοτονική φόρτιση με σταθερές τις παραμέτρους α και b (b = 0.5) σε κάθε δοκιμή. Συγκεκριμένα, εκτελέστηκαν 5 δοκιμές προκειμένου να διερευνηθούν 5 διαφορετικές διευθύνσεις της σ_1 ($\alpha = 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 75^\circ, 90^\circ$).

Η σχέση λόγου ενεργών τάσεων – διατμητικής παραμόρφωσης για τις δοκιμές που εκτελέστηκαν στην παρούσα έρευνα παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.21 Από το Σχήμα 2.21 παρατηρείται ότι καθώς η διεύθυνση της σ_1 απέκλινε από την κατακόρυφο, η αντοχή του εδάφους μειωνόταν.

Το Σχήμα 2.21 απεικονίζει το διάγραμμα του μεγίστου λόγου ενεργών τάσεων που παρατηρήθηκε σε κάθε δοκιμή συναρτήσει της παραμέτρου α. Για $\alpha = 0^\circ - 30^\circ$ και $\alpha = 60^\circ - 90^\circ$, δεν παρατηρήθηκαν σημαντικές αλλαγές στις μέγιστες τιμές του λόγου των τάσεων, ωστόσο σημειώθηκαν σημαντικές αλλαγές από $\alpha = 30^\circ - 60^\circ$. Η μεγαλύτερη τιμή του λόγου αυτού εμφανίσθηκε όταν $\alpha = 0^\circ$. Καθώς η γωνία

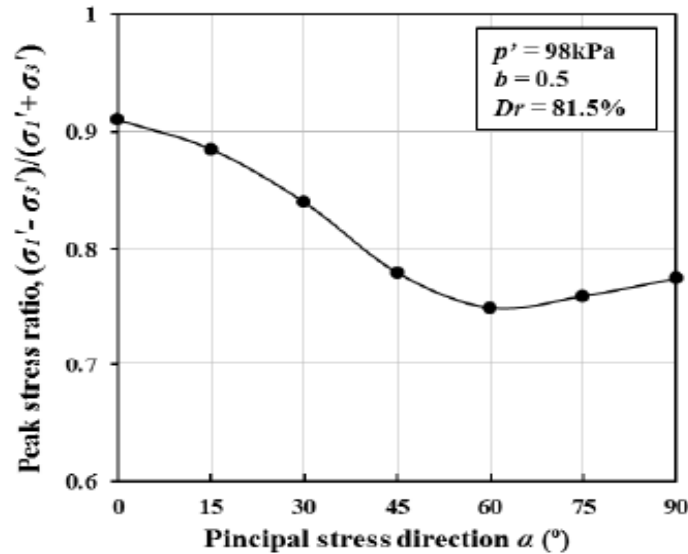
α κυμαίνονταν από τις 0° έως τις 60°, ο μέγιστος λόγος τάσεων μειωνόταν, με την ελάχιστή του τιμή να εμφανίζεται όταν $\alpha = 60^\circ$. Από $\alpha = 60^\circ - 90^\circ$, ο μέγιστος λόγος τάσεων αυξήθηκε ελαφρώς.

Οι Symes et al. (1988) διερεύνησαν, επίσης, την επίδραση της διεύθυνσης των αξόνων των κυρίων τάσεων στη μηχανική συμπεριφορά μίας άμμου, μέσης πυκνότητας, μέσω της εκτέλεσης δοκιμών στρεπτικής διάτμησης υπό στραγγιζόμενες συνθήκες. Τα αρχικά ανισότροπα δοκίμια άμμου, αφού στερεοποιήθηκαν ισότροπα ($p' = 200$ kPa), υποβλήθηκαν σε αυξανόμενη αποκλίνουσα τάση (q) μέχρι την αστοχία, ενώ η παράμετρος 'α' και η παράμετρος b παρέμεναν σταθερές. Συγκεκριμένα, μελετήθηκαν τρεις διαφορετικοί συνδυασμοί των παραμέτρων 'α' και 'b', με την παράμετρο 'α' να λαμβάνει τις τιμές 0°, 24.5° και 45° και την παράμετρο 'b' να είναι ίση με 0.5 σε όλες τις δοκιμές.

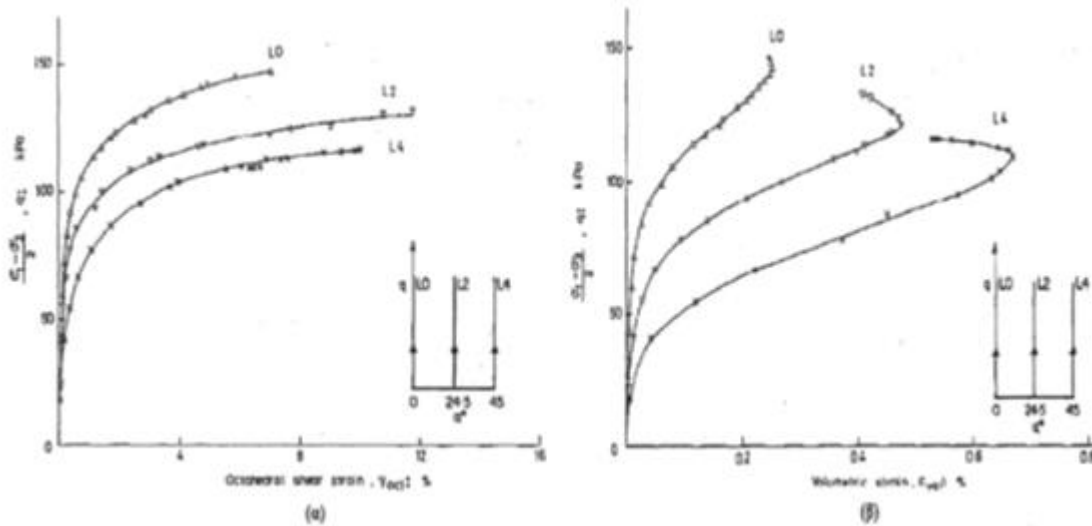


Σχήμα 2.21: Ο λόγος ενεργών τάσεων συναρτήσει της αποκλίνουσας παραμόρφωσης της πυκνής άμμου Τογούρα για διάφορες τιμές της παραμέτρου α (Miura et al., 1986).

Στο Σχήμα 2.23 (α) απεικονίζεται η παράμετρος q ως προς τη διατμητική παραμόρφωση (γ_{oct}) και στο Σχήμα 2.23 (β) η παράμετρος q ως προς την ογκομετρική παραμόρφωση (ϵ_{vol}) για τις τρεις διαφορετικές περιπτώσεις φόρτισης της άμμου που προαναφέρθηκαν. Από το Σχήμα 23 παρατηρείται ότι το δοκίμιο στο οποίο η διεύθυνση της μέγιστης κύριας τάσης ταυτιζόταν με τη διεύθυνση της εναπόθεσης (δοκιμή L0: $\alpha = 0^\circ$) παρουσίασε τις μικρότερες διατμητικές και ογκομετρικές παραμορφώσεις και τη μεγαλύτερη αντοχή συγκριτικά με τα άλλα δύο δοκίμια (δοκιμή L2: $\alpha = 24.5^\circ$ και δοκιμή L4: $\alpha = 45^\circ$).



Σχήμα 2.22: Ο μέγιστος λόγος των τάσεων συναρτήσει της παραμέτρου α για την πυκνά άμμο Τογούρα (Miura κ.α. 1986).



Σχήμα 2.23: Η διατμητική τάση (α) συναρτήσει (α) της διατμητικής παραμόρφωσης (γ_{oct}) και (β) της ογκομετρικής παραμόρφωσης (ϵ_{vol}) για τις δοκιμές στρεπτικής διάτμησης L0 ($\alpha=0^\circ$, $b=0.5$), L2 ($\alpha=24.5^\circ$, $b=0.5$) και L4 ($\alpha=45^\circ$, $b=0.5$) (Symes et al. (1988)).

Ο Yang (2013) μελέτησε πειραματικά τη μη – ομοαξονικότητα και τις επιδράσεις των παραμέτρων ‘ α ’ και ‘ b ’ στη μηχανική συμπεριφορά συγκεκριμένων αμμοδών εδαφών. Οι περισσότερες δοκιμές που εκτελέστηκαν αφορούσαν στη μελέτη της επίδρασης της εγγενούς ανισοτροπίας στη μηχανική συμπεριφορά των άμμων. Ωστόσο, εκτελέστηκε και μικρός αριθμός δοκιμών μονοτονικής φόρτισης σε αρχικά ανισότροπα δοκίμια της άμμου Leighton Buzzard, οι οποίες πρόκειται να αναλυθούν παρακάτω.

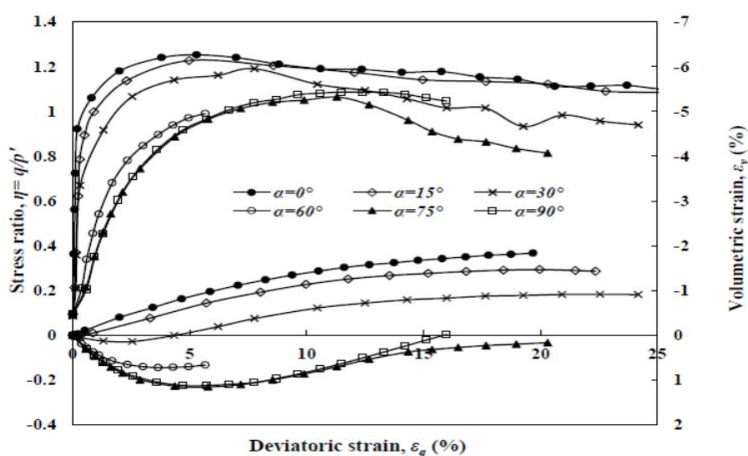
Αρχικά, προετοιμάστηκαν εγγενώς ανισότροπα δοκίμια της άμμου Leighton Buzzard, τα οποία υποβλήθηκαν σε κορεσμό και ισότροπη στερεοποίηση. Ακολούθησε η διάτμησή τους έως την

επίτευξη της μέγιστης τάσης και έπειτα, η αποφόρτισή τους έως την τάση $q = 20$ kPa. Εν συνεχεία, τα δοκίμια επαναφορτίστηκαν σε διαφορετικές διευθύνσεις της μέγιστης κύριας τάσης από εκείνη που είχαν κατά τη διάρκεια της φόρτισής – αποφόρτισής τους.

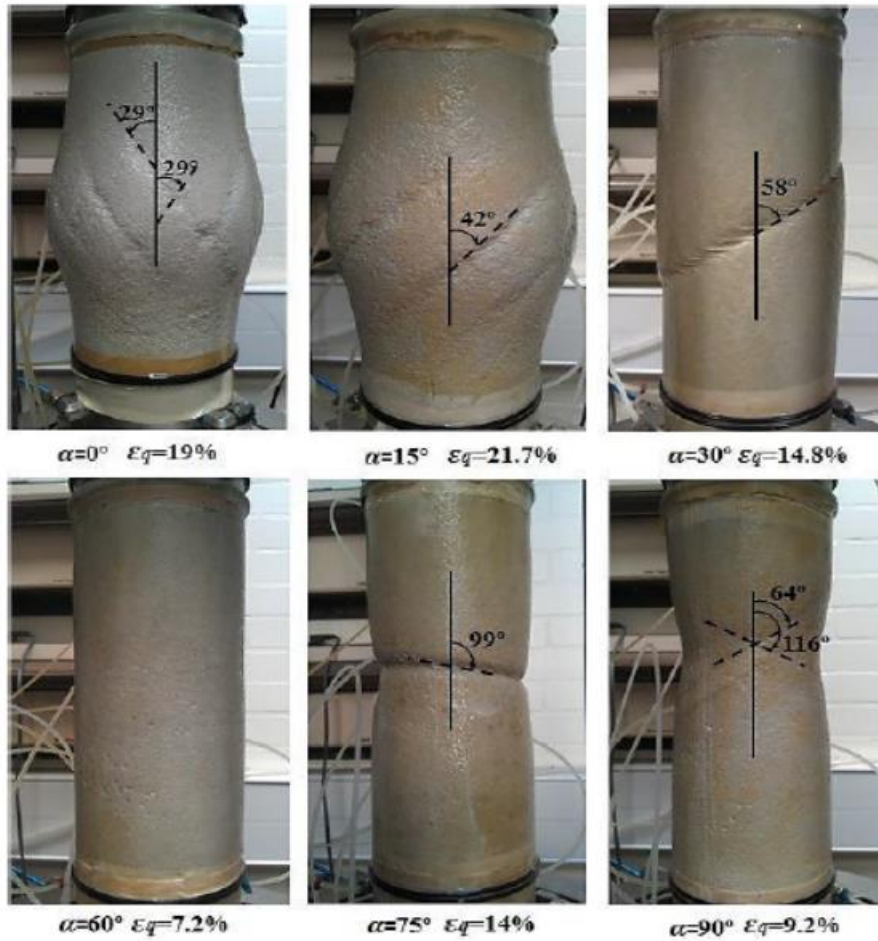
Στο Σχήμα 2.24 παρουσιάζεται ο λόγος των τάσεων (q/p') και η ογκομετρική παραμόρφωση (ϵ_v) συναρτήσει της αποκλίνουσας παραμόρφωσης (ϵ_q) της αρχικά ανισότροπης άμμου για έξι διαφορετικές τιμές της παραμέτρου α . Από το Σχήμα 2.24 παρατηρείται ότι καθώς η διεύθυνση της σ_1 απέκλινε από τη διεύθυνση της εναπόθεσης της άμμου ($\alpha \neq 0^\circ$), η προφορτισμένη άμμος γινόταν λιγότερο δύσκαμπτη και συμπιεζόταν περισσότερο, παρατηρήσεις οι οποίες συμφωνούν με αυτές των ερευνών των Miura et al. (1986) και Symes et al. (1988).

Στο Σχήμα 2.25 παρουσιάζονται φωτογραφίες των ζωνών διάτμησης που σχηματίστηκαν στα δοκίμια άμμου, έπειτα από τη μονοτονική τους φόρτιση σε διάφορες τιμές της παραμέτρου α και του ϵ_q .

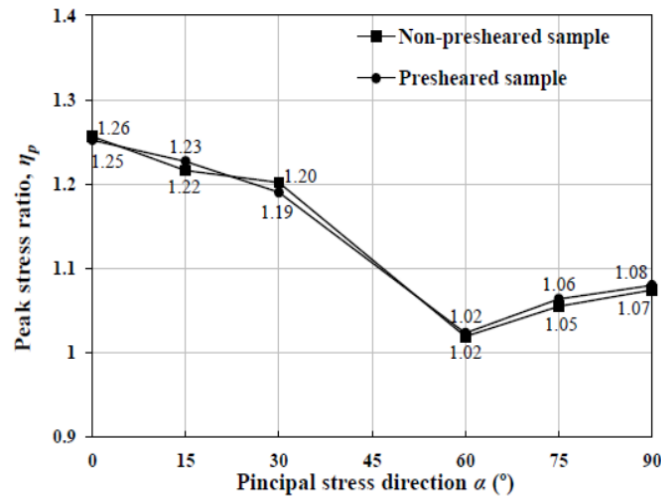
Στο Σχήμα 2.26 παρουσιάζονται οι μέγιστες τιμές του λόγου των κυρίων τάσεων (η_p) συναρτήσει της παραμέτρου α για τα δοκίμια της εγγενώς ανισότροπης και της αρχικά ανισότροπης άμμου Leighton Buzzard. Από το Σχήμα 2.26, παρατηρείται ότι τα δύο δοκίμια παρουσίασαν περίπου τις ίδιες τιμές η_p για τις διάφορες γωνίες α . Έτσι, αποδεικνύεται ότι η ανισοτροπία λόγω φόρτισης δεν είχε επίδραση στην εσωτερική γωνία τριβής της άμμου, όταν η άμμος φθάσει στη μέγιστή της τάση.



Σχήμα 2.24: Ο λόγος των ενεργών τάσεων (η) και η ογκομετρική παραμόρφωση (ϵ_v) συναρτήσει της αποκλίνουσας παραμόρφωσης (ϵ_q) της αρχικά ανισότροπης άμμου σε έξι διαφορετικές τιμές της γωνίας α (Yang, 2013).



Σχήμα 2.25: Οι ζώνες διάτμησης που σχηματίσθηκαν στα αρχικά ανισότροπα δοκίμια της άμμου Leighton Buzzard, έπειτα από τη μονοτονική τους φόρτιση σε διάφορες γωνίες α και αποκλίνουσες παραμορφώσεις ϵ_q (Yang, 2013).



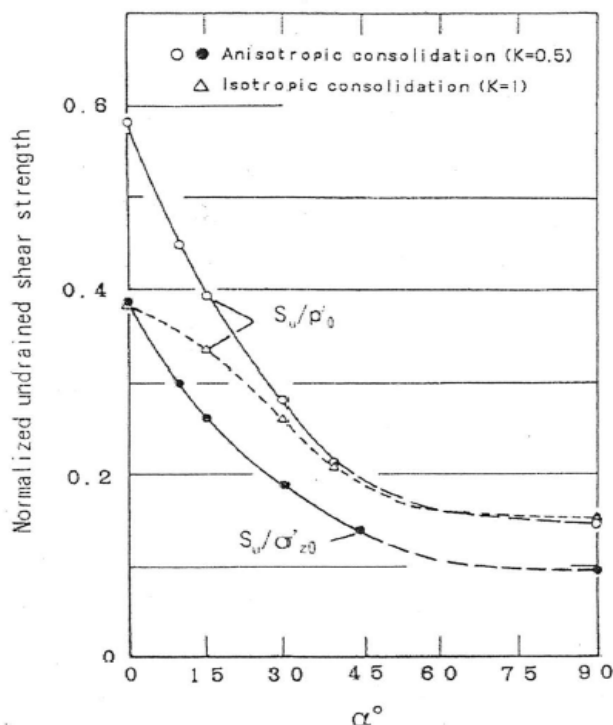
Σχήμα 2.26: Οι μέγιστοι λόγοι τάσεων (η_p) σε συνάρτηση με τις τιμές της παραμέτρου α για το προφορτισμένο (presheared sample) και το εγγενώς ανισότροπο δοκίμιο (non-presheared sample) της άμμου Leighton Buzzard (Yang, 2013).

2.3.3 Αστράγγιστες συνθήκες

Οι Symes et al. (1984), Shibuya (1985), Towhata and Ishihara (1985), Shibuya and Hight (1987a), Yoshimine et al. (1998), Sivathayalan and Vaid (2002) και Shibuya et al. (2003a, 2003b) διερεύνησαν πειραματικά τις επιδράσεις της διεύθυνσης των αξόνων των κυρίων τάσεων στη μηχανική συμπεριφορά διαφόρων αμμοδών εδαφών υπό αστράγγιστες συνθήκες.

Ενδεικτικά, οι Shibuya et al. (2003b) αφού παρασκεύασαν ισότροπα ($K=1$) και ανισότροπα ($K_0=0.5$) στερεοποιημένα δοκίμια της άμμου Ham river με την παράμετρο $\alpha=0^\circ$ και την παράμετρο $b=0$, στη συνέχεια, τα υπέβαλαν σε διάτμηση υπό διάφορες γωνίες α .

Στο Σχήμα 2.27 παρουσιάζεται η μέγιστη αστράγγιστη διατμητική αντοχή της άμμου κανονικοποιημένη ως προς την αρχική ενεργό τάση (S_u/p'_o) σε συνάρτηση με την παράμετρο α για τα ισότροπα και ανισότροπα στερεοποιημένα δοκίμια άμμου. Σύμφωνα με το Σχήμα 2.27, η κανονικοποιημένη αντοχή και των δύο τύπων δοκιμών άμμου παρατηρήθηκε ότι μειωνόταν με την αύξηση της γωνίας α , με σχεδόν μηδενική μείωση για γωνίες α μεγαλύτερες ή ίσες των 60° . Η μείωση της διατμητικής αντοχής ήταν μεγαλύτερη για την ανισότροπα στερεοποιημένη, συγκριτικά με την ισότροπα στερεοποιημένη άμμο.



Σχήμα 2.27: Η κανονικοποιημένη αστράγγιστη διατμητική αντοχή ως προς την αρχική ενεργό τάση (S_u/p'_o) σε συνάρτηση με την παράμετρο α για τους δύο τύπους δοκιμών, δηλαδή το ισότροπα και το ανισότροπα στερεοποιημένο δοκίμιο άμμου (Shibuya et al., 2003b).

2.4 Η επίδραση της παραμέτρου της ενδιάμεσης κύριας τάσης στη μηχανική συμπεριφορά των εδαφών

2.4.1 Εισαγωγή

Η επιτυχής προσομοίωση της πραγματικής εντατικής κατάστασης στο πεδίο μέσω μίας πειραματικής συσκευής, περιλαμβάνει την υποβολή του εδάφους σε τρισδιάστατη φόρτιση (μονοτονική ή και κυκλική), με ταυτόχρονη (συνεχή) στροφή των αξόνων των κυρίων τάσεων και δυνατότητα επιβολής ενδιάμεσης κύριας τάσης σ_2 ($\neq \sigma_3$). Ωστόσο, οι περισσότερες πειραματικές μελέτες εδάφους έως σήμερα περιλαμβάνουν την εκτέλεση απλών εργαστηριακών δοκιμών, οι οποίες δεν αντιπροσωπεύουν την πραγματική εντατική κατάσταση στο πεδίο. Για παράδειγμα, στις τριαξονικές δοκιμές, η ενδιάμεση κύρια τάση (σ_2) είναι ίση είτε με τη μέγιστη (σ_1), είτε με την ελάχιστη κύρια τάση (σ_3), με αποτέλεσμα να μην παρέχεται η δυνατότητα να εξετασθεί η επίδραση της σ_2 στη μηχανική συμπεριφορά του εδάφους.

Η παράμετρος ενδιάμεσης κύριας τάσης 'b', χρησιμοποιείται ευρέως για την πειραματική μελέτη της επίδρασης της σ_2 στη μηχανική συμπεριφορά του εδάφους. Η παράμετρος 'b' (Εξίσωση 2.2) περιγράφει το σχετικό μέγεθος της ενδιάμεσης κύριας τάσης (σ_2) ως προς τη μέγιστη (σ_1) και την ελάχιστη κύρια τάση (σ_3) και λαμβάνει τιμές από 0-1.

$$b = \sigma_2 - \sigma_3 / \sigma_1 - \sigma_2 \quad (2.2)$$

Αρκετοί ερευνητές στο παρελθόν (Bjerrum και Kummeneje 1961, Cornforth 1964, Vaid και Campanella 1974), παρατήρησαν τις μεγάλες αποκλίσεις μεταξύ των αποτελεσμάτων των τριαξονικών δοκιμών συμπίεσης, όπου $b=0$ και των δοκιμών επίπεδης παραμόρφωσης ($b \approx 0,2 - 0,3$), με αποτέλεσμα να συνειδητοποιήσουν τη μεγάλη επίδραση της σ_2 στη μηχανική συμπεριφορά του εδάφους. Η συνειδητοποίηση αυτή πυροδότησε την εκτέλεση πλήθος νέων αριθμητικών και πειραματικών προσπαθειών για την περαιτέρω διερεύνηση της παραμέτρου b (Zdravkovic, 1996; Yoshimine et al., 1998, Cai, 2010; Yang, 2013; Tian et al., 2018).

Στη διπλωματική εργασία πραγματοποιείται βιβλιογραφική ανασκόπηση μελετών αναφορικά με την επίδραση της σ_2 στη μηχανική συμπεριφορά διαφόρων εδαφών.

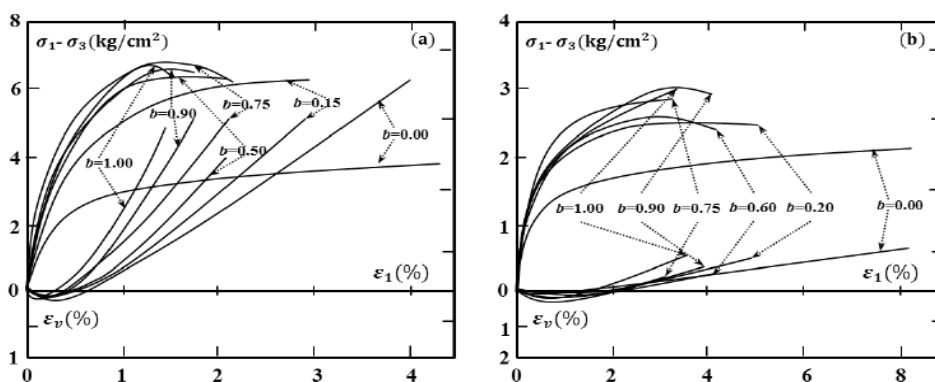
2.4.2 Στραγγιζόμενες συνθήκες

Οι Lade & Duncan (1973) μελέτησαν την επίδραση της παραμέτρου b στη μηχανική συμπεριφορά δοκιμών της άμμου Monterey χαμηλής και υψηλής πυκνότητας. Αργότερα οι Symes (1983) και Sayao & Vaid (1996) μελέτησαν επίσης, την επιρροή του b στην μέσης πυκνότητας άμμο Ham river. Τα αποτελέσματα των προαναφερθέντων ερευνών, που παρουσιάζουν τόσο ομοιότητες, όσο και διαφορές μεταξύ τους, παρατίθενται παρακάτω.

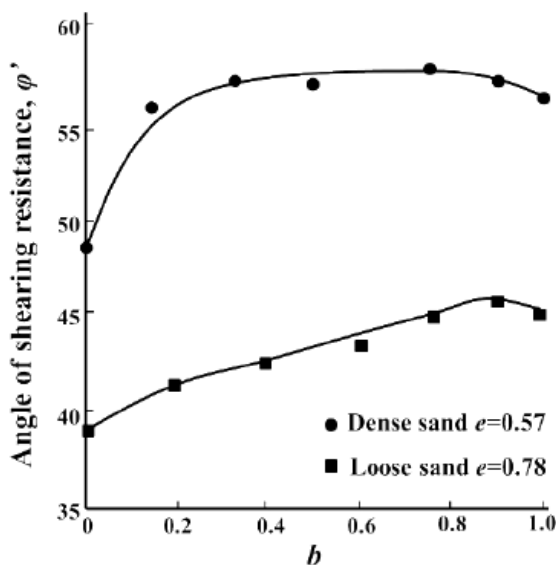
Οι Lade & Duncan (1973) χρησιμοποιώντας μία κυβική τριαξονική συσκευή με συνδυασμό εύκαμπτων και άκαμπτων ορίων, διερεύνησαν τις επιδράσεις της μεταβολής της παραμέτρου b στη συμπεριφορά τάσης-παραμόρφωσης της πυκνής, αλλά και της χαλαρής άμμου Monterey.

Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στα Σχήματα 2.28 (α) και 2.28 (β) δείχνουν ότι η κλίση της καμπύλης της τάσης-παραμόρφωσης αυξανόταν, η παραμόρφωση έως την αστοχία μειωνόταν και ο ρυθμός διαστολής αυξανόταν με την αύξηση της τιμής της παραμέτρου b , τόσο για τα πυκνά όσο και για τα χαλαρά δοκίμια της άμμου.

Όπως φαίνεται από το Σχήμα 2.29, η γωνία διατμητικής αντοχής ϕ' αυξανόταν σημαντικά από $b=0$ (συνθήκες αξονοσυμμετρικής φόρτισης) έως $b \approx 0,2 - 0,3$ (συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης). Περαιτέρω αύξηση του b οδήγησε σε επιπλέον αύξηση του ϕ' , έως ότου το ϕ' φθάσει στην υψηλότερή του τιμή, η οποία είναι κοντά στο $b=0,8$. Τέλος, για τιμές του b μεγαλύτερες του 0.8 το ϕ' άρχισε να μειώνεται.



Σχήμα 2.28: Σχέσεις αποκλίνουσας τάσης ($\sigma_1-\sigma_3$) – μέγιστης κύριας παραμόρφωσης (ϵ_1) και ογκομετρικής παραμόρφωσης (ϵ_v) – ϵ_1 για διάφορες τιμές του b της άμμου Monterey: (α) υψηλής και (β) χαμηλής πυκνότητας (Lade και Duncan, 1973).



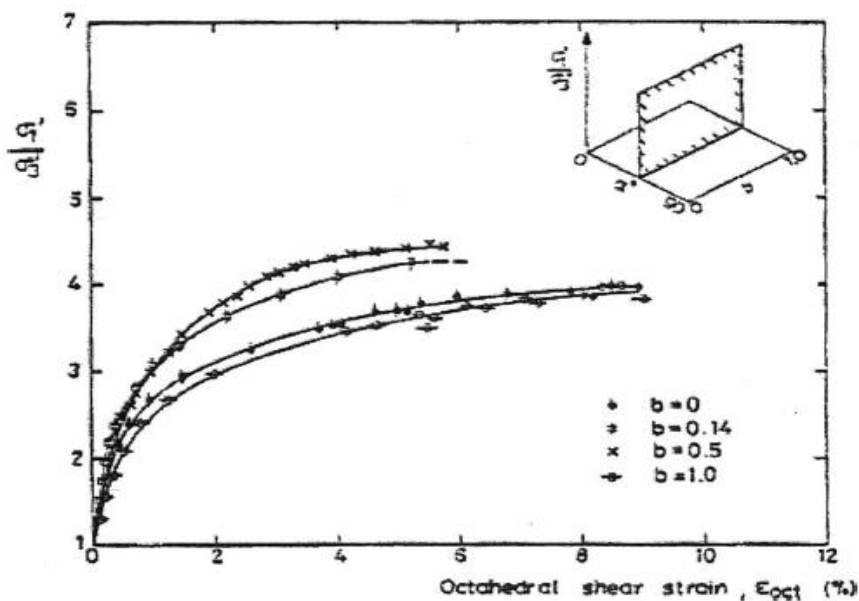
Σχήμα 2.29: Η γωνία διατμητικής αντοχής (ϕ') συναρτήσεως της παραμέτρου b , τόσο για την πυκνή όσο και για τη χαλαρή άμμο Monterey (Lade και Duncan, 1973).

Ο Symes (1983), κατά τη διάρκεια εκπόνησης της διδακτορικής του διατριβής, μεταξύ άλλων, διαμόρφωσε τέσσερα αρχικά ανισότροπα, μέσης πυκνότητας δοκίμια της άμμου Ham River. Στη συνέχεια, υπέβαλε τα δοκίμια σε ισότροπη στερεοποίηση και ακολούθως σε διάτμηση. Κατά τη διάτμηση, η παράμετρος $\alpha = 45^\circ$ για όλα τα δοκίμια, ενώ η παράμετρος b , ήταν σταθερή σε κάθε δοκιμή, αλλά διέφερε από δοκίμιο σε δοκίμιο, λαμβάνοντας τις ακόλουθες τιμές: 0, 0.14, 0.5, 1.

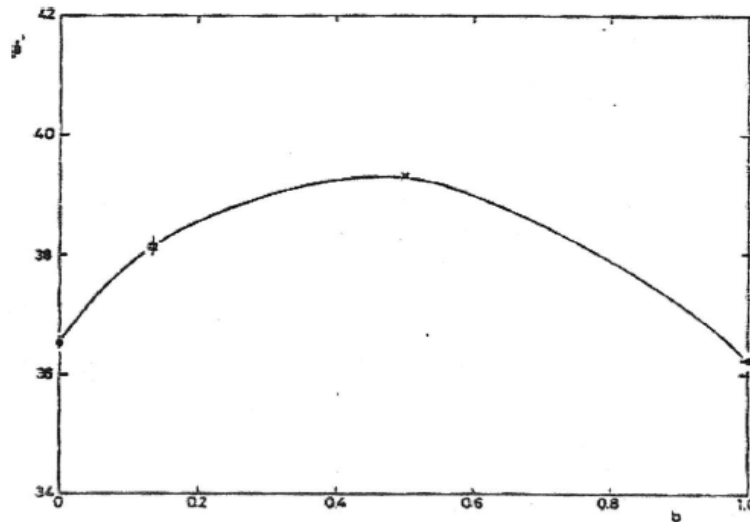
Στο Σχήμα 2.30 απεικονίζεται η σχέση του λόγου σ_1'/σ_3' ως προς την ογκομετρική παραμόρφωση (ϵ_{oct}) για τα τέσσερα δοκίμια άμμου που προαναφέρθηκαν. Από το Σχήμα 2.30, παρατηρείται ότι τα δοκίμια με $b=0.14$ και $b=0.5$, τα οποία παρουσίασαν παρόμοιες αποκρίσεις, εμφάνισαν μεγαλύτερες τιμές αντοχής και μικρότερες ογκομετρικές παραμορφώσεις συγκριτικά με τα άλλα δύο δοκίμια ($b=0$ και $b=1$).

Στο Σχήμα 2.31 παρουσιάζεται η καμπύλη της γωνίας ϕ' σε συνάρτηση με την παράμετρο 'b' για τα τέσσερα δοκίμια άμμου. Κάθε δοκίμιο αντιπροσωπεύεται από μοναδικό σημείο στο Σχήμα 2.31. Από το Σχήμα 2.31 παρατηρείται ότι οι μεγαλύτερες τιμές ϕ' εμφανίσθηκαν σε συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης ($b= 0.3 - 0.5$).

Σε ανάλογα αποτελέσματα κατέληξαν οι Sayao και Vaid (1996), μέσω της πειραματικής τους μελέτης.



Σχήμα 2.30: Ο λόγος των ενεργών κυρίων τάσεων (σ_1'/σ_3') συναρτήσει της ογκομετρικής παραμόρφωσης (ϵ_{oct}) για τα τέσσερα δοκίμια της άμμου Ham River, τα οποία διαφοροποιούνται ως προς τις τιμές της παραμέτρου b (Symes, 1983).



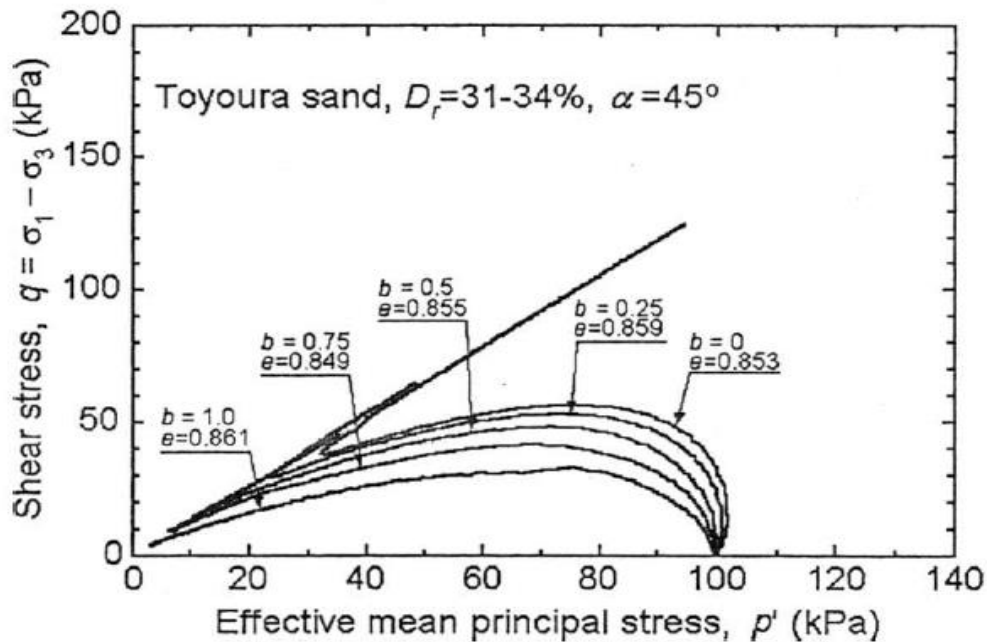
Σχήμα 2.31: Η γωνία εσωτερικής τριβής (ϕ') συναρτήσκει της παραμέτρου b για τα τέσσερα δοκίμια της άμμου Ham River (Symes, 1983).

2.4.3 Αστέραγγιστες συνθήκες

Οι Yoshimine et al. (1998) και Shibuya et al. (2003a) μελέτησαν την επίδραση της παραμέτρου 'b' στη μηχανική συμπεριφορά των αμμωδών εδαφών, μέσω της εκτέλεσης δοκιμών μονοτονικής στρεπτικής διάτμησης υπό σταθερή γωνία α .

Στο Σχήμα 2.35 παρουσιάζεται η σχέση της τάσης q ως προς τη μέση ενεργή τάση (p') για τη χαλαρή άμμο Τογουρα υπό σταθερή γωνία α ($\alpha=45^\circ$) και για πέντε διαφορετικές τιμές της παραμέτρου 'b', όπως προσδιορίστηκε από τους Yoshimine et al. (1998). Σύμφωνα με το Σχήμα 2.35, η διατμητική αντοχή της άμμου μειωνόταν με την αύξηση της τιμής της παραμέτρου 'b', με τη μέγιστη αντοχή να εμφανίζεται για τιμή $b=0$.

Σε παρόμοια αποτελέσματα κατέληξαν οι Shibuya et al. (2003a) μέσω της πειραματικής τους μελέτης.



Σχήμα 2.32: Η μεταβολή της αποκλίνουσας τάσης (q) ως προς τη μέση ενεργή τάση (p') κατά τη στρεπτική διάτμηση της χαλαρής άμμου Toyoura, με $\alpha=45^\circ$ και για πέντε διαφορετικές τιμές της παραμέτρου b υπό αστράγγιστες συνθήκες (Yoshimine et al., 1998).

2.5 Επίδραση της συνεχούς στροφής των αξόνων των κυρίων τάσεων στη μηχανική συμπεριφορά των εδαφών

2.5.1 Εισαγωγή

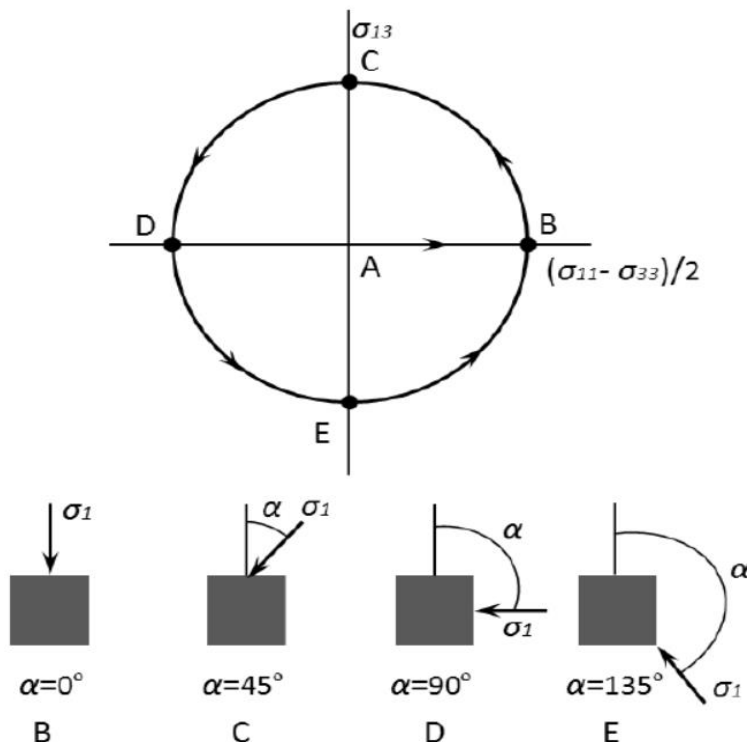
Το έδαφος υποβάλλεται πολύ συχνά σε φορτίσεις, όπως είναι οι φορτίσεις του σεισμού και των κυματισμών, οι οποίες προκαλούν τη συνεχή στροφή των διευθύνσεων των κυρίων τάσεων.

Η συνεχής στροφή των διευθύνσεων των κυρίων τάσεων (rotational shear), ορίζεται ως η εντατική κατάσταση κατά την οποία λαμβάνει χώρα η συνεχής στροφή των αξόνων των κυρίων τάσεων (σ_1 , σ_2 , σ_3) υπό σταθερή αποκλίνουσα τάση ($q = \sigma_1 - \sigma_3$).

Στο Σχήμα 2.33 παρουσιάζεται χαρακτηριστικό παράδειγμα συνεχούς στροφής της διεύθυνσης της τάσης σ_1 στο χώρο των τάσεων $X - Y$ ($(\frac{\sigma_{11} - \sigma_{33}}{2}) - \sigma_{13}$) από τη μελέτη του Yang (2013).

Κατά τη διάρκεια των τελευταίων δεκαετιών αρκετοί ερευνητές έχουν καταβάλλει προσπάθειες για την πειραματική ή / και αριθμητική προσομοίωση συνθηκών φόρτισης που προκαλούν συνεχή στροφή των διευθύνσεων των κυρίων τάσεων στο έδαφος, με στόχο τη διερεύνηση των επιδράσεών τους στη μηχανική του συμπεριφορά (Arthur et al., 1980; Symes et al., 1984; Nakata et al., 1998; Nakata et al., 1998; Tong et al., 2010; Tian et al., 2018).

Ακολουθεί σύντομη βιβλιογραφική ανασκόπηση ορισμένων πειραματικών και αριθμητικών μελετών αναφορικά με την επίδραση της συνεχούς στροφής των αξόνων των κυρίων τάσεων στη μηχανική συμπεριφορά των αμμωδών εδαφών.



Σχήμα 2.33: Η συνεχής στροφή του άξονα της μέγιστης κύριας τάσης (σ_1) υπό σταθερή αποκλίνουσα τάση (q) στο επίπεδο τάσεων $X-Y$ ($(\frac{\sigma_{11} - \sigma_{33}}{2}) - \sigma_{13}$) (Yang, 2013).

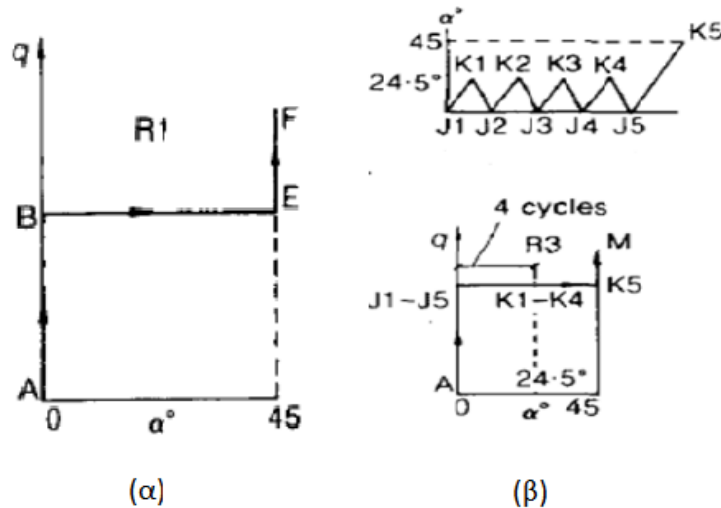
2.5.2 Ασπράγγιστες συνθήκες

Οι Arthur et al. (1980) μελέτησαν την επίδραση της μονοτονικής διάτμησης με συνεχή μεταβολή της διεύθυνσης της σ_1 στη μηχανική συμπεριφορά της άμμου Leighton Buzzard, με τη χρήση της συσκευής άμεσης διάτμησης. Η διεύθυνση της σ_1 ήταν αρχικά κατακόρυφη ($\alpha = 0^\circ$) και έπειτα, μεταβαλλόταν συνεχώς έως ότου $\alpha = 70^\circ$. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η παραμόρφωση και η αντοχή της άμμου επηρεάζονται από προηγούμενη στροφή της διεύθυνσης της σ_1 .

Οι Symes et al. (1984), επίσης, διερεύνησαν την επίδραση της συνεχούς στροφής του άξονα της σ_1 στη μηχανική συμπεριφορά της χαλαρής έως μέσης πυκνότητας, αρχικά ανισότροπης άμμου Ham River, μέσω της εκτέλεσης δύο ομάδων δοκιμών στρεπτικής διάτμησης στη συσκευή κοίλου κυλίνδρου. Στην πρώτη ομάδα, το ένα από τα δύο δοκίμια άμμου που χρησιμοποιήθηκαν υποβλήθηκε αρχικά, σε διάτμηση με $\alpha=0^\circ$ έως ότου η τάση q φθάσει την τιμή των 39 kPa. Στη συνέχεια, η γωνία α μεταβαλλόταν συνεχώς υπό σταθερή $q = 39$ kPa, έως ότου φθάσει στην τελική γωνία των 45° . Τέλος, το δοκίμιο οδηγήθηκε στην αστοχία με διατήρηση της γωνίας α στις 45° και συνεχή αύξηση της q

(Σχήμα 2.34 (α)). Στη δεύτερη ομάδα, το δοκίμιο υποβλήθηκε αρχικά, σε διάτμηση με $\alpha=0^\circ$ έως ότου η τάση q φθάσει την τιμή των 61 kPa. Στη συνέχεια, η γωνία α μεταβαλλόταν συνεχώς και ανακυκλικά, από την τιμή των 0° έως την τιμή των 24.5° και αντιστρόφως, υπό σταθερή $q = 61$ kPa, έως ότου το δοκίμιο άμμου φθάσει στην αστοχία. Συγκεκριμένα, εκτελέστηκαν 4 κύκλοι στροφής του άξονα της σ_1 (Σχήμα 2.34 (β)). Η παράμετρος b διατηρήθηκε σταθερή κατά τη διάρκεια εκτέλεσης των δύο δοκιμών ($b = 0.5$).

Η συνεχής μεταβολή της παραμέτρου α συντέλεσε στην ανάπτυξη υπερπιέσεων του νερού των πόρων και μεταβολών στην παραμόρφωση της άμμου. Οι αλλαγές αυτές στη συμπεριφορά της άμμου ήταν πιο έντονες στις δοκιμές ανακυκλικής φόρτισης και οδήγησαν στην αστοχία της άμμου.



Σχήμα 2.34: Η μεταβολή της αποκλίνουσας τάσης (q) συναρτήσει της γωνίας ' α ' για τις δοκιμές στρεπτικής διάτμησης με συνεχή μεταβολή της γωνίας α , υπό: (α) μονοτονικές συνθήκες και (β) ανακυκλικές συνθήκες (Symes et al., 1984).

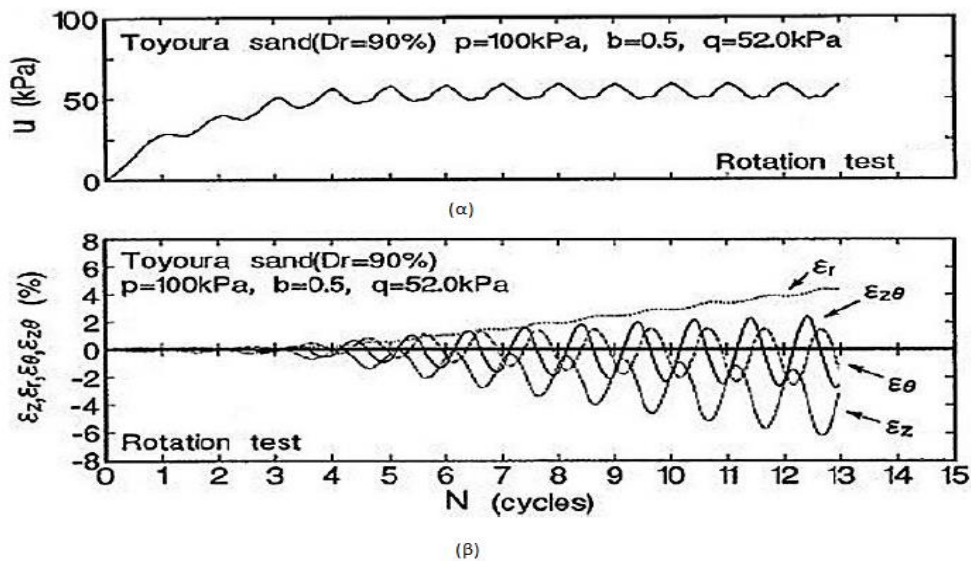
Οι Ishihara και Towhata (1983) προσπάθησαν να μελετήσουν πειραματικά τη συμπεριφορά αποθέσεων άμμου στον πυθμένα της θάλασσας, όταν επιδρούν σε αυτές οι διάφορες ημιτονοειδείς φορτίσεις των κυματισμών. Έτσι, εκτέλεσαν μια σειρά από τριαξονικές δοκιμές στρεπτικής διάτμησης σε μία άμμο, υπό σταθερή q και με τη γωνία ' α ' να μεταβάλλεται συνεχώς στο εύρος των 90° .

Τα αποτελέσματα των δοκιμών έδειξαν την ανάπτυξη πιέσεων του νερού των πόρων και πλαστικών παραμορφώσεων, οι οποίες δύναται να οδηγήσουν στη ρευστοποίηση του εδάφους. Η συμπεριφορά της άμμου ήταν μη - ομοαξονική, καθώς η διεύθυνση της προσαυξητικής παραμόρφωσης δεν ταυτιζόταν με τις διευθύνσεις της τάσης και της προσαυξητικής τάσης. Στην περίπτωση όπου η παραμόρφωση του εδάφους ήταν ελαστική, η διεύθυνση της προσαυξητικής παραμόρφωσης θα ήταν η ίδια με τη διεύθυνση της προσαυξητικής τάσης. Εάν η παραμόρφωση του εδάφους ήταν πλαστική, τότε η διεύθυνση της προσαυξητικής παραμόρφωσης θα ήταν παράλληλη με τη διεύθυνση της επιβαλλόμενης τάσης. Ωστόσο, η παραμόρφωση της άμμου που μελετήθηκε αποτελούνταν από δύο συνιστώσες παραμόρφωσης, τη συνιστώσα της ελαστικής και τη συνιστώσα της πλαστικής παραμόρφωσης. Η συνιστώσα της ελαστικής παραμόρφωσης κυριαρχούσε κατά τα πρώτα στάδια φόρτισης του εδάφους, με αποτέλεσμα η διεύθυνση της προσαυξητικής παραμόρφωσης να τείνει

προς τη διεύθυνση της προσαυξητικής τάσης. Η συνιστώσα της πλαστικής παραμόρφωσης κυριαρχούσε σε επόμενα βήματα της φόρτισης, με αποτέλεσμα η διεύθυνση της συνιστώσας της προσαυξητικής παραμόρφωσης να τείνει να γίνει παράλληλη με τη διεύθυνση της επιβαλλόμενης τάσης. Στα τελευταία βήματα της φόρτισης και κατά την έναρξη της ρευστοποίησης του εδάφους, η παραμόρφωση του ήταν σχεδόν εξ' ολοκλήρου πλαστική.

Οι Nakata et al. (1998) εξέτασαν την επίδραση της συνεχούς στροφής των αξόνων της σ_1 στην αστράγγιστη διατμητική αντοχή της άμμου Toyoura, για διάφορες σχετικές πυκνότητες (D_r), μέσω της εκτέλεσης δοκιμών στρεπτικής διάτμησης. Μετά την παρασκευή των δοκιμών άμμου, αυτά στερεοποιήθηκαν ισότροπα ($p'=100$ kPa) και υποβλήθηκαν σε δοκιμές μονοτονικής στρεπτικής διάτμησης με συνεχή στροφή του άξονα της σ_1 και με την παράμετρο 'b' σταθερή και ίση με 0.5 και $q=52$ kPa.

Στο Σχήμα 2.35 παρουσιάζονται οι μεταβολές της πίεσης του νερού των πόρων (Σχήμα 2.35 (α)) και των συνιστωσών της αξονικής (ϵ_z), ακτινικής (ϵ_r), περιφερειακής (ϵ_θ) και διατμητικής ($\epsilon_{z\theta}$) παραμόρφωσης (Σχήμα 2.35 (β)) σε συνάρτηση με τον αριθμό των κύκλων φόρτισης (N) για την πυκνή άμμο Toyoura. Από το Σχήμα 2.35 (α) παρατηρείται ότι η ανάπτυξη των πιέσεων του νερού των πόρων εμφανίσθηκε κυρίως κατά τη διάρκεια των πρώτων κύκλων φόρτισης. Από το Σχήμα 2.35 (β) παρατηρείται ότι τα μέτρα των παραμορφώσεων αυξανόταν συνεχώς με την αύξηση του N.



Σχήμα 2.35: (α) Η πίεση του νερού των πόρων (u) και (β) οι συνιστώσες των παραμορφώσεων συναρτήσει του αριθμού των κύκλων φόρτισης (N) για το πυκνό δοκίμιο της άμμου Toyoura (Nakata et al., 1998).

Η Κωνσταντίνου (2013), μεταξύ άλλων, μελέτησε πειραματικά την επίδραση της στρεπτικής διάτμησης με συνεχή μεταβολή της διεύθυνσης των αξόνων των κυρίων τάσεων στη μηχανική συμπεριφορά των ανισότροπα στερεοποιημένων αμμωδών εδαφών υπό αστράγγιστες συνθήκες.

Η μηχανική συμπεριφορά των ανισότροπα στερεοποιημένων δοκιμών άμμου, στα οποία υποβλήθηκε συνεχής μεταβολή της γωνίας α από τις 0° στις 30° , συγκρίθηκε με τη συμπεριφορά των ισότροπα στερεοποιημένων και ανισότροπα στερεοποιημένων δοκιμών άμμου, στα οποία η γωνία $\alpha = 45^\circ$ κατά τη διάτμηση. Τα σημαντικότερα συμπεράσματα που προέκυψαν είναι τα ακόλουθα:

1. Η συνεχής μεταβολή των διευθύνσεων της σ_1 στα ανισότροπα στερεοποιημένα δοκίμια άμμου, δεν επηρέασε τις τιμές της γωνίας διατμητικής αντοχής στη γραμμή αστοχίας και στη γραμμή αλλαγής φάσης.
2. Τα ανισότροπα στερεοποιημένα δοκίμια, στα οποία εφαρμόσθηκε συνεχής μεταβολή της γωνίας α , εμφάνισαν μεγαλύτερες κανονικοποιημένες τιμές της διατμητικής αντοχής ως προς την τάση στερεοποίησης και μικρότερες κανονικοποιημένες τιμές της υπερπίεσης του νερού των πόρων ως προς την τάση στερεοποίησης συγκριτικά με τις αντίστοιχες τιμές στα ισότροπα στερεοποιημένα δοκίμια άμμου και στα ανισότροπα στερεοποιημένα δοκίμια άμμου, στα οποία η γωνία $\alpha=45^\circ$ κατά τη διάτμηση. Η συμπεριφορά αυτή ενδέχεται να αποδίδεται στις μικρότερες τιμές που λάμβανε η γωνία α κατά τη φόρτιση των ανισότροπα στερεοποιημένων δοκιμών με συνεχή μεταβολή της α , συγκριτικά με τις άλλες δύο περιπτώσεις φόρτισης που μελετήθηκαν ($\alpha = 45^\circ$).
3. Κατά τη στρεπτική διάτμηση των ανισότροπα στερεοποιημένων δοκιμών άμμου με συνεχή μεταβολή της α , παρατηρήθηκε ότι ανεξάρτητα από το επίπεδο της τάσης στερεοποίησης, ίδιες τιμές της γωνίας α ορίζαν στον τασικό χώρο $t - p'$ ευθείες γραμμές, οι οποίες διέρχονταν από την αρχή των αξόνων.

2.5.3 Στραγγιζόμενες συνθήκες

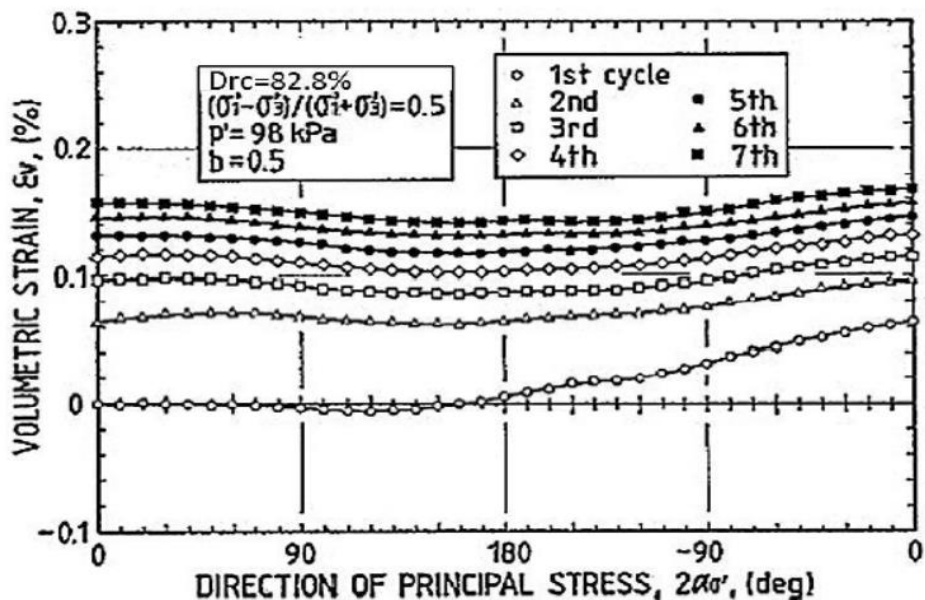
Οι Miura et al. (1986) διερεύνησαν πειραματικά την επίδραση της συνεχούς στροφής των αξόνων της σ_1 υπό σταθερή q στη μηχανική συμπεριφορά της πυκνής άμμου Toyoura υπό στραγγιζόμενες συνθήκες.

Αφού προετοιμάστηκαν τα δοκίμια άμμου, υποβλήθηκαν σε ισότροπη στερεοποίηση και στη συνέχεια, σε στρεπτική διάτμηση με συνεχή και ανακυκλική μεταβολή της διεύθυνσης της σ_1 . Συγκεκριμένα, εφαρμόσθηκαν επτά κύκλοι συνεχούς στροφής του άξονα της σ_1 στο εύρος $0-90^\circ$. Κατά τη διάρκεια των δοκιμών, η παράμετρος b διατηρούνταν σταθερή ($b=0.5$), όπως και ο λόγος τάσεων, ο οποίος ήταν ίσος με 0.5 .

Στο Σχήμα 2.36 παρουσιάζονται οι μεταβολές των ογκομετρικών παραμορφώσεων (ϵ_v) ως προς τις κατευθύνσεις της μέγιστης κύριας τάσης, όπως προέκυψαν για κάθε έναν από τους επτά κύκλους φόρτισης της άμμου.

Από το Σχήμα 2.36 παρατηρείται ότι η άμμος παρουσίασε κυρίως συστολικές παραμορφώσεις (θετικές τιμές παραμορφώσεων) κατά τη συνεχή μεταβολή της διεύθυνσης της σ_1 και ότι το μεγαλύτερο μέρος αυτών εμφανίσθηκε κατά τον πρώτο κύκλο φόρτισης. Επίσης, η άμμος παρουσίασε μη – ομοαξονική συμπεριφορά, υποδεικνύοντας ότι η αρχική ανισοτροπία που διαμορφώθηκε έως τη

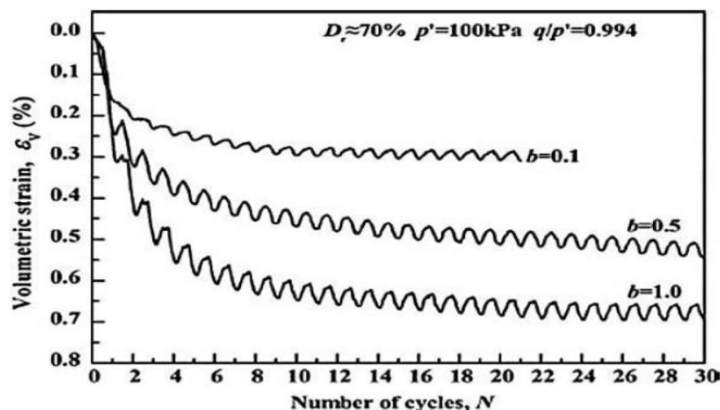
φάση της στερεοποίησης της, δεν εξαφανίστηκε λόγω της συνεχούς στροφής των αξόνων της σ_1 , αλλά συνέχισε να έχει σημαντική επίδραση στη μετέπειτα μηχανική της συμπεριφορά.



Σχήμα 2.36: Οι αναπτυσσόμενες ογκομετρικές παραμορφώσεις (ε_v) ως προς την κατεύθυνση της μέγιστης κύριας τάσης, για κάθε έναν από τους επτά συνεχόμενους κύκλους φόρτισης της πυκνής άμμου Τογουρα (Miura et al., 1986).

Σε παρόμοια αποτελέσματα με τους Miura et al. (1986) κατέληξαν οι Tong et al. (2010), οι οποίοι διερεύνησαν πειραματικά την επίδραση της στροφής των αξόνων των κυρίων τάσεων στη μηχανική συμπεριφορά της πυκνής άμμου Τογουρα, υπό σταθερή παράμετρο b και τάση q σε κάθε δοκιμή.

Στο Σχήμα 2.37 παρουσιάζονται οι ογκομετρικές παραμορφώσεις (ε_v) συναρτήσει του αριθμού των κύκλων φόρτισης (N) της πυκνής άμμου Τογουρα, για τρεις διαφορετικές τιμές της παραμέτρου b (0.1, 0.5, 1). Από το Σχήμα 3.37 παρατηρείται ότι αναπτύσσονται συστολικές παραμορφώσεις στην άμμο Τογουρα, με το μεγαλύτερο μέρος αυτών να αναπτύσσεται στους πρώτους κύκλους φόρτισης.

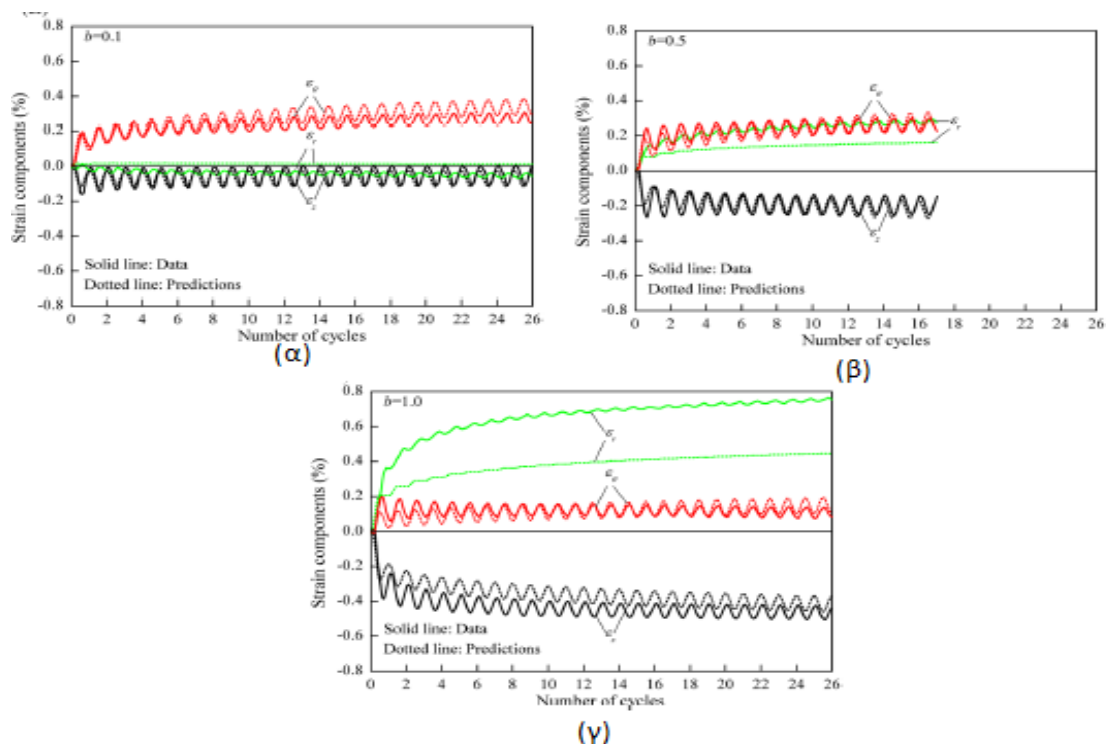


Σχήμα 2.37: Οι ογκομετρικές παραμορφώσεις (ε_v) της πυκνής άμμου Τογουρα συναρτήσει του αριθμού των κύκλων φόρτισης (N) για $b = 0.1, 0.5$ και 1 (Tong et al., 2010).

Οι Tian et al. (2018) ανέπτυξαν ένα ανισότροπο καταστατικό μοντέλο εδάφους (Unified Hardening Constitutive Model), προκειμένου να προσομοιώσουν τη μηχανική συμπεριφορά της άμμου Toyoura κατά τη συνεχή στροφή των αξόνων των κυρίων τάσεων υπό σταθερή q . Στο συγκεκριμένο μοντέλο ελήφθησαν υπόψιν, τόσο η εγγενής ανισοτροπία όσο και η ανισοτροπία λόγω φόρτισης του εδάφους. Επίσης, τα αποτελέσματα από την αναλυτική μελέτη της άμμου Toyoura συγκρίθηκαν με αντίστοιχα αποτελέσματα για την ίδια άμμο, που προέκυψαν από την πειραματική μελέτη των Tong et al. (2010).

Στο Σχήμα 2.38 παρουσιάζεται η μεταβολή των συνιστωσών παραμόρφωσης (ϵ_z , ϵ_θ , ϵ_r) συναρτήσει του αριθμού των κύκλων φόρτισης στην άμμο Toyoura, όπως προέκυψαν από το καταστατικό μοντέλο (διακεκομμένες γραμμές) και τις εργαστηριακές δοκιμές (συνεχείς γραμμές) για $b=0.1$ (Σχήμα 2.38 (α)), $b=0.5$ (Σχήμα 2.38 (β)) και $b=1$ (Σχήμα 2.38 (γ)).

Από το Σχήμα 2.38 παρατηρείται ότι τα πειραματικά αποτελέσματα συμφωνούν με τα αποτελέσματα του καταστατικού μοντέλου. Έτσι, η άμμος αναπτύσσει πλαστικές παραμορφώσεις με την αύξηση των κύκλων φόρτισης, με το μεγαλύτερο μέρος αυτών να εμφανίζεται κατά τους πρώτους κύκλους φόρτισης. Τα μέτρα της κατακόρυφης παραμόρφωσης ϵ_z και της ακτινικής παραμόρφωσης ϵ_r αυξάνονται, ενώ το μέτρο της ϵ_θ μειώνεται με την αύξηση των κύκλων φόρτισης και την αύξηση της τιμής του b .



Σχήμα 2.38: Η μεταβολή των συνιστωσών παραμόρφωσης (ϵ_z , ϵ_θ , ϵ_r) συναρτήσει των κύκλων φόρτισης στην άμμο Toyoura, όπως προέκυψαν από το καταστατικό μοντέλο (διακεκομμένες γραμμές) και τις εργαστηριακές δοκιμές (συνεχείς γραμμές) για (α) $b=0.1$, (β) $b=0.5$ και (γ) $b=1$ (Tian et al.; 2018).

2.6 Πειραματικές συσκευές για τη μελέτη της ανισοτροπίας του εδάφους

2.6.1 Εισαγωγή

Οι περισσότερες εδαφικές αποθέσεις είναι αρχικά ανισότροπες και συνήθως υποβάλλονται σε ανισότροπες τρισδιάστατες συνθήκες τάσεων ($\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$), ταυτόχρονα με τη (συνεχή) στροφή των αξόνων των κυρίων τάσεων. Έτσι, η εργαστηριακή μελέτη της επίδρασης της ανισοτροπίας στη μηχανική συμπεριφορά του εδάφους προϋποθέτει τη χρήση κατάλληλων πειραματικών διατάξεων, οι οποίες θα επιτρέπουν τη μεταβολή της διεύθυνσης της σ_1 κατά τη διάρκεια των δοκιμών και θα λαμβάνουν υπόψιν την τάση σ_2 . Ωστόσο, οι συνήθεις χρησιμοποιούμενες πειραματικές διατάξεις δεν πληρούν όλες τις παραπάνω προϋποθέσεις.

Η τέλεια πειραματική διάταξη θα ήταν αυτή η οποία θα προσομοίωνε την εντατική κατάσταση του πεδίου με τη χρήση έξι ανεξάρτητων ποσοτήτων, όμως, αυτό δεν έχει καταστεί εφικτό. Παρ' όλα αυτά, έχουν γίνει αξιοσημείωτες προσπάθειες, με αποτέλεσμα, με την πάροδο των ετών, να έχουν αναπτυχθεί κάποιες πειραματικές συσκευές για τη μελέτη της ανισοτροπίας, όπως είναι η πραγματική τριαξονική συσκευή, η συσκευή άμεσης διάτμησης, η συσκευή στρεπτικής διάτμησης κλπ.

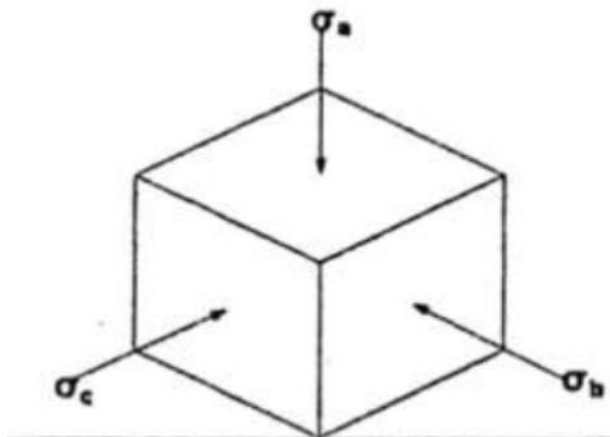
Παρακάτω αναλύονται οι διάφορες συσκευές που έχουν αναπτυχθεί για τη μελέτη του φαινομένου της ανισοτροπίας του εδάφους και περιγράφονται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά τους. Η πειραματική διάταξη στρεπτικής διάτμησης κοίλου κυλίνδρου θεωρείται ότι είναι η πλέον κατάλληλη για τη μελέτη της εδαφικής ανισοτροπίας.

2.6.2 Πειραματικές συσκευές

Οι σημαντικότερες πειραματικές συσκευές που έχουν χρησιμοποιηθεί έως σήμερα, για τη μελέτη της εδαφικής ανισοτροπίας είναι οι ακόλουθες:

1. Πραγματική Τριαξονική Συσκευή (True Triaxial Apparatus)

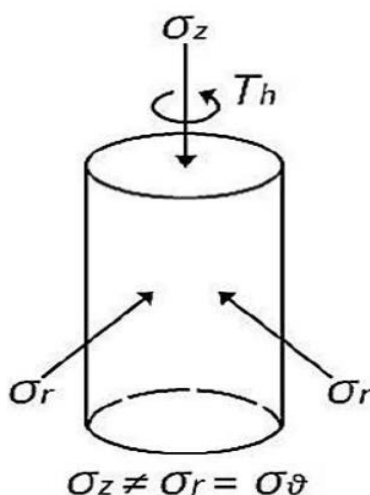
Η πραγματική τριαξονική συσκευή επιτρέπει την επιβολή τριών ανεξάρτητων κυρίων τάσεων στα πρισματικά δοκίμια εδάφους, οι οποίες είναι είτε κάθετες είτε οριζόντιες (Σχήμα 2.39). Έτσι, η πραγματική τριαξονική συσκευή είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί για τη μελέτη της επίδρασης της σ_2 στη μηχανική συμπεριφορά δοκιμών εδάφους. Ωστόσο, σε αρκετές περιπτώσεις, οι διαδρομές των τάσεων που υλοποιούνται μέσω της συσκευής αυτής είναι αρκετά περιορισμένες (Τσομώκος, 2005). Επίσης, σε ορισμένες υλοποιήσεις της συσκευής δεν παρέχεται πλήρης έλεγχος των συνθηκών αποστράγγισης και η εγκατάσταση μετρητών της πίεσης του νερού των πόρων καθίσταται δύσκολη.



Σχήμα 2.39: Οι επιβαλλόμενες τάσεις στο κυβικό δοκίμιο εδάφους της πραγματικής τριαξονικής συσκευής (Τσομώκος, 2005).

2. Συσκευή Τριαξονικής Στρέψης (Torsional Triaxial Device)

Η συσκευή επιτρέπει τον ανεξάρτητο έλεγχο της αξονικής φόρτισης, της στρέψης και της πίεσης της κυψέλης που υποβάλλονται στο δοκίμιο (Σχήμα 2.40), με αποτέλεσμα να καθίσταται δυνατή η επιβολή διαφορετικών μεγεθών στις τρεις μέγιστες κύριες τάσεις (Ishihara and Li, 1972). Επίσης, οι άξονες των σ_1 και σ_3 στρέφονται ταυτόχρονα στο κατακόρυφο επίπεδο. Ωστόσο, η διεύθυνση της σ_1 ως προς την κατακόρυφο (α) εξαρτάται από τις τρεις μέγιστες κύριες τάσεις, με αποτέλεσμα να μην επιτρέπεται ο ανεξάρτητος έλεγχός της. Επίσης, ένα ακόμη μειονέκτημά της είναι ότι τα δοκίμια αναπτύσσουν ανομοιόμορφες τάσεις και παραμορφώσεις στις οριζόντιές τους διατομές, λόγω της υποβολής τους σε στρεπτική διάτμηση.

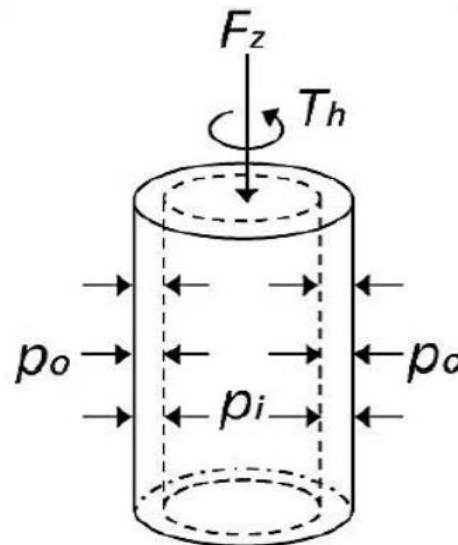


Σχήμα 2.40: Οι τάσεις στο κυλινδρικό δοκίμιο εδάφους της συσκευής τριαξονικής στρέψης (Yang, 2013).

3. Τριαξονική Συσκευή Στρεπτικής Διάτμησης (Triaxial Torsion Shear Device)

Μέσω της τριαξονικής συσκευής στρεπτικής διάτμησης, το κοίλο κυλινδρικό δοκίμιο υποβάλλεται σε κατακόρυφη φόρτιση και στρέψη στην άνω βάση του και σε εσωτερικές και εξωτερικές πιέσεις στα εσωτερικά και εξωτερικά του τοιχώματα (Σχήμα 2.41). Σύμφωνα με τους Ishihara και Towhata (1983), η στρεπτική διάτμηση στην οποία υποβάλλεται το κοίλο κυλινδρικό δοκίμιο προκαλεί ελάχιστες ανομοιομορφίες στις τάσεις και στις παραμορφώσεις στις οριζόντιες διατομές του, συγκριτικά με τις αντίστοιχες ανομοιομορφίες που δημιουργούνται σε κυλινδρικό δοκίμιο μέσω της συσκευής τριαξονικής στρέψης. Ωστόσο, οι εσωτερικές και εξωτερικές πιέσεις δεν δύναται να ελεγχθούν ανεξάρτητα, με αποτέλεσμα να είναι ίσες μεταξύ τους και τελικά, η παράμετρος 'α' να συνδέεται με την παράμετρο b μέσω της Εξίσωσης 2.3.

$$b = \sin^2 \alpha \quad (2.3)$$

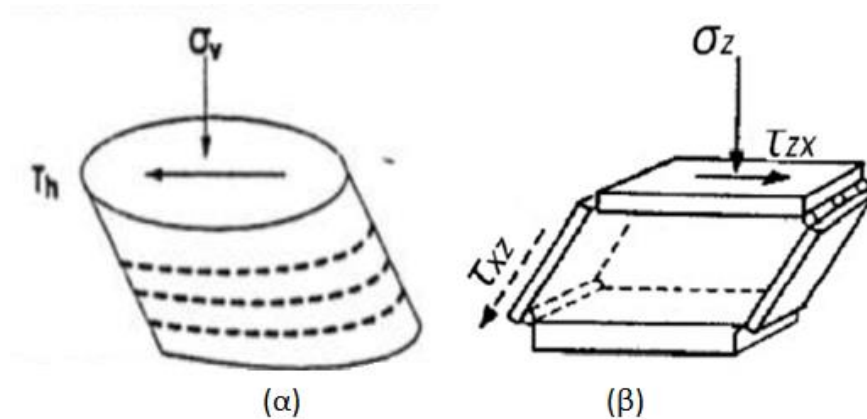


Σχήμα 2.41: Τα επιβαλλόμενα φορτία στο κοίλο κυλινδρικό δοκίμιο εδάφους της τριαξονικής συσκευής στρεπτικής διάτμησης (Yang, 2013).

4. Συσκευή Απλής Διάτμησης (Simple Shear Apparatus)

Η συσκευή απλής διάτμησης υποβάλλει τα ορθογωνικά ή κυλινδρικά δοκίμια σε διατμητικές τάσεις υπό συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης (Σχήμα 2.42), οι οποίες συμβάλλουν στη συνεχή στροφή των αξόνων των κυρίων τάσεων. Οι δύο πιο γνωστές συσκευές απλής διάτμησης είναι η Roscoe (Roscoe, 1953) και η NGI (Bjerrum και Landva, 1966), οι οποίες επιτρέπουν την ανισότροπη στερεοποίηση των δοκιμίων, με τη διατμητική παραμόρφωση να μην επηρεάζεται από την οριζόντια διατμητική τάση του δοκιμίου (Τσομώκος, 2005). Ένα από τα σημαντικότερα μειονεκτήματα των συσκευών αυτών, είναι ότι δεν παρέχουν τη δυνατότητα ελέγχου και μέτρησης των μεγεθών των κυρίων τάσεων, όπως

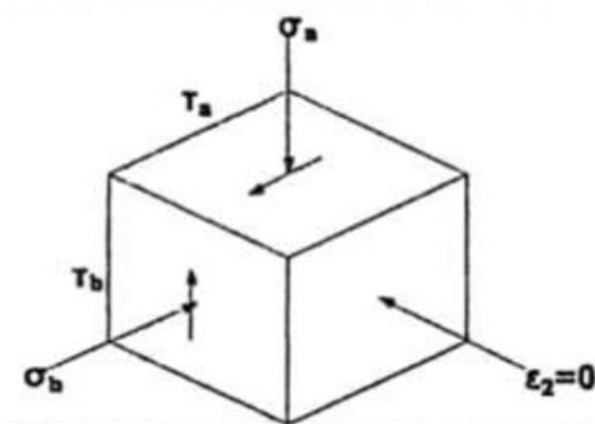
επίσης, ότι δεν είναι γνωστές οι κατευθύνσεις τους. Σύμφωνα με τους Saada και Townsend (1981), ένα ακόμη μειονέκτημά τους είναι οι προκύπτουσες ανομοιόμορφες κατανομές των τάσεων και των παραμορφώσεων στα δοκίμια εδάφους. Τέλος, η χρήση της συσκευής απλής διάτμησης δεν καθιστά δυνατή την προσομοίωση των πραγματικών – τρισδιάστατων εντατικών καταστάσεων στο πεδίο, καθώς το έδαφος υποβάλλεται σε συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης.



Σχήμα 2.42: Οι επιβαλλόμενες τάσεις στις επιφάνειες του: (α) κυλινδρικού (Τσομώκος, 2005) και (β) ορθογωνικού δοκιμίου (Yang, 2013) εδάφους της συσκευής απλής διάτμησης.

5. Συσκευή Άμεσης Διάτμησης (Direction Shear Cell)

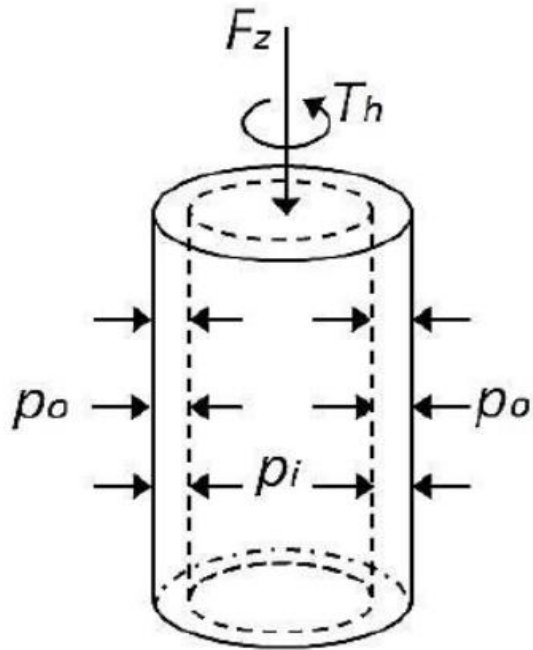
Η συσκευή άμεσης διάτμησης, η οποία σχεδιάστηκε αρχικά από τους Arthur et al. (1977), επιβάλλει ανεξάρτητες ορθές και διατμητικές τάσεις σε τέσσερις επιφάνειες του κυβικού δοκιμίου (Σχήμα 2.43), το οποίο βρίσκεται περιορισμένο μεταξύ δύο άκαμπτων πλακών (συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης). Συνεπώς, η συσκευή αυτή παρέχει τη δυνατότητα μελέτης της επίδρασης της μεταβολής της διεύθυνσης της σ_1 στη μηχανική συμπεριφορά του εδάφους. Επίσης, η κατανομή των τάσεων στον όγκο του δοκιμίου είναι σχετικά ομοιόμορφη. Ωστόσο, η συσκευή επιτρέπει την εφαρμογή πολύ μικρών τάσεων ($\sigma_3' \leq 14$ kPa) στο δοκίμιο εδάφους, με αποτέλεσμα, πολλές φορές, να μην μπορεί να μελετηθεί το επιθυμητό εύρος τάσεων (Yang, 2013). Επίσης, η συσκευή παρουσιάζει προβλήματα ως προς τη μέτρηση των παραμορφώσεων και των πιέσεων του νερού των πόρων.



Σχήμα 2.43: Οι επιβαλλόμενες ορθές και διατμητικές τάσεις σε τέσσερις επιφάνειες του κυβικού δοκιμίου εδάφους της συσκευής άμεσης διάτμησης (Τσομώκος, 2005).

6. Συσκευή Κοίλου Κυλίνδρου (Hollow Cylinder Apparatus)

Μέσω της συσκευής κοίλου κυλίνδρου δίνεται η δυνατότητα επιβολής ροπής στρέψης, αξονικού φορτίου και διαφορετικών πλευρικών πιέσεων στα εσωτερικά και εξωτερικά τοιχώματα του κοίλου κυλινδρικού δοκιμίου (Σχήμα 2.44). Η ροπή στρέψης συμβάλλει στην ανάπτυξη οριζόντιων διατμητικών τάσεων, αλλά και διατμητικών τάσεων στα κατακόρυφα ακτινικά επίπεδα. Η συγκεκριμένη συσκευή είναι από τις πλέον κατάλληλες συσκευές για τη μελέτη του φαινομένου της ανισοτροπίας στο έδαφος, καθώς επιτρέπει την επιβολή τριών ανεξάρτητων κυρίων τάσεων (σ_1 , σ_2 , σ_3) και παράλληλα τη μεταβολή των διευθύνσεων της μέγιστης και της ελάχιστης κύριας τάσης (σ_1 και σ_3 αντίστοιχα). Επίσης, μέσω της συσκευής κοίλου κυλίνδρου καθίσταται δυνατός ο έλεγχος των συνθηκών αποστράγγισης του δοκιμίου, με αποτέλεσμα να μπορούν να εκτελεστούν δοκιμές τόσο υπό στραγγιζόμενες όσο και υπό αστράγγιστες συνθήκες. Ένα από τα σημαντικότερα μειονεκτήματα της συσκευής κοίλου κυλίνδρου αφορά τις μεμβράνες που περικλείουν τα δοκίμια, οι οποίες διεισδύουν στα κενά των πόρων του εδάφους, όταν εκτελούνται δοκιμές υπό στραγγιζόμενες συνθήκες, ενώ όταν εκτελούνται δοκιμές υπό αστράγγιστες συνθήκες λαμβάνει χώρα η συμμόρφωση των μεμβρανών. Η διείσδυση της μεμβράνης συντελεί στη μέτρηση μη πραγματικών μεταβολών στον όγκο του δοκιμίου, ενώ η συμμόρφωση της μεμβράνης σε λανθασμένη εκτίμηση της πίεσης του νερού των πόρων και της αντοχής του. Ένα ακόμη μειονέκτημά της είναι η συσσώρευση μη ομοιόμορφων τάσεων και παραμορφώσεων στα τοιχώματα του κοίλου κυλινδρικού δοκιμίου. Ωστόσο, οι ανομοιομορφίες αυτές είναι δυνατόν να ελαχιστοποιηθούν με την επιλογή των κατάλληλων διαστάσεων δοκιμίου και την αποφυγή ορισμένων διαδρομών τάσεων.



Σχήμα 2.44: Οι επιβαλλόμενες φορτίσεις στο κοίλο κυλινδρικό δοκίμιο εδάφους της συσκευής κοίλου κυλίνδρου (Yang, 2013).

2.6.3 Συσκευή κοίλου κυλίνδρου (HCA)

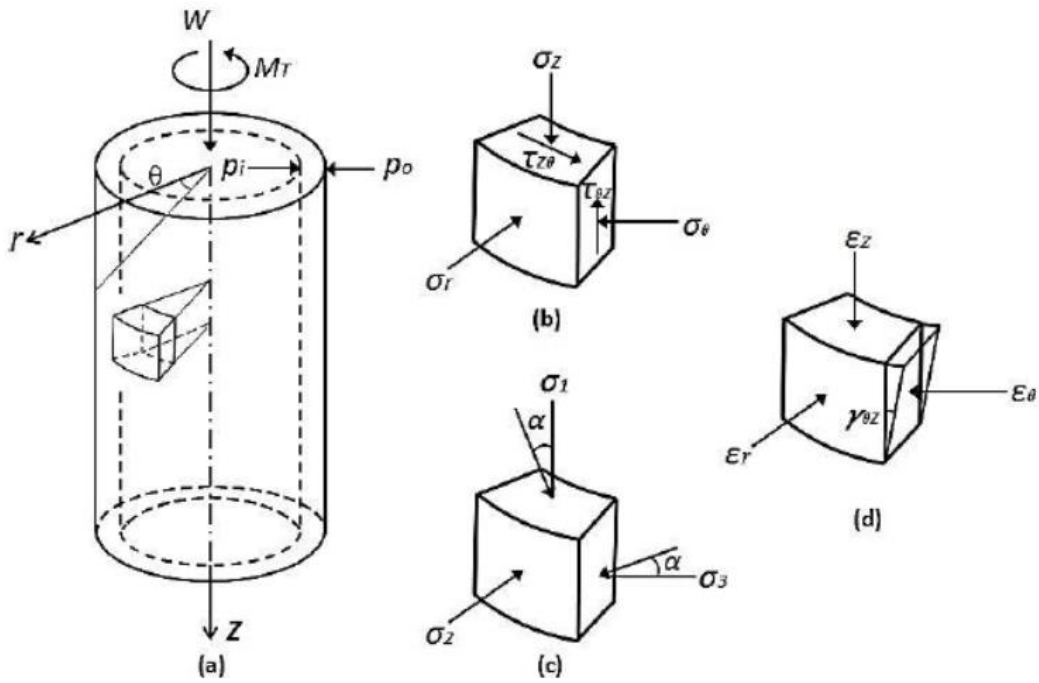
2.6.3.1 Υπολογισμός τάσεων και παραμορφώσεων στη συσκευή κοίλου κυλίνδρου

Τα κοίλα κυλινδρικά δοκίμια τα οποία εξετάζονται στη συσκευή κοίλου κυλίνδρου υποβάλλονται σε αξονικό φορτίο (W), ροπή στρέψης (M_T), εξωτερική πίεση (p_o) και εσωτερική πίεση (p_i) κυψέλης, τα οποία είναι ανεξάρτητα μεταξύ τους (Σχήμα 2.45 (α)). Το αξονικό φορτίο (W) δημιουργεί αξονική τάση (σ_z), η ροπή στρέψης (M_T) δημιουργεί διατμητικές τάσεις στο κατακόρυφο ($\tau_{\theta z}$), αλλά και οριζόντιο επίπεδο ($\tau_{z\theta}$) και η διαφορά μεταξύ των εξωτερικών (p_o) και εσωτερικών (p_i) πιέσεων της κυψέλης προκαλεί την ανάπτυξη της συνιστώσας της ακτινικής τάσης (σ_r) κατά μήκος των τοιχωμάτων του κοίλου δοκιμίου εδάφους (Σχήμα 2.45 (β)). Σύμφωνα με τους Hight et al. (1983) η διαφορά της ακτινικής τάσης (σ_r) από την περιφερειακή (σ_θ) υπολογίζεται από την Εξίσωση 2.4.

$$\sigma_\theta - \sigma_r = r \times \frac{d\sigma_r}{dr} \quad (2.4)$$

Στην Εξίσωση (2.4) το ' r ' ορίζεται ως η ακτινική απόσταση μέχρι ένα σημείο του κοίλου κυλίνδρου και ' $d\sigma_r$ ' το βήμα μεταβολής της ακτινικής τάσης.

Οι τάσεις δεν είναι ομοιόμορφα κατανομημένες στα τοιχώματα του δείγματος, ιδίως στην περίπτωση όπου οι πιέσεις στο εσωτερικό και στο εξωτερικό της κυψέλης δεν ταυτίζονται. Έτσι, συνήθως υπολογίζονται οι μέσες τιμές των τάσεων, των οποίων οι εξισώσεις παρατίθενται παρακάτω (Hight 1983).



Σχήμα 2.45: (α) Οι επιβαλλόμενες φορτίσεις σε ένα κοίλο κυλινδρικό δοκίμιο εντός της συσκευής κοίλου κυλίνδρου. Οι αναπτυσσόμενες: (β) τάσεις, (γ) κύριες τάσεις, (δ) παραμορφώσεις σε ένα κομμάτι του δοκιμίου (Yang, 2013).

$$\bar{\sigma}_z = \frac{W}{\pi(r_o^2 - r_i^2)} + \frac{P_o r_o^2 - P_i r_i^2}{r_o^2 - r_i^2} \quad (2.5)$$

$$\bar{\sigma}_\theta = \frac{P_o r_o - P_i r_i}{r_o - r_i} \quad (2.6)$$

$$\bar{\sigma}_r = \frac{P_o r_o + P_i r_i}{r_o + r_i} \quad (2.7)$$

$$\bar{\tau}_{zr} = \frac{3M_T}{2\pi(r_o^3 - r_i^3)} \quad (2.8)$$

Στις Εξισώσεις (2.5 έως 2.9) τα r_o και r_i συμβολίζουν την εξωτερική και την εσωτερική ακτίνα του δοκιμίου αντίστοιχα.

Αξίζει να σημειωθεί ότι ο υπολογισμός των τάσεων σ_r , σ_θ και $\tau_{\theta z}$ βασίζεται στη θεώρηση ότι το έδαφος αποτελεί γραμμικό, ελαστικό και ισότροπο υλικό. Η τάση σ_z , ωστόσο, δεν εξαρτάται από τον καταστατικό νόμο του υλικού και υπολογίζεται από την ισορροπία.

Οι τρεις συνιστώσες της κύριας τάσης (σ_1 , σ_2 , σ_3) υπολογίζονται συναρτήσει των τάσεων σ_r , σ_θ , σ_z και $\tau_{\theta z}$ από τις Εξισώσεις (2.9, 2.10, 2.11).

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_z + \sigma_\theta}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_z - \sigma_\theta}{2}\right)^2 + \tau_{\theta z}^2} \quad (2.9)$$

$$\sigma_2 = \sigma_r \quad (2.10)$$

$$\sigma_3 = \frac{\sigma_z + \sigma_\theta}{2} - \sqrt{\left(\frac{\sigma_z - \sigma_\theta}{2}\right)^2 + \tau_{\theta z}^2} \quad (2.11)$$

Εναλλακτικά, η εντατική κατάσταση ενός κοίλου δοκιμίου είναι δυνατόν να εκφρασθεί από τέσσερις παραμέτρους (Εξισώσεις 2.12, 2.13, 2.14, 2.15), οι οποίες είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους και είναι η αποκλίνουσα τάση (q), η μέση τάση (p), η παράμετρος ενδιάμεσης κύριας τάσης (b) και κλίση της μέγιστης κύριας τάσης ως προς την κατακόρυφο (α).

$$p = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} \quad (2.12)$$

$$q = \sqrt{\frac{1}{2}\{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2\}} \quad (2.13)$$

$$b = \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} \quad (2.14)$$

$$\alpha = \frac{1}{2} \tan^{-1}\left(\frac{2\tau_{\theta z}}{\sigma_z - \sigma_\theta}\right) \quad (2.15)$$

Σε όρους μέσων παραμορφώσεων, το κοίλο κυλινδρικό δοκίμιο εδάφους υποβάλλεται σε αξονική (Εξίσωση 2.16), ακτινική (Εξίσωση 2.17), περιφερειακή (Εξίσωση 2.18) και διατμητική παραμόρφωση (Εξίσωση 2.19).

$$\bar{\varepsilon}_z = \frac{w}{H} \quad (2.16)$$

$$\bar{\varepsilon}_r = -\frac{u_o - u_i}{r_o - r_i} \quad (2.17)$$

$$\bar{\varepsilon}_\theta = -\frac{u_o + u_i}{r_o + r_i} \quad (2.18)$$

$$\bar{\gamma}_{\alpha} = \frac{2\theta(r_o^3 - r_i^3)}{3H(r_o^2 - r_i^2)} \quad (2.19)$$

Στην Εξίσωση (2.16) η παράμετρος 'w' συμβολίζει την αξονική παραμόρφωση στο ύψος 'H' του δοκιμίου, στην Εξίσωση (2.19) το 'θ' είναι η περιφερειακή γωνιακή παραμόρφωση, η οποία μετράται σε ακτίνια, και οι παράμετροι 'u_o' και 'u_i' που εμφανίζονται στις Εξισώσεις (2.17) και (2.18) αποτελούν τις ακτινικές παραμορφώσεις στο εξωτερικό και εσωτερικό τοίχωμα του δοκιμίου αντίστοιχα.

Οι εξισώσεις των μέσων παραμορφώσεων είναι ανεξάρτητες από τον καταστατικό νόμο του υλικού. Οι μέσες τιμές των παραμορφώσεων ε_r και ε_θ βασίζονται στη γραμμική διακύμανση της ακτινικής μετακίνησης κατά μήκος των τοιχωμάτων του δείγματος.

Η μέγιστη, μέση και η ελάχιστη κύρια παραμόρφωση δίδονται από τις Εξισώσεις (2.20), (2.21), (2.22).

$$\varepsilon_1 = \frac{\bar{\varepsilon}_z + \bar{\varepsilon}_\theta}{2} + \sqrt{\left(\frac{\bar{\varepsilon}_z - \bar{\varepsilon}_\theta}{2}\right)^2 + \left(\frac{\bar{\gamma}_{\alpha}}{2}\right)^2} \quad (2.20)$$

$$(2.21)$$

$$\varepsilon_2 = \bar{\varepsilon}_r$$

$$\varepsilon_3 = \frac{\bar{\varepsilon}_z + \bar{\varepsilon}_\theta}{2} - \sqrt{\left(\frac{\bar{\varepsilon}_z - \bar{\varepsilon}_\theta}{2}\right)^2 + \left(\frac{\bar{\gamma}_{\alpha}}{2}\right)^2} \quad (2.22)$$

Η παραμόρφωση του δοκιμίου μπορεί να περιγραφεί, επίσης, από την ογκομετρική παραμόρφωση (ε_v) και την αποκλίνουσα παραμόρφωση (ε_q), σύμφωνα με τις Εξισώσεις (2.23), (2.24).

$$\varepsilon_v = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 \quad (2.23)$$

$$\varepsilon_q = \sqrt{\frac{2}{9} \{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2\}} \quad (2.24)$$

Η κατεύθυνση της προσαυξητικής παραμόρφωσης ($\alpha_{d\varepsilon}$) υπολογίζεται από την Εξίσωση (2.25).

$$\alpha_{d\varepsilon} = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{d\gamma_{\varepsilon}}{d\varepsilon_z - d\varepsilon_{\theta}} \right) \quad (2.25)$$

Ο βαθμός της μη-ομοαξονικότητας (β) υπολογίζεται από την Εξίσωση (2.26).

$$\beta = \alpha - \alpha_{d\varepsilon} \quad (2.26)$$

2.6.3.2 Ανομοιομορφίες στα κοίλα κυλινδρικά δείγματα

Όπως προαναφέρθηκε στην υποενότητα 2.6.2, ένα από τα μειονεκτήματα που παρουσιάζει η συσκευή κοίλου κυλίνδρου αποτελεί η ανάπτυξη μη ομοιόμορφων τάσεων και παραμορφώσεων στα τοιχώματα και εντός των κοίλων κυλινδρικών δοκιμίων κατά τη στρεπτική τους διάτμηση (Saada, 1988; Sayao & Vaid, 1991). Συγκεκριμένα, η συνιστώσα σ_z θεωρείται ομοιόμορφη, σε αντίθεση με τις συνιστώσες σ_r , σ_{θ} και $\tau_{\theta z}$, οι οποίες είναι ανομοιόμορφες κατά μήκος των τοιχωμάτων ενός δοκιμίου.

Ο βαθμός της ανομοιομορφίας των τάσεων και των παραμορφώσεων εξαρτάται από την εντατική κατάσταση (ροπή στρέψης, διαφορά της εσωτερικής από την εξωτερική πίεση του δοκιμίου) και τον καταστατικό νόμο του εδάφους, τις διαστάσεις και τη γεωμετρία του και των περιορισμών μετακίνησης λόγω των άκαμπτων πορωδών δίσκων στα άκρα του δοκιμίου (Sayao, 1989; Reinaldo, 2003, Κωνσταντίνου, 2013).

Πολλοί ερευνητές, όπως οι Saada & Townsed (1981), Hight et al. (1983), Sayao & Vaid (1991), Naughton & O'Kelly (2007), μελέτησαν τους παράγοντες που επηρεάζουν το βαθμό των ανομοιομορφιών που εμφανίζονται στις τάσεις και στις παραμορφώσεις των κοίλων κυλινδρικών δοκιμίων της συσκευής κοίλου κυλίνδρου και κατέληξαν σε κάποια χρήσιμα συμπεράσματα, τα οποία αναφέρονται στη συνέχεια.

Εσωτερικές και εξωτερικές πιέσεις του δοκιμίου:

Οι Hight et al. (1983) και Naughton & O'Kelly (2007) υποστήριξαν μέσω των ερευνών τους ότι ο βαθμός των ανομοιομορφιών των τάσεων και των παραμορφώσεων που αναπτύσσονται στα κοίλα κυλινδρικά δοκίμια της συσκευής κοίλου κυλίνδρου μειώνεται με τη μείωση της απόκλισης της εσωτερικής πίεσης (p_i) από την εξωτερική πίεση του δοκιμίου (p_o). Συγκεκριμένα, πρότειναν την Εξίσωση 2.27 για τη μείωση του βαθμού των ανομοιομορφιών.

$$0.9 \leq \frac{P_o}{P_i} \leq 1.2 \quad (2.27)$$

Γεωμετρία κοίλου κυλινδρικού δοκιμίου:

- Εσωτερική (r_i) και εξωτερική ακτίνα (r_o):

Οι Saada & Townsed (1981) και Sayao & Vaid (1991) ανέφεραν ότι ο βαθμός των ανομοιομορφιών των τάσεων και των παραμορφώσεων των κοίλων δοκιμίων μειώνεται με τη μείωση της επιφάνειας ή την αύξηση της εσωτερικής ακτίνας r_i του δοκιμίου. Οι Saada & Townsed (1981) πρότειναν την Εξίσωση (2.28), ενώ οι Sayao & Vaid (1991) τις Εξισώσεις (2.29) (2.30).

$$\frac{r_i}{r_o} \geq 0.65 \quad (2.28)$$

$$0.65 \leq \frac{r_i}{r_o} \leq 0.82 \quad (2.29)$$

$$r_o - r_i = 20 - 60mm \quad (2.30)$$

- Ύψος δοκιμίου (H):

Οι Saada & Townsed (1981) πρότειναν την ανίσωση που ακολουθεί Εξίσωση (2.31) για το ύψος που πρέπει να έχει ένα κοίλο κυλινδρικό δοκίμιο, ώστε να δημιουργείται μια επαρκής ζώνη σε αυτό, η οποία να μην επηρεάζεται από τις ανομοιομορφίες που δημιουργούνται σε αυτό λόγω των άκαμπτων άκρων του.

$$H \geq 5.44 \cdot \sqrt{r_o^2 - r_i^2} \quad (2.31)$$

2.6.3.3 Σφάλματα διείδυσης και συμμόρφωσης μεμβράνης

Όπως προαναφέρθηκε στην υποενότητα 2.6.3.2, ένα από τα σημαντικότερα μειονεκτήματα της συσκευής κοίλου κυλίνδρου αφορά στις μεμβράνες που περικλείουν τα δοκίμια, οι οποίες διεισδύουν στα κενά των πόρων του εδάφους, όταν εκτελούνται δοκιμές υπό στραγγιζόμενες συνθήκες, ενώ όταν εκτελούνται δοκιμές υπό αστράγγιστες συνθήκες λαμβάνει χώρα η συμμόρφωσή τους. Η διείδυση

της μεμβράνης συντελεί στη μέτρηση μη πραγματικών μεταβολών στον όγκο του δοκιμίου, ενώ η συμμόρφωση της μεμβράνης σε λανθασμένη εκτίμηση της πίεσης του νερού των πόρων και της αντοχής του.

Οι Frost & Allely (1957) ήταν οι πρώτοι ερευνητές που εντόπισαν τα προβλήματα που δημιουργούν η διείδυση και η συμμόρφωση των μεμβρανών στο κοίλο δοκίμιο εδάφους. Έκτοτε αρκετοί ερευνητές εκτέλεσαν θεωρητικές και πειραματικές έρευνες για τη διείδυση ή/και συμμόρφωση των ελαστικών μεμβρανών σε κοίλα κυλινδρικά δοκίμια εδάφους (Kramer & Sivaneswaran 1990, Miura & Kawamura 1996, Kuwano 1999, Naughton & O'Kelly 2003) και διαπίστωσαν ότι το μέγεθος των κόκκων εδάφους και το μέγεθος της τάσης s_3 είναι ίσως οι δύο πιο σημαντικοί παράγοντες που την επηρεάζουν.

Οι Kuwano, 1999; Baldi & Nova, 1984; Kramer & Sivaneswaran, 1989; Sivathayalan & Vaid, 1998 πρότειναν τρόπους για τον υπολογισμό της διείδυσης / συμμόρφωσης των μεμβρανών του κοίλου δοκιμίου στο έδαφος, με σκοπό τη μετέπειτα διόρθωση των τιμών των παραμέτρων μηχανικής συμπεριφοράς του εδάφους, οι οποίες επηρεάζονται από τη διείδυση / συμμόρφωση της μεμβράνης. Ενδεικτικά, αναφέρεται η πρόταση των Sivathayalan & Vaid (1998) για την εκτίμηση της διείδυσης ή/και συμμόρφωσης της μεμβράνης, η οποία συμφωνεί σε μεγάλο βαθμό με τις θεωρητικές εξισώσεις που προτάθηκαν από τους Baldi & Nova (1984) και Kramer & Sivaneswaran (1989). Συγκεκριμένα, Sivathayalan & Vaid (1998) πρότειναν την εκτίμηση της διείδυσης ή/και συμμόρφωσης της μεμβράνης μέσω των αποκλίσεων μεταξύ των μετρούμενων μεταβολών όγκου στο εσωτερικό της κυψέλης και στην ογκομετρική παραμόρφωση του δοκιμίου κατά την υδροστατική του φόρτιση. Οι ερευνητές πρότειναν, λοιπόν, την ακόλουθη Εξίσωση (2.32).

$$\varepsilon_m = \frac{\Delta V_r - \Delta V_{ir} (\chi^2 - 1)}{\chi (A_{mi} + A_{me})} \quad (2.32)$$

Στην Εξίσωση 2.32, η παράμετρος ε_m συμβολίζει τη διείδυση ή/και συμμόρφωση της μεμβράνης, τα ΔV_r και ΔV_{ir} είναι οι μετρούμενες αλλαγές του όγκου της εσωτερικής κυψέλης και του δοκιμίου αντίστοιχα, τα A_{mi} και A_{me} είναι η εσωτερική και η εξωτερική επιφάνεια του δοκιμίου που καλύπτονται από την εσωτερική και την εξωτερική μεμβράνη αντίστοιχα, και το χ είναι ο λόγος της εξωτερικής προς την εσωτερική ακτίνα του δοκιμίου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ – ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

3.1 Εισαγωγή

Στο Κεφάλαιο 3 παρουσιάζεται η πειραματική διάταξη της συσκευής στρεπτικής διάτμησης κοίλου κυλινδρικού δοκιμίου με δυνατότητα επιβολής πολύ μικρών παραμορφώσεων (GDS ss – HCA), η οποία είναι θεωρείται η πλέον κατάλληλη για τη μελέτη της ανισοτροπίας στο έδαφος και βρίσκεται εγκατεστημένη στο Εργαστήριο Γεωτεχνικής Μηχανικής, του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών, του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας. Στα πλαίσια του κεφαλαίου αυτού, περιγράφονται, επίσης, η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για τη βαθμονόμηση των ελεγκτών πίεσης / όγκου της συσκευής GDS ss – HCA και η διαδικασία για τη μόρφωση χαλαρού κοίλου κυλινδρικού δοκιμίου άμμου.

3.2 Περιγραφή της πειραματικής διάταξης GDS ss – HCA

3.2.1 Γενική περιγραφή

Η πειραματική διάταξη στρεπτικής διάτμησης κοίλου κυλίνδρου μικρών παραμορφώσεων (small – strain Hollow Cylinder Apparatus, ss – HCA) αναπτύχθηκε και κατασκευάσθηκε από την GDS Instruments Ltd. Η συγκεκριμένη πειραματική διάταξη βρίσκεται εγκατεστημένη στο Εργαστήριο Γεωτεχνικής Μηχανικής, του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών, του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας και διατίθεται από πολύ μικρό αριθμό ερευνητικών εργαστηρίων παγκοσμίως.

Η συσκευή δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να πραγματοποιήσει δοκιμές σε συμπαγή ή κοίλα κυλινδρικά, αμμώδη ή λεπτόκοκκα εδαφικά δοκίμια υπό πολύ μικρές αξονικές παραμορφώσεις (μικρότερες από 4×10^{-5} %), υπό στραγγιζόμενες ή αστράγγιστες συνθήκες και υπό μονοτονικές ή ανακυκλικές συνθήκες φόρτισης. Η εφαρμογή αξονικού φορτίου, ροπής στρέψης, καθώς και εσωτερικής και εξωτερικής πίεσης κυψέλης σε κοίλο κυλινδρικό δοκίμιο επιτρέπουν τον ανεξάρτητο έλεγχο στα μεγέθη των τριών κύριων τάσεων καθώς και της στροφής των αξόνων της μέγιστης – ελάχιστης κύριας τάσης, με αποτέλεσμα να παρέχεται η δυνατότητα εκτέλεσης μεγάλου εύρους διαδρομών των τάσεων. Συνεπώς, η συγκεκριμένη διάταξη είναι κατάλληλη για τη μελέτη του φαινομένου της ανισοτροπίας στο έδαφος.

Στο Σχήμα 3.1 παρουσιάζεται η πειραματική διάταξη GDS ss – HCA του Εργαστηρίου Γεωτεχνικής Μηχανικής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας. Όπως φαίνεται και από το Σχήμα 3.1, η διάταξη αποτελείται από τα ακόλουθα υποσυστήματα:

1. Μονάδα ενεργοποίησης αξονικών και στροφικών κινήσεων και Κυψέλη (Axial actuator and rotational actuator unit and Cell top)
2. Ψηφιακοί ελεγκτές πίεσης / όγκου (GDS standard digital pressure / volume controllers – STDDPC)
3. Μονάδα ρύθμισης σήματος (Signal conditioning unit)/ Διεπαφή ψηφιακού μορφοτροπέα (Digital transducer interface – DTI)
4. Κάρτα ελέγχου (GDSDCS)

Η διάταξη συνδέεται με επιτραπέζιο υπολογιστή στον οποίο είναι εγκατεστημένο ειδικό λογισμικό για την καταγραφή και τον έλεγχο δεδομένων από τις δοκιμές. Επίσης, είναι εφοδιασμένη με εξοπλισμό για την προετοιμασία κοίλων κυλινδρικών δοκιμίων, συνεκτικών εδαφών και άμμων.

Η αναλυτική περιγραφή των υποσυστημάτων της συσκευής GDS ss – HCA παρουσιάζονται στην υποενότητα 3.2.2.



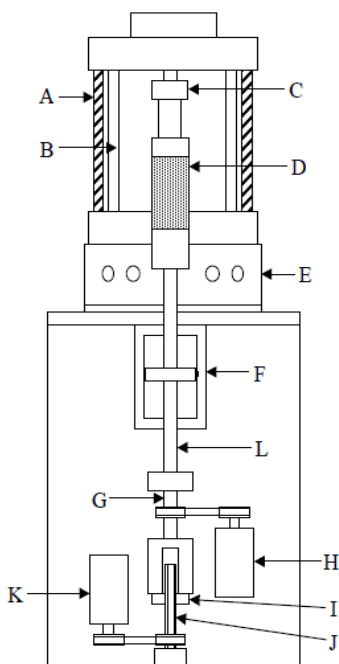
Σχήμα 3.1: Η συσκευή GDS ss - HCA στον χώρο του εργαστηρίου Γεωτεχνικής Μηχανικής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας.

3.2.2 Τα υποσυστήματα της πειραματικής διάταξης GDS ss – HCA

Μονάδα ενεργοποίησης αξονικών και στροφικών κινήσεων και Κυψέλη

Το σχηματικό διάγραμμα της συσκευής GDS ss – HCA παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.2 και αποτελείται από το θάλαμο της κυψέλης στο άνω μέρος και τη μονάδα ενεργοποίησης των αξονικών και στροφικών κινήσεων στο κάτω μέρος.

Στο εσωτερικό του θαλάμου της κυψέλης (B, Σχήμα 3.2) τοποθετείται το εδαφικό δοκίμιο (D, Σχήμα 3.2) με εσωτερική διάμετρο 60mm, εξωτερική διάμετρο 100mm και ύψος 200mm, το ρευστό που περιβάλλει το δοκίμιο εξωτερικά, το ρευστό στην εσωτερικό χώρο του κοίλου δοκιμίου καθώς και το βυθιζόμενο (εντός του ρευστού της κυψέλης) στοιχείο επιβολής και μέτρησης του φορτίου / ροπής στρέψης (C, Σχήμα 3.2), το οποίο προσαρτάται σταθερά στην κορυφή της κυψέλης. Ο θάλαμος της κυψέλης μπορεί να ανυψωθεί μακριά από τη βάση της κυψέλης, έτσι ώστε να γίνει η τοποθέτηση του δοκιμίου στη βάση της κυψέλης. Επίσης, έχει υψηλή αντοχή τόσο στα εφαρμοζόμενα αξονικά φορτία όσο και στις στρεπτικές δυνάμεις εξαιτίας τριών κατακόρυφων ράβδων (A, Σχήμα 3.2), οι οποίες συνδέουν την κορυφή και τη βάση του θαλάμου της κυψέλης. Η βάση της κυψέλης (E, Σχήμα 3.2), φιλοξενεί όλες τις υδραυλικές συνδεσμολογίες της κυψέλης, όπως είναι οι συνδέσεις για την επιβολή και μέτρηση της εξωτερικής και την εσωτερικής πίεσης της κυψέλης, της πίεσης του νερού των πόρων, της πίεσης που εφαρμόζεται στο δοκίμιο για τον κορεσμό του και της σύνδεσης για το άδειασμα και το γέμισμα της κυψέλης.



Σχήμα 3.2: Σχηματική απεικόνιση της συσκευής HCA (Serra & Hooker, 2011).

Η μονάδα ενεργοποίησης των αξονικών και στροφικών κινήσεων, η οποία φαίνεται στο κάτω μέρος του Σχήματος 3.2, αποτελεί ντουλάπι το οποίο φιλοξενεί όλα τα εξαρτήματα για την επιβολή των κινήσεων. Το έμβολο (L, Σχήμα 3.2) συνδέεται με τη βάση του δοκιμίου, καθώς διαπερνά το θάλαμο για την εξισορρόπηση του εμβόλου (F, Σχήμα 3.2) και τη βάση της κυψέλης. Ο θάλαμος εξισορρόπησης του εμβόλου (F) χρησιμοποιείται με σκοπό η πίεση της κυψέλης να είναι ανεπηρέαστη από τις δυναμικές αξονικές φορτίσεις. Ο ένας από τους δύο σερβοκινητήρες ελέγχου που εμπεριέχονται στη μονάδα ενεργοποίησης και συγκεκριμένα, ο σερβοκινητήρας που παράγει αξονική δύναμη / φορτίο (K, Σχήμα 3.2), συνδέεται με τη βάση μίας σφαιρικής βίδας (J, Σχήμα 3.2) μέσω ενός οδοντωτού ιμάντα. Η περιστροφή της σφαιρικής βίδας προκαλεί την αξονική κίνηση σφαιρικού περικοχλίου (I, Σχήμα 3.2), η οποία με τη σειρά της μεταβιβάζεται ως αξονική κίνηση στο έμβολο. Ο δεύτερος σερβοκινητήρας (H, Σχήμα 3.2) της μονάδας ενεργοποίησης συνδέεται με στύλο (G, Σχήμα 3.2) μέσω ενός οδοντωτού ιμάντα, έτσι ώστε να προκαλέσει τη δημιουργία ροπής στρέψης ή στροφικής μετακίνησης.

Ψηφιακοί ελεγκτές πίεσης / όγκου

Οι ψηφιακοί ελεγκτές πίεσης / όγκου περιέχουν μικροεπεξεργαστές που ρυθμίζουν και μετρούν με ακριβή τρόπο την πίεση και τη μεταβολή του όγκου των υγρών που περιέχουν στο εσωτερικό τους. Στις εργαστηριακές δοκιμές Εδαφομηχανικής, το υγρό αυτό είναι απαερωμένο νερό.

Οι ψηφιακοί ελεγκτές λειτουργούν είτε αυτόνομα είτε ως περιφερειακές συσκευές του υπολογιστή και κάθε μία από αυτές συνδέεται, μέσω σωλήνα, με ειδική θύρα στη βάση της κυψέλης. Επίσης, διαθέτουν πληκτρολόγιο με 16 πλήκτρα και μικρή οθόνη και έχουν τη δυνατότητα μέτρησης πίεσης έως 2 MPa και όγκου έως 200 cm³.

Οι ψηφιακοί ελεγκτές πίεσης / όγκου (Σχήμα 3.3), οι οποίοι χρησιμοποιούνται με τη συσκευή GDS ss – HCA είναι οι ακόλουθοι:

(α) Ελεγκτής της εξωτερικής πίεσης της κυψέλης (Cell pressure controller): Ο ελεγκτής της εξωτερικής πίεσης της κυψέλης ρυθμίζει και μετρά τις πιέσεις και τις μεταβολές του όγκου του νερού που εσωκλείεται στον εξωτερικό θάλαμο της κυψέλης, δηλαδή στο χώρο μεταξύ της εξωτερικής επιφάνειας του κοίλου δοκιμίου και του θαλάμου της κυψέλης.

(β) Ελεγκτής της εσωτερικής πίεσης της κυψέλης (Inner cell pressure controller): Ο ελεγκτής της εσωτερικής πίεσης της κυψέλης ρυθμίζει και μετρά τις πιέσεις και τις μεταβολές του όγκου του νερού που εσωκλείεται στον εσωτερικό θάλαμο της κυψέλης, δηλαδή στο χώρο εντός της εσωτερικής κοιλότητας του κοίλου δοκιμίου.

(γ) Ελεγκτής της πίεσης πόρων (ενδοπίεση) που εφαρμόζεται στο δοκίμιο για τον κορεσμό του καθώς και των μεταβολών της κατά τη διάρκεια της φόρτισης του δοκιμίου (Back pressure controller): Ο

ελεγκτής αυτός ρυθμίζει και μετρά τις πιέσεις που εφαρμόζονται στο δοκίμιο για τον κορεσμό του και τις αντίστοιχες μεταβολές στον όγκο του καθώς και αυτές κατά το στάδιο της φόρτισης του δοκιμίου.



Σχήμα 3.3: Οι τρεις ελεγκτές πίεσης / όγκου.

Μονάδα ρύθμισης σήματος / Διεπαφή ψηφιακού μορφοτροπέα (DTI)

Η μονάδα ρύθμισης σήματος (Σχήμα 3.4) ρυθμίζει το αναλογικό και το ψηφιακό σήμα. Για τη ρύθμιση του αναλογικού σήματος, η μονάδα διαθέτει έναν ή δύο πίνακες (με οκτώ κανάλια ο καθένας), οι οποίοι παρέχουν την απαραίτητη διέγερση σε κάθε μορφοτροπέα. Όλες οι έξοδοι των καναλιών στο εξωτερικό της μονάδας ρύθμισης σήματος ρυθμίζονται στα ± 10 volt, έτσι ώστε να έχουν τη δυνατότητα να συνδεθούν με το σύστημα δυναμικού ελέγχου GDSDCS, το οποίο βρίσκεται εντός της μονάδας. Για τη ρύθμιση του ψηφιακού σήματος, η μονάδα διαθέτει έναν ή δύο πίνακες με οκτώ κανάλια ο καθένας, και το κάθε κανάλι μεταφέρει ψηφιακό σήμα από το σύστημα δυναμικού ελέγχου GDSDCS στον κινητήρα ελέγχου και αντίστροφα. Οι μορφοτροπείς συνδέονται με τη μονάδα DTI με τη χρήση καλωδίων Iemo, τα οποία ξεχωρίζουν βάσει του διαφορετικού χρωματισμού τους.

Κάρτα ελέγχου GDSDCS

Το σύστημα δυναμικού ελέγχου GDSDCS (κάρτα ελέγχου), το οποίο βρίσκεται εγκατεστημένο εντός της μονάδας ρύθμισης σήματος, χαρακτηρίστηκε από τον Yang (2013) ως η καρδιά της πειραματικής διάταξης GDS ss – HCA. Η κάρτα αυτή συνδέεται με τον υπολογιστή μέσω καλωδίου USB υψηλής

ταχύτητας και χρησιμοποιείται για τη σύνδεση των ελεγκτών πίεσης / όγκου με τη μονάδα ενεργοποίησης και το μορφοτροπέα της πίεσης του νερού των πόρων. Η κάρτα ελέγχου GDSDCS ελέγχει την αξονική δύναμη, την αξονική μετακίνηση, τη ροπή στρέψης και τη γωνιακή στροφή.



Σχήμα 3.4: Η μονάδα ρύθμισης σήματος.

3.2.3 Λογισμικό GDSLAB

Η πειραματική διάταξη GDS ss – HCA συνδέεται με υπολογιστή (Σχήμα 3.5), στον οποίο είναι εγκατεστημένο το πρόγραμμα GDSLAB. Το GDSLAB είναι φιλικό προς το χρήστη και κατάλληλο για τον έλεγχο και / ή την καταγραφή των δεδομένων των δοκιμών.



Σχήμα 3.5: Ο σταθερός υπολογιστής που συνδέεται με τη συσκευή GDS ss - HCA.

3.3 Βαθμονόμηση ελεγκτών πίεσης / όγκου

3.3.1 Εισαγωγή

Στην υποενότητα 3.3 παρουσιάζονται οι διαδικασίες και τα αποτελέσματα των βαθμονομήσεων των τριών ελεγκτών πίεσης / όγκου, δηλαδή του ελεγκτή της εσωτερικής πίεσης της κυψέλης, της εξωτερικής πίεσης της κυψέλης και της πίεσης για τον κορεσμό του δοκιμίου.

Η βαθμονόμηση πραγματοποιείται προκειμένου να διακριβωθεί ότι ο κάθε ελεγκτής μετρά και ρυθμίζει με ακρίβεια τις μεταβολές στον όγκο και στην πίεση του νερού.

Όπως προαναφέρθηκε στην υποενότητα 3.2.2, το υγρό που χρησιμοποιείται στους ελεγκτές πίεσης / όγκου για την εκτέλεση των εργαστηριακών δοκιμών Εδαφομηχανικής είναι απαερωμένο νερό. Για το λόγο αυτό, χρησιμοποιήθηκε ο αποστακτήρας Hamilton του Εργαστηρίου Γεωτεχνικής Μηχανικής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας (Σχήμα 3.6) για την παραγωγή της απαραίτητης ποσότητας απεσταγμένου νερού. Συγκεκριμένα, παρήχθησαν 4lt απεσταγμένου νερού από τον αποστακτήρα, τα οποία στη συνέχεια τοποθετήθηκαν στο θάλαμο κενού έως ότου αφαιρεθούν οι όποιες φυσαλίδες αέρα υπήρχαν στο νερό.



Σχήμα 3.6: Ο αποστακτήρας Hamilton WSB/4 του Εργαστηρίου Γεωτεχνικής Μηχανικής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας.

3.3.2 Βαθμονομήσεις ελεγκτών ως προς τον όγκο

Η διαδικασία που ακολουθείται για τη βαθμονόμηση των τριών ελεγκτών πίεσης / όγκου ως προς τον όγκο είναι η ίδια και για τους τρεις ελεγκτές. Ακολουθεί η διαδικασία βαθμονόμησης για τον ελεγκτή της εσωτερικής πίεσης της κυψέλης ως προς τον όγκο και τα αποτελέσματα της βαθμονόμησης και για τους τρεις ελεγκτές.

- Διαδικασία βαθμονόμησης του ελεγκτή της εσωτερικής πίεσης της κυψέλης

Ο ελεγκτής της εσωτερικής πίεσης της κυψέλης βαθμονομείται ως προς τον όγκο, τόσο κατά τη φάση της πλήρωσής του με νερό, όσο και κατά τη φάση της εκκένωσής του. Η διαδικασία περιλαμβάνει τα εξής βήματα:

(α) Ο ελεγκτής συνδέεται με ημιδιάφανο σωλήνα, ο οποίος καταλήγει σε βαθμονομημένο ογκομετρικό κύλινδρο. Στη συνέχεια, μέσω του πληκτρολογίου δίνεται η εντολή στον ελεγκτή να αποβάλει το νερό που υπάρχει στο εσωτερικό του. Συγκεκριμένα, στο πληκτρολόγιο επιλέγονται διαδοχικά τα εξής πλήκτρα: 'reset' και '+'.
 (β) Τοποθέτηση 200 ml απεσταγμένου - απαερωμένου νερού στο βαθμονομημένο ογκομετρικό κύλινδρο για το γέμισμα του ελεγκτή. Πληκτρολογώντας διαδοχικά τα πλήκτρα 'reset' και '6', ο ελεγκτής γεμίζει με το νερό του ογκομετρικού κυλίνδρου.
 (γ) Μηδενισμός της ένδειξης του όγκου στην οθόνη του ελεγκτή μέσω του πληκτρολογίου (πληκτρολόγιο: 'reset' και '5').
 (δ) Αντικατάσταση του βαθμονομημένου ογκομετρικού κυλίνδρου χωρητικότητας 200 ml με επίσης βαθμονομημένο κυλίνδρου χωρητικότητας 100 ml.
 (ε) Ο ελεγκτής ρυθμίζεται μέσω του πληκτρολογίου να φθάσει σε διάφορες αρνητικές τιμές όγκου, έτσι ώστε να αφαιρεθούν συγκεκριμένες ποσότητες νερού από το εσωτερικό του. Στη συνέχεια, ο χρήστης ελέγχει εάν οι τιμές όγκου που ορίζονται από τον χρήστη στην οθόνη του ελεγκτή συμπίπτουν με τις αναγραφόμενες ενδείξεις του νερού στον ογκομετρικό κύλινδρο. Αρχικά, ο χρήστης ρυθμίζει τον ελεγκτή έτσι ώστε να φθάσει τιμή όγκου ίση με -10.000 mm^3 (πληκτρολόγιο: 'reset', '4', '-10000', 'enter'). Ακολούθως, ελέγχει την ένδειξη του ογκομετρικού κυλίνδρου, η οποία παρατηρεί πως είναι τα 12 ml. Η ένδειξη των 12 ml είναι αρκετά κοντά με την προσδοκώμενη ένδειξη στο σωλήνα, η οποία ήταν τα 10ml. Το σφάλμα των 2 ml προέρχεται από προηγούμενη χρήση του ογκομετρικού κυλίνδρου. Η ίδια διαδικασία επαναλαμβάνεται και για τις τιμές -30.000 , -50.000 , -100.000 mm^3 , και όπως φαίνεται από τον Πίνακα 3.1, οι ενδείξεις στον ογκομετρικό κύλινδρο παρουσιάζουν μικρές αποκλίσεις από τις αντίστοιχες τιμές όγκου που ορίστηκαν αρχικά στον ελεγκτή.

Πίνακας 3.1: Οι ενδείξεις όγκου της οθόνης του ελεγκτή εσωτερικής πίεσης της κυψέλης και οι αντίστοιχες ενδείξεις του νερού στον ογκομετρικό κύλινδρο κατά το άδειασμα του ελεγκτή.

Μέτρηση	Ένδειξη οθόνης ελεγκτή (mm^3)	Ένδειξη ογκομετρικού κυλίνδρου (ml)
1	0	2
2	-10.000	12
3	-30.000	32
4	-50.000	52
5	-100.00	102

Η διαδικασία που ακολουθείται για τη βαθμονόμηση του ελεγκτή πίεσης της εσωτερικής κυψέλης ως προς τον όγκο κατά τη διάρκεια του γεμίσματός του, περιγράφεται από τα παρακάτω βήματα:

(α) Μηδενισμός της ένδειξης του όγκου στην οθόνη του ελεγκτή (πληκτρολόγιο: 'reset', '5').

(β) Ο χρήστης προσθέτει 97.5 ml στο βαθμονομημένο ογκομετρικό κύλινδρο των 100 ml, ο οποίος χρησιμοποιήθηκε και προηγουμένως. Επίσης, ο ελεγκτής συνδέεται με ημιδιάφανο λεπτό σωλήνα, ο οποίος καταλήγει στον ογκομετρικό κύλινδρο.

(γ) Ο ελεγκτής ρυθμίζεται μέσω του πληκτρολογίου να φθάσει σε διάφορες θετικές τιμές όγκου, έτσι ώστε να προστεθούν συγκεκριμένες ποσότητες νερού στο εσωτερικό του από το νερό που υπάρχει στον ογκομετρικό κύλινδρο. Στη συνέχεια, ο χρήστης ελέγχει εάν οι τιμές όγκου στην οθόνη του ελεγκτή συμπίπτουν με τις απώλειες του νερού στον ογκομετρικό κύλινδρο. Αρχικά, ο χρήστης ρυθμίζει τον ελεγκτή έτσι ώστε να φθάσει τιμή όγκου ίση με 10.000 mm³ (πληκτρολόγιο: 'reset', '4', '10000', 'enter'). Ακολούθως, ελέγχει την ένδειξη του ογκομετρικού κυλίνδρου, η οποία παρατηρεί πως είναι 87.5 ml. Με βάση την αρχική ένδειξη του ογκομετρικού κυλίνδρου, η οποία ήταν 100 ml και την τελική ένδειξη η οποία είναι 87.5 ml, υπολογίζεται ότι αφαιρέθηκαν 12.5 ml νερού από τον ογκομετρικό κύλινδρο, τα οποία είναι αρκετά κοντά με την αρχική ένδειξη των 10 ml στον ελεγκτή.

Η παραπάνω διαδικασία επαναλαμβάνεται και για τις τιμές 30.000, 50.000, 100.000 mm³ και όπως φαίνεται από τον Πίνακα 3.2, οι ενδείξεις στον ογκομετρικό κύλινδρο παρουσιάζουν μικρές αποκλίσεις από τις αντίστοιχες τιμές όγκου που ορίστηκαν αρχικά στον ελεγκτή.

Πίνακας 3.2: Οι ενδείξεις όγκου της οθόνης του ελεγκτή εσωτερικής πίεσης της κυψέλης και οι αντίστοιχες ενδείξεις του νερού στον ογκομετρικό κύλινδρο κατά το γέμισμα του ελεγκτή.

Μέτρηση	Ένδειξη οθόνης ελεγκτή (mm ³)	Ένδειξη ογκομετρικού κυλίνδρου (ml)
1	0	97,5
2	10.000	87,5
3	30.000	69
4	50.000	50
5	100.000	0

- Βαθμονόμηση του ελεγκτή της πίεσης που εφαρμόζεται στο δοκίμιο για τον κορεσμό του

Στους Πίνακες 3.3 & 3.4 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των βαθμονομήσεων όγκου για τον ελεγκτή της πίεσης που εφαρμόζεται για τον κορεσμό του δοκιμίου κατά το άδειασμα και το γέμισμα του ελεγκτή αντίστοιχα.

Όπως και στον ελεγκτή της εσωτερικής πίεσης της κυψέλης, παρατηρείται ότι, τόσο κατά το άδειασμα όσο και το γέμισμα του ελεγκτή της πίεσης για τον κορεσμό του δοκιμίου, οι αποκλίσεις μεταξύ των τιμών όγκου που ορίστηκαν αρχικά στον ελεγκτή και των ενδείξεων στον ογκομετρικό σωλήνα είναι αρκετά μικρές.

Πίνακας 3.3: Οι ενδείξεις όγκου της οθόνης του ελεγκτή της πίεσης για τον κορεσμό του δοκιμίου και οι αντίστοιχες ενδείξεις του νερού στον ογκομετρικό κύλινδρο κατά το άδειασμα του ελεγκτή.

Μέτρηση	Ένδειξη οθόνης ελεγκτή (mm ³)	Ένδειξη ογκομετρικού κυλίνδρου (ml)
1	0	1,5
2	-10.000	11,5
3	-30.000	31,5
4	-50.000	51,5
5	-100.000	101,5

Πίνακας 3.4: Οι ενδείξεις όγκου της οθόνης του ελεγκτή της πίεσης για τον κορεσμό του δοκιμίου και οι αντίστοιχες ενδείξεις του νερού στον ογκομετρικό κύλινδρο κατά το γέμισμα του ελεγκτή.

Μέτρηση	Ένδειξη οθόνης ελεγκτή (mm ³)	Ένδειξη ογκομετρικού κυλίνδρου (ml)
1	0	100
2	10.000	90
3	30.000	70
4	50.000	50,5
5	100.000	1,5

- Βαθμονόμηση του ελεγκτή της εξωτερικής πίεσης της κυψέλης

Στους Πίνακες 3.5 & 3.6 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των βαθμονομήσεων όγκου για τον ελεγκτή της εξωτερικής πίεσης της κυψέλης κατά το άδειασμα και το γέμισμα του ελεγκτή αντίστοιχα.

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι αποκλίσεις μεταξύ των τιμών όγκου που ορίστηκαν αρχικά στον ελεγκτή και των ενδείξεων στον ογκομετρικό κύλινδρο είναι μεγαλύτερες από αυτές που παρατηρήθηκαν στους άλλους δύο ελεγκτές και φθάνουν έως τα 12 ml. Οι μεγαλύτερες αποκλίσεις είναι πολύ πιθανό να οφείλονται στο γεγονός ότι ο σωλήνας που χρησιμοποιήθηκε στο συγκεκριμένο ελεγκτή για τη σύνδεση του με τον ογκομετρικό σωλήνα είχε μεγαλύτερη διάμετρο (8 mm) συγκριτικά με τη διάμετρο των σωλήνων που χρησιμοποιήθηκαν στους άλλους δύο ελεγκτές (3.175 mm).

Πίνακας 3.5: Οι ενδείξεις όγκου της οθόνης του ελεγκτή της εξωτερικής πίεσης της κυψέλης και οι αντίστοιχες ενδείξεις του νερού στον ογκομετρικό κύλινδρο κατά το άδειασμα του ελεγκτή.

Μέτρηση	Ένδειξη οθόνης ελεγκτή (mm ³)	Ένδειξη ογκομετρικού κυλίνδρου (ml)
1	0	0
2	-50.000	40
3	-100.000	89
4	-150.000	140
5	-180.000	169

Πίνακας 3.6: Οι ενδείξεις όγκου της οθόνης του ελεγκτή της εξωτερικής πίεσης της κυψέλης και οι αντίστοιχες ενδείξεις του νερού στον ογκομετρικό κύλινδρο κατά το γέμισμα του ελεγκτή.

Μέτρηση	Ένδειξη οθόνης ελεγκτή (mm ³)	Ένδειξη ογκομετρικού κυλίνδρου (ml)
1	0	200
2	50.000	151
3	100.000	102
4	150.000	53
5	180.000	32

3.3.3 Βαθμονομήσεις ελεγκτών ως προς την πίεση

Η διαδικασία που ακολουθείται για τη βαθμονόμηση των τριών ελεγκτών πίεσης / όγκου ως προς την πίεση είναι η ίδια και για τους τρεις ελεγκτές. Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας πραγματοποιήθηκε μία βαθμονόμηση πίεσης.

- Βαθμονόμηση του ελεγκτή της πίεσης που εφαρμόζεται στο δοκίμιο για τον κορεσμό του:

Η διαδικασία που ακολουθείται για τη βαθμονόμηση του ελεγκτή της πίεσης για τον κορεσμό του δοκιμίου ως προς την πίεση περιγράφεται από τα παρακάτω βήματα:

(α) Ο ελεγκτής της εφαρμοζόμενης πίεσης πόρων κατά το στάδιο του κορεσμού του δοκιμίου, έχει αρχικά πληρωθεί με απεσταγμένο - απαερωμένο νερό. Στη συνέχεια, συνδέεται με έναν από τους άλλους δύο ελεγκτές, και συγκεκριμένα με τον ελεγκτή της εσωτερικής πίεσης της κυψέλης με έναν ημιδιάφανο σωλήνα μικρής διαμέτρου.

(β) Ο χρήστης σημειώνει την αρχική ένδειξη της πίεσης τόσο από την οθόνη του ελεγκτή της εσωτερικής πίεσης της κυψέλης ($p_0 = 54$ kPa), όσο και από την οθόνη του ελεγκτή της πίεσης που εφαρμόζεται στο δοκίμιο για τον κορεσμό του ($p_0 = 39$ kPa).

(γ) Οι ενδείξεις των πιέσεων στις οθόνες και των δύο ελεγκτών μηδενίζονται (πληκτρολόγιο: 'reset', '8').

(δ) Η εσωτερική πίεση της κυψέλης ρυθμίζεται από το πληκτρολόγιο σε τιμή ίση με 10 kPa (πληκτρολόγιο: 'reset', '7', '10', 'enter'). Στη συνέχεια, ο χρήστης ελέγχει την τιμή της πίεσης η οποία εμφανίζεται στην οθόνη του δεύτερου ελεγκτή, η οποία είναι ίση με 9 kPa. Η προσδοκώμενη τιμή της πίεσης στο δεύτερο ελεγκτή είναι τα 10 kPa. Η απόκλιση του 1 kPa μεταξύ της προσδοκώμενης πίεσης και της πίεσης στην οθόνη του ελεγκτή της πίεσης για τον κορεσμό του δοκιμίου οφείλεται στη διακριτότητα του συστήματος.

(ε) Στη συνέχεια εφαρμόζεται η ίδια διαδικασία με το βήμα (δ) για τιμές πίεσης ίσες με 30, 50 και 100 kPa. Οι αντίστοιχες τιμές στην οθόνη του δεύτερου ελεγκτή είναι 29, 49 και 99 kPa (Πίνακας 3.7). Από

τον Πίνακα 3.7 παρατηρείται ότι οι αποκλίσεις μεταξύ των πιέσεων στην οθόνη του ελεγκτή της πίεσης της εσωτερικής κυψέλης και των πιέσεων του ελεγκτή της πίεσης που εφαρμόζεται στο δοκίμιο για τον κορεσμό του είναι μικρές.

Πίνακας 3.7: Οι ενδείξεις πίεσης του ελεγκτή πίεσης της εσωτερικής κυψέλης και οι αντίστοιχες ενδείξεις στον ελεγκτή πίεσης για τον κορεσμό του δοκιμίου.

Μέτρηση	Ένδειξη ελεγκτή πίεσης της εσωτερικής κυψέλης (kPa)	Ένδειξη ελεγκτή πίεσης για τον κορεσμό του δοκιμίου(kPa)
1	0	0
2	10	9
3	30	29
4	50	49
5	100	99

3.4 Προετοιμασία κοίλου κυλινδρικού δοκιμίου άμμου

Η διαδικασία προετοιμασίας ενός κοίλου δοκιμίου άμμου περιλαμβάνει από τα εξής βήματα:

(α) Κάλυψη του εσωτερικού χείλους της βάσης του δοκιμίου (base pedestal) με ένα λεπτό στρώμα λιπαντικού, το οποίο έχει ως βάση τη σιλικόνη (Σχήμα 3.7). Η τοποθέτηση του λιπαντικού συμβάλλει στην ευκολότερη εισχώρηση του συστήματος εσωτερική μεμβράνη – εξάρτημα συγκράτησης μεμβράνης - δακτύλιος στη βάση του δοκιμίου.

(β) Τοποθέτηση του κάτω μεταλλικού δακτυλίου συγκράτησης της εσωτερικής μεμβράνης (lower membrane holder) στο εσωτερικό της βάσης του δοκιμίου (Σχήμα 3.8).

(γ) Τοποθέτηση ενός ελαστικού δακτυλίου κυκλικής διατομής στη βάση του άνω εξαρτήματος συγκράτησης της εσωτερικής μεμβράνης (upper membrane holder) (Σχήμα 3.9). Επίσης, η προαναφερθείσα διάταξη τοποθετείται εντός της εσωτερικής μεμβράνης (D =60 mm), όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.10.

(δ) Τοποθέτηση της διάταξης δακτύλιος – άνω εξάρτημα συγκράτησης της εσωτερικής μεμβράνης – εσωτερική μεμβράνη στο εσωτερικό της βάσης του δοκιμίου (Σχήμα 3.11).

(ε) Η εσωτερική μεμβράνη διπλώνεται μερικές φορές, έτσι ώστε να διευκολυνθεί η τοποθέτηση 4 βιδών στις 4 οπές του άνω εξαρτήματος συγκράτησης της εσωτερικής μεμβράνης. Οι οπές αυτές βρίσκονται πάνω από τις 4 οπές της βάσης του δοκιμίου (Σχήμα 3.12). Οι βίδες αυτές, συμπιέζουν τον ελαστικό δακτύλιο κυκλικής διατομής, με αποτέλεσμα να επιτυγχάνεται σφράγιση μεταξύ της εσωτερικής μεμβράνης και της βάσης του δοκιμίου.

(στ) Ο κάτω κοίλος κυλινδρικός πορώδης δίσκος, με 6 λεπίδες στην άνω βάση του, βιδώνεται στη βάση του δοκιμίου με 6 βίδες, χρησιμοποιώντας σταυρωτό κατσαβίδι (Σχήμα 3.13).



Σχήμα 3.7: Τοποθέτηση λιπαντικού στο εσωτερικό χείλος της βάσης του δοκιμίου.



Σχήμα 3.8: Τοποθέτηση του κάτω δακτυλίου συγκράτησης της εσωτερικής μεμβράνης στο εσωτερικό της βάσης του δοκιμίου.



Σχήμα 3.9: Τοποθέτηση του ελαστικού δακτυλίου στη βάση του άνω εξαρτήματος συγκράτησης της εσωτερικής μεμβράνης.



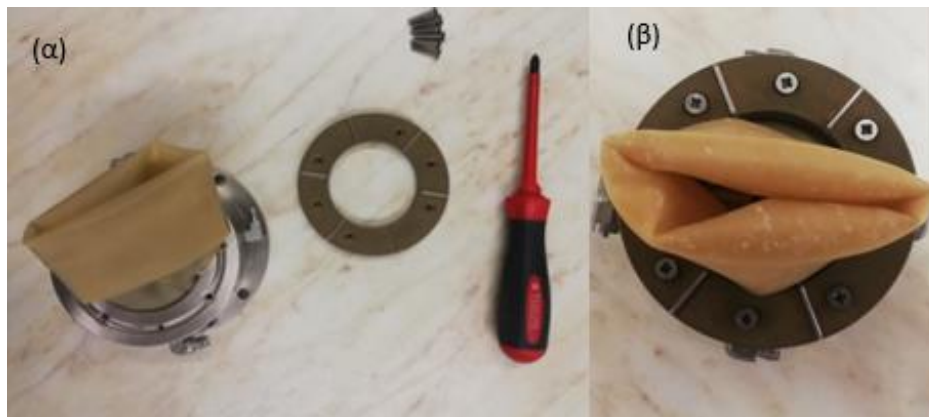
Σχήμα 3.10: Τοποθέτηση της διάταξης δακτύλιος-άνω εξάρτημα συγκράτησης της εσωτερικής μεμβράνης εντός της εσωτερικής μεμβράνης.



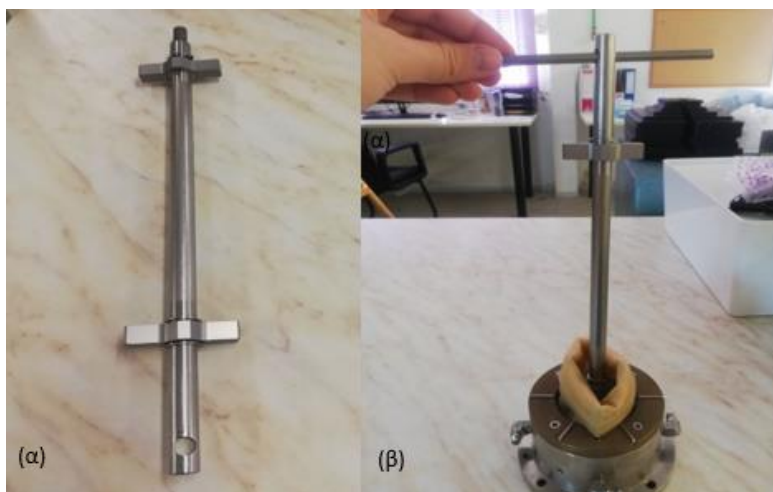
Σχήμα 3.11: Τοποθέτηση της διάταξης δακτύλιος – άνω εξάρτημα συγκράτησης της εσωτερικής μεμβράνης – εσωτερική μεμβράνη στο εσωτερικό της βάσης του δοκιμίου.



Σχήμα 3.12: Σφράγιση μεταξύ της εσωτερικής μεμβράνης και της βάσης του δοκιμίου με 4 βίδες.



Σχήμα 3.13: (α) Ο κάτω πορώδης δίσκος, οι 6 βίδες και το σταυρωτό κατσαβίδι, (β) Ο πορώδης δίσκος βιδωμένος στη βάση του δοκιμίου.

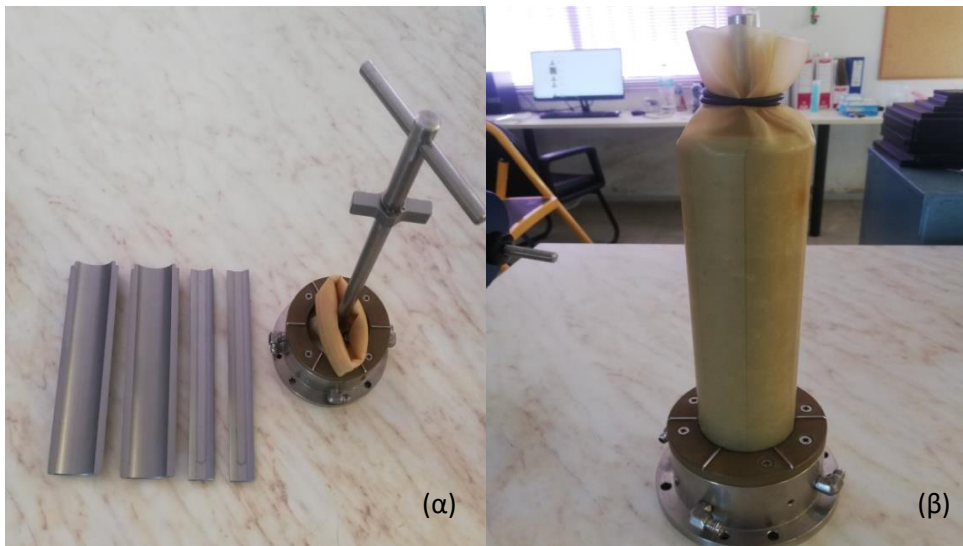


Σχήμα 3.14: (α) Η βιδωτή ράβδος, (β) Τοποθέτηση της βιδωτής ράβδου εντός της βάσης του δοκιμίου.

(ζ) Τοποθέτηση της βιδωτής ράβδου (guide bar) εντός της βάσης του δοκιμίου (Σχήμα 3.14).

(η) Τοποθέτηση και συναρμολόγηση του εσωτερικού διαιρετού καλουπιού, που αποτελείται από 4 επιμέρους τμήματα (Σχήμα 3.15(α)), εντός της εσωτερικής μεμβράνης. Συγκέντρωση της εσωτερικής μεμβράνης που προεξέχει πάνω από το εσωτερικό καλούπι με έναν ελαστικό δακτύλιο (Σχήμα 3.15(β)).

(θ) Τοποθέτηση ειδικού φίλτρου σε σχήμα δακτυλίου επάνω στον κάτω πορώδη δίσκο. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιείται το φίλτρο No.50, το οποίο είναι κατάλληλο για καθαρές άμμους (Σχήμα 3.16).



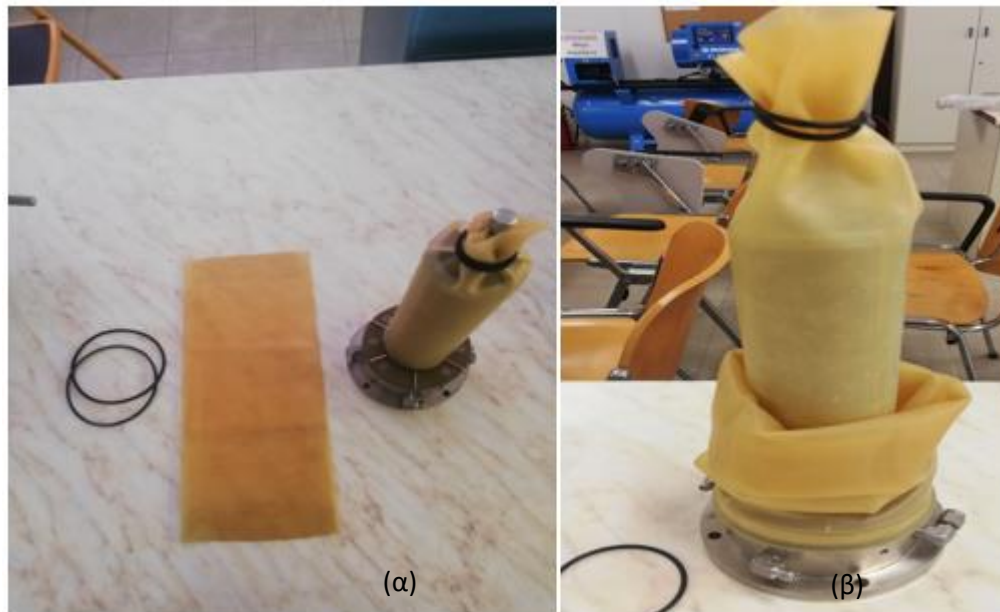
Σχήμα 3.15: (α) Το διαιρετό εσωτερικό καλούπι, (β) Ενσωμάτωση του εσωτερικού καλουπιού εντός της εσωτερικής μεμβράνης και συγκέντρωση της εσωτερικής μεμβράνης που προεξέχει πάνω από το εσωτερικό καλούπι με έναν ελαστικό δακτύλιο.



Σχήμα 3.16: Τοποθέτηση του φίλτρου στον πορώδη δίσκο της βάσης του δοκιμίου.

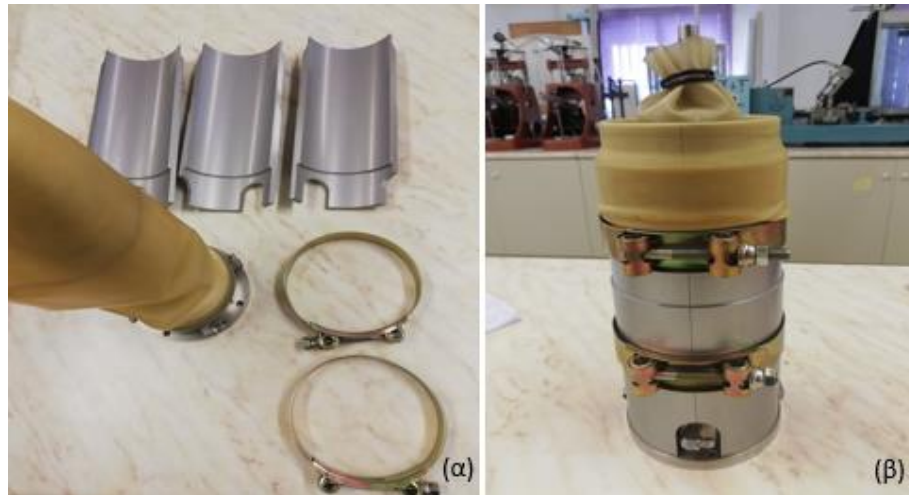
(ι) Τοποθέτηση της εξωτερικής μεμβράνης ($D = 100 \text{ mm}$) περιμετρικά της βάσης του δοκιμίου. Η μεμβράνη ασφαρίζεται στη βάση του δοκιμίου με τη χρήση 2 δακτυλίων κυκλικής διατομής (Σχήμα 3.17).

(κ) Τοποθέτηση του εξωτερικού καλούπιού, που αποτελείται από 3 τμήματα, γύρω από την εξωτερική μεμβράνη (Σχήμα 3.18(α)). Το καλούπι στερεώνεται με δύο σφιγκτήρες κυκλικής διατομής. Η εξωτερική μεμβράνη που προεξέχει από το καλούπι διπλώνεται γύρω από το εξωτερικό καλούπι (Σχήμα 3.18(β)).



Σχήμα 3.17: (α) Η εξωτερική μεμβράνη και οι 2 ελαστικοί δακτύλιοι κυκλικής διατομής, (β) Τοποθέτηση της εξωτερικής μεμβράνης γύρω από τη βάση του δοκιμίου και σφράγιση της στη βάση με τη χρήση δύο δακτυλίων.

(λ) Η μέθοδος προετοιμασίας χαλαρού δοκιμίου καθαρής άμμου που χρησιμοποιήθηκε στην προκειμένη περίπτωση είναι η μέθοδος της ξηρής εναπόθεσης. Συγκεκριμένα, καθαρή χαλαζιακή άμμος, με σχεδόν μηδενική υγρασία, εισάγεται σε στρώσεις εντός του κοίλου κυλινδρικού χώρου, που σχηματίζεται μεταξύ του εσωτερικού και του εξωτερικού καλούπιού, με τη βοήθεια ενός χωνιού και ενός κουταλιού (Σχήμα 3.19). Το ύψος από το οποίο ρίχνεται η άμμος στην κοιλότητα είναι σταθερό για κάθε στρώση άμμου, όμως διαφέρει από στρώση σε στρώση.



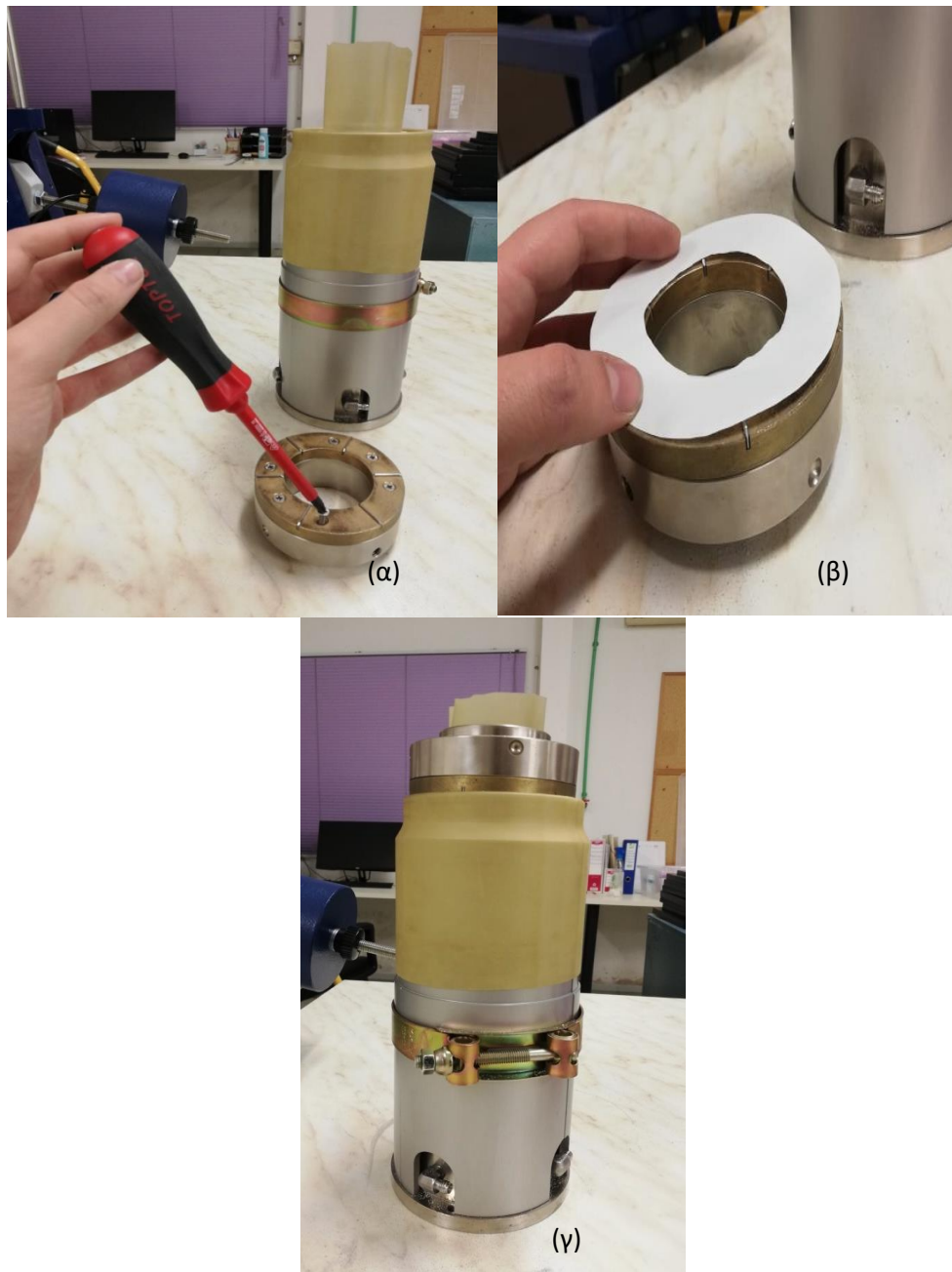
Σχήμα 3.18: (α) Το διαιρετό εξωτερικό καλούπι και οι 2 σφιγκτήρες, (β) Τοποθέτηση του εξωτερικού καλουπιού γύρω από την εξωτερική μεμβράνη και στερέωσή του με 2 σφιγκτήρες.

(μ) Ο άνω πορώδης δίσκος βιδώνεται με 6 βίδες στο κάτω μέρος του καπακιού του δοκιμίου (top cap), με τη βοήθεια σταυρωτού κατσαβιδιού (Σχήμα 3.20(α)). Στη συνέχεια, ειδικό φίλτρο τοποθετείται στη βάση του πορώδους δίσκου (Σχήμα 3.20(β)) και τελικά, η διάταξη καπάκι – πορώδης δίσκος – φίλτρο τοποθετείται με προσοχή στο άνω μέρος του δοκιμίου (Σχήμα 3.20(γ)).

(ν) Η εσωτερική μεμβράνη που περισσεύει στο επάνω μέρος του δοκιμίου διπλώνεται γύρω από το χείλος του καπακιού και συγκρατείται εκεί με ένα δακτύλιο κυκλικής διατομής (Σχήμα 3.21). Η εξωτερική μεμβράνη που περισσεύει στο επάνω μέρος του δοκιμίου, κόβεται κατάλληλα, διπλώνεται στο χείλος του εξωτερικού καλουπιού και συγκρατείται εκεί με δύο δακτυλίους κυκλικής διατομής.



Σχήμα 3.19: Έγχυση της άμμου σε στρώσεις στην κοιλότητα μεταξύ των δύο μεμβρανών, με τη βοήθεια ενός χωνιού και ενός κουταλιού.



Σχήμα 3.20: (α) Ο άνω πορώδης δίσκος βιδώνεται στο καπάκι του δοκιμίου με 6 βίδες, με τη χρήση σταυρωτού κατσαβιδιού, (β) Τοποθέτηση φίλτρου στη βάση της διάταξης πορώδης δίσκος – καπάκι, (γ) Τοποθέτηση της διάταξης φίλτρο – πορώδης δίσκος – καπάκι στο άνω μέρος του δοκιμίου άμμου.



Σχήμα 3.21: Η εσωτερική και η εξωτερική μεμβράνη διπλώνονται και ασφαλίζονται με ελαστικούς δακτυλίους στη διάταξη διαμόρφωσης του δοκιμίου άμμου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΑΝΙΣΟΤΡΟΠΙΑΣ ΛΟΓΩ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΣΤΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΑΜΜΩΔΩΝ ΕΔΑΦΩΝ – ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

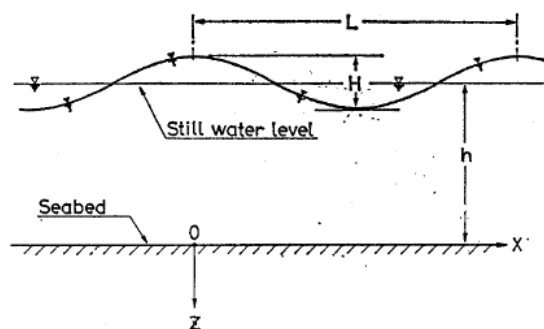
Η επίδραση της ανισοτροπίας λόγω φόρτισης στη μηχανική συμπεριφορά εδαφών έχει μελετηθεί μέσω παραμετρικών πειραματικών ερευνών που προσομοιώνουν τις συνθήκες φόρτισης σε διάφορα επίπεδα:

- του συντελεστή ωθήσεων σε ηρεμία, K_0
- της γωνίας μεταξύ του επιπέδου της μέγιστης κύριας τάσης και του κατακόρυφου επιπέδου, α , και
- της παραμέτρου της μέσης κύριας τάσης, b

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται μια βιβλιογραφική ανασκόπηση των παραπάνω μελετών που έχουν πραγματοποιηθεί σε αμμώδη εδάφη υπό συνθήκες μονοτονικής και κυκλικής φόρτισης. Συγκεκριμένα, παρουσιάζεται η επίδραση της ανισότροπης φόρτισης στη διατμητική αντοχή, στην αντίσταση έναντι ρευστοποίησης, στην ανάπτυξη της υπερπίεσης του ύδατος των πόρων και στο λόγο των κυκλικών τάσεων για ένα μεγάλο εύρος αμμωδών εδαφών σε διάφορες πυκνότητες και συνθήκες στερεοποίησης.

4.1 Επίδραση του K_0 στην εδαφική συμπεριφορά του πυθμένα θαλασσών λόγω των φορτίων κυματισμού

Η επίδραση του K_0 στην ανάπτυξη του λόγου κυκλικών τάσεων που οδηγούν στην προοδευτική αύξηση της πίεσης του ύδατος των πόρων και τελικά στη ρευστοποίηση αμμωδών εδαφών έχει μελετηθεί από τους Ishihara et al. (1985), με σκοπό (α) την προσομοίωση της αρχικής ανισοτροπίας εδαφών που αποτελούν το πυθμένα θαλασσών υπό μονοτονική φόρτιση, και (β) τη μελέτη της συμπεριφοράς τους κατά την επιβολή του φορτίου κυματισμού, Σχήμα (4.1).



Σχήμα 4.1: Διάγραμμα και σύστημα αξόνων για την ανάλυση του φορτίου κυματισμού (Ishihara et al., 1985).

Τα κύματα που ταξιδεύουν στην επιφάνεια της θάλασσας, θεωρείται πως αποτελούνται από ένα άθροισμα άπειρων κυματισμών σταθερού πλάτους και μήκους κύματος. Αυτοί οι κυματισμοί δημιουργούν μια μεταβαλλόμενη πίεση του νερού στην επιφάνεια του πυθμένα, η οποία έχει τη μέγιστη τιμή της στην κορυφογραμμή του θαλάσσιου κύματος. Η πίεση που επιβάλλεται στην επιφάνεια του πυθμένα δίνεται στην Εξίσωση (4.1), που περιγράφει μια αρμονική συνάρτηση:

$$p(x) = p_0 \cos\left(\frac{2\pi}{L}x - \frac{2\pi}{T}t\right) \quad (4.1)$$

Όπου p_0 : είναι το πλάτος πίεσης, L : το μήκος κύματος, T : η περίοδος κύματος, x : το σημείο στο οριζόντιο επίπεδο του πυθμένα, και t : ο χρόνος της φόρτισης.

Θεωρώντας πως ο πυθμένας αποτελεί έναν ομογενή και ελαστικό ημι-χώρο που υποβάλλεται στην αρμονική φόρτιση της Εξίσωσης (4.1), οι συνισταμένες των τάσεων μπορούν να υπολογιστούν βάσει της λύσης Boussinesq, και δίνονται παρακάτω:

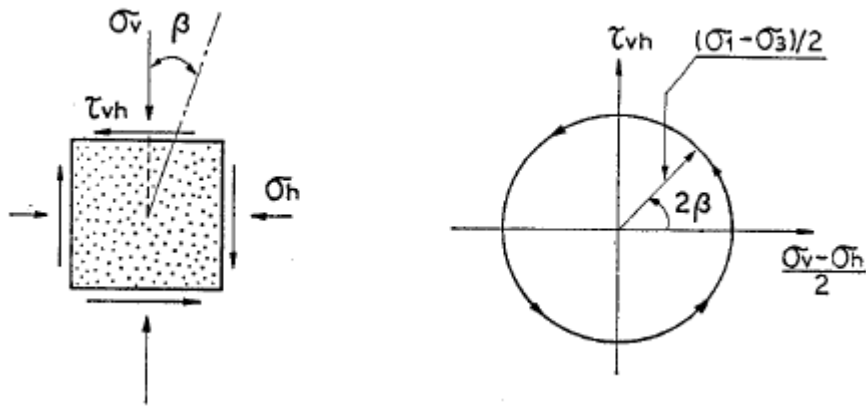
$$\left. \begin{aligned} \frac{\sigma_v - \sigma_h}{2} &= p_0 \frac{2\pi Z}{L} e^{-2\pi Z/L} \cdot \cos\left(\frac{2\pi x}{L} - \frac{2\pi t}{T}\right) \\ \tau_{vh} &= p_0 \frac{2\pi Z}{L} e^{-2\pi Z/L} \cdot \sin\left(\frac{2\pi x}{L} - \frac{2\pi t}{T}\right) \end{aligned} \right\} \quad (4.2)$$

Όπου σ_v : είναι η κατακόρυφη τάση στο επίπεδο του πυθμένα, σ_h : είναι η οριζόντια τάση και τ_{vh} : είναι η διατμητική τάση στο επίπεδο του πυθμένα. Τα x και z μετρώνται βάσει του συστήματος αξόνων του Σχήματος 4.1.

Παρατηρείται πως η διαφορά των ορθών τάσεων $(\sigma_v - \sigma_h)/2$ και τη διατμητική τάση τ_{vh} έχουν το ίδιο πλάτος αλλά διαφορά φάσης.

Διαιρώντας τις εξισώσεις των τ_{vh} και $(\sigma_v - \sigma_h)/2$ προκύπτει η γωνία β (Εξίσωση 4.3 και Σχήμα 4.2), η οποία μετράται από την κατακόρυφο και δείχνει πως για ένα δεδομένο σημείο x η διεύθυνση των κύριων αξόνων περιστρέφεται με το χρόνο, έτσι ώστε σε μια περίοδο $t=T$ η περιστροφή να είναι 180° .

$$\beta = \frac{\pi}{L}x - \frac{\pi}{T}t = \frac{1}{2} \tan^{-1}\left(\frac{\tau_{vh}}{\sigma_v - \sigma_h}\right) \quad (4.3)$$



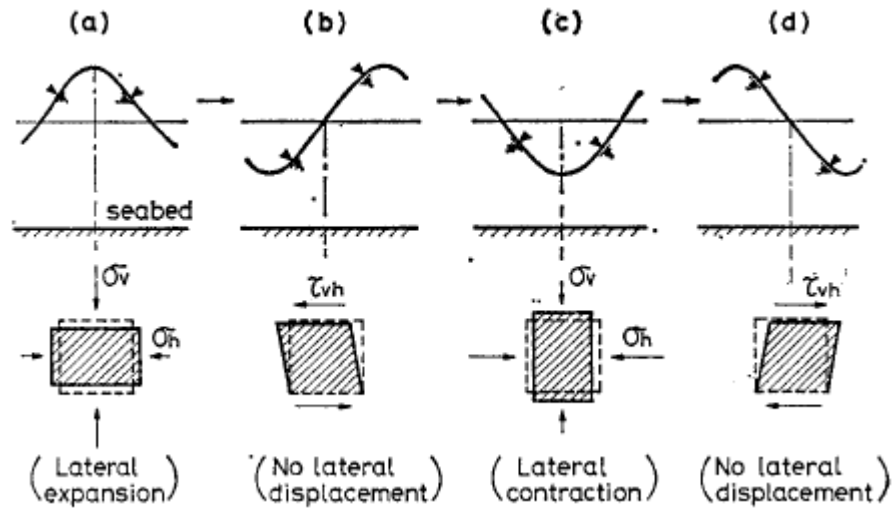
Σχήμα 4.2: Περιστροφή των κύριων τάσεων (κυκλική φόρτιση) (Ishihara et al., 1985).

Η ακτίνα του κύκλου δίνεται στην Εξίσωση (4.4) και περιγράφει το ήμισυ της εκτροπικής τάσης:

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_v - \sigma_h}{2}\right)^2 + \tau_{vh}^2} = p_0 \frac{2\pi Z}{L} e^{-2\pi Z/L} \quad (4.4)$$

Για σημείο με δεδομένο βάθος από τον πυθμένα (z), η παραπάνω εξίσωση δείχνει πως η εκτροπική τάση για όλα τα σημεία (x) του οριζόντιου επιπέδου είναι ίδια και ανεξάρτητη του χρόνου φόρτισης (t). Συνοψίζοντας τα παραπάνω και με την υπόθεση του ομογενούς και ελαστικού ημι-χώρου για τον πυθμένα θαλάσσης που υποβάλλεται σε μια αρμονική φόρτιση λόγω του επιφανειακού κυματισμού, η κυκλική τάση που αναπτύσσεται στον πυθμένα έχει τα χαρακτηριστικά της μεταβολής της κυκλικής διατμητικής τάσης λόγω της συνεχούς στροφής των αξόνων των κυρίων τάσεων.

Η ανάπτυξη των παραμορφώσεων του πυθμένα εξαιτίας του φορτίου κυματισμού μεταβάλλεται χρονικά ακολουθώντας την αρμονική φόρτιση. Στο Σχήμα 4.3 παρουσιάζονται χαρακτηριστικές παραμορφώσεις του ίδιου σημείου (x και z) ή εδαφικού στοιχείου σε διάφορες στιγμές (a , b , c , & d). Στο χρόνο (a) όπου επιβάλλεται το μέγιστο πλάτος του φορτίου κυματισμού (κορυφογραμμή), στο εδαφικό στοιχείο επιβάλλονται μόνο ορθές τάσεις που προκαλούν την πλευρική διόγκωση και την κατακόρυφη συμπίεσή του. Στο χρόνο (b) όπου το φορτίο κυματισμού είναι μηδενικό, το εδαφικό στοιχείο υποβάλλεται σε απλή διάτμηση με μηδενική πλευρική παραμόρφωση και μόνο γωνιακή παραμόρφωση. Στο χρόνο (c) όπου επιβάλλεται το ελάχιστο πλάτος του φορτίου κυματισμού (αρνητικό πρόσημο, δηλαδή αποφόρτιση) στο εδαφικό στοιχείο επιβάλλονται μόνο ορθές τάσεις που προκαλούν την πλευρική συμπίεση και την κατακόρυφη διόγκωσή του. Στο χρόνο (d) όπου το φορτίο κυματισμού είναι μηδενικό, το εδαφικό στοιχείο υποβάλλεται σε απλή διάτμηση με μηδενική πλευρική παραμόρφωση και μόνο γωνιακή παραμόρφωση, αλλά αντίθετης φοράς με το χρόνο (b).



Σχήμα 4.3: Μεταβολές στην παραμόρφωση εδαφικού στοιχείου στον πυθμένα λόγω της φόρτισης κυματισμού (Ishihara et al., 1985).

Παρατηρείται λοιπόν πως η πλευρική παραμόρφωση που λαμβάνει χώρα στις καταστάσεις (α) και (c) είναι αναστρέψιμη στις καταστάσεις (b) και (d). Το ίδιο ισχύει και για την κατακόρυφη παραμόρφωση, καθώς η φόρτιση επιβάλλεται υπό αστράγγιστες συνθήκες. Αυτή η συνθήκη επαληθεύεται εύκολα με την υπόθεση του εδάφους του πυθμένα ως ελαστικό μέσο. Για προβλήματα επίπεδης παραμόρφωσης, οι ορθές παραμορφώσεις ϵ_v και ϵ_h στο κατακόρυφο και οριζόντιο επίπεδο αντίστοιχα δίνονται στην Εξίσωση (4.5).

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_v &= \frac{1+\nu}{E} [(1-\nu)\sigma_v - \nu\sigma_h] \\ \epsilon_h &= \frac{1+\nu}{E} [(1-\nu)\sigma_h - \nu\sigma_v] \end{aligned} \right\} \quad (4.5)$$

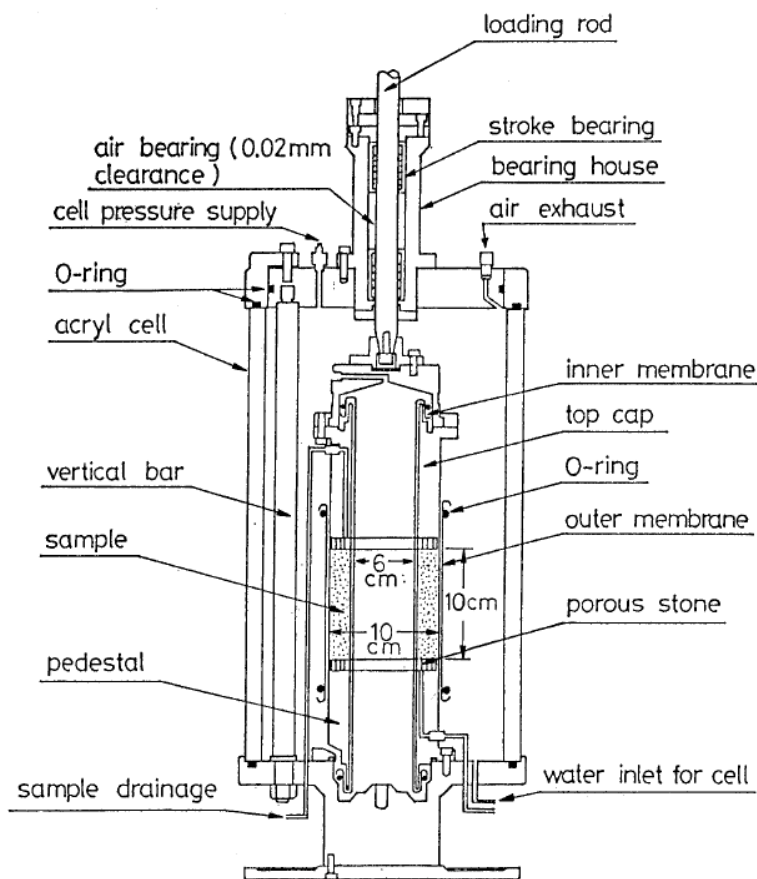
Όπου E : είναι του μέτρου του Young και ν : είναι ο λόγος Poisson που για αστράγγιστες συνθήκες ισούται με 0.5, κι έτσι προκύπτει η Εξίσωση (4.6):

$$\epsilon_h = -\frac{3}{2} \frac{p_0}{E} \frac{2\pi}{L} Z \cdot e^{-2\pi Z/L} \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{L}x - \frac{2\pi}{T}t\right) \quad (4.6)$$

Όπως φαίνεται στην παραπάνω εξίσωση, για διάστημα ίσο με το μισό του μήκους κύματος, η οριζόντια παραμόρφωση μηδενίζεται. Συγκρίνοντας της Εξισώσεις (4.1) και (4.6) προκύπτει πως η κυκλική μεταβολή της πλευρικής παραμόρφωσης είναι σε φάση με το φορτίο κυματισμού στον πυθμένα. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.3, η πλευρική παραμόρφωση μηδενίζεται όταν το ύψος του κύματος είναι μηδενικό (καταστάσεις b και d). Η συνθήκη αυτή πρέπει να ικανοποιείται και στις

μεγάλες παραμορφώσεις, όπου πλαστικές παραμορφώσεις εμφανίζονται κατά τη ρευστοποίηση των εδαφών.

Στη μελέτη τους οι Ishihara et al. (1985) παρουσιάζουν τα αποτελέσματα ενός προγράμματος εργαστηριακών δοκιμών στην τριαξονική συσκευή στρεπτικής διάτμησης κοίλων δοκιμίων, (Σχήμα 4.4). Έχουν χρησιμοποιήσει μια καθαρή, ομοιόμορφη άμμο από την Ιαπωνία, την άμμο Toyoura, για την παρασκευή κοίλων δοκιμίων σε διάφορες πυκνότητες. Η άμμος αποτελείται από ημιστρογγυλεμένους και ημιγωνιώδεις κόκκους, έχει μέση διάμετρο κόκκων $D_{50}=0.17\text{mm}$, συντελεστή ομοιομορφίας $C_u=2.0$, ειδικό βάρος στερεών κόκκων $G_s=2.65$, και ελάχιστο και μέγιστο δείκτη πόρων $e_{\min}=0.60$ και $e_{\max}=0.98$ αντίστοιχα. Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των δοκιμίων είναι: ύψος $H=10\text{cm}$, εσωτερική διάμετρος $D_{\text{in}}=6\text{cm}$ και εξωτερική διάμετρος $D_{\text{out}}=10\text{cm}$. Η μέθοδος προετοιμασίας των δοκιμίων που χρησιμοποιήθηκε ήταν η εναπόθεση ξηρής άμμου στον αέρα. Το ύψος πτώσης της άμμου καθόρισε την πυκνότητα των δοκιμίων: 12cm, 35cm και 180cm για δοκίμια πυκνότητας 43-50% (χαλαρά), 75-82% (μέσης πυκνότητας) και 88-95% (πυκνά). Ο κορεσμός των δοκιμίων έγινε με την τεχνική του CO_2 και της εσωτερικής πίεσης (back pressure), $u_b=150\text{kPa}$.



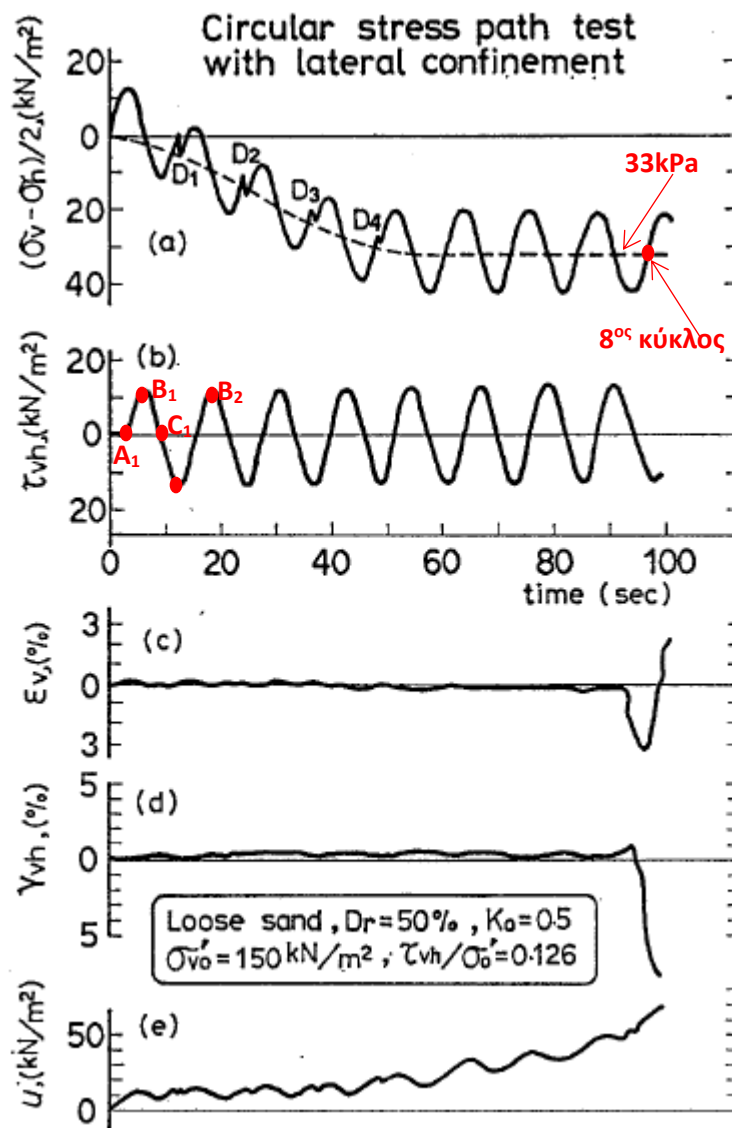
Σχήμα 4.4: Συσκευή στρεπτικής διάτμησης κοίλου δοκιμίου σχεδιασμένη στο University of Tokyo (Ishihara et al., 1985).

Όλα τα δοκίμια μετά το στάδιο του κορεσμού υποβλήθηκαν σε ανισότροπη στερεοποίηση σε μονοτονικές συνθήκες φόρτισης για την προσομοίωση της κατάστασης του εδαφικού στοιχείου στον

πυθμένα της θάλασσας πριν την επιβολή του φορτίου κυματισμού. Στο στάδιο αυτό, η αρχική επιβαλλόμενη κατακόρυφη τάση, σ'_{v0} , ήταν μεγαλύτερη της οριζόντιας τάσης, σ'_{h0} , και συνεπώς ο συντελεστής K_0 ήταν μικρότερος της μονάδας ($\sigma'_{h0} = K_0 \times \sigma'_{v0}$). Στη συσκευή υπήρχε η δυνατότητα επιβολής διαφορετικής σ_{h-in} και σ_{h-out} , η οποία όμως δε χρησιμοποιήθηκε, κι έτσι οι δύο οριζόντιες τάσεις ήταν σταθερές και αμετάβλητες. Δοκίμια ίδιας πυκνότητας υποβλήθηκαν σε ανισότροπη στερεοποίηση σε εξής τιμές του $K_0 = 0.5, 0.75 \text{ \& } 1.0$.

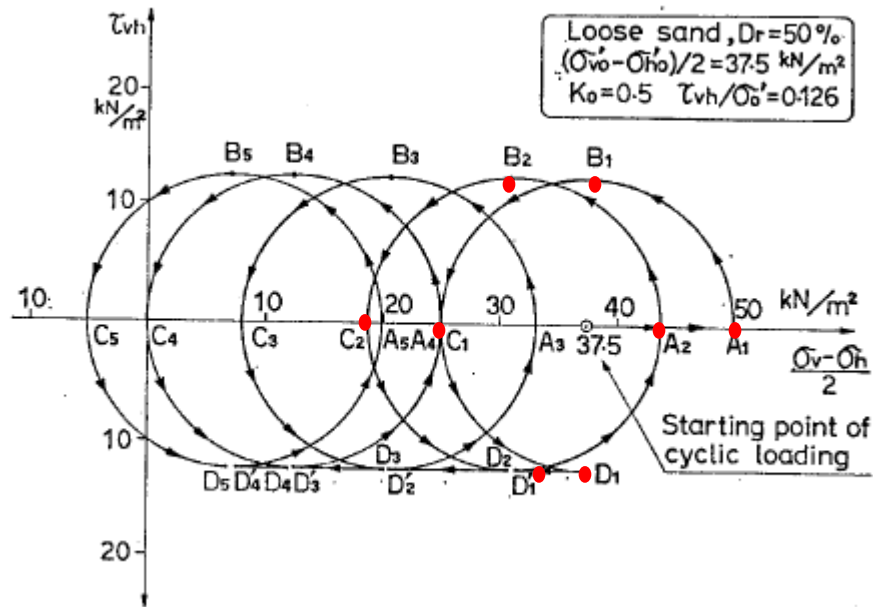
Το επόμενο στάδιο ήταν αυτό της κυκλικής φόρτισης υπό αστράγγιστες συνθήκες, κατά το οποίο μεταβάλλονται μόνο οι τάσεις σ'_v και τ_{vh} . Όπως αναφέρεται παραπάνω, στο στάδιο της στερεοποίησης ίσχυε $\sigma'_{v0} > \sigma'_{h0}$ και $K_0 < 1$. Αυτό συνεπάγεται πως στην κυκλική φόρτιση θα αναπτύσσεται οριζόντια παραμόρφωση, ϵ_h , και συνεπώς και κατακόρυφη παραμόρφωση, ϵ_v , έτσι ώστε η ογκομετρική παραμόρφωση $\Delta V/V_0$ να είναι μηδενική (αστράγγιστες συνθήκες). Τούτο όμως έρχεται σε αντίθεση με την πιο πάνω παρατήρηση πως στο $\frac{1}{2}$ του κύκλου φόρτισης η ϵ_h είναι μηδενική και άρα η συμπεριφορά είναι ελαστική. Για το λόγο αυτό, εφαρμόστηκε στο στάδιο αυτό ένα πρόγραμμα δοκιμών ελεγχόμενης παραμόρφωσης. Επιβλήθηκαν οι κυκλικές τάσεις σ'_v και τ_{vh} με διαφορά φάσης 90° και συχνότητα 1κύκλος ανά 12 δευτέρα. Στο τέλος κάθε κύκλου φόρτισης, η σ'_v μειώνεται απότομα ώστε το δοκίμιο να επιστρέψει το αρχικό του ύψος. Η διαδικασία αυτή δεν είναι αυτοματοποιημένη, αλλά γίνονται διορθώσεις με την παρακολούθηση των καταγραφών του κατακόρυφου μηκυνσιομέτρου. Καθώς όμως, ο αριθμός των κύκλων φόρτισης είναι μικρός δεν παρουσιάζει δυσκολία. Κατά τη διαδικασία, η μείωση της σ'_v τείνει να μειώσει τη διαφορά της από την σ'_h . Έτσι το K_0 αυξάνεται ως την τιμή $K_0=1$. Τότε γίνεται η μετάβαση από την κατάσταση της ανισότροπης στερεοποίησης στην ισότροπη στερεοποίηση, η οποία συμφωνεί με το φυσικό φαινόμενο στον πυθμένα κατά την επιβολή της κυκλικής φόρτισης.

Ενδεικτικά αποτελέσματα των δοκιμών παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.5, όπου δίνεται η μεταβολή της διαφοράς των ορθών τάσεων $(\sigma_v - \sigma_h)/2$, της διατμητικής τ_{vh} , της αξονικής παραμόρφωσης, ϵ_v , της γωνιακής παραμόρφωσης, γ_{vh} , και της πίεσης του νερού των πόρων, με το χρόνο φόρτισης, t . Τα αποτελέσματα αφορούν σε χαλαρό δοκίμιο ($D_r=50\%$) που στερεοποιήθηκε υπό $\sigma'_{v0}=150\text{kPa}$ και $K_0=0.5$. Στη συνέχεια υποβλήθηκε σε κυκλική φόρτιση πλάτους $\tau_{vh}/\sigma'_{v0}=0.126$, όπου $\sigma'_{v0}=(1+2 \times K_0) \times \sigma'_{v0}/3=100\text{kPa}$ η μέση ενεργός τάση. Από την υστέρηση της τ_{vh} παρατηρείται η διαφορά φάσης 90° με την $(\sigma_v - \sigma_h)/2$. Στην ολοκλήρωση κάθε κύκλου της διατμητικής τάσης, τ_{vh} , η σ'_v μειωνόταν έτσι ώστε το δοκίμιο να επανέλθει στο αρχικό του ύψος, ακυρώνοντας έτσι τις κατακόρυφες (τρίτο διάγραμμα c) αλλά και τις πλευρικές παραμορφώσεις. Τα σημεία μείωσης της σ'_v παρουσιάζονται στο πρώτο διάγραμμα (α) ως D_1, D_2, D_3 και D_4 . Μετά το D_4 η σχέση $(\sigma_v - \sigma_h)/2 - t$ έχει ομαλοποιηθεί και σταθεροποιηθεί με θεωρητική μείωση της $(\sigma_v - \sigma_h)/2$ στην αρχική της τιμή που είναι η $(\sigma'_{v0} - \sigma'_{h0})/2 = (1 - 2 \times 0.5) \times 150/2 = 37.5\text{kPa}$. Η πτώση στη διαφορά των τάσεων στους 8 κύκλους φόρτισης μετρήθηκε ωστόσο ίση με 33kPa (πρώτο διάγραμμα) και οφείλεται σε περιορισμούς και προβλήματα ακρίβειας της συσκευής. Η πίεση του νερού των πόρων (διάγραμμα e) αυξήθηκε μέχρι την τιμή των $u=65\text{kPa}$, ενώ η θεωρητική αύξησή της ήταν $(\sigma'_{v0} - \sigma'_{h0})=75\text{kPa}$.



Σχήμα 4.5: Αποτελέσματα δοκιμής στρεπτικής διάτμησης ελεγχόμενης παραμόρφωση για τη χαλαρή άμμο Toyoura (Ishihara et al., 1985).

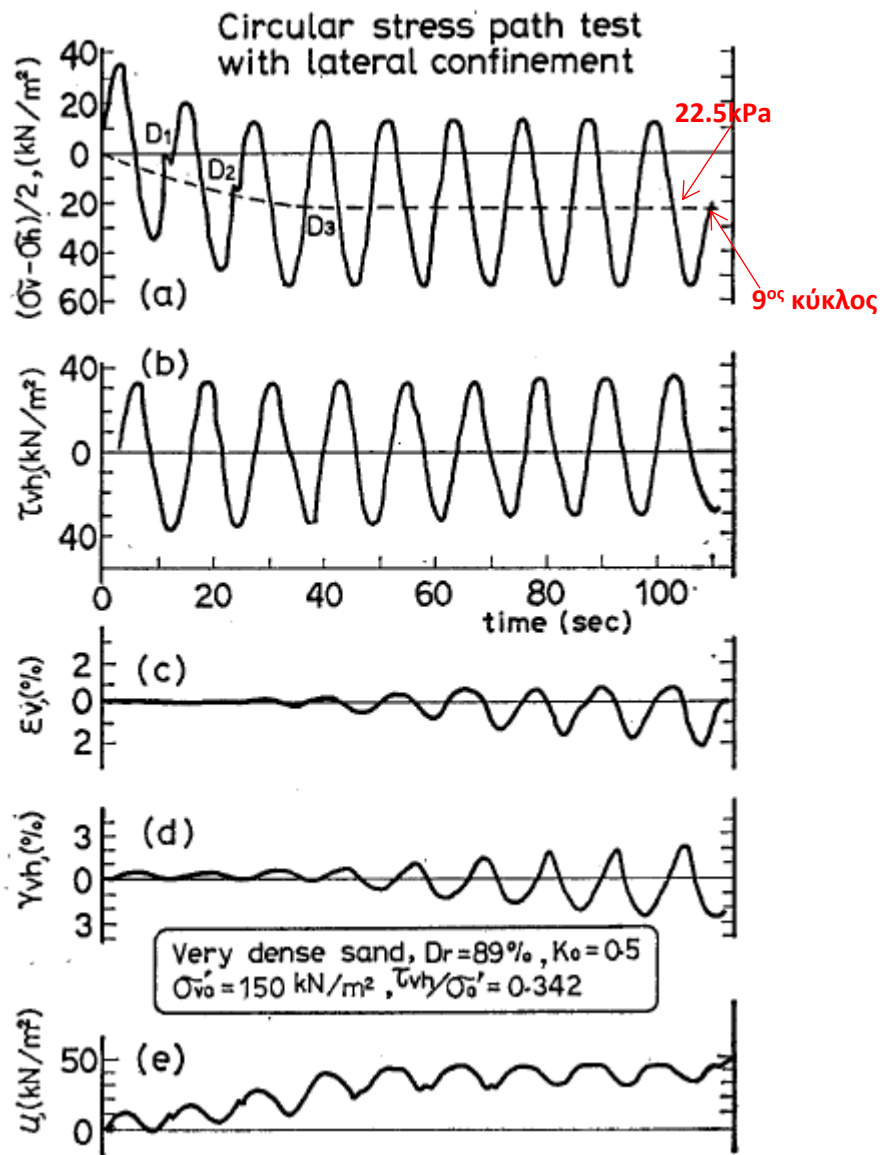
Η διαδρομή τάσεων κατά την κυκλική φόρτιση παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.6 στο επίπεδο τ_{vh} και $(\sigma_v - \sigma_h)/2$. Τα σημεία A_1, A_2, \dots και C_1, C_2, \dots αντιστοιχούν στην αρχική του κάθε κύκλου και στο πρώτο $\frac{1}{2}$ του κάθε κύκλου φόρτισης όπου η τ_{vh} μηδενίζεται. Τα σημεία B_1, B_2, \dots αντιστοιχούν στη μέγιστη τιμή της τ_{vh} . Η μείωση της σ'_v στο τέλος κάθε κύκλου φόρτισης για το μηδενισμό των παραμορφώσεων, αντιστοιχεί στη μετάθεση του σημείου D_1 στο D_1' για τον πρώτο κύκλο, του σημείου D_2 στο D_2' για το δεύτερο κύκλο, του σημείου D_3 στο D_3' για τον τρίτο κύκλο κ.ο.κ. Παρατηρείται πως στα διαστήματα αυτά η διαδρομή τάσεων κινείται προς την αρχή των αξόνων χωρίς την επιβολή της κυκλικής φόρτισης. Συνεπώς η τιμή του K_0 αυξάνεται κάθε φορά πριν την εφαρμογή της στρεπτικής διάτμησης. Η αύξηση αυτή οδηγεί στην ισότροπη κατάσταση με ταυτόχρονη μείωση της μέσης τάσης.



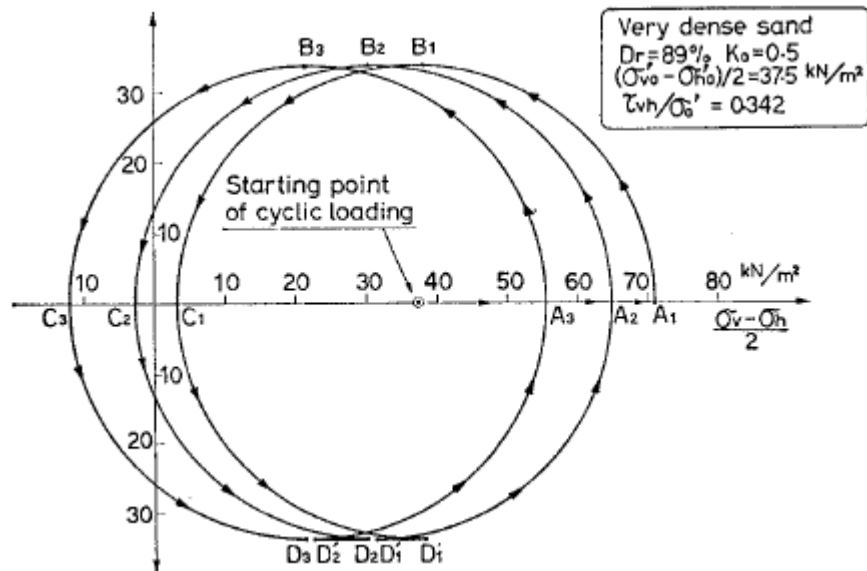
Σχήμα 4.6: Διαδρομές κυκλικών τάσεων για τη χαλαρή άμμο Toyoura (Ishihara et al., 1985).

Αντίστοιχα αποτελέσματα παρουσιάζονται για τη δοκιμή σε πολύ πυκνό δοκίμιο ($D_r=89\%$) της άμμου Toyoura, στα Σχήματα 4.7 και 4.8. Το δοκίμιο στερεοποιήθηκε υπό $\sigma'_{v0}=150\text{kPa}$ και $K_0=0.5$. Στη συνέχεια υποβλήθηκε σε κυκλική φόρτιση πλάτους $\tau_{vh}/\sigma'_0=0.342$, όπου $\sigma'_0=(1+2K_0)\sigma'_{v0}/3=100\text{kPa}$ η μέση ενεργός τάση. Από την υστέρηση της τ_{vh} παρατηρείται η διαφορά φάσης 90° με την $(\sigma_v - \sigma_h)/2$. Στην ολοκλήρωση κάθε κύκλου της διατμητικής τάσης, τ_{vh} , η σ'_v μειωνόταν έτσι ώστε το δοκίμιο να επανέλθει στο αρχικό του ύψος, ακυρώνοντας έτσι τις κατακόρυφες (τρίτο διάγραμμα c) αλλά και τις πλευρικές παραμορφώσεις. Τα σημεία μείωσης της σ'_v παρουσιάζονται στο πρώτο διάγραμμα (α) ως D_1 , D_2 και D_3 . Καθώς όμως ο λόγος των κυκλικών τάσεων ήταν μεγάλος ($\tau_{vh}/\sigma'_0=0.342$), η ανάπτυξη παραμορφώσεων λόγω της κυκλικής φόρτισης όπως φαίνεται στα διαγράμματα (c) και (d) παρατηρείται από την αρχή. Μετά το D_3 η σχέση $(\sigma_v - \sigma_h)/2 - t$ έχει ομαλοποιηθεί και σταθεροποιηθεί με θεωρητική μείωση της $(\sigma_v - \sigma_h)/2$ στην αρχική της τιμή που είναι η $(\sigma'_{v0} - \sigma'_{h0})/2 = (1 - 2 \times 0.5) \times 150 / 2 = 37.5\text{kPa}$. Η πτώση στη διαφορά των τάσεων στους 9 κύκλους φόρτισης μετρήθηκε ωστόσο ίση με 22.5kPa (διάγραμμα α) και οφείλεται σε περιορισμούς και προβλήματα ακρίβειας της συσκευής. Η πίεση του νερού των πόρων (διάγραμμα ε) αυξήθηκε μέχρι την τιμή των $u=50\text{kPa}$, ενώ η θεωρητική αύξησή της ήταν $(\sigma'_{v0} - \sigma'_{h0}) = 75\text{kPa}$. Η μείωση της κατακόρυφης τάσης, σ'_v , στο τέλος του κάθε κύκλου φόρτισης παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.8. Η διαδρομή από το D_1 στο D_1' δείχνει τη μείωση της σ'_v μετά τον πρώτο κύκλο φόρτισης, από το D_2 στο D_2' μετά το δεύτερο κύκλο, και από το D_3 στο D_3' μετά τον τρίτο κύκλο. Στα διαστήματα αυτά η διαδρομή τάσεων κινείται προς την αρχή των αξόνων χωρίς την επιβολή της κυκλικής φόρτισης. Συνεπώς η τιμή του K_0 αυξάνεται κάθε φορά πριν την εφαρμογή της στρεπτικής διάτμησης. Η αύξηση αυτή οδηγεί στην ισότροπη κατάσταση με ταυτόχρονη μείωση της μέσης τάσης, σ'_0 . Όπως και παρατηρείται και για τα αποτελέσματα του χαλαρού δοκίμιου (Σχήματα 4.5 και 4.6), έτσι και για το πολύ πυκνό δοκίμιο το έδαφος φτάνει σε μια κατάσταση

παρόμοια της ρευστοποίησης, καθώς υποβάλλεται σε κυκλική φόρτιση με συνεχή στροφή των κύριων αξόνων και υπό το καθεστώς της πολύ μικρής τάσης στερεοποίησης.



Σχήμα 4.7: Αποτελέσματα δοκιμής στρεπτικής διάτμησης ελεγχόμενης παραμόρφωση για την πολύ πυκνή άμμο Toyoura (Ishihara et al., 1985).



Σχήμα 4.8: Διαδρομές κυκλικών τάσεων για την πολύ πυκνή άμμο Toyoura (Ishihara et al., 1985).

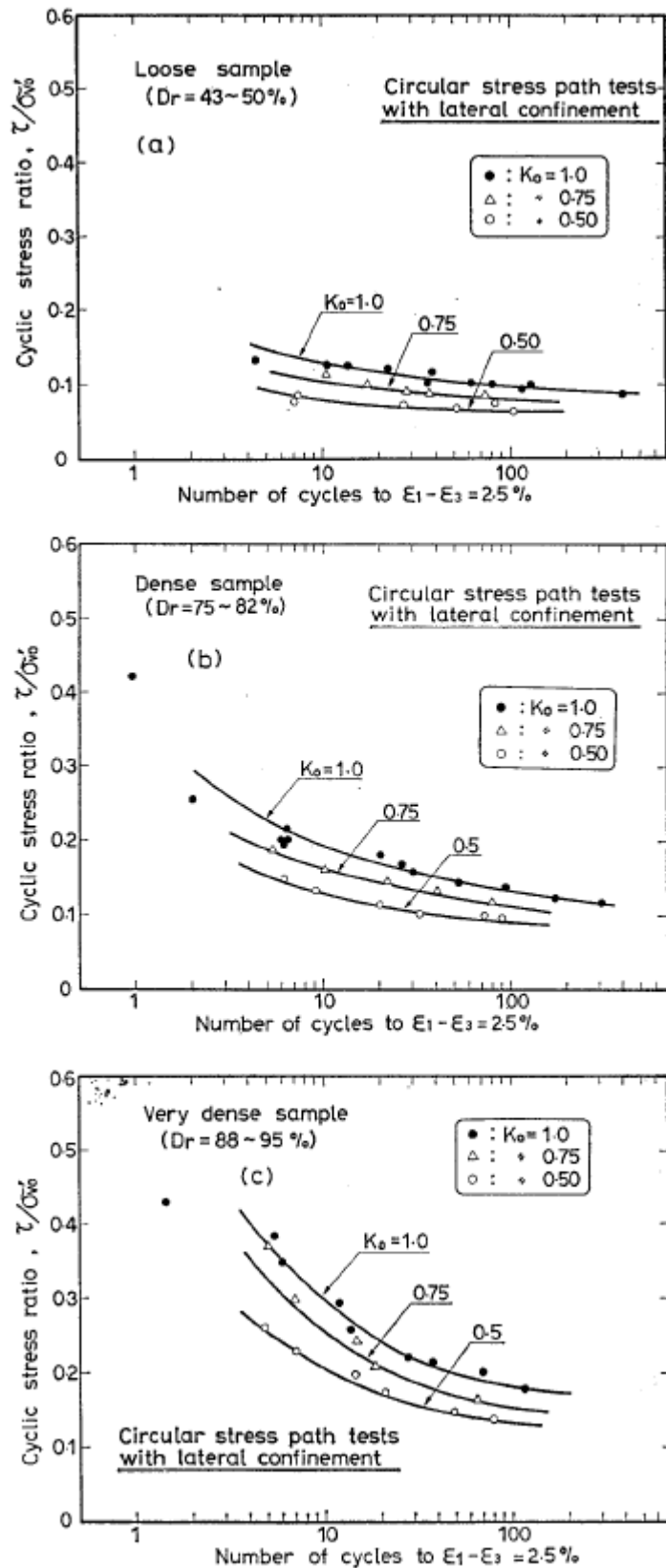
Για τη σύγκριση των αποτελεσμάτων παρουσιάζεται το Σχήμα 4.9, όπου για τα τρία επίπεδα πυκνότητας D_r (διάγραμμα α, β και γ για χαλαρά, πυκνά και πολύ πυκνά δοκίμια αντίστοιχα) και αρχικού συντελεστή K_0 δίνεται η μεταβολή του λόγου κυκλικών τάσεων τ_{vh}/σ'_{v0} με τον αριθμό των κύκλων φόρτισης για την ανάπτυξη εκτροπικής παραμόρφωσης $\varepsilon_1 - \varepsilon_3 = 2.5\%$. Η κανονικοποίηση της κυκλικής τάσης τ_{vh} με την αρχική τιμή της σ'_{v0} έγινε για την απαλοιφή της επίδρασης της τάσης στερεοποίησης στα αποτελέσματα. Έχει θεωρηθεί πως ένας κύκλος φόρτισης περιλαμβάνει έναν κύκλο τριαξονικής φόρτισης και έναν κύκλο στρεπτικής φόρτισης. Για τον προσδιορισμό της εκτροπικής παραμόρφωσης χρησιμοποιήθηκε η Εξίσωση (4.7). Η επιλογή της τιμής $\varepsilon_1 - \varepsilon_3 = 2.5\%$ (μόνο πλάτος παραμόρφωσης) έγινε με μόνο κριτήριο να αντιστοιχεί σε κατάσταση αστοχίας.

$$\varepsilon_1 - \varepsilon_3 = \sqrt{(\varepsilon_v - \varepsilon_h)^2 + \gamma_{vh}^2} \quad (4.7)$$

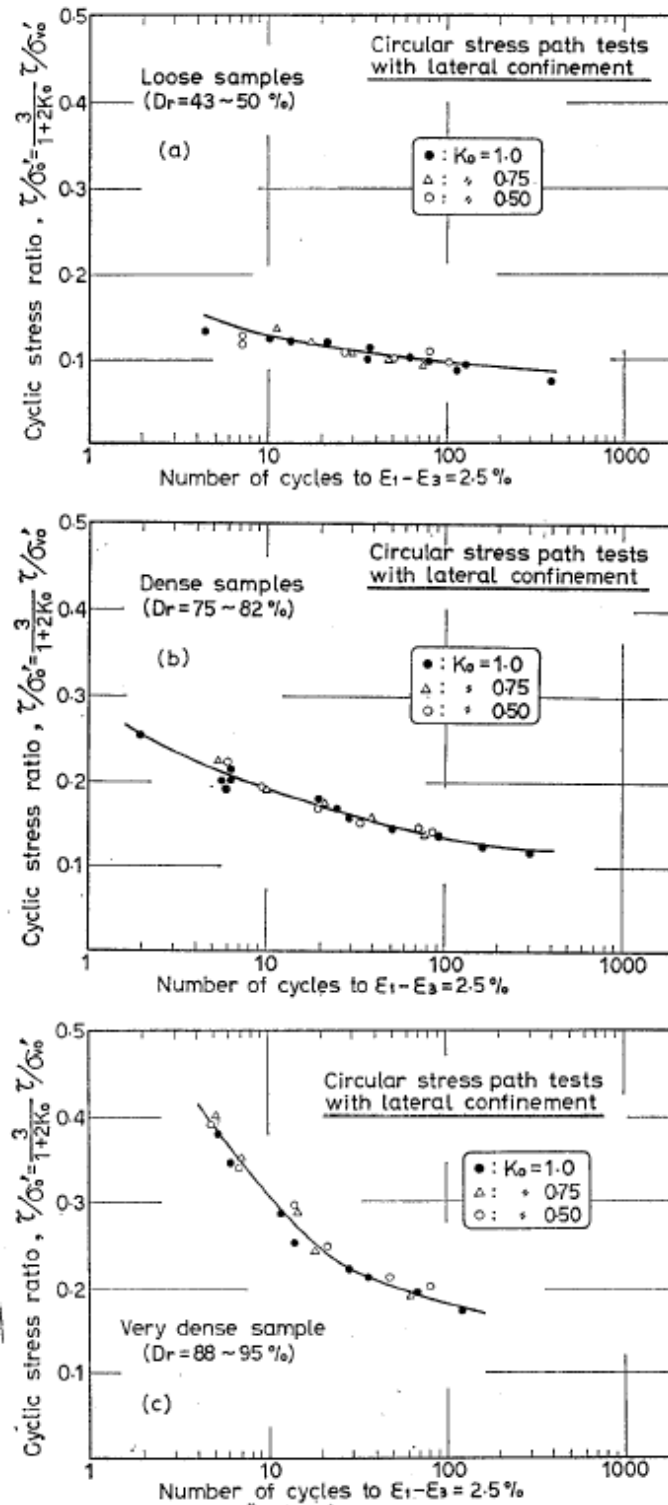
Όπου ε_v , ε_h και γ_{vh} είναι η κατακόρυφη, η οριζόντια και η γωνιακή παραμόρφωση αντίστοιχα.

Και στα τρία επίπεδα πυκνότητας παρατηρείται μείωση του λόγου κυκλικής τάσης τ_{vh}/σ'_{v0} με τον αριθμό των κύκλων φόρτισης. Αυτό σημαίνει πως η απαιτούμενη κυκλική τάση για την ανάπτυξη της δεδομένης παραμόρφωσης μειώνεται καθώς αυξάνεται ο αριθμός των κύκλων φόρτισης. Επίσης, παρατηρείται πως σε κάθε επίπεδο του κύκλου φόρτισης η απαιτούμενη κυκλική τάση για την ανάπτυξη της δεδομένης παραμόρφωσης μειώνεται με τη μείωση του συντελεστή K_0 . Δηλαδή, η απαιτούμενη κυκλική τάση είναι μεγαλύτερη αν το έδαφος είναι ισότροπα στερεοποιημένο και συνεπώς ρευστοποιείται δυσκολότερα.

Για τη σύνθεση των παραπάνω αποτελεσμάτων σε όλα τα επίπεδα του K_0 , στο Σχήμα 4.10 έγινε η κανονικοποίηση της κυκλικής τάσης με την ισότροπη τάση και χρησιμοποιήθηκε ο όρος τ_{vh}/σ'_{v0} .

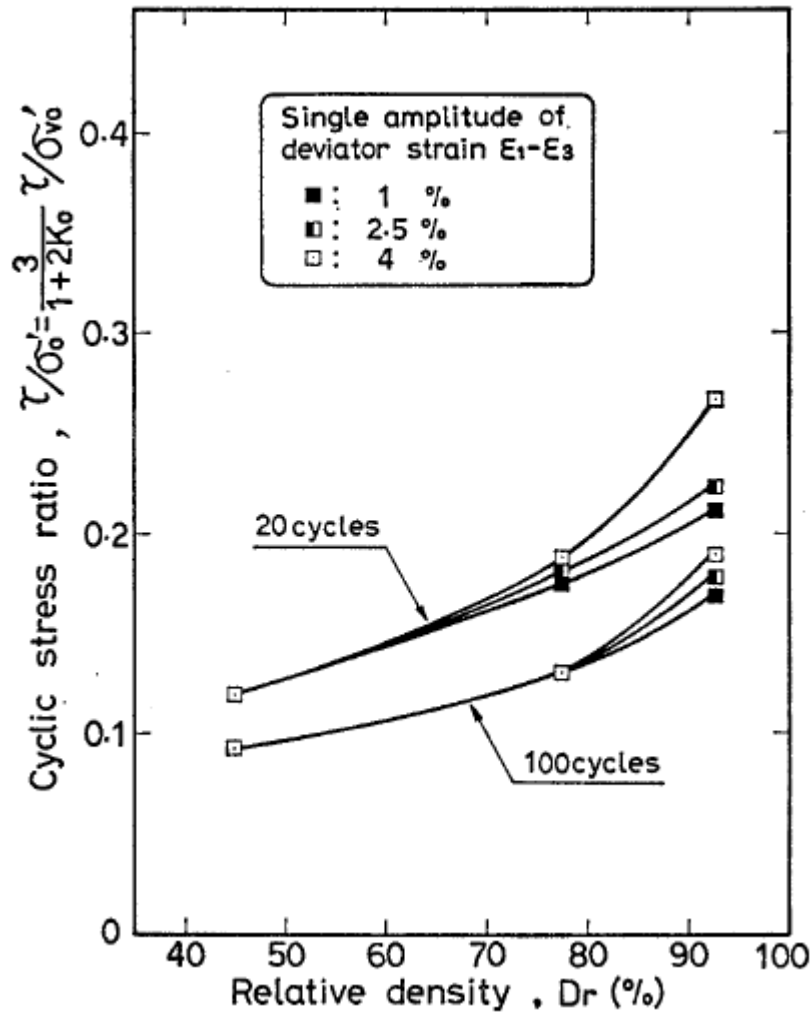


Σχήμα 4.9: Συγκριτικά αποτελέσματα στην άμμο Τογούρα για την επίδραση του αρχικού K_0 στο λόγο των κυκλικών τάσεων, τ_{vh}/σ'_{v0} (Ishihara et al., 1985).



Σχήμα 4.10: Συγκριτικά αποτελέσματα στην άμμο Τογουρα για την επίδραση των κύκλων φόρτισης στο λόγο των κυκλικών τάσεων, τ_{vh}/σ'_v (Ishihara et al., 1985).

Ισχύει πως $\tau_{vh}/\sigma'_v = \tau_{vh}/\sigma'_{v0} \times [3/(1+2K_0)]$. Παρατηρείται από το Σχήμα 4.10 πως αν ο λόγος κυκλικών τάσεων ορισθεί ως προς τη μέση τάση, δηλαδή ως τ_{vh}/σ'_v , τότε ο αριθμός κύκλων που απαιτείται για την ανάπτυξη της παραμόρφωσης αστοχίας είναι ανεξάρτητος του K_0 .



Σχήμα 4.11: Εκτίμηση της κυκλικής τάσης στην άμμο Toyoura (Ishihara et al., 1985).

Σύμφωνα με τα παραπάνω, η κυκλική αντοχή μιας K_0 -στερεοποιημένης άμμου μπορεί να εκτιμηθεί από την Εξίσωση (4.8) μέσω της κυκλικής αντοχής της ισότροπα στερεοποιημένης άμμου.

$$\left(\frac{\tau_l}{\sigma_{v0}'} \right) = \frac{1+2K_0}{3} \left(\frac{\tau_l}{\sigma_0'} \right) \quad (4.10)$$

Για την εκτίμηση της κυκλικής αντοχής τ_{vh}/σ'_0 της άμμου Toyoura χρησιμοποιείται το Σχήμα 4.11, συναρτήσει της σχετικής πυκνότητας D_r για αριθμό κύκλων φόρτισης 20 και 100 και για τρία επίπεδα εκτροπικής τάσης 1%, 2.5% και 4%.

Τα κύρια συμπεράσματα της μελέτης των Ishihara et al., 1985 συνοψίζονται στα εξής: (α) για την προσομοίωση της στατικής και κυκλικής φόρτισης του θαλάσσιου πυθμένα μπορούν να

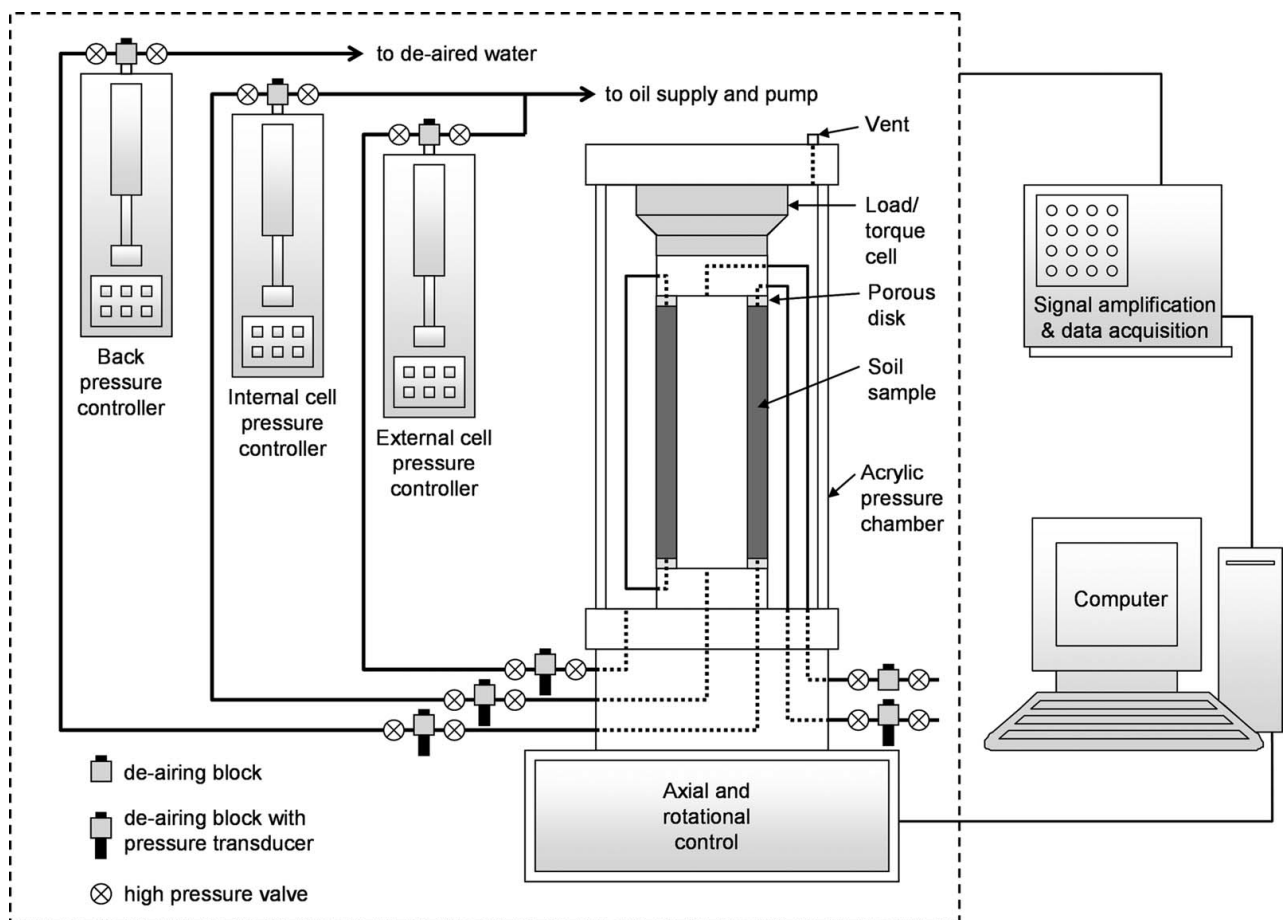
πραγματοποιηθούν εργαστηριακά πειράματα σε αρχικώς K_0 -στερεοποιημένα δοκίμια άμμου τα οποία στη συνέχεια υποβάλλονται σε κυκλική φόρτιση τριαξονικής και στρεπτικής καταπόνησης, η οποία συνεπάγεται τη συνεχή στροφή των αξόνων των κύριων τάσεων, (β) η επιβολή της κυκλικής φόρτισης με ταυτόχρονη σταθερή τιμή K_0 , έχει ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη πλευρικών παραμορφώσεων, φαινόμενο το οποίο δε συμφωνεί με την πραγματική κατάσταση του εδαφικού στοιχείου θαλάσσιου πυθμένα που υπόκειται σε φόρτιση κυματισμού. Για το λόγο αυτό, προτείνεται η μείωση της αρχικής σ'_{v0} (ενεργός κατακόρυφη τάση στερεοποίησης) μετά την ολοκλήρωση ενός κύκλου φόρτισης, έτσι ώστε να αναιρεθούν οι πλευρικές παραμορφώσεις. (γ) Ο λόγος κυκλικών τάσεων τ_{vh}/σ'_{v0} για δεδομένη παραμόρφωση αυξάνεται με τη μείωση του αριθμού των κύκλων φόρτισης, με την αύξηση της πυκνότητας D_r , και με την αύξηση του K_0 . Επίσης, ο λόγος τ_{vh}/σ'_{v0} αυξάνεται με την αύξηση της παραμόρφωσης. (δ) Η επίδραση του K_0 στην κυκλική αντοχή άμμου λαμβάνεται υπόψη μέσω της ενεργής ισότροπης τάσης, σ'_o , σε κάθε επίπεδο της D_r . Δηλαδή ο λόγος τ_{vh}/σ'_o είναι ανεξάρτητος της τιμής του K_0 .

4.2 Επίδραση της στροφής των αξόνων των κύριων τάσεων στην εδαφική συμπεριφορά των υλικών βάσης των υποδομών σιδηροδρομικών δικτύων

Η επίδραση της περιστροφής των αξόνων των κύριων τάσεων (PSR) στην ανάπτυξη των μόνιμων παραμορφώσεων στην εδαφική υποδομή του σιδηροδρομικού δικτύου κατά την επιβολή της κυκλικής φόρτισης λόγω διέλευσης των συρμών μελετήθηκε από τους Grabe & Clayton (2009). Μέχρι τότε, η πλειονότητα των εργαστηριακών ερευνών στις υποδομές σιδηροδρομικών γραμμών περιλάμβανε κυκλικές τριαξονικές δοκιμές, χωρίς την περιστροφή της κύριας τάσης (Clayton & Wright, 1994, Shalu et al., 1999 & 2000). Μερικοί μελετητές, όπως οι Selig & Chang (1981) ασχολήθηκαν με κυκλικές τριαξονικές δοκιμές στις οποίες, η εκτροπική τάση μεταβάλλεται (ασύμμετρα ή συμμετρικά) πάνω στη γραμμή ισότροπης συμπίεσης. Σε αυτή την περίπτωση, οι κύριες τάσεις σ_1 και σ_3 ανταλλάσσουν απότομα διευθύνσεις, με τη διεύθυνση της σ_1 να αλλάζει από 0° έως 90° ως προς τον κατακόρυφο άξονα όταν πέφτει στη γραμμή ισότροπης συμπίεσης.

Η ανάγκη εκπόνησης της συγκεκριμένης μελέτης από τους Grabe & Clayton (2009) προέκυψε καθώς σύμφωνα με τη βιβλιογραφία η περιστροφή της κύριας τάσης έχει σημαντική επίδραση στην συσσώρευση πλαστικών, δηλαδή μόνιμων παραμορφώσεων στα κοκκώδη εδάφη (Young, 1972, Ansell & Brown, 1978). Οι Wong & Arthur (1986) είχαν διερευνήσει τις επιπτώσεις της διεύθυνσης της κυκλικής και περιστρεφόμενης κύριας τάσης σε δείγματα άμμου υπό στραγγιζόμενες συνθήκες, και διαπίστωσαν ότι είναι πιθανή η ανάπτυξη υψηλών πιέσεων του ύδατος των πόρων με αποτέλεσμα τη μείωση του μέτρου ελαστικότητας. Σύμφωνα με τους Symes et al. (1984), η περιστροφή των κυκλικών κύριων τάσεων σε κορεσμένα δοκίμια άμμου υπό αστράγγιστες συνθήκες προκαλεί μεταβολή της πίεσης του ύδατος των πόρων με αμετάβλητη διατμητική τάση. Ακόμη, η πίεση του ύδατος πόρων μεταβάλλεται με την παραμόρφωση και οδηγεί σταδιακά στην αστοχία. Οι ίδιοι μελετητές σε μια άλλη έρευνά τους (Symes et al., 1988) σε μετρίως πυκνή ως χαλαρή άμμο υπό στραγγιζόμενες συνθήκες παρατήρησαν πως η περιστροφή των κύριων τάσεων οδηγεί στη συμπίεση του δείγματος.

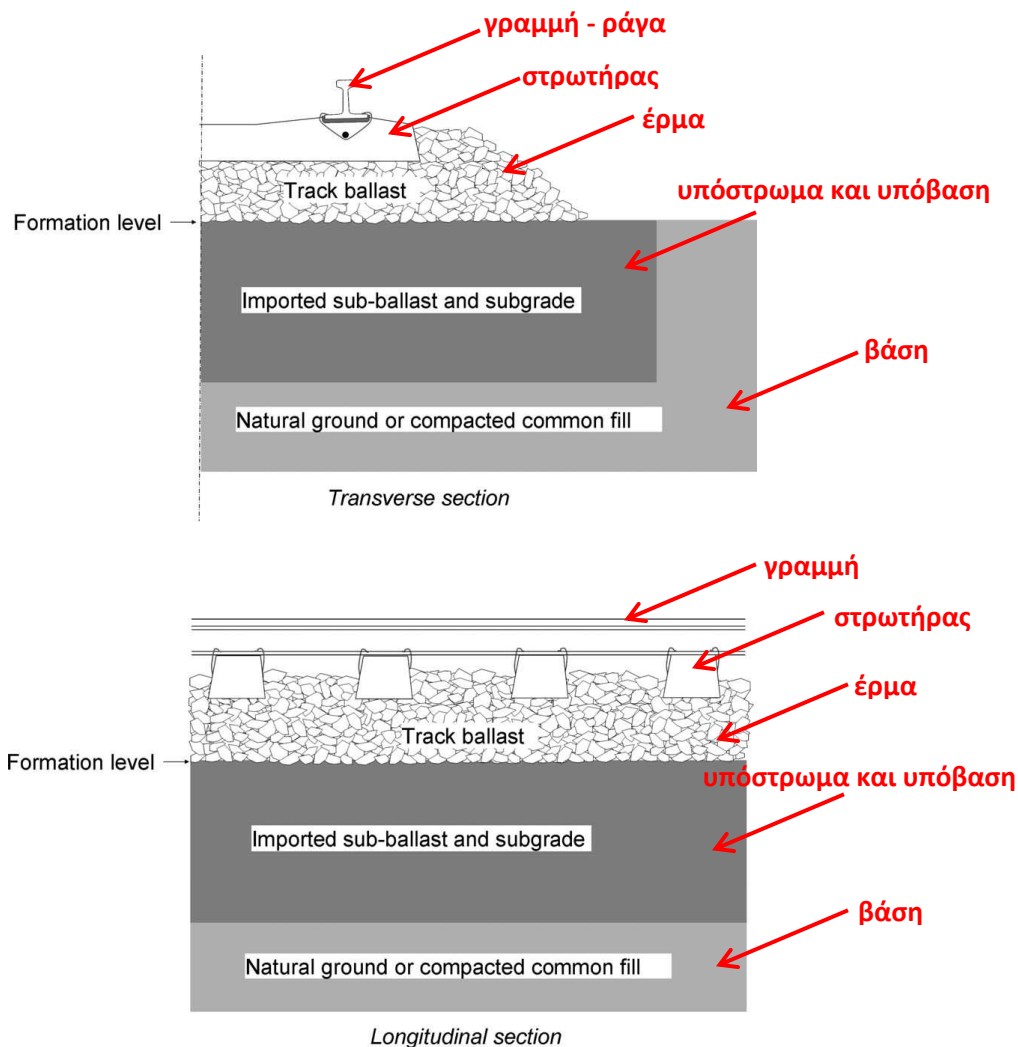
Στη μελέτη τους οι Grabe & Clayton (2009) πραγματοποίησαν μια σειρά δοκιμών στρεπτικής διάτμησης σε κοίλα δοκίμια εδαφικών δειγμάτων υπό κυκλική φόρτιση και αστράγγιστες συνθήκες που προσομοιώνει την καταπόνηση λόγω των φορτίων του συρμού, Σχήμα 4.12. Τα δοκίμια μετά την ολοκλήρωση της κυκλικής φόρτισης (είτε με περιστροφή των κύριων αξόνων είτε χωρίς περιστροφή), οδηγήθηκαν σε αστοχία υπό μονοτονική φόρτιση και αστράγγιστες συνθήκες. Επίσης πραγματοποιήθηκαν και δοκιμές οιδημέτρου (με διπλασιασμό της κατακόρυφης τάσης από 12,5kPa έως 800kPa κατά τον κλάδο της φόρτισης και αποφόρτιση στα 30kPa) για τον προσδιορισμό της γραμμής μονοδιάστατης στερεοποίησης. Πολλοί ερευνητές έχουν διαπιστώσει πως παρά την πολυπλοκότητά τους οι δοκιμές στρεπτικής διάτμησης κοίλου δοκιμίου έχουν το σοβαρό πλεονέκτημα της επιβολής μεγάλης έκτασης διαδρομών τάσεων.



Σχήμα 4.12: Συσκευή στρεπτικής διάτμησης κοίλου δοκιμίου GDS σχεδιασμένη στο University of Southampton (Grabe & Clayton, 2009).

Τα δοκίμια που παρασκευάστηκαν εργαστηριακά προσομοίωναν το έδαφος θεμελίωσης, όπως αυτό παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.13. Οι στρωτήρες αποτελούν εγκάρσια ως προς τις ράγες στοιχεία για τη μεταξύ τους σύνδεση. Το έρμα χρησιμοποιείται για την ομοιόμορφη κατανομή των τάσεων, την απόσβεση των δονήσεων και την αποστράγγιση των ομβρίων υδάτων και για αυτό το λόγο αποτελείται από υλικό υψηλής διαπερατότητας. Το υπόστρωμα αποτελείται από αμμοχάλικο για τη μεταφορά των φορτίων στη βάση. Η υπόβαση είναι μια στρώση διαμόρφωσης που κατασκευάζεται

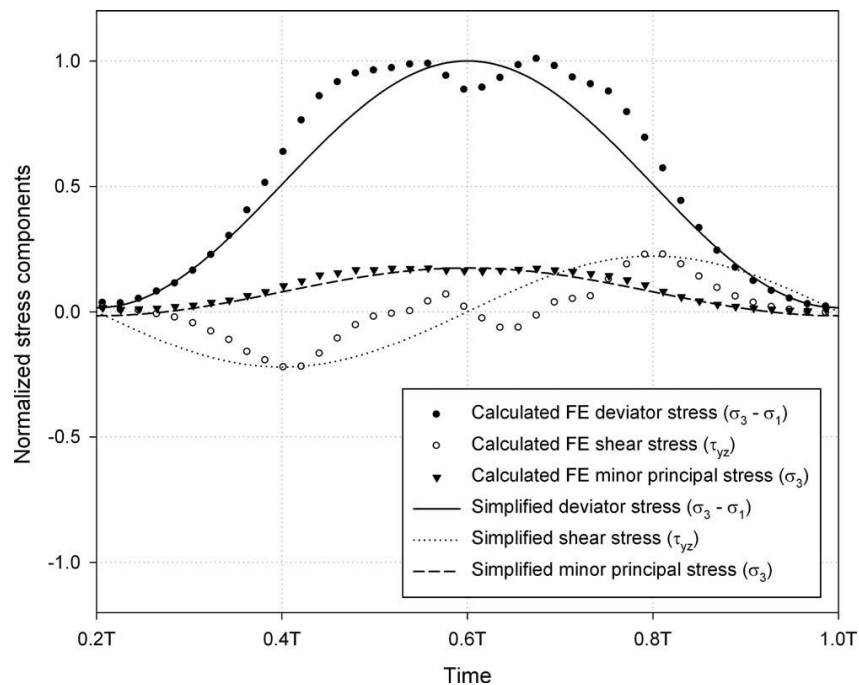
όταν η βάση δεν αποτελείται από έδαφος ικανοποιητικής αντοχής. Το στρώμα της βάσης είναι συχνά ένα συμπυκνωμένο υλικό με την απαιτούμενη μηχανική αντοχή. Σε αυτό το στρώμα καταλήγουν τα φορτία κυκλοφορίας.



Σχήμα 4.13: Εγκάρσια και διαμήκης τομή σε μια τυχαία θέση της σιδηροδρομικής γραμμής (Grabe & Clayton, 2009).

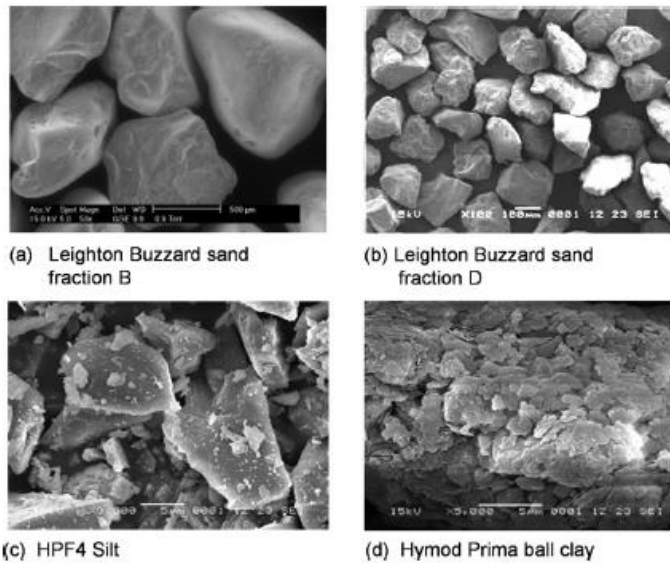
Τα συνολικά φορτία που μεταβιβάζονται στο υπόστρωμα λόγω της μόνιμης υποδομής (ράγες, στρωτήρες και βαγόνια) και των φορτίων κυκλοφορίας (συρμοί) διαφέρουν ως προς το μέγεθος και τη γεωμετρία. Για την εκτίμηση των φορτίων αυτών που χρησιμοποιήθηκαν για το σχεδιασμό των εργαστηριακών δοκιμών, οι Grabe & Clayton (2009) χρησιμοποίησαν δεδομένα από τη γραμμή South Coal Line μήκους 650km που κατασκευάστηκε το 1976 στη Νότια Αφρική. Μια τυπική αμαξοστοιχία άνθρακα σε αυτή τη γραμμή περιλαμβάνει πέντε ατμομηχανές και 200 βαγόνια άνθρακα με τέσσερις άξονες το καθένα. Τα φορτία στα βαγόνια υπολογίζονται συνολικά γύρω στους 104 τόνους (ή 26 ανά άξονα). Η ταχύτητα που αναπτύσσουν τα τρένα στη συγκεκριμένη γραμμή κυμαίνεται μεταξύ 50-80km/h και αντιστοιχεί σε συχνότητα 1-8Hz. Σημειώνεται πως στα επίπεδα τμήματα των τροχών του συρμού η συχνότητα αυτή είναι πολύ μεγαλύτερη. Η αναπτυσσόμενη τάση στο υπόστρωμα ξεκινά

από 10-25kPa και φτάνει ως 25-50kPa στα σημεία φόρτισης. Εξαιτίας του φορτίου του συρμού, η αναπτυσσόμενη τάση κάτω από τις ράγες είναι της τάξης των 400kPa, αλλά σύμφωνα με μετρήσεις πεδίου μειώνεται στα 120kPa στη βάση του έρματος (ballast) και στα 50kPa στη βάση του υποστρώματος (subballast). Η ακριβής εκτίμηση των φορτίων έγινε με την ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων (FE), και βρέθηκε πως το κρίσιμο σημείο της θεμελίωσης της γραμμής βρίσκεται στο μέσο του υποστρώματος (subballast) με τη μεγαλύτερη τιμή του λόγου της οκταεδρικής διατμητικής τάσης ως προς τη μέση ορθή τάση και τιμές του συντελεστή στερεοποίησης $K_0=0.5-1.0$ και $K_0=1.2-1.5$ με αντίστοιχες τιμές της γωνίας στροφής της κύριας τάσης σ_1 ως προς την κατακόρυφο $\alpha=\pm 45^\circ$ και $\alpha=\pm 90^\circ$. Στα πλαίσια της μελέτης αυτής, παρουσιάστηκαν αποτελέσματα δοκιμών με $K_0=1.0$, καθώς θεωρήθηκε αντιπροσωπευτικό με περιστροφή τάσεων $\alpha=\pm 45^\circ$. Στο Σχήμα 4.14 παρουσιάζονται αποτελέσματα των αναλύσεων FE σε ένα χαρακτηριστικό σημείο 0.5m κάτω από τη βάση του έρματος (δεν αποτελεί το δυσμενέστερο σημείο αλλά ένα χαρακτηριστικό σημείο). Η προσομοίωση της διαδρομής τάσεων και της περιστροφής των κύριων τάσεων έγινε μέσω αυτού του σχήματος.

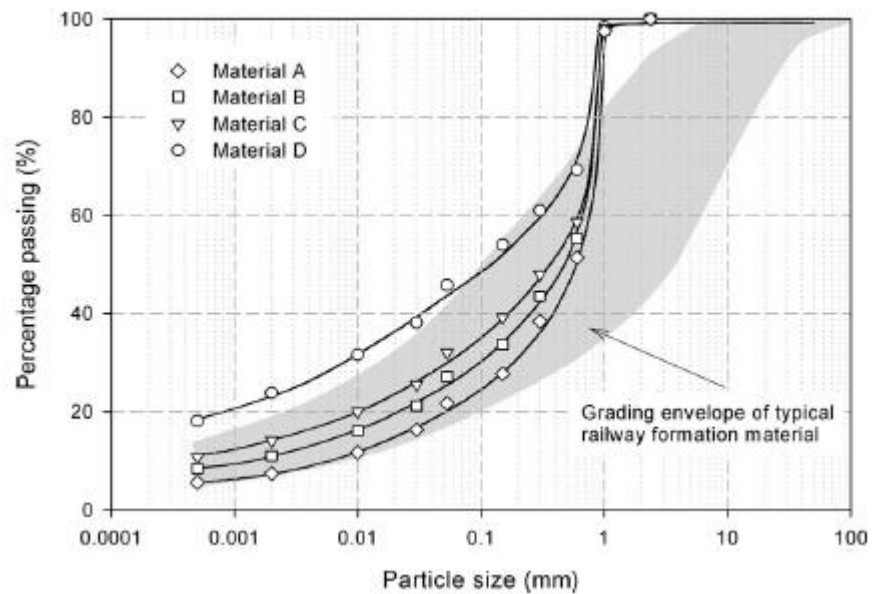


Σχήμα 4.14: Υπολογιζόμενες τάσεις (FE) και απλοποιημένες τάσεις για τις εργαστηριακές δοκιμές εργαστηρίου, με βάση τις αναλύσεις FE για ένα στοιχείο σε βάθος 0.5 m κάτω από τη βάση του έρματος (Grabe & Clayton, 2009).

Τα δοκίμια παρασκευάστηκαν από τη μίξη διάφορων ποσοτήτων ξηρής άμμου (Leighton Buzzard σε διάφορα μεγέθη κόκκων), ιλύος (HPF4 με χαλαζιακούς κόκκους) και αργίλου (Hymod Prima Ball από καολίνη και χαλαζιακούς κόκκους) με την προσθήκη νερού δίνοντας τέσσερα εδαφικά υλικά A, B, C & D, Σχήματα 4.15 & 4.16. Στον Πίνακα 4.1 δίνονται οι αναλογίες κάθε δείγματος και οι φυσικές του ιδιότητες. Παρατηρείται πως η πλαστικότητα των δειγμάτων κυμαίνεται μεταξύ 7-24%. Το μέγιστο μέγεθος των κόκκων στα μίγματα περιορίζεται στα 1.18mm. Το ειδικό βάρος στερεών κόκκων προσδιορίστηκε ίσο με $G_s=2.64$ και για τα τέσσερα υλικά.



Σχήμα 4.15: Φωτογραφίες μέσω ηλεκτρονικού μικροσκοπίου των εδαφικών υλικών που χρησιμοποιήθηκαν στην παρασκευή των δειγμάτων (Grabe & Clayton, 2009).



Σχήμα 4.16: Κοκκομετρική ανάλυση των τεσσάρων δειγμάτων A, B, C & D (Grabe & Clayton, 2009).

Πίνακας 4.1: Φυσικές ιδιότητες των μελετηθέντων δειγμάτων.

Component	Particle size	Reconstituted material			
		A	B	C	D
(a) Percentages by weight of constituents					
Sand (Leighton Buzzard)	Fraction B (600–1,180 μm)	51	47	43	32
Sand (Leighton Buzzard)	Fraction C (300–600 μm)	11	10	9	7
Sand (Leighton Buzzard)	Fraction D (150–300 μm)	11	10	9	7
Silt (HPF4)	(5–150 μm)	19	21	23	27
Clay (Hymod Prima)	<125 μm	8	13	16	27
(b) Resulting compositions of mixes					
Sand content (%)		78	73	68	54
Silt content (%)		14	16	18	22
Clay content (%)		7	11	14	24
(c) Plasticity of mixes					
Plastic limit (%)		14	14	14	16
Liquid limit (%)		25	28	31	37
Plasticity index (%)		11	14	17	21
Activity (A)		1.4	1.3	1.2	0.9

Για την ευκολία της προετοιμασίας των κοίλων δοκιμίων από το εδαφικά δείγματα, τα τελευταία μετά την ανάμιξη των υλικών στερεοποιήθηκαν σε ενεργό κατακόρυφη τάση 200kPa, για τα υλικά B, C και D, ενώ για το υλικό A χρειάστηκε μία τάση ίση με 300kPa. Τα κοίλα κυλινδρικά δοκίμια που διαμορφώθηκαν είχαν εξωτερική διάμετρο $D_{out} = 10$ cm, εσωτερική διάμετρο $D_{in} = 6$ cm και ύψος $H=20$ cm. Για τη διαμόρφωσή τους, αρχικά το δείγμα διαμορφώθηκε εξωτερικά με χορδή πιάνου σύμφωνα με τις προδιαγραφές BS1377 (part 1, method 7, BSI 1990) και JGS0550 (JGS 1999). Στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκε ένα ρυθμιζόμενο τρυπάνι ξύλου για την κατασκευή της εσωτερικής κοιλότητας, διαμέτρου 6cm. Το κομμένο δείγμα τροποποιήθηκε στο βάθος της βάσης και η εσωτερική μεμβράνη κόλλησε γύρω από το κοίλο δείγμα. Μετά την τοποθέτηση της άνω πλάκας, το δείγμα εσωκλείστηκε με μια εξωτερική μεμβράνη από latex. Και οι δύο μεμβράνες σφραγίστηκαν χρησιμοποιώντας o-rings (ελαστικοί δακτύλιοι).

Για την προσομοίωση της συμπύκνωσης του υποστρώματος και της βάσης της θεμελίωσης της σιδηροδρομικής γραμμής, τα δοκίμια αρχικά στερεοποιήθηκαν ισότροπα σε ενεργή τάση ίση με 30kPa, δηλαδή μικρότερη της τάσης των 200 και 300kPa που επιβλήθηκε μετά την ανάμιξη των εδαφικών υλικών.

Προκειμένου να επιτευχθεί χαμηλότερη τριβή στο έμβολο φόρτισης στην βάση της κυψέλης, χρησιμοποιήθηκε ένας σφικτός βραχίονας ανοχής με στεγανοποίηση ελαφράς πίεσης αντί ισορροπημένου εμβόλου. Κατά συνέπεια, επειδή δεν μπορούσε να χρησιμοποιηθεί νερό ως μέσο πίεσης στο δοκίμιο, χρησιμοποιήθηκε υγρό λάδι σιλικόνης με ιξώδες 50cSt στους 25°C στο εσωτερικό και στο εξωτερικό κελί. Η συσκευή είναι δυνατόν να πετύχει μέγιστο ρυθμό κύκλων περίπου 2Hz. Ωστόσο, οι αρχικές δοκιμές έδειξαν πως απαιτείται πολύ πιο αργός ρυθμός ενός κύκλου ανά λεπτό, προκειμένου να εφαρμοστούν πιέσεις με ακρίβεια και να δώσουν αρκετό χρόνο για τα 16 κανάλια που συνδέονται με την μέτρηση της πίεσης, της φόρτισης και της παραμόρφωσης για να κάνουν καταγραφή ανά 3 δευτερόλεπτα. Έτσι παρέχεται μια καλά καθορισμένη σχέση τάσης-παραμόρφωσης κατά την διάρκεια μιας ημιτονοειδούς κυκλικής φόρτισης.

Η κατακόρυφη δύναμη και η ροπή μετρήθηκαν στην κορυφή του εδαφικού δοκιμίου με τη χρήση ενός εσωτερικού υποβρύχιο αισθητήρα μετατροπέα με μέγιστο αξονικό φορτίο 10 kN (1.0N διακριτότητα και 1.0N ακρίβεια) και μέγιστη ροπή 30Nm (0.1Nm διακριτότητα και 0.07Nm ακρίβεια). Οι εσωτερικές και εξωτερικές πιέσεις των κελιών μετρήθηκαν με αισθητήρες πίεσης που είχαν εύρος 1000kPa (1kPa διακριτότητα και ακρίβεια καλύτερη του 0.5kPa). Οι πιέσεις αυτές διατηρήθηκαν ίσες σε όλες τις δοκιμές και χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό της ακτινικής τάσης στο δοκίμιο.

Η μέτρηση των μεταβολών του όγκου των κορεσμένων δοκιμίων έγινε μέσω των GDS digital pressure/volume controllers. Για τη μέτρηση της μεταβολής όγκου του υγρού πίεσης στο εσωτερικό κελί χρησιμοποιήθηκε μια ανάλογη συσκευή. Έγινε η παραδοχή πως τόσο το νερό όσο και το υγρό – λάδι ήταν ασυμπίεστα. Για το λόγο αυτό, ιδιαίτερη προσοχή δόθηκε ώστε όλοι οι σωλήνες και οι συνδέσεις να είναι απαερωμένες.

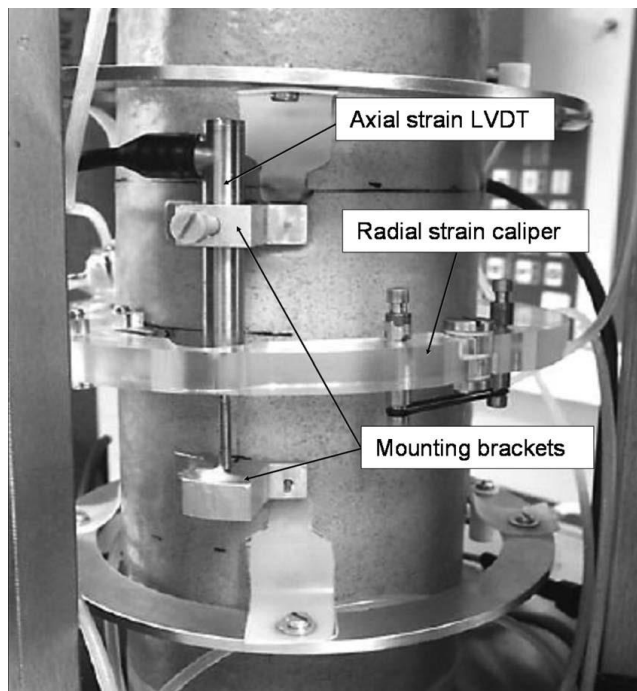
Η εξωτερική μέτρηση της ολικής αξονικής παραμόρφωσης του δοκιμίου μετρήθηκε χρησιμοποιώντας έναν αισθητήρα μήκους τοποθετημένο στον άξονα του κινητήρα. Για τη μέτρηση των τοπικών παραμορφώσεων, δύο δακτύλιοι αλουμινίου κολλήθηκαν στην εξωτερική μεμβράνη του δοκιμίου με κόλλα ταχείας σκλήρυνσης, για τη διατήρηση των υποβρύχιων αισθητήρων μετατόπισης (LVDT) στην θέση τους, Σχήμα 4.17. Η τοπική ακτινική παραμόρφωση της εξωτερικής διαμέτρου του δοκιμίου μετρήθηκε μέσω ενός υποβρύχιο αισθητήρα μήκους LVDT, ο οποίος είναι προσαρτημένος σε μια ακτινική δαγκάνα. Η δαγκάνα αυτή βασίστηκε στο σχεδιασμό του δείκτη πλευρικής παραμόρφωσης από τους Bishop & Henkel (1962) και κατασκευάστηκε από πλεξιγκλάς για τη μείωση του βάρους του. Διαμορφώθηκαν πάνω στη δαγκάνα δύο οπές για την κατακόρυφη τοποθέτηση του αισθητήρα LVDT. Η ακτινική δαγκάνα κολλήθηκε επίσης στην εξωτερική μεμβράνη με κυανό-ακρυλική κόλλα ταχείας σκλήρυνσης. Οι μετασχηματιστές LVDT έχουν διακριτότητα 1μm και ακρίβεια καλύτερη από 11μm.

Η εξωτερική μέτρηση της γωνιακής παραμόρφωσης λόγω στρέψης του δοκιμίου εκτιμήθηκε από τις μετρήσεις γωνίας του ακτινικού κινητήρα βάσει ενός μετρητή. Έγιναν και τοπικές μετρήσεις της γωνιακής παραμόρφωσης, ωστόσο αποδείχθηκε πως η εξωτερική μέτρηση ήταν ακριβής.

Η πίεση του νερού των πόρων μετρήθηκε στην κορυφή και την βάση του δοκιμίου με εξωτερικούς αισθητήρες πίεσης εύρους 1000kPa (διακριτότητα 1kPa και ακρίβεια καλύτερη από 0.5kPa). Επιπλέον, χρησιμοποιήθηκε ακόμα ένας αισθητήρας πίεσης σε μινιατούρα, περίπου στην μέση του δείγματος, με εύρος 600kPa (διακριτότητα 1kPa και ακρίβεια καλύτερη από 0.5 kPa) για την μέτρηση της πίεσης του νερού των πόρων.

Μετά την παρασκευή των δειγμάτων και την προστεροποίησή τους, διαμορφώθηκαν τα δοκίμια, τοποθετήθηκαν οι τοπικοί αισθητήρες παραμόρφωσης πάνω στο δοκίμιο και το δοκίμιο στη βάση της συσκευής. Στη συνέχεια γέμισε η εσωτερική κυψέλη με λάδι σιλικόνης και τοποθετήθηκε η πλάκα κάλυψης του δοκιμίου. Ακολούθησε η τοποθέτηση της εξωτερικής κυψέλης, της πλάκας της κυψέλης και γέμισε με λάδι σιλικόνης τη εξωτερική κυψέλη. Έπειτα εφαρμόστηκε η διαδικασία κορεσμού του δοκιμίου με τη μέθοδο της ενδοπίεσης (backpressure), κατά την οποία εφαρμόστηκε μια ενεργός μέση τάση 30kPa με αυξανόμενη πίεση του ύδατος των πόρων σε τρία επίπεδα 100, 200 και 300kPa. Σε κάθε επίπεδο έγινε μέτρηση της πίεσης ύδατος στη βάση και στο μέσο του ύψους του δοκιμίου για τον προσδιορισμό της παραμέτρου B ($B > 0.98$). Έπειτα τα δοκίμια στερεοποιήθηκαν ισότροπα αυξάνοντας την πίεση της εσωτερικής και της εξωτερικής κυψέλης, έως ότου η μέση ενεργός τάση

έφτασε τα 450kPa, κι έπειτα μειώθηκε στα 30kPa ώστε τα δοκίμια να καταστούν υπερστερεοποιημένα με λόγο υπερστερεοποίησης OCR=15 (εκτιμήθηκε από τις παραμέτρους φόρτισης για το South Coal Line.

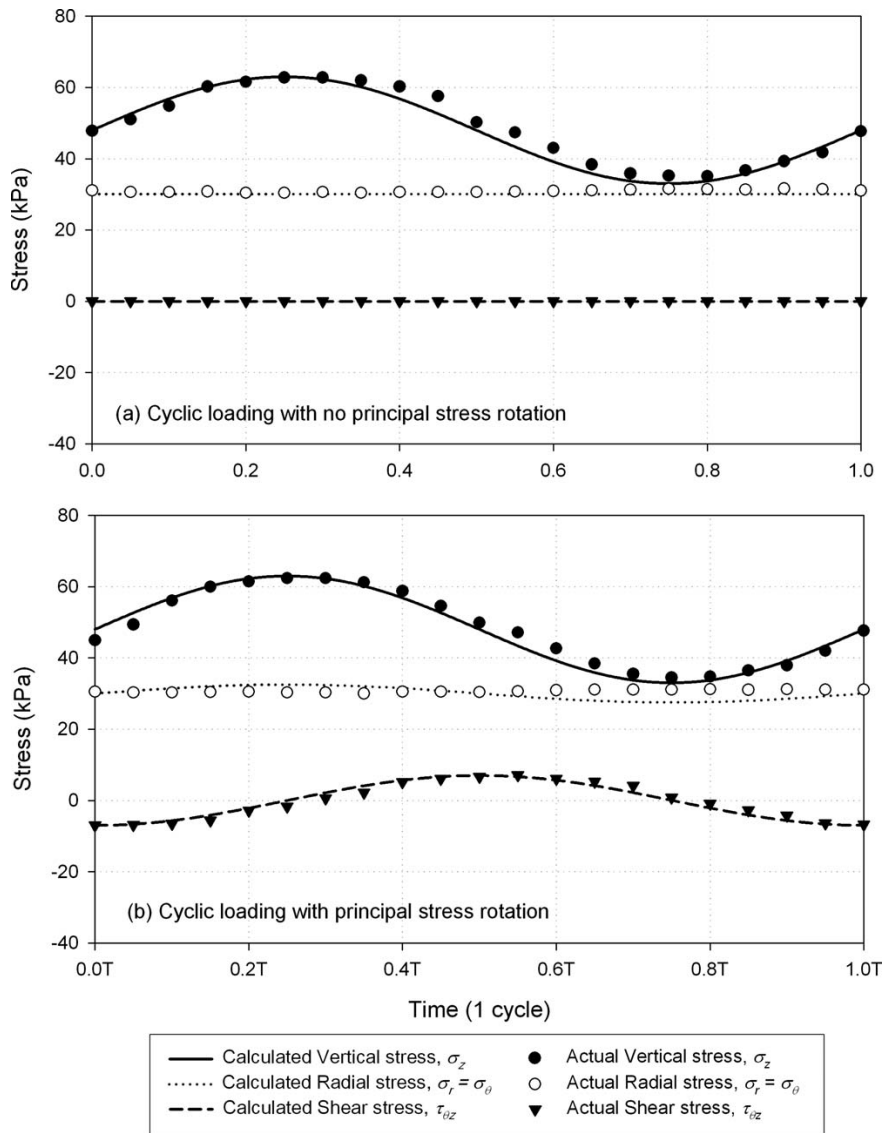


Σχήμα 4.17: Αισθητήρες μέτρησης της τοπικής αξονικής και της ακτινικής παραμόρφωσης (Grabe & Clayton, 2009).

Μετά τη στερεοποίηση των δοκιμών ακολούθησε η επιβολή της κυκλικής φόρτισης και για τα τέσσερα δείγματα A, B, C & D με περιστροφή των κύριων τάσεων (δηλώνεται με το δείκτη 1) ή χωρίς περιστροφή (δηλώνεται με το δείκτη 2). Στο Σχήμα 4.18 παρουσιάζεται η ιδεατή διαδρομή τάσεων υπό κυκλική φόρτιση στα κοίλα κυλινδρικά δοκίμια για την προσομοίωση της φόρτισης του συρμού σε συνάρτηση με τον χρόνο. Με T συμβολίζεται η περίοδος του κύκλου φόρτισης. Στο Σχήμα 4.18 (α) παρουσιάζεται η κατακόρυφη ολική τάση, σ_v , η οποία κυμαίνεται από 30 έως 60 kPa, ενώ η ακτινική τάση σ_r διατηρείται σταθερή και η οριζόντια διατμητική τάση (η $\tau_{\theta z}$ που παράγεται από την εφαρμογή της ροπής στο δείγμα) είναι ίση με το μηδέν. Αυτό ισοδυναμεί με κυκλική τριαξονική φόρτιση, καθώς δεν υπάρχει κύρια περιστροφή της τάσης. Στο Σχήμα 4.18 (b) η τάση διάτμησης, $\tau_{\theta z}$, δεν είναι πλέον μηδενική, αλλά κυμαίνεται μεταξύ του -7 και 7 kPa. Η κατακόρυφη ολική τάση, σ_v , καθώς και η ακτινική τάση, σ_r , παραμένουν αμετάβλητες σε σχέση με την διαδρομή τάσεων του Σχήματος 4.18 (α). Οι διαδρομές τάσης στο Σχήμα 4.18 (b) είναι παρόμοιες με αυτές που λαμβάνονται από τις αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων, αλλά με τις εξής δύο διαφορές:

- Οι αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων προβλέπουν μικρές αυξήσεις στην ακτινική τάση, σ_r , της τάξης των 5kPa, αλλά μια προκαταρκτική σειρά πειραμάτων έδειξαν πως έχουν ασήμαντες μόνιμες παραμορφώσεις που μετρήθηκαν, κατά συνέπεια παρέμειναν σταθερές.
- Οι προβλέψεις πεπερασμένων στοιχείων που υποστηρίζονται από τις επιτόπιες μετρήσεις σημειώνουν ότι στα βάθη στα οποία η ενεργή τάση θα ήταν της τάξης των 30kPa, ενδέχεται να αυξηθεί στα 40-50kPa, με αποτέλεσμα το πέρασμα ενός ακόμη άξονα 26 τόνων. Ωστόσο,

κρίθηκε επιθυμητή η διατήρηση της κατάστασης της πίεσης του δείγματος μέχρι τώρα στα 30kPa.



Σχήμα 4.18: Απεικόνιση των ιδεατών και των πραγματικών διαδρομών τάσεων σε κυκλικές φορτίσεις με ή χωρίς PSR ($K_0=1$) (Grabe & Clayton, 2009).

Οι εξωτερικές και εσωτερικές πιέσεις των κελιών, p_o και p_i , διατηρήθηκαν ίσες κατά την διάρκεια όλων των δοκιμών, μειώνοντας έτσι τις διακυμάνσεις στην ακτινική και περιφερειακή τάση των κελιών (σ_r και σ_θ ίσες με την πίεση στην κυψέλη). Η μέγιστη κύρια αρχική σ_1 έχει κλίση υπό γωνία, α , ως προς τον κατακόρυφο άξονα του δοκιμίου σύμφωνα με το λόγο της εκτροπικής προς τη διατμητική τάση. Το μέγεθος της ενδιάμεσης κύριας τάσης σ_2 συγκριτικά με τις σ_1 και σ_3 , δίνεται με το λόγο της ενδιάμεσης τάσης, b , ως εξής:

$$b = \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} \quad (4.11)$$

Για δοκιμές τριαξονικής συμπίεσης ισχύει $b = \sin^2 \alpha$, ενώ για τις δοκιμές σε κοίλα κυλινδρικά δοκίμια το b κυμαίνεται από 0.0 έως 1.0 και η σ_1 περιστρέφεται από 0° έως 90° .

Είναι γενικά χρήσιμο η τρισδιάστατη εντατική κατάσταση να εκφράζεται με τις αναλλοίωτες των τάσεων, τα μεγέθη των οποίων είναι ανεξάρτητα από την επιλογή του συστήματος αναφοράς. Οι αναλλοίωτες οκταεδρικής τάσης, ή οκταεδρικές όπως αλλιώς ονομάζονται, είναι η οκταεδρική ορθή τάση, σ_{oct} , και οκταεδρική διατμητική τάση, τ_{oct} , και παρουσιάζονται στις επόμενες εξισώσεις.

$$\sigma'_{oct} = \frac{1}{3}(\sigma'_1 + \sigma'_2 + \sigma'_3) \quad (4.12)$$

$$\tau_{oct} = \frac{1}{3}[(\sigma'_1 - \sigma'_2)^2 + (\sigma'_2 - \sigma'_3)^2 + (\sigma'_3 - \sigma'_1)^2]^{1/2} \quad (4.13)$$

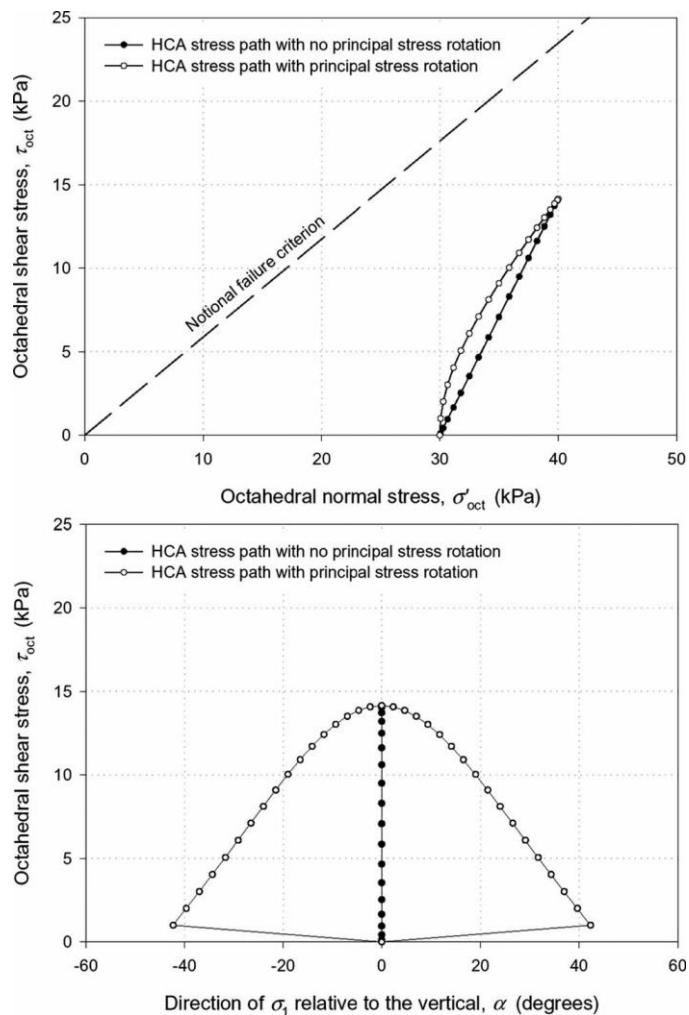
Το Σχήμα 4.19 δείχνει τις διαδρομές τάσης που παρουσιάζονται και στο Σχήμα 4.18, αλλά με όρους οκταεδρικών τάσεων, δηλαδή στο επίπεδο $\tau_{oct} - \sigma_{oct}$ (4.19(α)) και $\tau_{oct} - \alpha$ (4.19(α)). Υπενθυμίζεται πως α είναι η γωνία μεταξύ του άξονα της μέγιστης κύριας τάσης, σ_1 , με τον κατακόρυφο άξονα. Παρατηρείται πως η διαφορά μεταξύ των διαδρομών τάσεων με ή χωρίς PSR στο επίπεδο $\tau_{oct} - \sigma_{oct}$ δεν είναι μεγάλη, παρ' όλο που η περιστροφή της μέγιστης κύριας τάσης σε σχέση με τον κατακόρυφο άξονα είναι μεγάλη. Στα Σχήματα 4.18 και 4.19 η μέγιστη τιμή του λόγου των ενεργών (σ'_1/σ'_3) είναι ίση με 2.

Όλες οι δοκιμές κυκλικής φόρτισης διεξήχθησαν σε αστράγγιστες συνθήκες για δύο λόγους. Πρώτον, το φορτίο του συρμού έχει κατά κανόνα μεγάλο ρυθμό επιβολής και ως εκ τούτου δεν επιτρέπει την επικράτηση στραγγιζόμενων συνθηκών μεταξύ των κύκλων φόρτισης, και δεύτερον η ανάπτυξη υπερπίεσης του νερού των πόρων αναμένεται να έχει σημαντική επίδραση στην ανάπτυξη μόνιμων παραμορφώσεων.

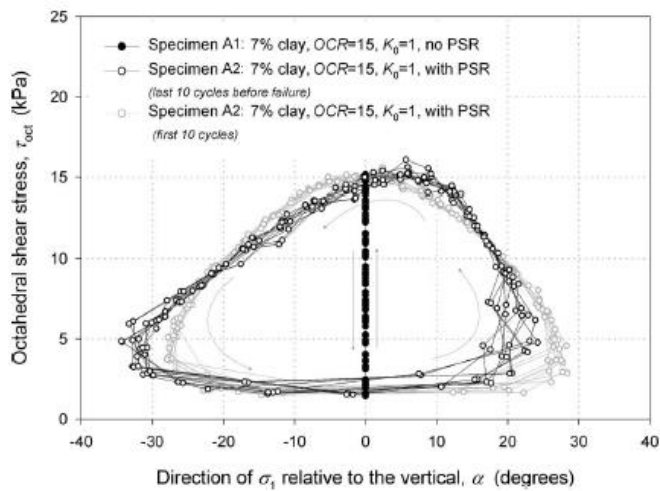
Το Σχήμα 4.20 δίνει παραδείγματα της πραγματικής διαδρομής οκταεδρικών τάσεων για σύγκριση με τις αντίστοιχες ιδεατές διαδρομές του Σχήματος 4.19(b). Παρατηρείται πως η οκταεδρική διατμητική τάση στο Σχήμα 4.20 ότι μειώνεται στα 2kPa σε αντίθεση με τη μηδενική τιμή που αποκτά όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.19(b). Αυτός ο περιορισμός επιβλήθηκε προκειμένου να αποφευχθεί ο τριαξονικός εφελκυσμός του δοκιμίου με ταυτόχρονη περιστροφή των αξόνων των κύριων τάσεων ίση με 90° , ως αποτέλεσμα του θορύβου του συστήματος της συσκευής.

Στο Σχήμα 4.21 παρατηρείται μεταβολή στο σχήμα της διαδρομής της κυκλικής τάσης του δοκιμίου A2 από τη σύγκριση μεταξύ στους πρώτους 10 κύκλους φόρτισης με τους 10 τελευταίους κύκλους φόρτισης πριν την αστοχία. Παρατηρείται επίσης πως υπό το καθεστώς της κυκλικής φόρτισης με περιστροφή των αξόνων (δοκίμιο A2), το δοκίμιο πλησιάζει σταδιακά την περιβάλλουσα αστοχίας με την αύξηση του αριθμού των κύκλων φόρτισης.

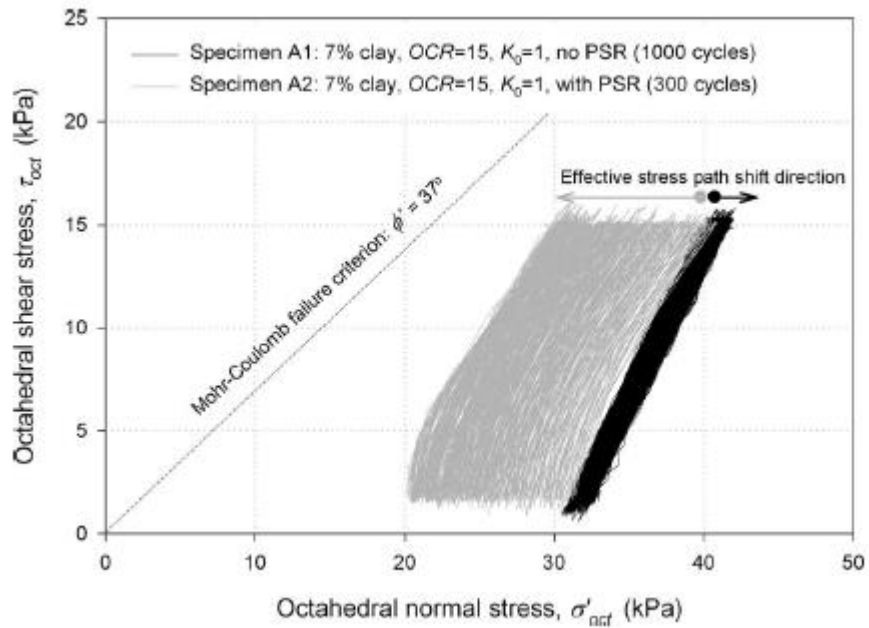
Μετά την ολοκλήρωση της κυκλικής φόρτισης, τα δοκίμια υποβλήθησαν σε CU δοκιμές τριαξονικής συμπίεσης με ταυτόχρονη καταγραφή της πίεσης του νερού των πόρων, για τον προσδιορισμό του κριτηρίου αστοχίας Mohr-Coulomb, $q = M p'$. Τα αποτελέσματα αυτών των δοκιμών δίνονται στο Σχήμα 4.22.



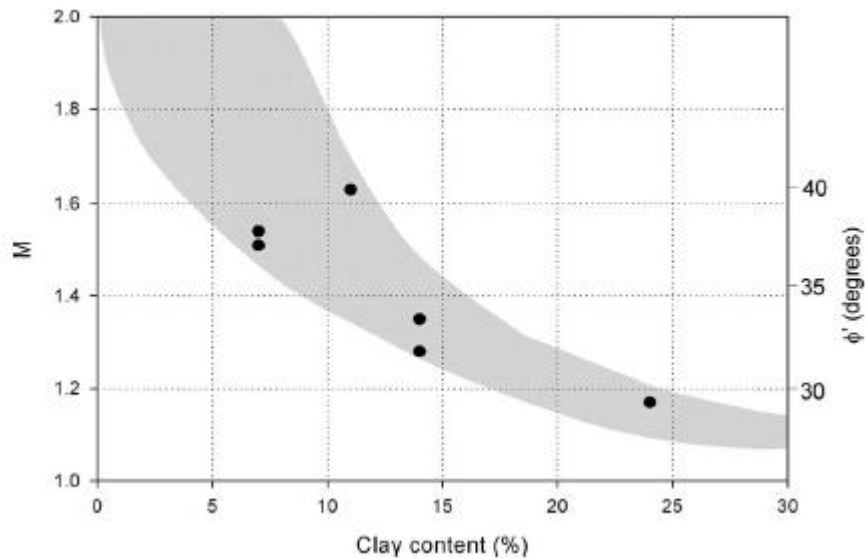
Σχήμα 4.19: Ιδεατές διαδρομές τάσεων σε όρους οκταεδρικής διατμητικής τάσης για κοίλο κυλινδρικό δοκίμιο που υποβάλλεται σε κυκλική φόρτιση με ή χωρίς PSR ($K_0=1$) (Grabe & Clayton, 2009).



Σχήμα 4.20: Παράδειγμα πραγματικών διαδρομών τάσεων ως προς την οκταεδρική διατμητική τάση (Δοκίμια A1 & A2, 7% άργιλος) (Grabe & Clayton, 2009).



Σχήμα 4.21: Πραγματικές διαδρομές τάσεων ως προς την οκταεδρική διατμητική τάση (Δοκίμια A1 & A2, 7% άργιλος) (Grabe & Clayton, 2009).

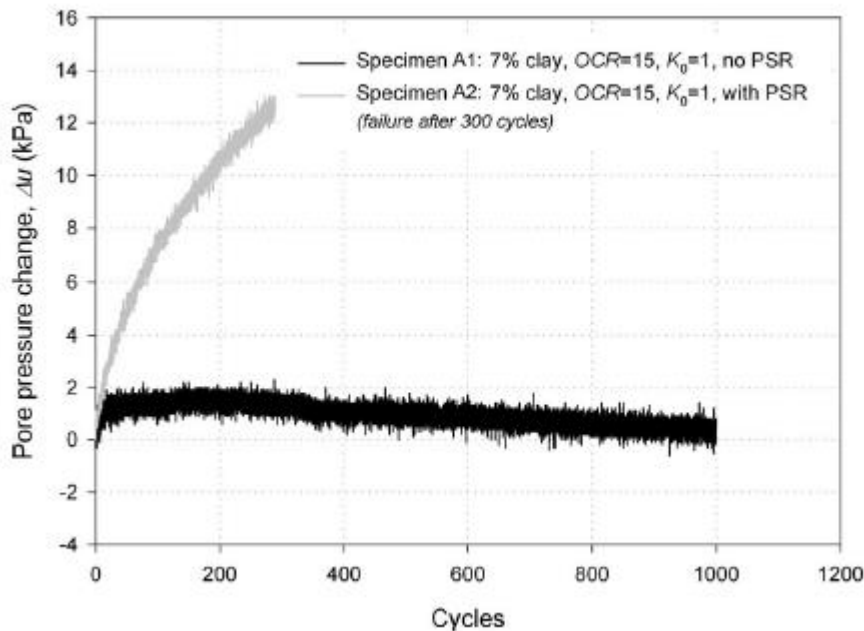


Σχήμα 4.22: Μεταβολής των M και ϕ' με το ποσοστό του αργλικού κλάσματος (Grabe & Clayton, 2009).

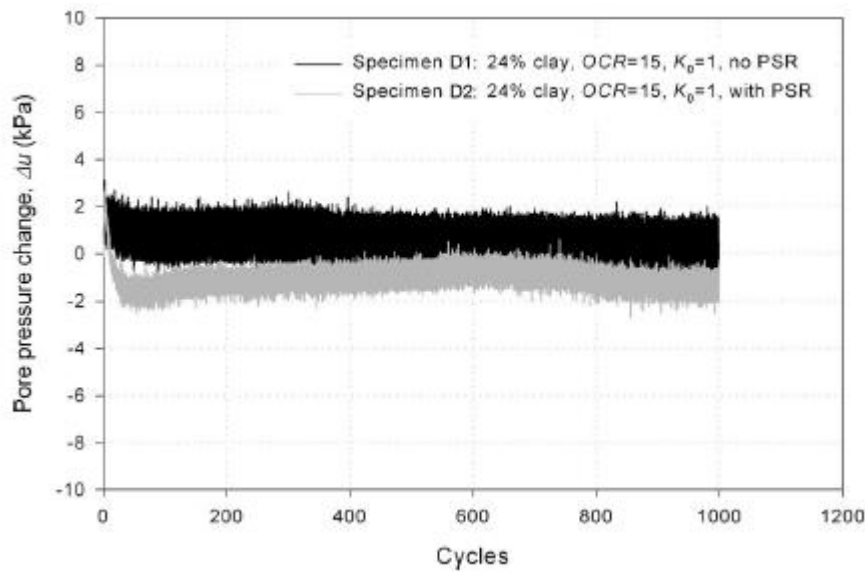
Το Σχήμα 4.23 συγκρίνει τις πιέσεις του νερού των πόρων που αναπτύσσονται στα δείγματα A1 και A2 κατά την διάρκεια της κυκλικής φόρτισης, με μέγιστο λόγο ενεργών κύριων τάσεων $\sigma'_1/\sigma'_3 = 2.0$, χωρίς και με PSR αντίστοιχα. Το δείγμα A είναι το πιο χονδρόκοκκο από τα τέσσερα δείγματα που μελετήθηκαν και έχει περιεκτικότητα σε άργιλο 7%. Η κυκλική φόρτιση χωρίς την περιστροφή των

αξόνων των κύριων τάσεων, οδήγησε αρχικά σε μικρή άνοδο της πίεσης των πόρων η οποία στη συνέχεια μειώθηκε και στους 1000 κύκλους φόρτισης απέκτησε μια πολύ μικρή τιμή. Η περιστροφή των αξόνων των κύριων τάσεων κατά την κυκλική φόρτιση επιφέρει σημαντική αύξηση της πίεσης του νερού των πόρων στο δείγμα A (δοκίμιο A2), που είναι το δείγμα με το μεγαλύτερο ποσοστό χονδρόκοκκου κλάσματος. Αντίστοιχα αποτελέσματα για το δείγμα D που έχει το μικρότερο ποσοστό χονδρόκοκκου κλάσματος και το μεγαλύτερο ποσοστό αργιλικού κλάσματος (24%) παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.24. Όπως παρατηρείται για το δείγμα D η αύξηση της πίεσης του νερού των πόρων δεν ξεπέρασε τα 3kPa (πολύ μικρή τιμή) είτε με περιστροφή των αξόνων των κύριων τάσεων είτε χωρίς περιστροφή.

Το Σχήμα 4.25 συγκρίνει τις καμπύλες μεταβολής της πίεσης του νερού των πόρων με τον αριθμό των κύκλων φόρτισης με ταυτόχρονη περιστροφή των αξόνων των κύριων τάσεων για τα τέσσερα εδαφικά δείγματα A, B, C & D. Στις δοκιμές που παρουσιάζονται ο μέγιστος λόγος ενεργών κύριων τάσεων ισούται με $\sigma_1'/\sigma_3' = 2.0$. Παρατηρείται πως η ανάπτυξη υπερπίεσης του νερού των πόρων είναι μεγαλύτερη στα δείγματα με μεγάλο ποσοστό χονδρόκοκκου κλάσματος. Στο δείγμα A με το μεγαλύτερο ποσοστό χονδρόκοκκου κλάσματος η αύξηση της πίεσης του νερού των πόρων είναι συνεχής κατά την κυκλική φόρτιση μέχρι της αστοχίας. Στο δείγμα B παρατηρείται αύξηση της πίεσης του νερού των πόρων μέχρι τους πρώτους 400 κύκλους φόρτισης και μετά σταθεροποίηση. Οι πιέσεις στα δείγματα C και D δεν άλλαξαν πολύ, αλλά μειώθηκαν ελάχιστα.

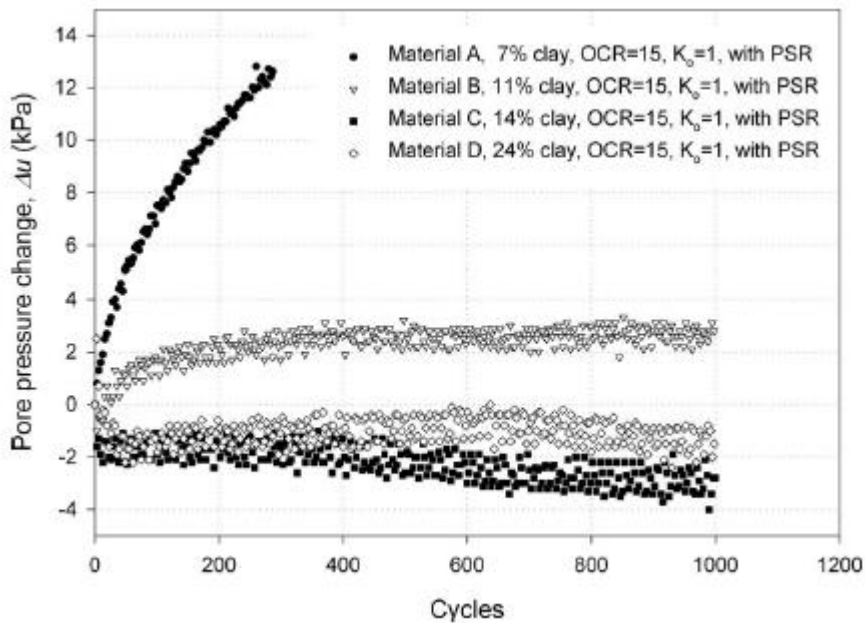


Σχήμα 4.23: Ανάπτυξη της πίεσης του νερού των πόρων λόγω κυκλικής φόρτισης με και χωρίς περιστροφή των κύριων τάσεων (Υλικό A, 7% άργιλος) (Grabe & Clayton, 2009).

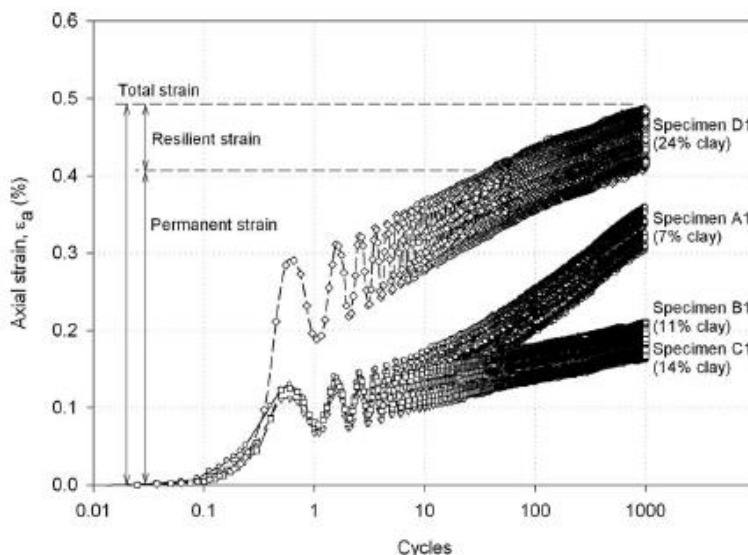


Σχήμα 4.24: Ανάπτυξη της πίεσης του νερού των πόρων λόγω κυκλικής φόρτισης με και χωρίς περιστροφή των κύριων τάσεων (Υλικό D, 24% άργιλος) (Grabe & Clayton, 2009).

Το Σχήμα 4.26 δείχνει την εξέλιξη της μόνιμης παραμόρφωσης σε σχέση με τον αριθμό των κύκλων φόρτισης χωρίς της εφαρμογή της περιστροφής των κύριων τάσεων, που ισοδυναμεί με δοκιμή σε κυκλική τριαξονική φόρτιση. Δίνονται τα αποτελέσματα για καθ' ένα από τα τέσσερα δείγματα, με μέγιστο λόγο ενεργών κύριων τάσεων $\sigma_1'/\sigma_3' = 2.0$. Στο ίδιο σχήμα ορίζονται τα μεγέθη της ολικής, ελαστικής και μόνιμης παραμόρφωσης για το δοκίμιο D1. Τα δοκίμια B1 και C1 έδειξαν παρόμοια συμπεριφορά.



Σχήμα 4.25: Ανάπτυξη της πίεσης του νερού των πόρων λόγω κυκλικής φόρτισης με περιστροφή των κύριων τάσεων (Υλικά A, B, C και D) (Grabe & Clayton, 2009).



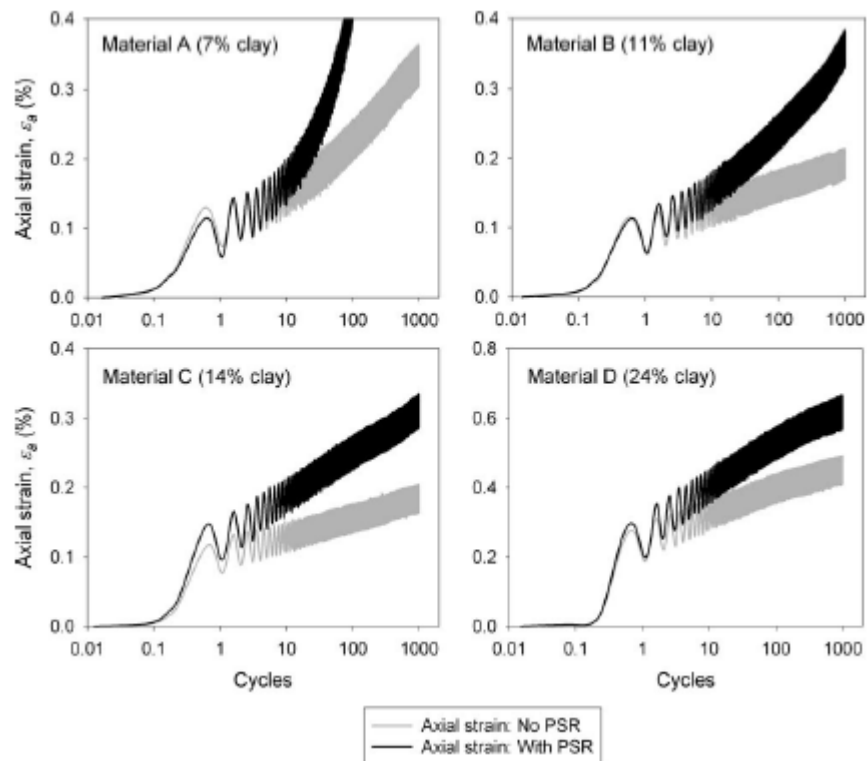
Σχήμα 4.26: Μόνιμη παραμόρφωση των δειγμάτων A, B, C και D ως αποτέλεσμα κυκλικής φόρτισης χωρίς περιστροφή των κύριων τάσεων (Grabe & Clayton, 2009).

Το Σχήμα 4.27 παρουσιάζει τη μεταβολή της τοπικής αξονικής παραμόρφωσης που αναπτύχθηκαν στα τέσσερα δείγματα κατά την επιβολή της κυκλικής φόρτισης με ή χωρίς PSR. Στο γράφημα που απεικονίζει τα αποτελέσματα του δείγματος D (με περιεκτικότητα 24% σε άργιλο) χρησιμοποιείται διαφορετική κλίμακα. Σε τα δείγματα υπήρξε μια σημαντική αύξηση της μόνιμης παραμόρφωσης όταν εφαρμόστηκε η PSR, η οποία ήταν εντονότερη με τη μείωση του αργλικού κλάσματος. Όπως σημειώθηκε παραπάνω, στην περίπτωση του πιο κοκκώδους δείγματος, δηλαδή του A2, η αύξηση της πίεσης του νερού των πόρων οδήγησαν σε αστοχία εντός των πρώτων 300 κύκλων φόρτισης. Η συνεπακόλουθη μείωση της οκταεδρικής ενεργής τάσης είναι υπεύθυνη για την αύξηση των μόνιμων παραμορφώσεων. Ωστόσο, στις περιπτώσεις πίεσης των δειγμάτων B, C και D, όπου οι πιέσεις του νερού των πόρων είναι είτε σταθεροποιημένες είτε μειωμένες, και οι αυξήσεις στην μόνιμη παραμόρφωση που προκύπτουν από την κύρια περιστροφή των τάσεων, προέρχονται κυρίως από τις διαφορές της συμπεριφοράς των υλικών, παρά από τη μείωση της ενεργής τάσης.

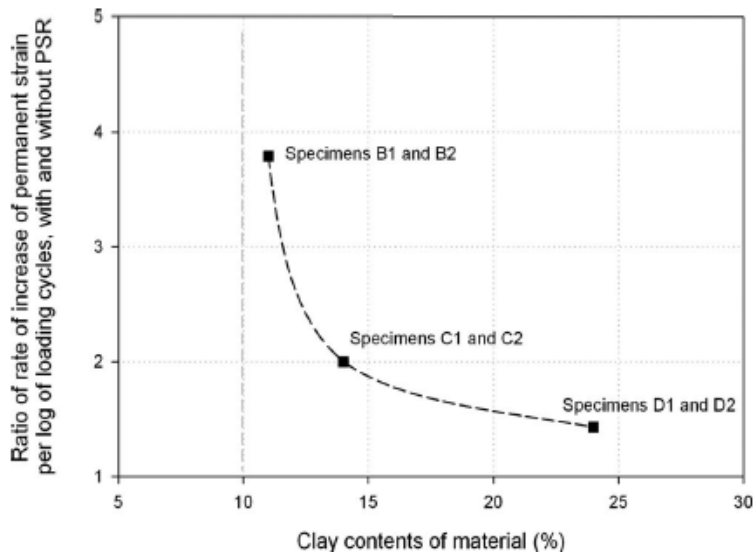
Στο Σχήμα 4.28 παρουσιάζεται ο λόγος του ρυθμού αύξησης της μόνιμης καταπόνησης ανά κύκλο φόρτισης, με και χωρίς περιστροφή των αξόνων των κύριων τάσεων, ως συνάρτηση του αργλικού κλάσματος των δειγμάτων B, C και D. Τα αποτελέσματα προσδιορίστηκαν για τους 900 κύκλους φόρτισης. Δεν παρουσιάζονται δεδομένα για το δείγμα A, καθώς ρευστοποιήθηκε στους 300 κύκλους φόρτισης. Παρατηρείται πως η επίδραση της περιστροφής των αξόνων των κύριων τάσεων στην ανάπτυξη των μόνιμων παραμορφώσεων γίνεται μεγαλύτερη με τη μείωση του αργλικού κλάσματος.

Όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.29, η επίδραση της περιστροφής των αξόνων των κύριων τάσεων στην ανάπτυξη των μόνιμων παραμορφώσεων εξαρτάται από το λόγο των κύριων τάσεων $\eta^* = \sigma_1' / \sigma_3'$, ο οποίος μεταβάλλεται κατά την επιβολή της κυκλικής φόρτισης. Συγκεκριμένα, για τα αποτελέσματα του δείγματος C, παρατηρείται πως για τιμές του $\eta^* < 2,4$, ο ρυθμός αύξησης των μόνιμων

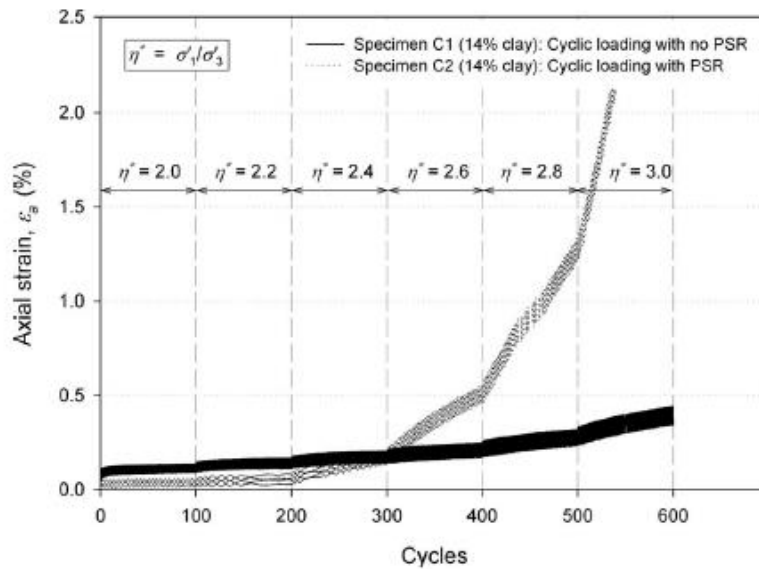
παραμορφώσεων είναι χαμηλότερος με την εφαρμογή της περιστροφής των αξόνων των κύριων τάσεων.



Σχήμα 4.27: Μόνιμη παραμόρφωση των δειγμάτων A, B, C και D σε κυκλική φόρτιση, με ή χωρίς περιστροφή των αξόνων των κύριων τάσεων (Grabe & Clayton, 2009).



Σχήμα 4.28: Επίδραση της περιστροφής των αξόνων των κύριων τάσεων στην ανάπτυξη των μόνιμων παραμορφώσεων με το ποσοστό του αργιλικού κλάσματος (Grabe & Clayton, 2009).



Σχήμα 4.29: Αξονική παραμόρφωση σε διάφορες τιμές του $\eta^* = \sigma'_1 / \sigma'_3$ (δείγμα C με αργιλικό κλάσμα 14%) (Grabe & Clayton, 2009).

Τα κύρια συμπεράσματα της μελέτης των Grabe & Clayton (2009) συνοψίζονται στα εξής: (α) Για την προσομοίωση της επιβαλλόμενης κυκλικής φόρτισης με ταυτόχρονη περιστροφή των αξόνων των κύριων τάσης (PSR) και τη μελέτη των αναπτυσσόμενων μόνιμων παραμορφώσεων στα εδαφικά υλικά του υποστρώματος και της βάσης θεμελίωσης των σιδηροδρομικών γραμμών κρίνεται ως καταλληλότερη η συσκευή στρεπτικής διάτμησης κοίλων κυλινδρικών δοκιμίων. Η διεξαγωγή δοκιμών τριαξονικής ανακυκλικής φόρτισης δεν προσομοιώνει την PSR και συνεπώς δεν παρέχει αξιόπιστα αποτελέσματα στις περιπτώσεις αυτές. (β) Μεγάλη αύξηση των μόνιμων παραμορφώσεων παρατηρείται κατά την επιβολή της κυκλικής φόρτισης υπό το καθεστώς της PSR. Η επίδραση της PSR στην ανάπτυξη των κύριων παραμορφώσεων αυξάνεται με τη μείωση του αργιλικού κλάσματος στο έδαφος. (γ) Η επίδραση της περιστροφής των αξόνων των κύριων τάσεων PSR στην ανάπτυξη των μόνιμων παραμορφώσεων εξαρτάται από το λόγο των κύριων τάσεων $\eta^* = \sigma'_1 / \sigma'_3$, και αυξάνεται με την αύξησή του κατά τη διάρκεια της κυκλικής φόρτισης. (δ) Η ανάπτυξη υπερπίεσης του νερού των πόρων είναι μεγαλύτερη στα δείγματα με μεγάλο ποσοστό χονδρόκοκκου κλάσματος και υπό το καθεστώς της PSR.

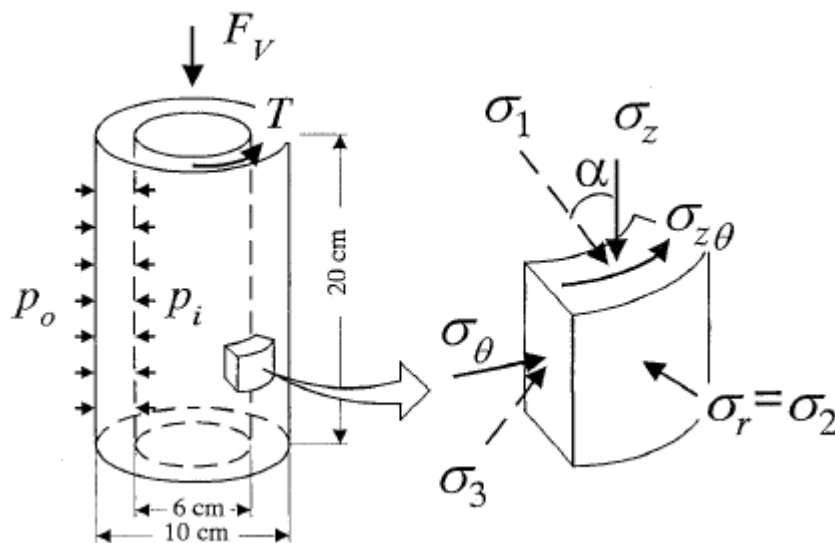
4.3 Επίδραση της γωνίας μεταξύ του άξονα της μέγιστης κύριας τάσης και του κατακόρυφου άξονα, α , & του λόγου της ενδιάμεσης κύριας τάσης, b , σε προβλήματα επίπεδης παραμόρφωσης

Οι Yoshimine et al. (2009) πραγματοποίησαν μια εργαστηριακή έρευνα για τη μελέτη της σχέσης τάσης-παραμόρφωσης αμμωδών εδαφών σε συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης στη συσκευή στρεπτικής διάτμησης κοίλου κυλινδρικού δοκιμίου (στο Istanbul Technical University), με έμφαση στη μελέτη της επίδρασης της περιστροφής των αξόνων των κύριων τάσεων και του μεγέθους της

ενδιάμεσης κύριας τάσης, καθώς και στη σύγκριση με τα αντίστοιχα αποτελέσματα δοκιμών απλής διάτμησης.

Το ερευνητικό ενδιαφέρον προέκυψε καθώς συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης στο πεδίο ($\epsilon_2=0$) επικρατούν συχνά στα γεωτεχνικά έργα, π.χ. επιχώματα μεγάλου μήκους. Για την προσομοίωση της επίπεδης παραμόρφωσης είχαν πραγματοποιηθεί μέχρι τότε πολλές πειραματικές μελέτες με τη διεξαγωγή πειραμάτων συμπίεσης και εφελκυσμού, με άκαμπτα όρια όμως στη διεύθυνση του ϵ_2 . Ωστόσο, σε αυτές τις μελέτες (α) δε λάμβανε χώρα η περιστροφή των αξόνων των κύριων τάσεων, (β) υπήρχε το πρόβλημα της αναπτυσσόμενης τριβής μεταξύ του δοκιμίου και του άκαμπτου ορίου, και (γ) δεν ήταν δυνατή η επιβολή της ενδιάμεσης κύριας τάσης. Όλοι αυτοί οι περιορισμοί ξεπεράστηκαν στη μελέτη των Yoshimine et al. (2009) με τη διεξαγωγή πειραμάτων στη συσκευή στρεπτικής διάτμησης κοίλου κυλινδρικού δοκιμίου και συνεπώς με εύκαμπτα όρια στην κατεύθυνση του ϵ_2 .

Στην συσκευή αυτή επιβάλλονται: ένα αξονικό φορτίο F_V και μια ροπή στρέψης, T , στην κορυφή και τη βάση του εδαφικού δοκιμίου αντίστοιχα με την ταυτόχρονη επιβολή της εξωτερικής και εσωτερικής πίεσης, p_o και p_i αντίστοιχα, Σχήμα 4.30. Τα τέσσερα αυτά μεγέθη μετρώνται μέσω αισθητήρων. Επίσης μετράται η κατακόρυφη αξονική μετατόπιση, ΔH , και η περιστροφική γωνία, $\Delta \theta$, μέσω ενός αισθητήρα LVDT και ενός ποτενσιόμετρου, αντίστοιχα. Οι μεταβολές του όγκου του δείγματος, ΔV_s , και της εσωτερικής κυψέλης, ΔV_i , μετρήθηκαν με κατάλληλα συστήματα (burrettes). Οι μετρήσεις αυτών των εννέα εντατικών μεγεθών, F_V , T , p_o , p_i , u , ΔH , $\Delta \theta$, ΔV_s και ΔV_i καταγράφονταν αυτόματα από έναν ηλεκτρονικό υπολογιστή σε ψηφιακή μορφή.



Σχήμα 4.30: Γραφική απεικόνιση των εξωτερικών και εσωτερικών δυνάμεων στο κοίλο κυλινδρικό δοκίμιο (Yoshimine et al., 2009).

Οι συνιστώσες τάσης του Σχήματος 4.30 υπολογίζονται ως εξής, σύμφωνα με τους Hight et al. (1983), Pradhan et al. (1988) και τους Pradel et al. (1990):

$$\sigma_z = (F_v + \pi(p_o r_o^2 - p_i r_i^2)) \frac{1}{A_s} \quad (4.14)$$

$$\sigma_{z\theta} = \frac{1}{2} \left\{ \frac{3T}{2\pi(r_o^3 - r_i^3)} + \frac{T}{\pi(r_o^2 + r_i^2)(r_o - r_i)} \right\} \quad (4.15)$$

$$\sigma_r = \frac{p_o r_o + p_i r_i}{r_o + r_i} \quad (4.16)$$

$$\sigma_\theta = \frac{p_o r_o - p_i r_i}{r_o - r_i} \quad (4.17)$$

Όπου: r_o είναι η εξωτερική ακτίνα, r_i είναι η εσωτερική ακτίνα, και A_s είναι το εμβαδόν της διατομής του εδαφικού δοκιμίου. Τα μεγέθη F_v , T , p_o και p_i διορθώνονται λόγω της επίδρασης της μεμβράνης, θεωρώντας πως το μέτρο ελαστικότητας της μεμβράνης είναι $E=1400\text{kPa}$ και ο λόγος Poisson είναι $\nu=0.5$, εκτός από την Εξίσωση (4.14) όπου τα φορτία επιβάλλονται στην πλάκα του δοκιμίου και όχι πάνω στη μεμβράνη.

Οι συνιστώσες της παραμόρφωσης υπολογίζονται ως εξής :

$$\varepsilon_z = \frac{\Delta H}{H_0} \quad (4.18)$$

$$\gamma_{z\theta} = 2\varepsilon_{z\theta} = \frac{2\Delta\theta(r_o^3 - r_i^3)}{3H(r_o^2 - r_i^2)} \quad (4.19)$$

$$\varepsilon_r = -\frac{\Delta r_o - \Delta r_i}{r_o - r_i} \quad (4.20)$$

$$\varepsilon_\theta = -\frac{\Delta r_o + \Delta r_i}{r_o + r_i} \quad (4.21)$$

Όπου: H_0 είναι το αρχικό ύψος του δοκιμίου, Δr_o και Δr_i είναι οι μεταβολές της εξωτερικής και της εσωτερικής ακτίνας του δοκιμίου, οι οποίες υπολογίζονται από τις μετρήσεις των ΔH , ΔV_s και ΔV_i θεωρώντας πως το δοκίμιο διατηρεί το κυλινδρικό του σχήμα.

Στις δοκιμές επίπεδης παραμόρφωσης η ακτινική παραμόρφωση διατηρήθηκε στο μηδέν ($\varepsilon_r = \varepsilon_\theta = 0$), η ολική κατακόρυφη τάση διατηρήθηκε σταθερή ($\sigma_z = \text{σταθερή}$) και η στρεπτική διάτμηση εφαρμόστηκε με σταθερή ταχύτητα ($d\gamma_{z\theta}/dt = \text{σταθερό}$). Κατά τη διάρκεια της δοκιμής επιλέχτηκε σταθερή τιμή του λόγου τάσεων στην περιφερειακή διεύθυνση:

$$K_{\theta} = \sigma'_{\theta} / \sigma'_z = \text{const.} \quad (4.22)$$

Από τις Εξισώσεις (4.17) και (4.22), προέκυψε η σχέση μεταξύ των p_o και p_i :

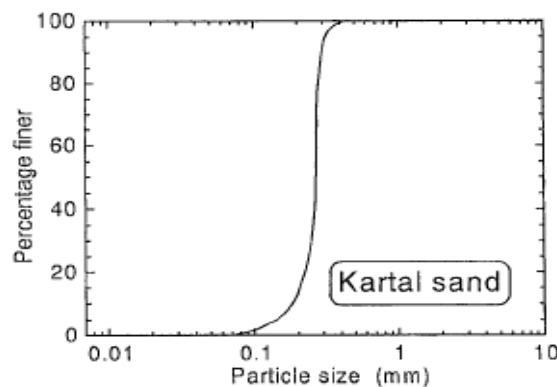
$$p_o = \left(1 - \frac{r_i}{r_o}\right) (K_{\theta} \sigma'_z + u) + \frac{r_i}{r_o} p_i. \quad (4.23)$$

Όταν το πάχος του δοκιμίου έτεινε να αυξηθεί (αρνητικές τιμές στο ϵ_r) οι πιέσεις p_o και p_i αυξανόταν έτσι ώστε να επιβληθούν συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης με $\epsilon_r=0$. Στην αντίθετη περίπτωση (μείωση του πάχους του δοκιμίου με θετικές τιμές στο ϵ_r) οι πιέσεις p_o και p_i μειώνονταν έτσι ώστε να επιβληθούν συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης με $\epsilon_r=0$.

Το εδαφικό υλικό που χρησιμοποιήθηκε στα πλαίσια της μελέτης των Yoshimine et al. (2009) ήταν η άμμος Kartal, με προέλευση από μια παραθαλάσσια περιοχή της Κωνσταντινούπολης στην Τουρκία. Τα εδαφικό δείγμα που επιλέχθηκε για τις δοκιμές είχε μέση διάμετρο κόκκων $D_{50}=0.25\text{mm}$, ελάχιστο δείκτη πόρων $e_{\min}=0.685$ και μέγιστο δείκτη πόρων $e_{\max}=0.971$. Οι διαστάσεις του εδαφικού δοκιμίου ήταν: $H=19.5\text{cm}$, $D_o=10\text{cm}$ και $D_i=6\text{cm}$. Η σχετική πυκνότητα των ήταν $D_r=33\% \sim 36\%$, Πίνακας 4.2. Στο Σχήμα 4.31 παρουσιάζεται η κοκκομετρική καμπύλη του εδαφικού δείγματος.

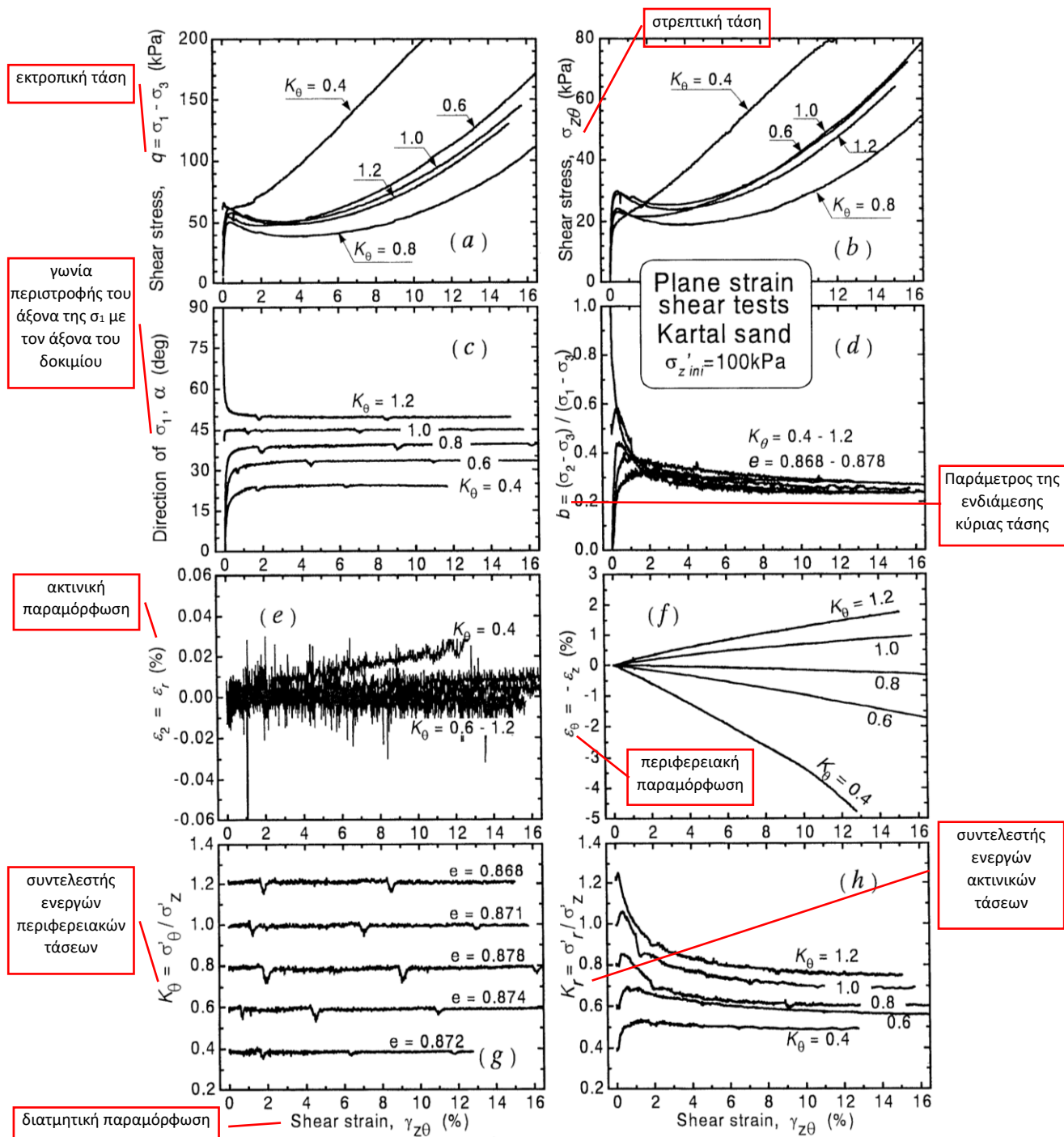
Πίνακας 4.2: Αρχικές συνθήκες των δοκιμών επίπεδης παραμόρφωσης

Test no.	Void ratio after consolidation e	Relative density D_r (%)	Initial consolidation stress ratio $K_c = \sigma'_h / \sigma'_z$
11	0.872	35	0.4
5	0.874	34	0.6
6	0.878	33	0.8
10	0.871	35	1.0
7	0.868	36	1.2



Σχήμα 4.31: Κοκκομετρική καμπύλη της άμμου Kartal (Yoshimine et al., 2009).

Το δοκίμιο αρχικά υποβλήθηκε στη διαδικασία κορεσμού με τη μέθοδο της ενδοπίεσης υπό ισότροπη ενεργή τάση $p' = 20 \text{ kPa}$, μέχρι έως ότου μετρήθηκε τιμή για την παράμετρο Skempton $B > 0.98$. Κατά τη διαδικασία αυτή, ο λόγος των ενεργών τάσεων $K_c = \sigma'_h / \sigma'_z$ ήταν ίσος με τη μονάδα ($K_c = 1.0$) καθώς ίσχυε $\sigma'_h = \sigma'_\theta = \sigma'_r$. Μετά τον κορεσμό η τιμή του K_c μεταβλήθηκε στην τιμή του Πίνακα 4.2 για κάθε δοκιμή (από 0.4 έως 1.2 σε συνολικά πέντε δοκιμές). Στη συνέχεια, υπό σταθερή τιμή του K_c αυξήθηκε η κατακόρυφη τάση έως $\sigma'_z = 100 \text{ kPa}$ σε όλες τις δοκιμές για το στάδιο της στερεοποίησης. Στο στάδιο αυτό η αρχική τιμή της στρεπτικής τάσης, $\sigma_{z\theta}$, ήταν μηδενική. Μετά από διάστημα μιας ώρας, στο οποίο είχε ολοκληρωθεί η στερεοποίηση του δοκιμίου, ακολούθησε το στάδιο της διάτμησης υπό αστράγγιστες συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης, διατηρώντας σταθερό το λόγο των ενεργών περιφερειακών τάσεων ($K_\theta = \sigma'_\theta / \sigma'_z$). Τα αποτελέσματα των δοκιμών παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.32.



Σχήμα 4.32: Αποτελέσματα δοκιμών στρεπτικής διάτμησης υπό αστράγγιστες συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης στην άμμο Kartal (Yoshimine et al., 2009).

Όπως παρατηρείται στο Σχήμα 4.32(e) η κατάσταση της επίπεδης παραμόρφωσης επιβεβαιώνεται από τις μετρήσεις της παραμόρφωσης ε_2 που είναι της τάξης του $\pm 0,01\%$, παρά το γεγονός ότι η διάσταση του δείγματος στην διάσταση του ε_2 είναι μόνο 2cm (πάχος δοκιμίου). Στον υπολογισμό των παραμορφώσεων, δεν έγινε διόρθωση λόγω της διεύθυνσης της μεμβράνης στους εδαφικούς πόρους, καθώς οι Yoshimine et al. (1998) έδειξαν πως το σφάλμα σε αυτήν την περίπτωση είναι μικρότερο του 0.03%. Στο Σχήμα 4.32(g) παρουσιάζεται η διακύμανση του $K_\theta = \sigma'_\theta / \sigma'_z$ κατά τη διάρκεια της διάτμησης. Η σταθερότητα των τιμών του K_θ επιβεβαιώνεται στο σχήμα αυτό, καθώς οι μικρές πτώσεις που

παρατηρούνται οφείλονται στην αδυναμία του συστήματος να διατηρήσει σταθερή την κατακόρυφη τάση λόγω τριβών στον άξονα επιβολής της.

Στα Σχήματα 4.32(c) και 4.32(d) παρουσιάζεται η μεταβολή της γωνίας α (μεταξύ του άξονα της μέγιστης κύριας τάσης και του κατακόρυφου) και της παραμέτρου b με τη διατμητική παραμόρφωση αντίστοιχα. Για τον υπολογισμό τους χρησιμοποιήθηκαν οι ακόλουθες εξισώσεις:

$$\alpha = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{2\sigma_{z\theta}}{\sigma_{\theta} - \sigma_z} \right) \quad (4.24)$$

$$b = \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} = \frac{1}{2} \left(\frac{\sigma_r - (\sigma_z + \sigma_{\theta})/2}{\sqrt{(\sigma_z - \sigma_{\theta})^2/4 + \sigma_{z\theta}^2}} + 1 \right). \quad (4.25)$$

Η διεύθυνση της τάσης σ_1 και το μέγεθος της σ_2 .

Η επίδραση της διεύθυνσης των αξόνων των κύριων τάσεων και το μέγεθος της ενδιάμεσης κύριας τάσης στην αστράγγιστη μηχανική συμπεριφορά άμμων έχει αναδειχθεί σε προηγούμενες μελέτες από τους Yamada & Ishihara (1981), Symes et al. (1985), Uthayakumar (1996) και Yoshimine et al. (1998). Στη μελέτη των Yoshimine et al. (2009) η επίδραση αυτή μελετάται στις συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης. Η μεταβολή της γωνίας α κατά την επιβαλλόμενη διάτμηση, όπως προκύπτει από το Σχήμα 4.32(c), περιορίζεται σε παραμορφώσεις μικρότερες από $\gamma_{z\theta}=2\%$, και εξαρτάται από την τιμή του λόγου K_{θ} (μεγαλύτερες τιμές της α παρατηρούνται για μεγαλύτερες τιμές του K_{θ}). Η αρχική τιμή της α εξαρτάται από τη αρχική διεύθυνση της σ_1 (δηλαδή πριν τη διάτμηση). Δηλαδή, όταν στην αρχική κατάσταση, η σ_1 ήταν κατακόρυφη τότε η $\alpha=0^\circ$ και ισχύει πως $K_c (=K_{\theta}) < 1.0$, ενώ όταν η σ_1 είναι οριζόντια τότε η $\alpha=90^\circ$ και ισχύει πως $K_c > 1.0$. Και τις δύο περιπτώσεις η διεύθυνση των κύριων τάσεων περιστράφηκε πολύ γρήγορα όταν εφαρμόστηκε στρεπτική διάτμηση και η γωνία α σταθεροποιήθηκε σε $\gamma_{z\theta} \geq 2\%$. Στην αρχική κατάσταση η τιμή της παραμέτρου b ήταν ίση με 0 όταν $K_c < 1.0$ και ίση με 1.0 όταν $K_c > 1.0$, Σχήμα 4.32(d). Η διάτμηση επέφερε ταχεία μεταβολή της τιμής του b (αύξηση ή μείωση) μέχρι την τελική τιμή που ήταν ίση με 0.25 και ήταν ανεξάρτητη της τιμής του K_{θ} .

Οριζόντια, ϵ_{θ} , και κατακόρυφη, ϵ_z , ορθή παραμόρφωση

Στις συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης, η παραμόρφωση $\epsilon_2 = \epsilon_r$ ήταν μηδενική, όπως επιβεβαιώνεται στο Σχήμα 4.32(e), ενώ οι παραμορφώσεις ϵ_{θ} και ϵ_z μεταβάλλονται ανεξάρτητα της τιμής του K_{θ} . Στη μελέτη των Yoshimine et al. (1998) λόγω των αστράγγιστων συνθηκών ($\Delta V=0$, $\epsilon_v = \epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3 = 0$) ισχύει πως $\epsilon_{\theta} = -\epsilon_z$, και όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.32(f) η μεταβολή της κατακόρυφης παραμόρφωσης είναι ανάλογη της διατμητικής παραμόρφωσης και εξαρτάται από την τιμή του K_{θ} . Για μικρές τιμές του K_{θ} τα δοκίμια διογκώνονται στην οριζόντια διεύθυνση (θ διεύθυνση) και συμπιέζονται στην κατακόρυφη διεύθυνση (z διεύθυνση). Το αντίθετο παρατηρείται για μεγάλες τιμές του K_{θ} . Για τιμή του K_{θ} ίση με 0.8 ή ελαφρώς μεγαλύτερη οι κατακόρυφες παραμορφώσεις είναι μηδενικές, κάτι που συμβαίνει στην περίπτωση της απλής διάτμησης.

Οριζόντια τάση στο επίπεδο της επίπεδης παραμόρφωσης, σ_r

Ο λόγος των ορθών ενεργών τάσεων στο επίπεδο της επίπεδης παραμόρφωσης ορίζεται ως $K_r = \sigma'_r / \sigma'_z$, και απεικονίζεται στο Σχήμα 4.32(h). Παρότι το K_r μεταβάλλεται κατά το πρώτο στάδιο της διάτμησης (δηλαδή σε μικρές παραμορφώσεις), στη συνέχεια έγινε σχεδόν σταθερό σε μεγάλες παραμορφώσεις. Σε κάθε επίπεδο διατμητικής παραμόρφωσης το K_r αυξάνεται με την αύξηση της τιμής του K_θ .

Σύγκριση αποτελεσμάτων με απλές δοκιμές απλής διάτμησης.

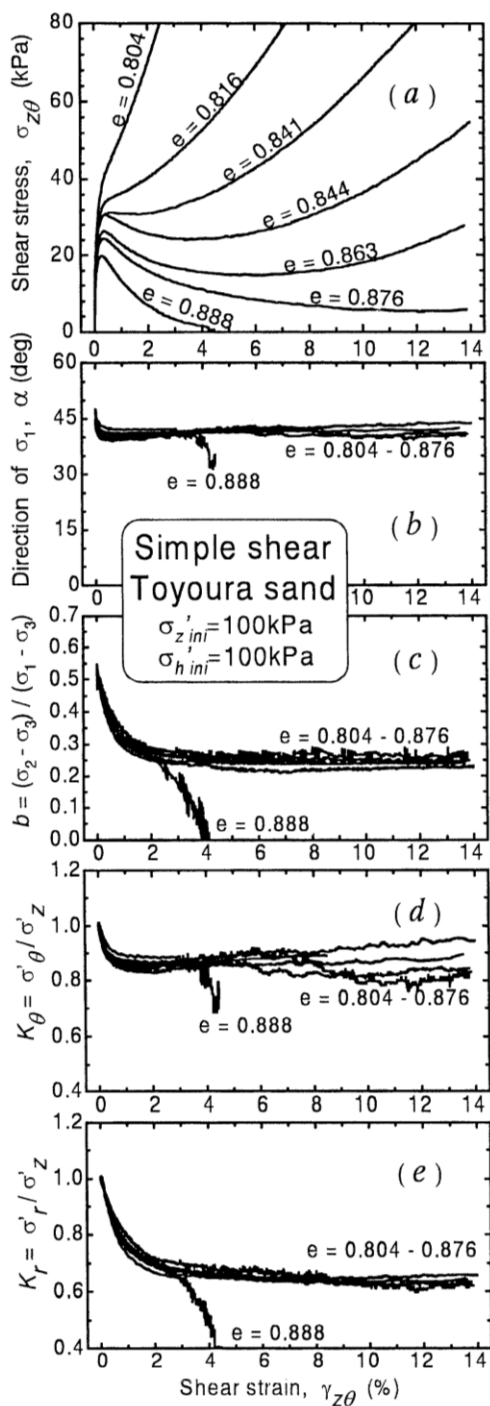
Ο Yoshimine et al. (1998) πραγματοποίησαν μια σειρά δοκιμών απλής διάτμησης χρησιμοποιώντας τον ίδιο τύπο συσκευής στρεπτικής διάτμησης στο Πανεπιστήμιο του Τόκυο στην Ιαπωνία. Μελέτησαν την άμμο Τογουρα, η οποία έχει τα εξής φυσικά χαρακτηριστικά: $D_{50}=0.17$ mm, $e_{min}=0.597$ και $e_{max}=0.977$. Τα αποτελέσματα αυτών των δοκιμών παρουσιάζονται στα Σχήματα 4.33 και 4.34, για αρχικές συνθήκες (πριν τη διάτμηση) ισότροπης στερεοποίησης και για $K_c = \sigma'_h / \sigma'_z = 0,5$ αντίστοιχα. Παρατηρείται πως και στις δύο περιπτώσεις, οι ακόλουθες παράμετροι τάσης ήταν ικανοποιητικά σταθερές σε μεγάλες παραμορφώσεις (πέρα από την κατάσταση μετασηματισμού): η α είναι μεταξύ 40° - 50° , το b σταθεροποιήθηκε περίπου στο 0.25, το K_θ είναι κυμαίνεται μεταξύ 0.8-0.9 και το K_r είναι 0.6. Αυτές οι τιμές είναι σε συμφωνία με τα αποτελέσματα των δοκιμών στρεπτικής διάτμησης που παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.33, και συγκεκριμένα με την τιμή $K_\theta = 0.8$ που αντιστοιχεί σε τιμές του $\varepsilon_\theta = -\varepsilon_z$ πολύ κοντά στο μηδέν (Σχήμα 3.32,f) και $\alpha=40^\circ$, $b=0.25$ και $K_r=0.6$ (Σχήμα 4.32 (c), (d), (h) αντίστοιχα).

Ακόμα, πρέπει να σημειωθεί ότι οι παράμετροι α , b , K_θ και K_r , δεν είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους αλλά συνδέονται με την ακόλουθη σχέση, η οποία προκύπτει από της Εξισώσεις (4.24) και (4.25):

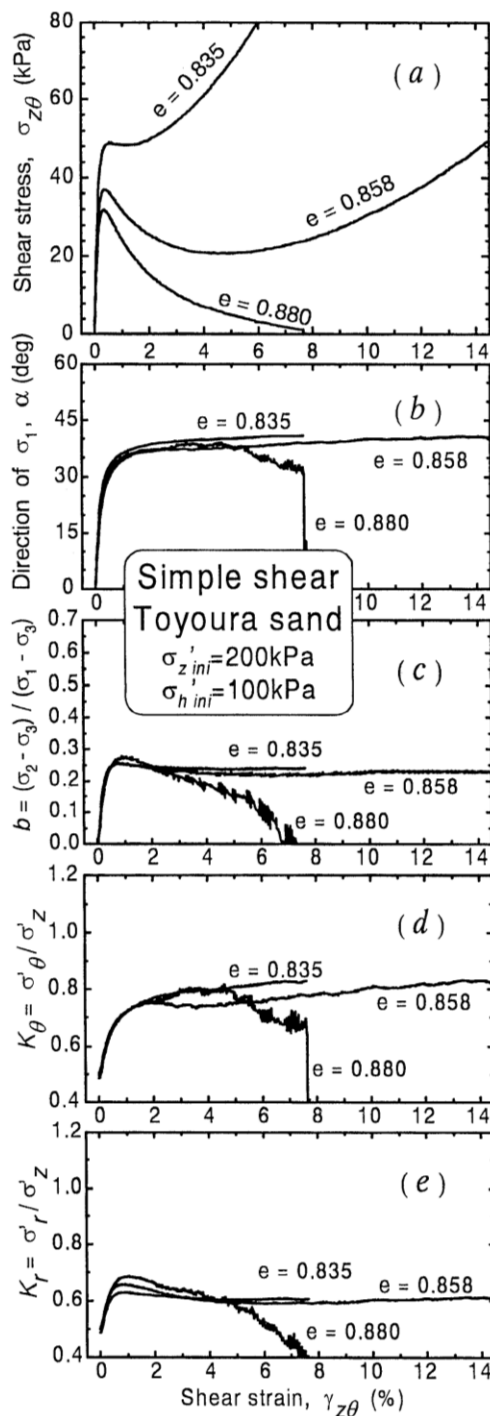
$$(1 - K_\theta)(1 - 2b) = (1 + K_\theta - 2K_r) \cos 2\alpha \quad (4.26)$$

Τα κυριότερα συμπεράσματα της μελέτης των Yoshimine et al. (2009) είναι τα εξής: (α) Η συνθήκη της επίπεδης παραμόρφωσης στο ακτινικό επίπεδο επιτεύχθηκε με καλή ακρίβεια. (β) Για το εύρος του K_θ που μελετήθηκε (μεταξύ 0.4-1.2) παρατηρήθηκε πως οι παράμετροι τάσης α , b και K_r τείνουν να αποκτήσουν σταθερή τιμή σε μεγάλες παραμορφώσεις. (γ) Σε δεδομένη διατμητική παραμόρφωση, οι μεγάλες τιμές του K_θ οδηγούν σε μεγαλύτερες τιμές του α και του K_r , ενώ το b τείνει στο 0.25 ανεξάρτητα από την τιμή του K_θ . (δ) Σε εδαφικά πρανή και επιχώματα το είδος της εντατικής κατάστασης διαφέρει στα σημεία της ζώνης ολίσθησης, Σχήμα 4.35. Έτσι, στον πόδα του πρανούς το έδαφος υποβάλλεται σε πλευρική συμπίεση με μεγάλες τιμές K_θ και θετικές τιμές ε_θ . Αντιθέτως στην κορυφή του πρανούς το έδαφος υποβάλλεται σε πλευρική διόγκωση με μικρές τιμές K_θ και αρνητικές τιμές ε_θ . Η θεώρηση αυτών των συνθηκών είναι σημαντική και στη μελέτη της σεισμικής συμπεριφοράς ρευστοποιήσιμων άμμων, που χρησιμοποιούνται ως υλικά επίχωσης πίσω από τοίχους αντιστήριξης και κρηπιδότοιχους. Παρότι στη μελέτη αυτή η τιμή του K_θ διατηρήθηκε σταθερή κατά τη διάρκεια της διάτμησης, στις πραγματικές καταστάσεις εξαρτάται από τις οριακές συνθήκες των κατασκευών και το έδαφος. (ε) για τιμή του $K_\theta = 0.8$ οι συνθήκες παραμόρφωσης προσεγγίζουν

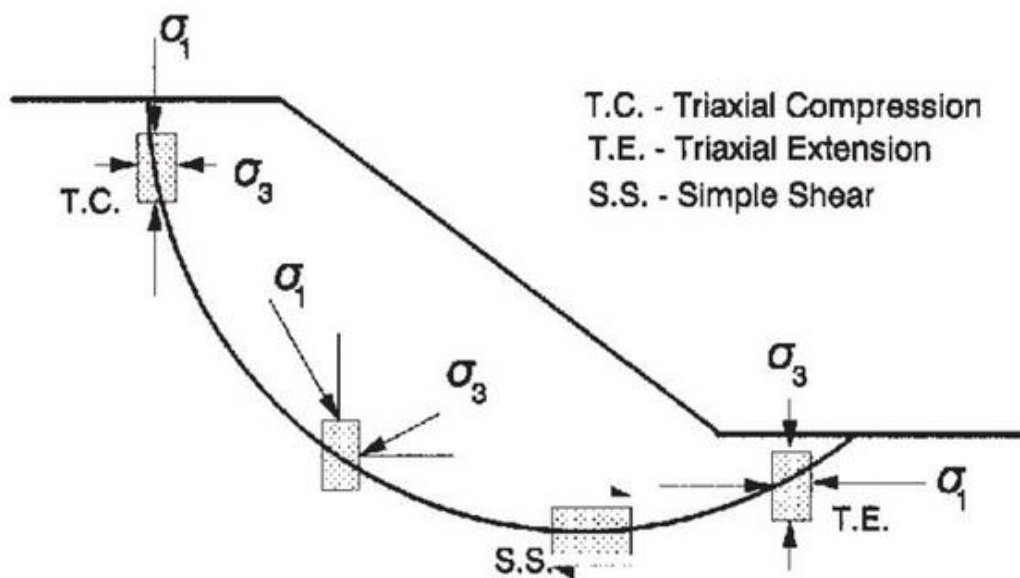
αυτές της απλής διάτμησης με τιμές τάσεων σταθερές σε μεγάλες παραμορφώσεις και ίσες με $\alpha=40^\circ$, $b=0.25$ και $K_r=0.6$.



Σχήμα 4.33 (αριστερά): Αποτελέσματα δοκιμής απλής διάτμησης υπό αστράγγιστες συνθήκες στην άμμο Toyoura ($K_c = \sigma'_h / \sigma'_z = 1.0$ στην αρχική κατάσταση) (Yoshimine et al., 2009).



Σχήμα 4.34 (δεξιά): Αποτελέσματα δοκιμής απλής διάτμησης υπό αστράγγιστες συνθήκες στην άμμο Toyoura ($K_c = \sigma'_h / \sigma'_z = 0.5$ στην αρχική κατάσταση) (Yoshimine et al., 2009).



Σχήμα 4.35: Καταστάσεις φόρτισης του εδάφους σε διάφορα σημεία της επιφάνειας ολίσθησης.

4.4 Επίδραση των αρχικών παραμέτρων τάσεων, α_0 , η_0 , ρ_0 και b_0 , στην οριακή ογκομετρική διατμητική παραμόρφωση, γ_t

Η οριακή ογκομετρική διατμητική παραμόρφωση, γ_t , συνδέεται με την κατάσταση του εδάφους, στην οποία ξεκινά η μεταβολή της πίεσης ύδατος πόρων λόγω της φόρτισής του υπό αστράγγιστες συνθήκες. Εξαιτίας αυτής τη μεταβολής πίεσης του ύδατος παρατηρείται περεταίρω μείωση της εδαφικής δυσκαμψίας. Όταν το εύρος της κυκλικής διατμητικής παραμόρφωσης, γ_c , είναι μεγαλύτερο από την γ_t , τότε η πίεση του νερού των πόρων μεταβάλλεται γρήγορα και αυξάνεται με την αύξηση του αριθμού των κύκλων φόρτισης, N . Για παραμορφώσεις μικρότερες της γ_t η μεταβολή της πίεσης πόρων είναι αμελητέα ακόμη και σε μεγάλο αριθμό κύκλων N . Στη δημοσιευμένη έρευνα είχε παρουσιαστεί η επίδραση της πυκνότητας, των συνθηκών στράγγισης, του ποσοστού αργλικού κλάσματος και του δείκτη πλαστικότητας στη γ_t σε ισότροπη στερεοποίηση πριν την επιβολή της κυκλικής φόρτισης. Ενδεικτικές τιμές των γ_t που παρουσιάστηκαν στη βιβλιογραφία για ισότροπα στερεοποιημένες άμμους παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.3. Ωστόσο, συνήθως το έδαφος βρίσκεται σε μια σύνθετη εντατική κατάσταση πριν την επιβολή της κυκλικής φόρτισης λόγω σεισμού, φορτίων κυματισμού ή κυκλοφορίας κ.ά. Αυτήν τη σύνθετη εντατική κατάσταση μέσω των δοκιμών στρεπτικής κυκλικής διάτμησης κούλου κυλινδρικού δοκιμίου της εταιρίας GDS μελέτησαν οι Guoxing & Hua (2009), ανταποκρινόμενοι σε αυτό το ερευνητικό κενό, Σχήμα 4.36. Η χρήση της συγκεκριμένης συσκευής

προσφέρει το πλεονέκτημα της προσομοίωσης της σύνθετης εντατικής κατάστασης σε αντίθεση με τις συμβατικές εργαστηριακές μεθόδους, Σχήμα 4.37. Συγκεκριμένα, οι Guoxing & Hua (2009) ασχολήθηκαν με την επίδραση της γωνίας μεταξύ της διεύθυνσης της αρχικής κύριας τάσης με την κατακόρυφο, α_0 , του αρχικού λόγου της εκτροπικής τάσης, η_0 , της αρχικής μέσης ενεργής τάσης, p_0 , και της παραμέτρου της αρχικής ενδιάμεσης κύριας τάσης, b_0 , στην γ_t της άμμου Nanjing. Οι παράμετροι ορίζονται ως εξής :

$$\alpha = \frac{1}{2} \arctan \frac{2\tau_{z\theta}}{\sigma_z - \sigma_\theta} \quad (4.27)$$

$$\eta = \frac{q}{p} \quad (4.28)$$

Πίνακας 4.3: Τιμές της γ_t για ισότροπα στερεοποιημένες άμμους από τη βιβλιογραφία (Guoxing & Hua, 2009).

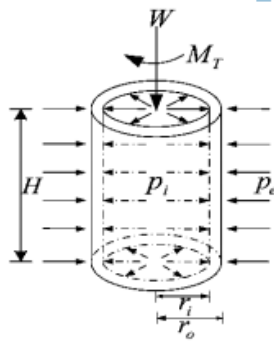
References	Cyclic threshold shear strain (%)
Drnevich, et al. (1967)	0.01
Silver, et al. (1971)	0.02 ~ 0.04
Youd (1972)	0.01
Stoll, et al. (1977)	0.005 ~ 0.006
Dobry, et al. (1982)	0.01
Chung, et al. (1984)	0.0015 ~ 0.01
Ray (1984)	0.01
Kim (1991)	0.0035 ~ 0.02
Vucetic (1994)	0.007 ~ 0.03
Ishihara (1996)	0.006 ~ 0.045
Hsu (2002)	0.004 ~ 0.03
Tabata (2004)	0.0025 ~ 0.035
Dong-Soo Kim, et al. (2006)	0.003 ~ 0.035
Total	0.0015 ~ 0.045

Όπου q είναι η τάση διάτμησης και είναι ίση με :

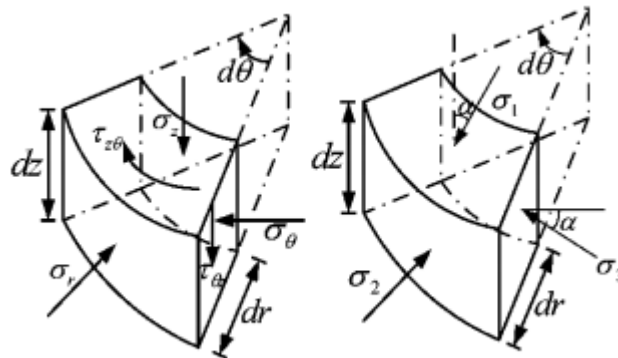
$$q = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2} \quad (4.29)$$

$$p = \frac{\sigma'_1 + \sigma'_2 + \sigma'_3}{3} \quad (4.30)$$

$$b = \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} \quad (4.31)$$

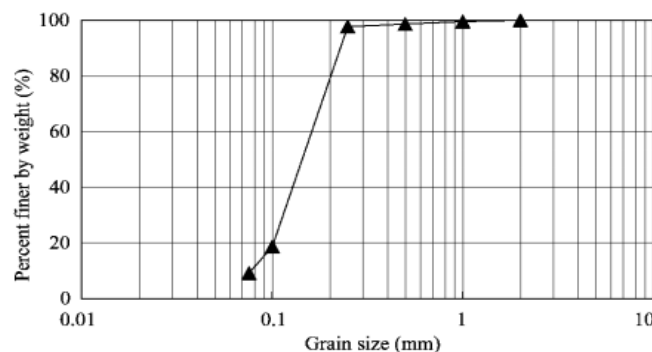


Σχήμα 4.36: Εξωτερικά φορτία που ασκούνται στο κούλο κυλινδρικό δοκίμιο στη συσκευή στρεπτικής διάτμησης (Guoxing & Hua, 2009).



Σχήμα 4.37: Εντατική κατάσταση στο εδαφικό δοκίμιο (Guoxing & Hua, 2009).

Το εδαφικό υλικό που μελετήθηκε ήταν η λεπτόκοκκη άμμος Nanjing με τα εξής φυσικά χαρακτηριστικά: ειδικό βάρος στερεών κόκκων $G_s = 2.70$, μέγιστος δείκτης πόρων $e_{max} = 1.14$ και ελάχιστος δείκτης πόρων $e_{min} = 0.62$. Η σχετική πυκνότητα στην οποία προετοιμάστηκαν τα δοκίμια της άμμου ήταν $D_r = 0.5$. Οι αρχικές διαστάσεις του δοκιμίου ήταν 100mm και 60mm για την εξωτερική και εσωτερική διάμετρο αντίστοιχα και 200mm το ύψος. Στο Σχήμα 4.38 παρουσιάζει η κοκκομετρική καμπύλη του εδαφικού δείγματος.



Σχήμα 4.38: Καμπύλη κατανομής μεγέθους κόκκων της άμμου Nanjing (Guoxing & Hua, 2010).

Για την προετοιμασία των εδαφικών δοκιμίου εφαρμόστηκε η μέθοδος της ξηρής εναπόθεσης στο μεταλλικό καλούπι. Ο κορεσμός του δοκιμίου επιτεύχθηκε με τη μέθοδο του διοξειδίου του άνθρακα (CO₂), στη συνέχεια της πλήρωσης των κενών με απιονισμένο νερό (συνεχής διέλευση νερού για περίπου μισή ώρα) και τελικά τη σταδιακή εφαρμογή της ενδοπίεσης έως την τελική τιμή της πίεσης του νερού των πόρων στα 300kPa. Ο κορεσμός θεωρήθηκε πλήρης όταν μετρήθηκε η παράμετρος του Skempton $B \geq 0.98$. Ακολούθησε η διαδικασία της κυκλικής τριαξονικής φόρτισης σύμφωνα με τον Πίνακα 4.4. Στον Πίνακα 4.5 παρουσιάζονται τα εντατικά μεγέθη σε κάθε δοκιμή.

Πίνακας 4.4: Αρχικές συνθήκες δοκιμών (Guoxing & Hua, 2009).

Initial average effective principal stress P_0 /KPa	Initial intermediate principal stress parameter b_0	Initial ratio of deviatoric stress η_0	Initial principal stress direction $\alpha_0 /^\circ$		
100	0.5	0.35	0(1)	45(2)	90(3)
		0.87	0(4)	45(5)	90(6)
	1	0(7)	45(8)	90(9)	
200	0.5	0.35	0(10)	45(11)	90(12)

(The values in brackets are test numbers)

Πίνακας 4.5: Εντατικά μεγέθη δοκιμών (Guoxing & Hua, 2009).

Test number	Inner cell pressure P_i /KPa	External cell pressure P_e /KPa	Axial load W_0 /kN	Torque M_0 /N•m
Test 1	106.74	95.96	0.1524	0
Test 2	100	100	0	4.1471
Test 3	93.265	104.41	-0.1523	0
Test 4	116.74	89.95	0.3787	0
Test 5	100	100	0	10.3097
Test 6	83.26	110.05	-0.3787	0
Test 7	123.33	104.67	0.088	0
Test 8	117.5	108.17	-0.044	3.5919
Test 9	111.67	111.67	-0.1759	0
Test 10	213.47	191.92	0.3047	0
Test 11	200	200	0	8.2952
Test 12	186.53	208.08	-0.3047	0

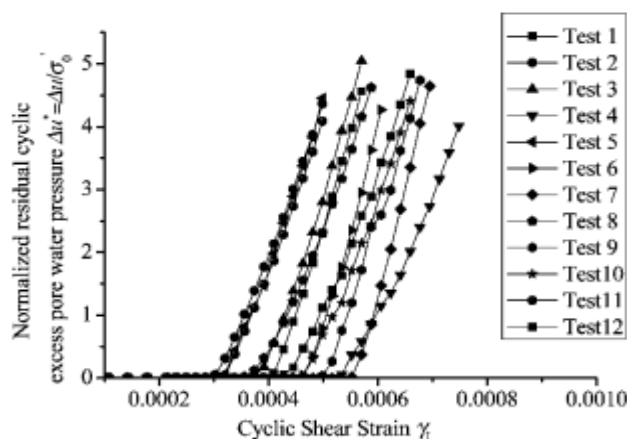
Στον Πίνακα 4.6 παρουσιάζονται οι τιμές της κυκλικής διατμητικής παραμόρφωσης διατμητικής παραμόρφωσης που αντιστοιχούν στις τιμές της κανονικοποιημένης μεταβολής της πίεσης του ύδατος πόρων $\Delta u / \Delta \sigma'$ ίση με 0.2 και 0.5 καθώς και την παραμόρφωση στην οποία ξεκινά η μεταβολή της πίεσης πόρων. Από αυτές τις τιμές επιλέχθηκε βάσει της βιβλιογραφίας (Ni, 1987, Kim, 1991, Dong-Soo Kim, 2006)

ως οριακή ογκομετρική διατμητική παραμόρφωση, γ_t, αυτή η παραμόρφωση που αντιστοιχεί στην Δu/Δσ' = 0.2.

Πίνακας 4.6: Διατμητική παραμόρφωση σε διάφορες πιέσεις πόρων (Guoxing & Hua, 2009).

Test numbers	Shear strain amplitude corresponding to any pore water pressure($\times 10^{-4}$)		
	Pore water pressure begins to increase	$\Delta u^* = \Delta u/\sigma'_0 = 0.2\%$	$\Delta u^* = \Delta u/\sigma'_0 = 0.$
Test 1	4.098	4.475	4.653
Test 2	2.851	3.132	3.294
Test 3	3.563	3.938	4.077
Test 4	5.167	5.456	5.654
Test 5	3.029	3.286	3.394
Test 6	4.454	4.727	4.859
Test 7	5.345	5.620	5.752
Test 8	3.385	3.824	4.067
Test 9	4.811	5.144	5.255
Test 10	4.454	4.782	4.904
Test 11	3.029	3.294	3.439
Test 12	3.920	4.155	4.297

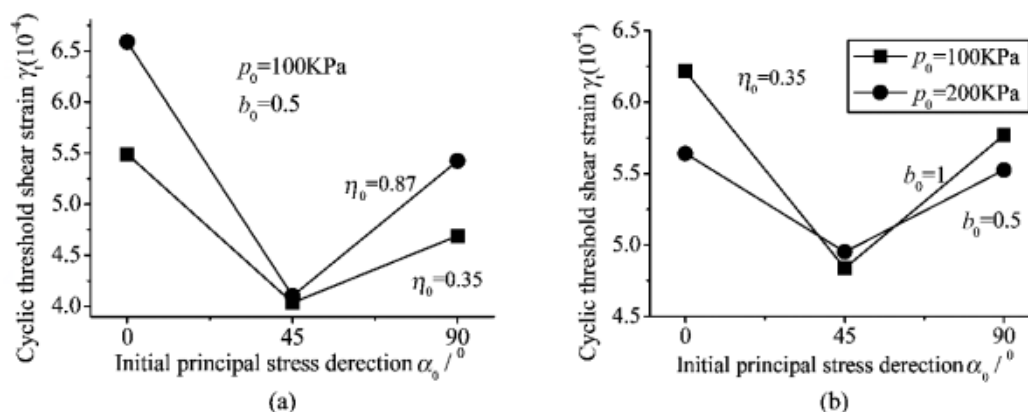
Στο Σχήμα 4.39 παρουσιάζεται η ανάπτυξη της πίεσης του νερού των πόρων για όλες τις δοκιμές. Όλα τα δοκίμια παρουσιάζουν το ίδιο μοντέλο αύξησης της πίεσης του νερού των πόρων και η αύξηση αυτή ξεκινά σε παραμόρφωση που κυμαίνεται μεταξύ του 3×10^{-4} και 6×10^{-4} . Επειδή όλες οι δοκιμές αυτής της μελέτης έχουν πραγματοποιηθεί σε δοκίμια ανισότροπα στερεοποιημένα, η αύξηση της πίεσης του νερού των πόρων αναπτύσσεται ταχύτερα συγκριτικά με αντίστοιχα αποτελέσματα άμμων υπό το καθεστώς της ισότροπης στερεοποίησης.



Σχήμα 4.39: Καμπύλες της κανονικοποιημένης μεταβολής της πίεσης του νερού των πόρων, $\Delta u^* = \Delta u/\sigma'_0$, με την οριακή ογκομετρική διατμητική τάση, γ_t (Guoxing & Hua, 2010).

Επίδραση της παραμέτρου α_0 στη γ_t

Στο Σχήμα 4.40 παρουσιάζεται η μεταβολή της γ_t με την παράμετρο α_0 , και αποδεικνύεται η μεγάλη επίδραση της τελευταίας, όταν οι άλλες τρεις παράμετροι ρ_0 , η_0 και b_0 είναι σταθερές. Η τιμή του γ_t φτάνει στο μέγιστο όταν $\alpha_0=0^\circ$ και στο ελάχιστο όταν $\alpha_0=45^\circ$. Παρατηρείται πως η γ_t μειώνεται όταν το α_0 αυξάνεται από 0° σε 45° , ενώ αυξάνεται όταν το α_0 αυξάνεται από 45° έως 90° . Στις ακραίες τιμές $\alpha_0=0^\circ$ ή $\alpha_0=90^\circ$ η στρεπτική ροπή M_T είναι μηδενική, ενώ είναι διάφορη του μηδενός όταν το α_0 ισούται με άλλες τιμές (δηλαδή οι διευθύνσεις των κύριων τάσεων διαφέρουν από την οριζόντια και την κατακόρυφη). Η ροπή M_T έχει τη μεγαλύτερη τιμή της όταν $\alpha_0=45^\circ$, επειδή η απόκλιση της διεύθυνσης της κύριας τάσης από την κατακόρυφη είναι μεγαλύτερη, Πίνακας 4.4. Η ανάπτυξη της πίεσης του νερού των πόρων των δοκιμίων, των οποίων η ροπή M_T είναι διαφορετική του μηδενός, είναι πιο γρήγορη και η τιμή της γ_t είναι μικρότερη, με την ελάχιστη τιμή της γ_t να παρατηρείται όταν $\alpha_0=45^\circ$. Η κύρια τάση στην κατακόρυφη κατεύθυνση, γίνεται η σ_1 όταν $\alpha_0=0^\circ$, και έτσι το αξονικό φορτίο συμπίεσης (θετικό) επιβάλλεται στο δοκίμιο. Η κύρια τάση στην κατακόρυφη κατεύθυνση γίνεται η σ_3 όταν $\alpha_0=90^\circ$, και έτσι το αξονικό φορτίο εφελκυσμού (αρνητικό) επιβάλλεται στο δοκίμιο. Συνεπώς, η αντοχή του δοκιμίου είναι μεγαλύτερη όταν $\alpha_0=0^\circ$ σε σύγκριση με την περίπτωση του $\alpha_0=90^\circ$, και η ανάπτυξη της πίεσης του νερού των πόρων είναι πιο αργή και η τιμή του γ_t πιο μεγάλη. Η τιμή του γ_t φτάνει στο μέγιστο όταν $\alpha_0=0^\circ$.

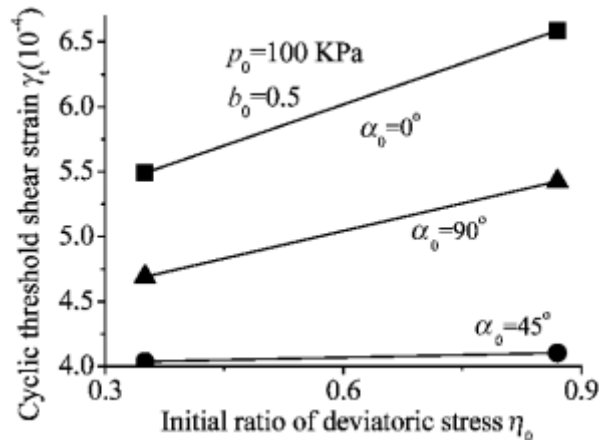


Σχήμα 4.40: Επίδραση της παραμέτρου α_0 στη γ_t (αντιστοιχεί στη $\Delta u^* = 0.2$) (Guoxing & Hua, 2010).

Επίδραση της παραμέτρου η_0 στη γ_t

Στο Σχήμα 4.41 παρουσιάζεται η αύξηση της γ_t με την αύξηση του η_0 , όταν οι άλλες τρεις παράμετροι ρ_0 , α_0 και b_0 είναι σταθερές. Από την Εξίσωση (4.28) παρατηρείται πως η q αυξάνεται όταν το η_0 αυξάνεται ενώ η ρ_0 είναι σταθερή. Αυτό σημαίνει ότι ένα δοκίμιο με μεγαλύτερο η_0 υπόκειται σε μεγαλύτερο q , και έτσι το δοκίμιο γίνεται περισσότερο σταθερό και το γ_t είναι μεγαλύτερο. Το Σχήμα επίσης δείχνει πως η επίδραση της η_0 στο γ_t μειώνεται έως απαλείφεται όταν $\alpha_0=45^\circ$. Το γ_t παίρνει τις ελάχιστες τιμές όταν $\alpha_0=45^\circ$. Συμπερασματικά παρατηρείται πως (α) η επίδραση του

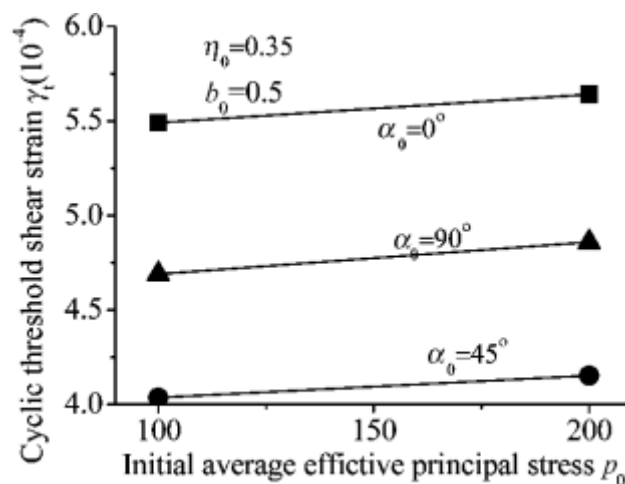
α_0 στο γ_t είναι σημαντική, και (β) η επίδραση του η_0 στο γ_t είναι μεγάλη, εκτός από την περίπτωση που το α_0 είναι περίπου 45° όπου η επίδραση αυτή πρακτικά μηδενίζεται.



Σχήμα 4.41: Επίδραση της παραμέτρου η_0 στη γ_t (αντιστοιχεί στη $\Delta u^* = 0.2$) (Guoxing & Hua, 2010).

Επίδραση της παραμέτρου p_0 στη γ_t

Στο Σχήμα 4.42 παρουσιάζεται η αύξηση του γ_t με την αύξηση της p_0 , όταν οι άλλες τρεις παράμετροι η_0 , α_0 και b_0 είναι σταθερές. Όπως αναμένεται, η αύξηση του p_0 θα οδηγήσει σε μεγαλύτερη επαφή μεταξύ των εδαφικών κόκκων και σε μικρότερο όγκο κενών του δοκιμίου, με συνέπεια την αύξηση της διατμητικής αντοχής του και τη βραδύτερη ανάπτυξη της πίεσης του νερού των πόρων.

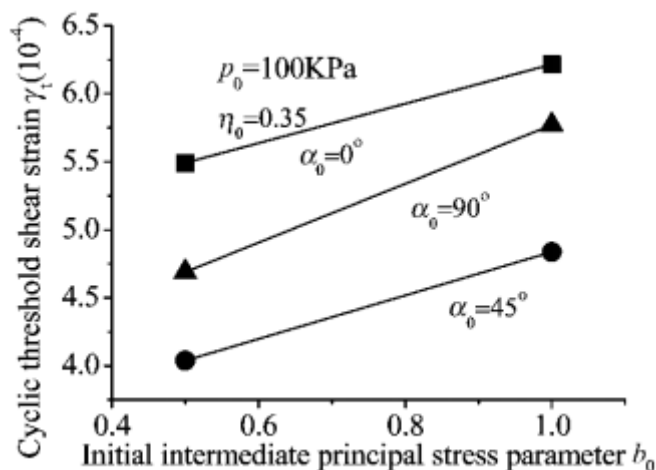


Σχήμα 4.42: Επίδραση της παραμέτρου p_0 στη γ_t (αντιστοιχεί στη $\Delta u^* = 0.2$) (Guoxing & Hua, 2010).

Επίδραση της παραμέτρου b_0 στη γ_t

Το Σχήμα 4.43 παρουσιάζει την αύξηση του γ_t με την αύξηση του b_0 , όταν οι άλλες τρεις παράμετροι η_0 , α_0 και p_0 είναι σταθερές. Σύμφωνα με την Εξίσωση (4.31) η τιμή

του b_0 αυξάνεται όταν η τάση σ_2 προσεγγίζει την τιμή της τάσης σ_1 . Η αύξηση του b_0 οδηγεί σε μεγαλύτερη επαφή μεταξύ των εδαφικών κόκκων, με συνέπεια την αύξηση της διατμητικής αντοχής του και τη βραδύτερη ανάπτυξη της πίεσης του νερού των πόρων.



Σχήμα 4.43: Επίδραση της παραμέτρου b_0 στη γ_t (αντιστοιχεί στη $\Delta u^* = 0.2$) (Guoxing & Hua, 2010).

Από τη μελέτη των Guoxing & Hua (2010) προκύπτει πως η οριακή ογκομετρική διατμητική παραμόρφωση, γ_t , που αντιστοιχεί στην $\Delta u / \Delta \sigma' = 0.2$ επηρεάζεται από τις παραμέτρους α_0 , η_0 , p_0 και b_0 στην περίπτωση μιας λεπτόκοκκης άμμου. Διατηρώντας τρεις από τις τέσσερις παραμέτρους σταθερές, προκύπτουν τα παρακάτω συμπεράσματα: (α) Η παράμετρος α_0 έχει σημαντική επίδραση στο γ_t . Το γ_t μειώνεται όταν το α_0 αυξάνεται από 0° έως 45° , και αυξάνεται όταν το α_0 αυξάνεται από 45° με 90° . Η μικρότερη τιμή του γ_t παρατηρείται όταν το α_0 είναι 45° , (β) Το γ_t αυξάνεται με την αύξηση του p_0 , (γ) Το γ_t αυξάνεται με την αύξηση του b_0 , και (δ) το γ_t αυξάνεται με την αύξηση του η_0 . Ωστόσο η επίδραση του α_0 επηρεάζει σημαντική τη σχέση $\gamma_t - \eta_0$, η οποία εξασθενεί όταν το α_0 είναι περίπου 45° .

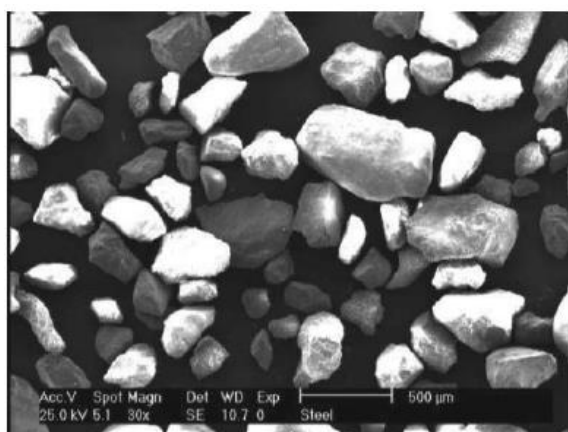
4.5 Επίδραση της ανισοτροπίας λόγω φόρτισης σε συνδυασμό με την εγγενή ανισοτροπία στη δυσκαμψία, απόσβεση, ανάπτυξη της πίεσης ύδατος και των παραμορφώσεων πυκνής άμμου

Οι Casagrande & Carillo (1944) διακρίνουν αυτές δύο μορφές εδαφικής ανισοτροπίας: την εγγενή και την ανισοτροπία λόγω φόρτισης. Οι γεωλογικές συνθήκες κατά την εναπόθεση των εδαφικών κόκκων στη φάση της ιζηματογένεσης των εδαφικών σχηματισμών, μαζί με τα φυσικά χαρακτηριστικά των κόκκων, όπως το μέγεθος, η ανομοιομορφία κλπ, καθορίζουν την αρχική δομή του εδάφους. Σε αυτούς του παράγοντες οφείλεται η εγγενής ανισοτροπία του εδάφους. Η εδαφική δομή και συνεπώς η εδαφική ανισοτροπία μπορεί σε μεταγενέστερο στάδιο να διαταραχθεί εξαιτίας της εφαρμογής κάποιας φόρτισης και την ανάπτυξη πλαστικών

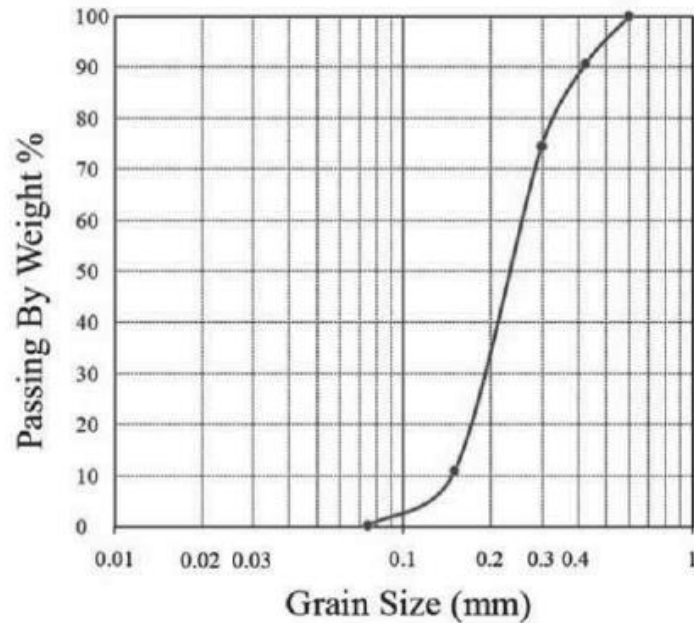
παραμορφώσεων στο έδαφος (ανισοτροπία λόγω φόρτισης). με εφαρμογή φορτίων και, ως εκ τούτου, πλαστικών παραμορφώσεων. Οι Jafarzadeth & Zamanian (2013) μελέτησαν την επίδραση των παραμέτρων α και β στην ανάπτυξη τάσεων, παραμορφώσεων και πίεσης του νερού των πόρων καθώς και στη δυσκαμψία και απόσβεση μιας πυκνής άμμου στη συσκευή στρεπτικής διάτμησης κούλου κυλινδρικού δοκιμίου. Χρησιμοποίησαν τη συσκευή της Wykeham Farrance για την επιβολή κυκλικής φόρτισης υπό αστράγγιστες συνθήκες.

Η επίδραση των παραμέτρων α και β στη μηχανική συμπεριφορά άμμων υπό μονοτονική και κυκλική φόρτιση είχε μελετηθεί νωρίτερα από τους Shibuya et al. (2003). Στη μελέτη τους οι Shibuya et al. (2003) έδειξαν πως αυτές τις διαδρομές τάσεων οδηγούν σε συνεχή ανάπτυξη υψηλών πιέσεων ύδατος υπό το καθεστώς της σταθερής εκτροπικής τάσης $(\sigma_1 - \sigma_3)/2$. Η επίδραση της παραμέτρου β στη μεταβολή της πίεσης του ύδατος πόρων ήταν μικρότερη συγκριτικά με την επίδραση της παραμέτρου α . Επίσης, πολλοί άλλοι ερευνητές έδειξαν πως η αστράγγιστη διατμητική αντοχή των άμμων μειώνεται με την αύξηση της παραμέτρου α . Συνεπώς, η πιο κρίσιμη κατάσταση στο υπέδαφος θεμελίωσης δε βρίσκεται στο κέντρο της θεμελίωσης όπου αναπτύσσεται η μέγιστη κύρια τάση, αλλά σε σημεία μακριά από το κέντρο θεμελίωσης και συνεπώς σε μικρότερη τιμή της κύριας τάσης.

Οι Jafarzadeth & Zamanian (2013) στη μελέτη τους χρησιμοποίησαν την άμμο Babolsar, η οποία προέρχεται από την ακτή της Κασπίας θάλασσας στην περιοχή του Ιράν. Τα φυσικά χαρακτηριστικά της άμμου είναι τα εξής: $D_{50} = 0.22\text{mm}$, $D_{10} = 0.14\text{mm}$, ελάχιστος δείκτης πόρων $e_{\min} = 0.543$ και μέγιστος δείκτης πόρων $e_{\max} = 0.820$. Όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.44, οι κόκκοι της άμμου Balbosar έχουν ημιγωνιώδεις σχήμα. Σύμφωνα με το Σχήμα 4.45 η άμμος χαρακτηρίζεται ως κακώς διαβαθμισμένη SP.



Σχήμα 4.44: Εικόνα των κόκκων της άμμου Balbosar (Jafarzadeth & Zamanian, 2013).



Σχήμα 4.45: Κοκκομετρική καμπύλη της άμμου Balbosar (Jafarzadeth & Zamanian, 2013).

Μετά την παρασκευή των δοκιμίων, ακολούθησε η διαδικασία του κορεσμού αρχικά με τη μέθοδο του CO₂, στη συνέχεια με τη διέλευση απαερωμένου νερού από τους εδαφικούς πόρους και τέλος με την επιβολή ενδοπίεσης (back pressure). Η διαδικασία αυτή θεωρήθηκε ολοκληρωμένη όταν η παράμετρος του Skempton ήταν $B \geq 0.94$. Το μέγεθος της πίεσης της εσωτερικής κυψέλης ήταν ίδιο με αυτό της εξωτερικής κυψέλης. Έπειτα, τα δοκίμια στερεοποιήθηκαν ισότροπα στην ενεργή μέση ορθή τάση (σ'_0) των 150kPa. Ακολούθησε η επιβολή της κυκλικής φόρτισης σε συνθήκες τάσης, με σταθερό λόγο της κυκλικής εκτροπικής τάσης προς την ενεργή μέση ορθή τάση ίσο με 0.27 (q/σ'_0). Για τη διατήρηση των σταθερών τιμών των παραμέτρων α και b κατά τη διάρκεια της φόρτισης μιας δοκιμής, το κατακόρυφο φορτίο και η στρεπτική ροπή σε έναν κύκλο επιβλήθηκαν ταυτόχρονα. Πραγματοποιήθηκαν 5 δοκιμές, Πίνακας 4.7.

Πίνακας 4.7: Παράμετροι δοκιμών (Jafarzadeth & Zamanian, 2013).

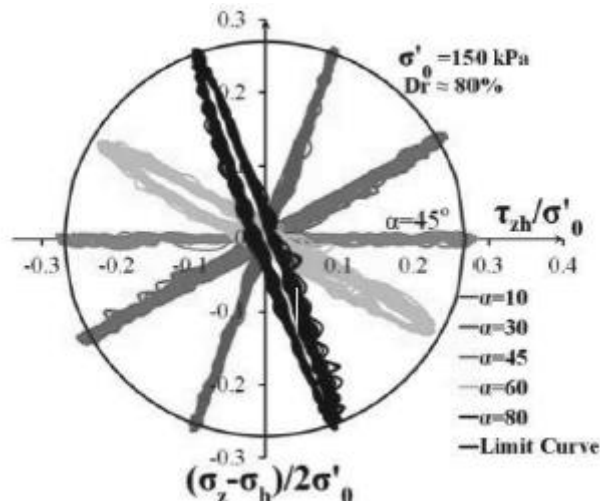
Specimens Id.	$D_r(\%)$	σ'_0 (kPa)	α (degree)	b
15010	83	150	10	0.03
15030	87	150	30	0.25
15045	84	150	45	0.5
15060	83	150	60	0.75
15080	86	150	80	0.97

Καθώς το επιβαλλόμενο μέγεθος της πίεσης της εσωτερικής κυψέλης στο εδαφικό δοκίμιο ήταν ίδιο με αυτό της εξωτερικής κυψέλης, η παράμετρος b συνδέεται με την παράμετρο α μέσω της Εξίσωσης (4.32).

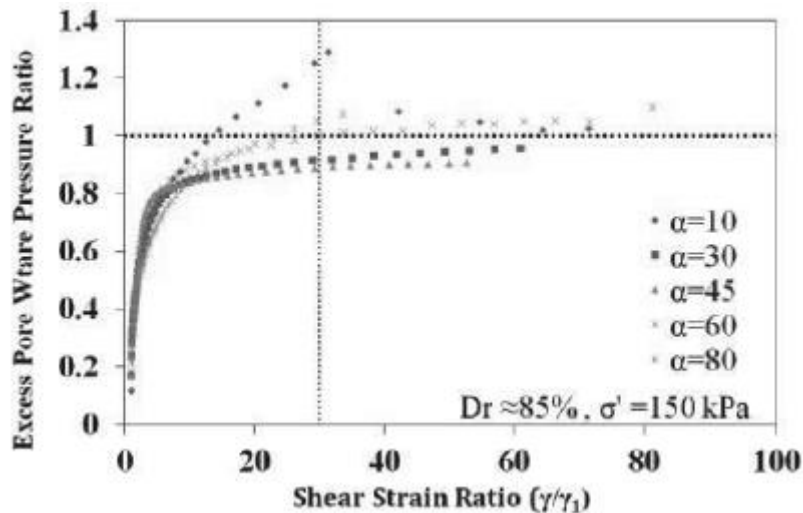
$$b = \sin^2(\alpha) \quad (4.32)$$

Η μέγιστη διατμητική τάση σε ένα εδαφικό στοιχείο του κοίλου κυλινδρικού δοκιμίου είναι το αποτέλεσμα των δύο εξής δύο συνιστωσών: (α) αυτής που οφείλεται στη στρεπτική ροπή τ_{zh} και (β) αυτής που οφείλεται στην εκτροπική τάση $(\sigma'_z - \sigma'_h)/2$. Η μέγιστη τιμή της εκτροπικής τάσης υπολογίζεται από τις κύριες τάσεις ως $(\sigma'_1 - \sigma'_3)/2$. Όπως προαναφέρθηκε, τα στερεοποιήθηκαν στην ίδια μέση ενεργή τάση, σ'_0 , και υποβλήθηκαν σε κυκλική φόρτιση υπό το καθεστώς της ελεγχόμενης τάσης που καθορίζεται από την τιμή της παραμέτρου α (είναι σταθερή κατά τη διάρκεια της δοκιμής) και του λόγου της μέγιστης εκτροπικής τάσης προς τη μέση ενεργό ορθή τάση $(\sigma'_1 - \sigma'_3)/2\sigma'_0$. Οι διαδρομές τάσεων κατά τη διάρκεια των κυκλικών φορτίσεων και στις πέντε δοκιμές παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.46. Το δοκίμιο υποβάλλεται σε τριαξονική συμπίεση και τριαξονικό εφελκυσμό όταν $\alpha=10^\circ$ και 80° αντίστοιχα. Όταν $\alpha=45^\circ$ επιβάλλεται καθεστώς καθαρής διάτμησης.

Το Σχήμα 4.47 παρουσιάζει την παράμετρο πίεσης του νερού των πόρων (r_u) σε διάφορες τιμές της παραμέτρου α . Η αύξηση της παραμέτρου r_u λαμβάνει χώρα σε τρεις διαφορετικές φάσεις. Στην 1^η φάση, η ανάπτυξη της πίεσης του νερού των πόρων έως την τιμή $r_u=0.8$ πραγματοποιήθηκε απότομα χωρίς σημαντική παραμόρφωση. Στην 2^η φάση, η αύξηση της πίεσης του νερού των πόρων συνοδεύεται με τη μείωση της εδαφικής δυσκαμψίας, και αναπτύσσεται σε παραμόρφωση 10 φορές μεγαλύτερη συγκριτικά με την 1^η φάση. Η 3^η φάση αντιστοιχεί στην αστοχία των δοκιμών, κατά την οποία η παράμετρος $r_u \approx 1$.



Σχήμα 4.46: Διαδρομές τάσεων (Jafarzadeth & Zamanian, 2013).



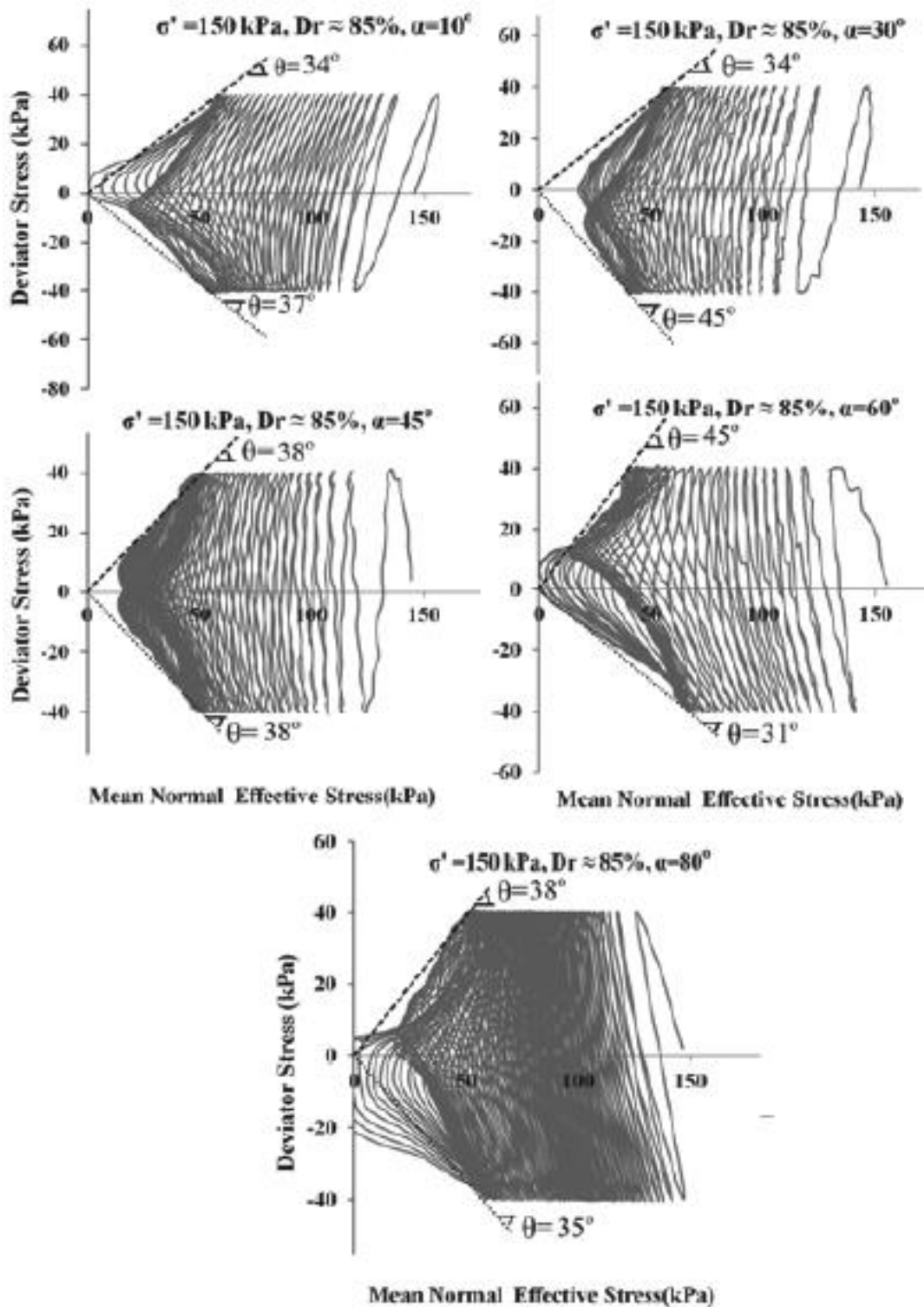
Σχήμα 4.47: Διακύμανση του λόγου πίεσης του νερού των πόρων σε σχέση με την αναλογία διάτμησης (Jafarzadeth και Zamanian, 2013).

Παρατηρείται στο Σχήμα 4.47, πως μόνο στις δοκιμές με $\alpha=10^\circ$ & 80° η τιμή u ξεπερνά την τιμή 1 και φτάνει τη μέγιστη τιμή της στην τιμή του λόγου παραμόρφωσης $\gamma/\gamma_1=30$. Η παραμόρφωση γ_1 αντιστοιχεί στον πρώτο κύκλο φόρτισης. Στην τριαξονική συμπίεση ($\alpha=10^\circ$) και στον τριαξονικό εφελκυσμό ($\alpha=80^\circ$) η παραμόρφωση του δοκιμίου οφείλεται κυρίως στην αξονική και ακτινική παραμόρφωση και ελάχιστα στη διατμητική. Αυτού του είδους η παραμόρφωση προκαλεί ψαθυρή συμπεριφορά δοκιμίου. Στις άλλες τρεις δοκιμές ($\alpha=30, 45, 60^\circ$) οι 2^η και η 3^η φάση δεν μπορούν να διαχωριστούν, η αστοχία συνοδεύεται με την ανάπτυξη διατμητικών παραμορφώσεων και η συμπεριφορά των δοκιμίων δεν είναι ψαθυρή.

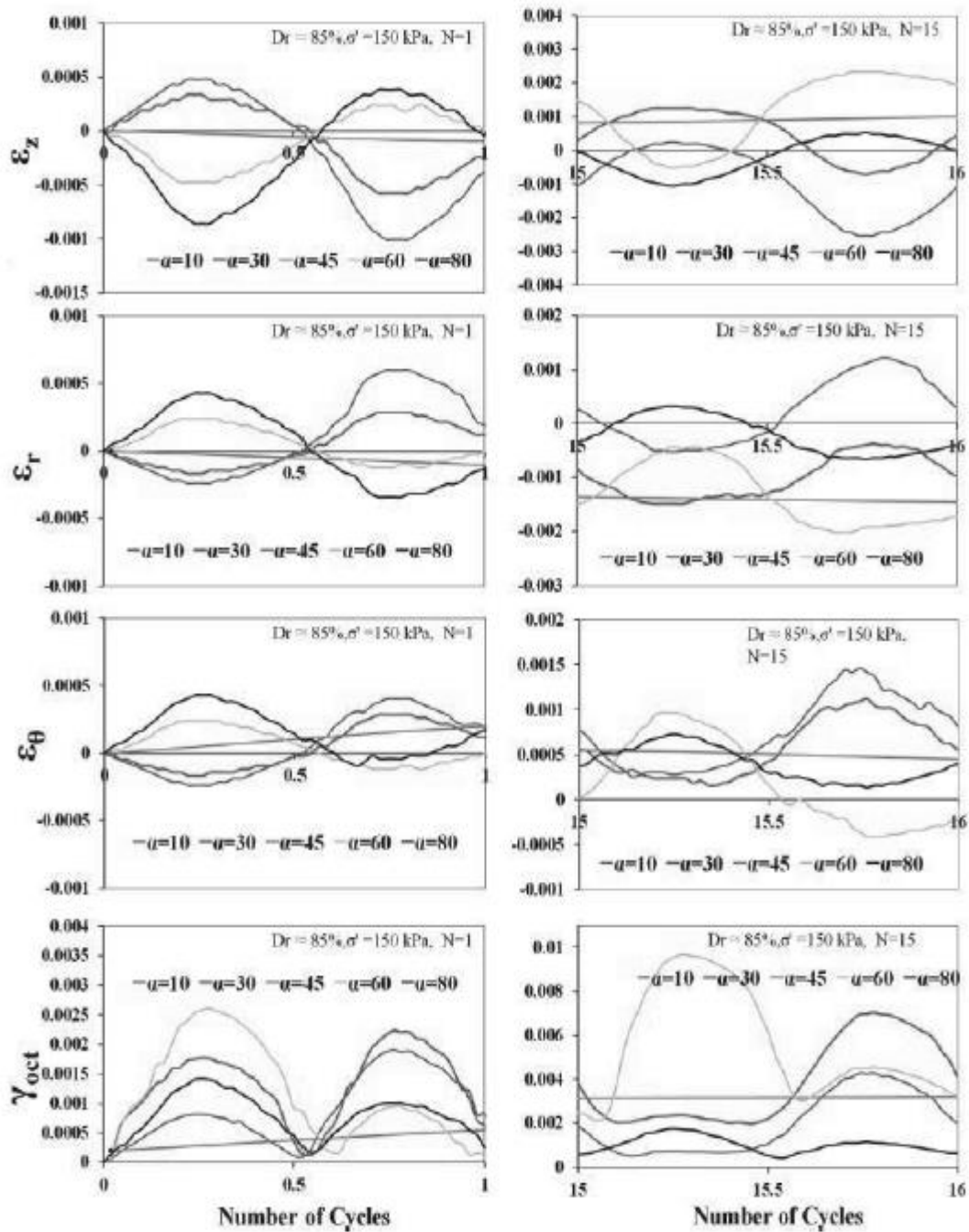
Οι διαδρομές τάσεων στο επίπεδο της εκτροπικής και της μέσης ενεργής τάσης παρουσιάζονται Σχήμα 4.48. Παρατηρείται πως η ανισοτροπία λόγω φόρτισης (όπως περιγράφεται από τις τιμές της α) επηρεάζει σημαντικά την κυκλική απόκριση του εδάφους. Καθώς οι τιμές των παραμέτρων α και b ήταν σταθερές κατά τη διάρκεια των δοκιμών, το καθεστώς της τριαξονικής συμπίεσης, τριαξονικού εφελκυσμού ή καθαρής διάτμησης δε μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια της κυκλικής φόρτισης. Συνεπώς η περιβάλλουσα αστοχίας καθορίζεται από τη μεταβολή της εδαφικής συμπεριφοράς κατά τη φόρτιση και αποφόρτιση στην κυκλική φόρτιση και τη συνεπακόλουθη μεταβολή της εδαφικής δομής με την εμπλοκή και απεμπλοκή των εδαφικών κόκκων.

Η μεταβολή των παραμορφώσεων κατά τη διάρκεια του πρώτου (1) και του δέκατου πέμπτου (15) κύκλου παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.49. Στις δοκιμές τριαξονικής συμπίεσης και εφελκυσμού, η αξονική παραμόρφωση (ϵ_z) είναι η μεγαλύτερη παραμόρφωση των δοκιμίων. Εξαιτίας της πυκνής κατάστασης των δοκιμίων παρατηρείται διασταλτική συμπεριφορά. Για $\alpha=10^\circ$, η διόγκωση λαμβάνει χώρα στην ακτινική διεύθυνση. Η μέγιστη διατμητική παραμόρφωση λαμβάνει χώρα για $\alpha=45^\circ$.

Όταν η παράμετρος α αποκλίνει από την $\alpha=45^\circ$ η τιμή της διατμητικής παραμόρφωσης μειώνεται.

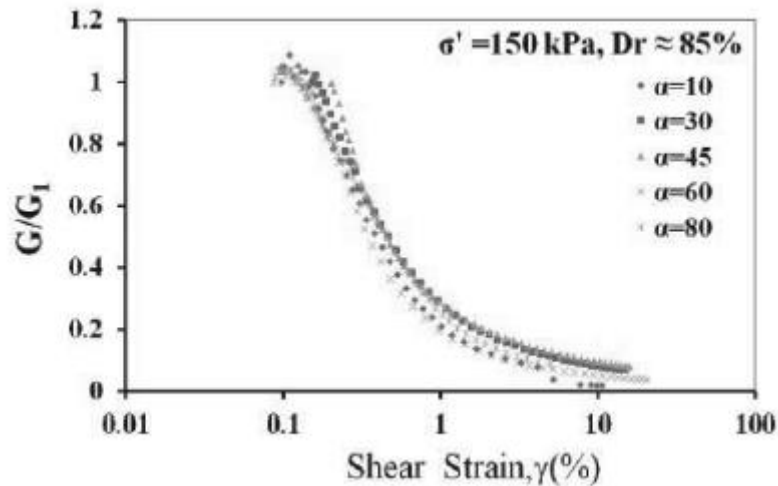


Σχήμα 4.48: Διαδρομές τάσεων (Jafarzadeth & Zamanian, 2013).

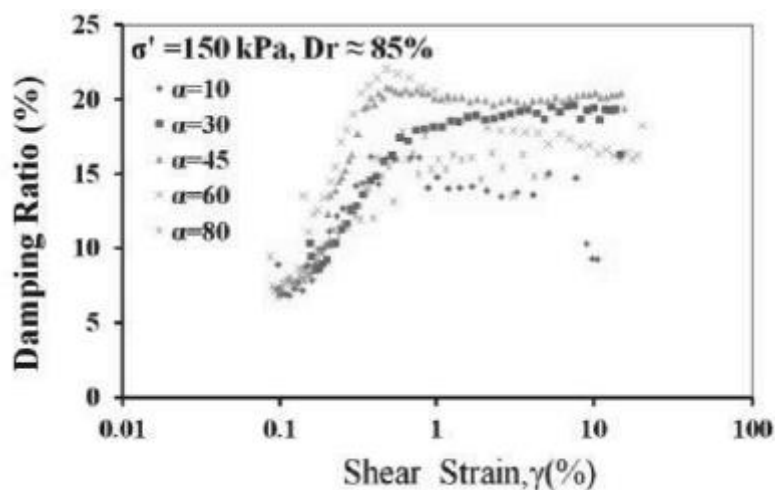


Σχήμα 4.49: Μεταβολή των παραμορφώσεων στον 1^ο και τον 15^ο κύκλο φόρτισης (Jafarzadeth & Zamanian, 2013).

Στα Σχήματα 4.50 και 4.51 παρουσιάζεται η μεταβολή του κανονικοποιημένου μέτρου διάτμησης και του λόγου απόσβεσης με τη διατμητική παραμόρφωση, η οποία ξεκινά από την τιμή $\gamma=0.1\%$ περίπου. Η κανονικοποίηση του μέτρου διάτμησης έγινε με την τιμή του G που αντιστοιχεί στην παραμόρφωση αυτή. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η ανισοτροπία λόγω τάσης δεν είχε σημαντική επίδραση στη μείωση της δυσκαμψίας και στο λόγο απόσβεσης για πυκνά δοκίμια.



Σχήμα 4.50: Μεταβολή του μέτρου διάτμησης με τη διατμητική παραμόρφωση (Jafarzadeth & Zamanian, 2013).



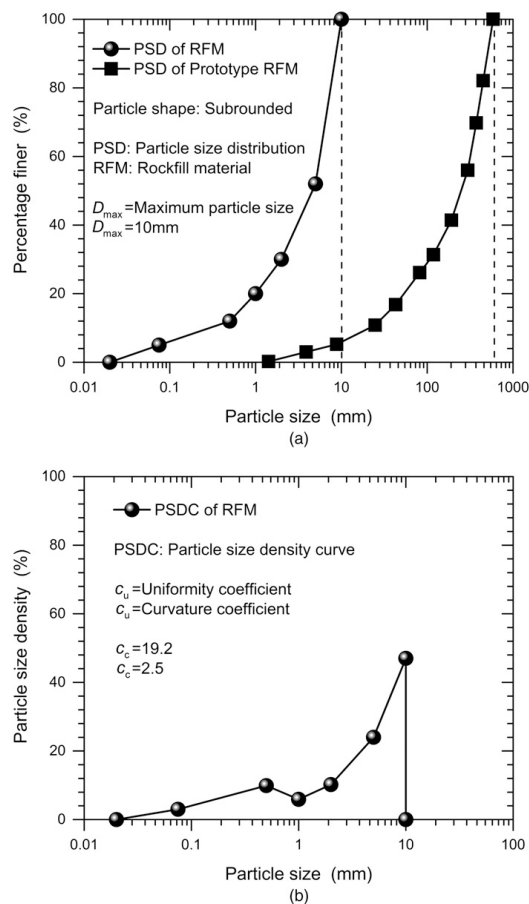
Σχήμα 4.51: Μεταβολή του λόγου απόσβεσης με τη διατμητική παραμόρφωση (Jafarzadeth & Zamanian, 2013).

Τα κυριότερα συμπεράσματα της μελέτης των Jafarzadeth & Zamanian (2013) σε πυκνά δοκίμια είναι τα εξής: (α) Η ανισοτροπία λόγω τάσης έχει σημαντική επίδραση στην κυκλική απόκριση του εδάφους και στην ανάπτυξη της πίεσης του νερού των πόρων. (β) Η περιβάλλουσα αστοχίας καθορίζεται από τη μεταβολή της εδαφικής συμπεριφοράς κατά τη φόρτιση και αποφόρτιση στην κυκλική φόρτιση και τη συνεπακόλουθη μεταβολή της εδαφικής δομής με την εμπλοκή και απεμπλοκή των εδαφικών κόκκων. (γ) Το μέτρο διάτμησης και ο λόγος απόσβεσης δεν επηρεάζονται σημαντικά από τις παραμέτρους α και b.

4.6 Επίδραση της ενδιάμεσης κύριας τάσης στην συμπεριφορά χαλικωδών υλικών

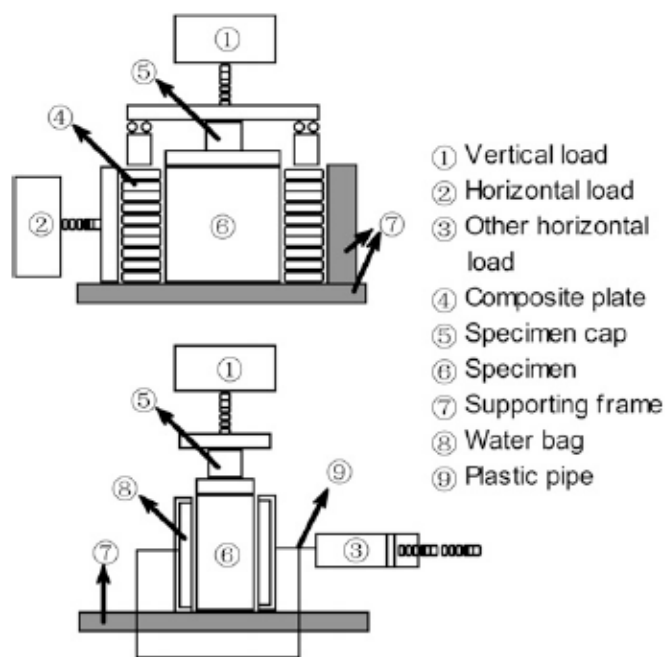
Η σχέση μεταξύ της μέγιστης γωνίας τριβής και αυτής στην κρίσιμη κατάσταση έχει μελετηθεί από πολλούς ερευνητές σε αμμώδη εδάφη. Ο Bolton (1986) εισήγαγε την έννοια του δείκτη σχετικής διόγκωσης από αποτελέσματα τριαξονικής και επίπεδης παραμόρφωσης φόρτισης. Ωστόσο η σχέση μεταξύ της μέγιστης γωνίας τριβής και της μέγιστης γωνίας διασταλτικότητας σε διάφορες διαδρομές τάσεων δεν έχει μελετηθεί. Έτσι δεν έχει διερευνηθεί εάν η σχέση του Bolton εξαρτάται από τη γωνία Lode ή από την παράμετρο b .

Στόχος της μελέτης των Xiao et al. (2014) ήταν η διερεύνηση της επίδρασης της ενδιάμεσης κύριας τάσης στην αντοχή και στην μεταβολή του όγκου των χαλικωδών υλικών σε σχετικά χαμηλή τάση. Διεξήχθησαν μια σειρά από δοκιμές με σταθερή την παράμετρο b , σε υλικά που χρησιμοποιούνται συνήθως για την κατασκευή χωμάτων φραγμάτων. Χρησιμοποιήθηκε γεωλυτικό προέλευσης από τον ποταμό Yalong της Δυτικής Κίνας. Το αλουβιακό αυτό υλικό προέρχεται κυρίως από γρανίτη και κροκαλοπαγές πέτρωμα και η αντοχή του υπολογίζεται περίπου στα 113.5MPa. Η κοκκομετρική σύνθεση του γεωλυτικού παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.52.



Σχήμα 4.52: Κοκκομετρική σύνθεση του γεωλυτικού μελέτης (Xiao et al., 2014).

Η συσκευή που στο πλαίσιο αυτής της μελέτης είναι η τριαξονική συσκευή ΤΤΑ. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.53 το κατακόρυφο φορτίο εφαρμόζεται μέσω μιας άκαμπτης πλάκας. Ένα από τα οριζόντια φορτία εφαρμόστηκε στο δείγμα μέσω μιας σύνθετης πλάκας, ενώ το άλλο οριζόντιο εφαρμόστηκε με την δημιουργία υδροστατικής πίεσης. Η τριαξονική αυτή συσκευή διαθέτει σύστημα ψηφιακής λειτουργίας, σύστημα ελέγχου και σύστημα φόρτισης.



Σχήμα 4.53: Γραφική απεικόνιση των στοιχείων της τριαξονικής συσκευής (Xiao et al., 2014).

Το μέγεθος του ορθογωνικού δείγματος που χρησιμοποιήθηκε για τη μελέτη έχει τις εξής διαστάσεις: 120mm σε μήκος, 60mm σε πλάτος και 120mm σε ύψος.

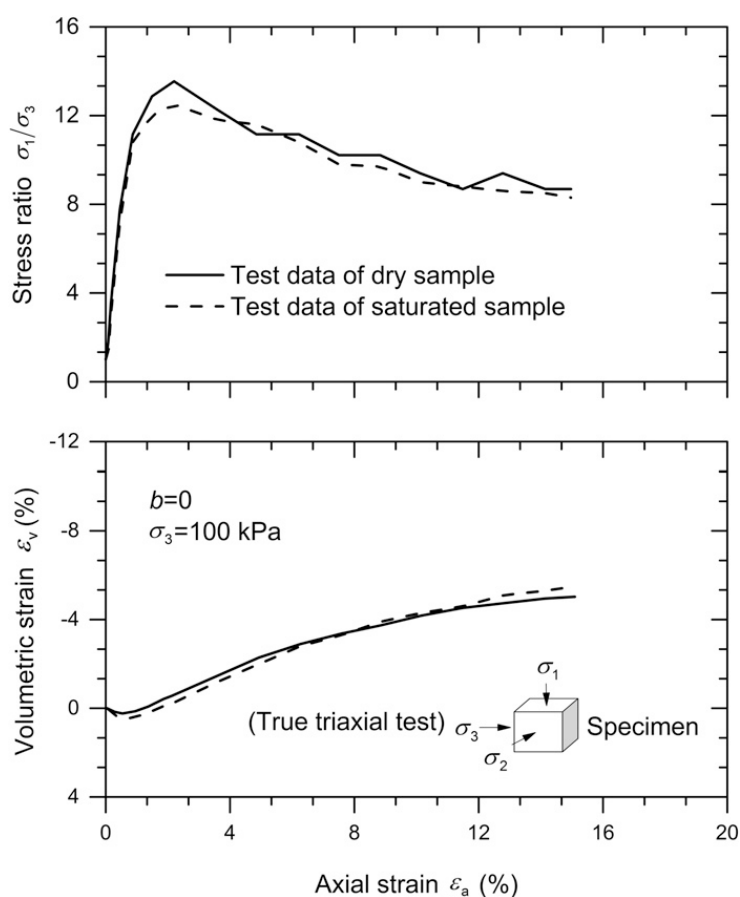


Σχήμα 4.54: Εγκατάσταση του εδαφικού δοκιμίου στην τριαξονική συσκευή (Xiao et al., 2014).

Πίνακας 4.8: Αρχική εντατική κατάσταση των δοκιμών (Χiao et al., 2014).

Initial void ratio e_0	Minor principal stress σ_3 (kPa)	b -value
0.26	100	0, 0.25, 0.5, 0.75, 1
0.26	200	0, 0.25, 0.5, 0.75, 1
0.26	300	0, 0.25, 0.5, 0.75, 1
0.26	400	0, 0.25, 0.5, 0.75, 1

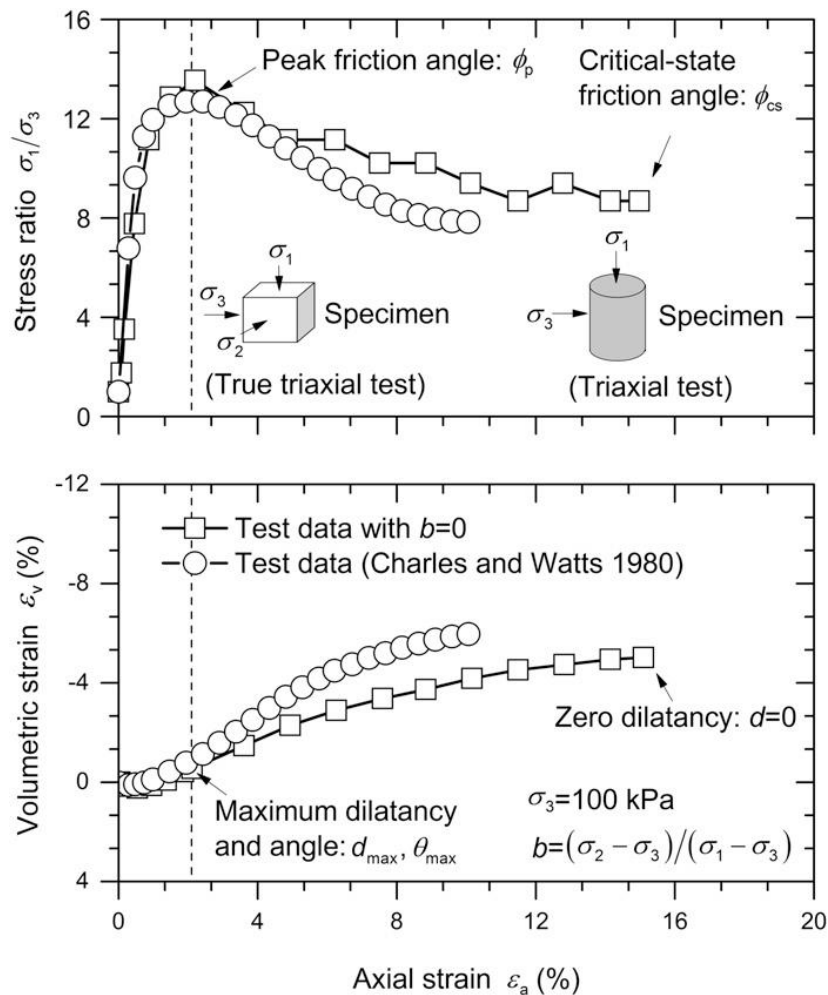
Οι Χiao et al. (2014) πραγματοποίησαν τρεις ανεξάρτητες δοκιμές με $\sigma_3=100\text{kPa}$ και υπό στραγγιζόμενες συνθήκες και ξηρές συνθήκες. Σε ένα φράγμα από σκυρόδεμα, το υλικό βρίσκεται σε ξηρή κατάσταση λόγω του αδιαπέρατου σκυροδέματος. Σε ένα λιθόρριπτο φράγμα με αργιλικό πυρήνα, το ανάντι μέρος του είναι σε στραγγιζόμενη κατάσταση, ενώ ο ανάντι βράχος είναι κυρίως σε ξηρή κατάσταση. Η σύγκριση των αποτελεσμάτων σε ξηρή και κορεσμένη κατάσταση παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.55.



Σχήμα 4.55: Σύγκριση της συμπεριφοράς του γεωυλικού σε ξηρή και στραγγιζόμενη κατάσταση (Χiao et al., 2014).

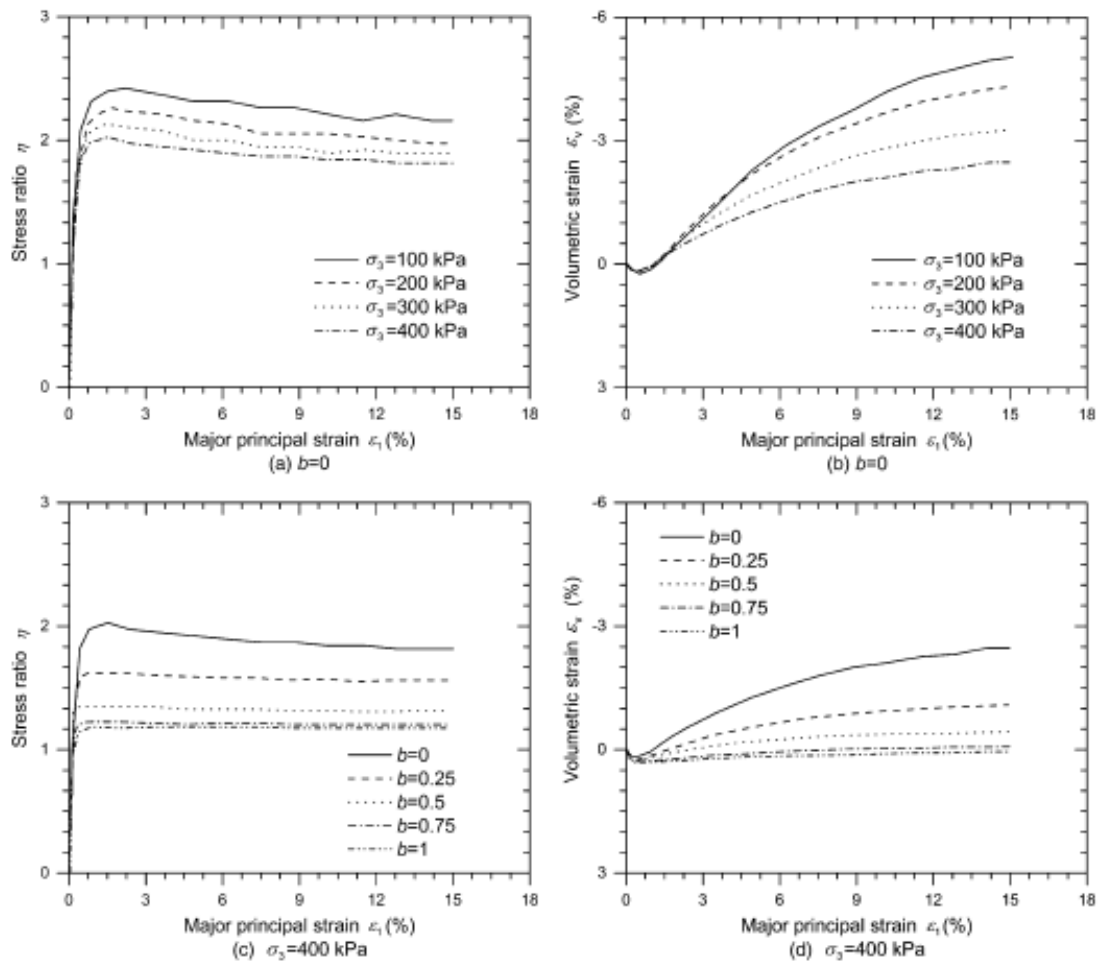
Στο Σχήμα 4.56 γίνεται σύγκριση της σχέσης τάσης-παραμόρφωσης, της ογκομετρικής παραμόρφωσης, της μέγιστης γωνίας τριβής και της γωνίας διασταλτικότητας μεταξύ των αποτελεσμάτων των Χiao et al. (2014) και των αποτελεσμάτων των Charles και

Watts (1980) τα οποία προήλθαν από κλασικές δοκιμές τριαξονικής φόρτισης σε συμπαγή κυλινδρικά δοκίμια. Η σύγκριση δείχνει ικανοποιητική συμφωνία.



Σχήμα 4.56: Συγκρίσεις τάσης-καταπόνησης, μέγιστης γωνίας τριβής και διασταλτικότητας πετρωδών υλικών από δεδομένα τριαξονικής δοκιμής (Xiao et al., 2014).

Στο Σχήμα 4.57 παρουσιάζονται οι σχέσεις τάσης-παραμόρφωσης και οι ογκομετρικές παραμορφώσεις σε διάφορα επίπεδα των σ_3 και b . Παρατηρείται πως η αύξηση της σ_3 όταν $b=0$ οδηγεί στην μείωση του λόγου $\eta=q/p'$ στην ίδια παραμόρφωση αλλά ταυτόχρονα προκαλεί αύξηση της ογκομετρικής παραμόρφωσης. Επίσης παρατηρείται πως η αύξηση της τιμής b όταν $\sigma_3=400$ kPa οδηγεί στην μείωση του λόγου $\eta=q/p'$ στην ίδια παραμόρφωση και στην αύξηση της ογκομετρικής παραμόρφωσης.

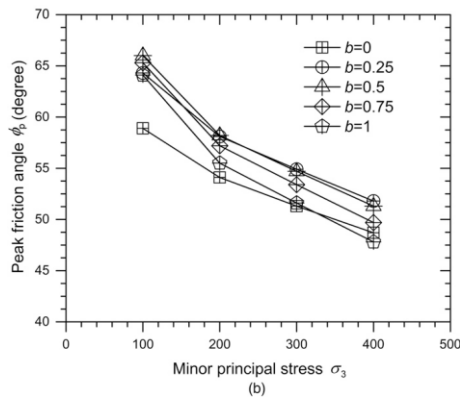
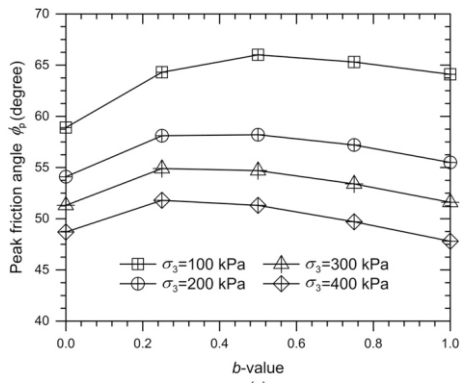


Σχήμα 4.57: Μεταβολή (α & c) του λόγου $\eta=q/p'$, (b & d) της ογκομετρικής παραμόρφωσης ϵ_v , με τη μέγιστη κύρια παραμόρφωση ϵ_1 σε διάφορα επίπεδα της σ_3 και του b (Xiao et al., 2014).

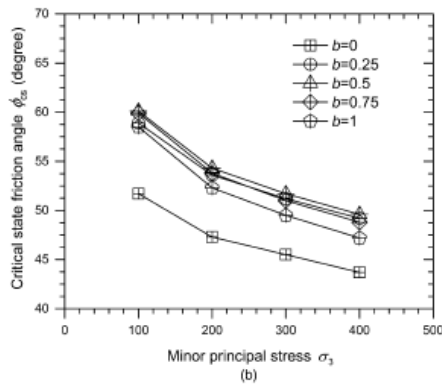
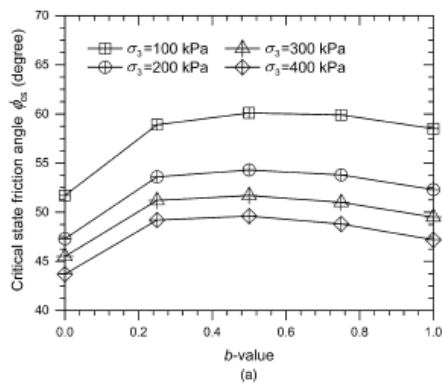
Το Σχήμα 4.58 παρουσιάζει τη μέγιστη γωνία τριβής και τη μεταβολή της με την τάση σ_3 και την τιμή του b . Παρατηρείται πως η γωνία τριβής αυξάνεται με την αύξηση της b ώσπου να λάβει την μέγιστή της τιμή και έπειτα μειώνεται. Επιπλέον παρατηρείται πως η μέγιστη γωνία τριβής μειώνεται με την αύξηση της τάσης σ_3 .

Το Σχήμα 4.59 παρουσιάζει τη γωνία τριβής στην κρίσιμη κατάσταση και τη μεταβολή της με την τάση σ_3 και την τιμή του b . Παρατηρείται πως η γωνία τριβής αυξάνεται με την αύξηση της b ώσπου να λάβει την μέγιστή της τιμή και έπειτα μειώνεται. Επιπλέον παρατηρείται πως η μέγιστη γωνία τριβής μειώνεται με την αύξηση της τάσης σ_3 . Η γωνία τριβής στην κρίσιμη κατάσταση είναι μικρότερη της μέγιστης γωνίας τριβής.

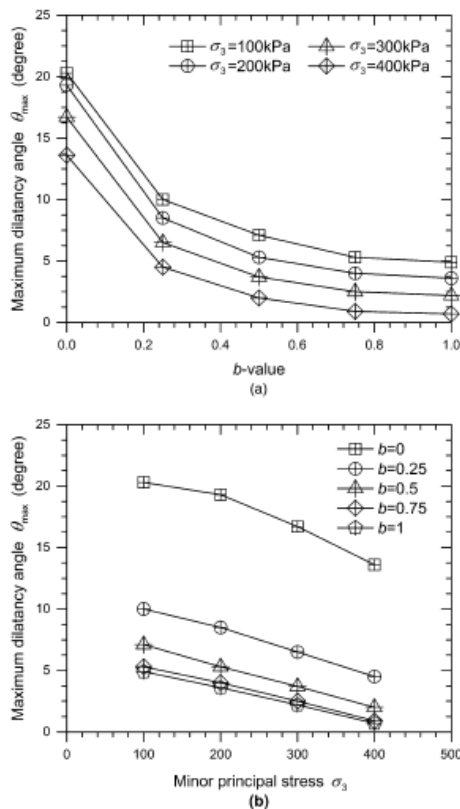
Το Σχήμα 4.60 παρουσιάζει τη γωνία διασταλτικότητας και τη μεταβολή της με την τάση σ_3 και την τιμή του b . Παρατηρείται πως η γωνία διασταλτικότητας μειώνεται με την αύξηση της b σε αντίθεση με τη μέγιστη γωνία τριβής και τη γωνία τριβής στην κρίσιμη κατάσταση. Σε ό,τι όμως αφορά στην επίδραση της σ_3 , παρατηρείται μείωση της γωνίας διασταλτικότητας όπως και με τις άλλες γωνίες.



Σχήμα 4.58: Μεταβολή της μέγιστης γωνίας τριβής με: (α) την τιμή του b , και (β) την τάση σ_3 (Xiao et al., 2014).



Σχήμα 4.59: Μεταβολή της γωνίας τριβής της κρίσιμης κατάστασης με: (α) την τιμή του b , και (β) την τάση σ_3 (Xiao et al., 2014).



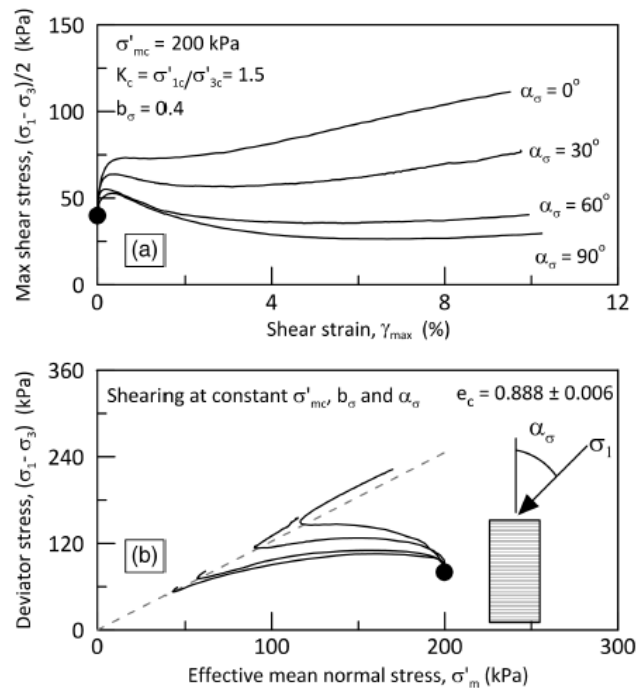
Σχήμα 4.60: Μεταβολή της γωνίας διασταλτικότητας της κρίσιμης κατάστασης με: (α) την τιμή του b , και (β) την τάση σ_3 (Xiao et al., 2014).

Τα κυριότερα συμπεράσματα των Xiao et al. (2014) είναι τα εξής: (α) Η μέγιστη γωνία τριβής και η γωνία κρίσιμης κατάστασης του χαλικώδους γεωλικού, σε μια δεδομένη σ_3 αυξάνεται μέχρι μια μέγιστη τιμή και στην συνέχεια μειώνεται με την αύξηση της τιμής b . (β) Η γωνία διασταλτικότητας σε μια δεδομένη σ_3 μειώνεται με την αύξηση της τιμής b . (γ) Η μέγιστη γωνία τριβής, η γωνία κρίσιμης κατάστασης και η γωνία διασταλτικότητας του χαλικώδους γεωλικού, σε μια δεδομένη b , μειώνεται με την αύξηση της τιμής σ_3 . (δ) Προτάθηκε ένας αναθεωρημένος δείκτης σχετικής διασταλτικότητας για την εκτίμηση της γωνίας τριβής που σχετίζεται με την τιμή b . (ε) Μια αύξηση στην τιμή b με $\sigma_3=5400\text{kPa}$ οδηγεί σε θραύση των κόκκων, η οποία εξαρτάται από τη διαδρομή των τάσεων.

4.7 Επίδραση της στροφής των αξόνων των κυρίων τάσεων και της μέγιστης διατμητικής τάσης στο δυναμικό ρευστοποίησης χαλαρής άμμου

Πειραματικές μελέτες έχουν δείξει την επίδραση της στροφής των αξόνων των κύριων τάσεων στη σχέση τάσης-παραμόρφωσης αμμωδών εδαφών υπό αστράγγιστες ή στραγγιζόμενες συνθήκες και υπό κυκλική ή μονοτονική φόρτιση, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.61. Ωστόσο η ποσοτικοποίηση της επίδρασης αυτής δεν είναι προς το παρόν εφικτή. Στο Σχήμα 4.61 η μείωση της αντοχής για $\alpha=90^\circ$ οφείλεται στο ότι ο άξονας φόρτισης συμπίπτει με το επίπεδο εναπόθεσης που είναι και το ασθενέστερο. Στο

ίδιο συμπέρασμα έχουν καταλήξει και οι Uthayakumar (1996) για την κυκλική φόρτιση.



Σχήμα 4.61: Μονοτονική συμπεριφορά αμμωδών δοκιμίων που παρασκευάστηκαν με εναπόθεση στο νερό (Sivathayalan & Vaid, 2002).

Μετά την πρωτοποριακή έρευνα των Pyke et al. (1975) για την επίδραση της διεύθυνσης της δόνησης στην εκτίμηση των καθιζήσεων πολλές έρευνες ακολούθησαν. Η πλέον πιστή μέθοδος είναι οι δοκιμές HCA που μπορούν να προσομοιώσουν τις συνεχείς μεταβολές της διεύθυνσης των επιβαλλόμενων τάσεων καθώς και τις διαφορετικές αρχικές συνθήκες φόρτισης κατά τη διάρκεια της σεισμικής φόρτισης. Στη μέθοδο αυτή δίνεται η επιλογή της επιβολής ταυτόχρονης κυκλικής αξονικής και διατμητικής δράσης όπως στην περίπτωση των επιφανειακών κυμάτων.

Στα πλαίσια της μελέτης των Sivathayalan et al. (2015) χρησιμοποιήθηκε η συσκευή HTC του Πανεπιστημίου Carleton, η οποία παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.62. Η συσκευή αυτή είναι προσαρμοσμένη έτσι ώστε να δέχεται δοκίμια με εξωτερική διάμετρο 150mm, εσωτερική διάμετρο 100mm και ύψος 300mm. Τα εδαφικά δείγματα που χρησιμοποιήθηκαν προέρχονται από τον ποταμό Fraser, ο οποίος βρίσκεται κοντά στο Abbotsford, Βρετανική Κολομβία στον Καναδά. Το αρχικό υλικό, κοσκινίστηκε, σε ξηρή μορφή, μέσω του κόσκινου #20 για την απομάκρυνση διάφορων μεγάλων κόκκων (λιγότερο από 1%) και στην συνέχεια κοσκινίστηκε, σε υγρή μορφή, μέσω του κόσκινου #200 για να αφαιρεθούν το λεπτόκκοκο κλάσμα (λιγότερο από 5%). Το αποτέλεσμα ήταν η παρασκευή μιας ομοιόμορφης άμμου με μέση διάμετρο 0.30mm και συντελεστή ομοιομορφίας ίσο με 2.9. Ο μέγιστος και ο ελάχιστος δείκτης πόρων είναι 0.806 και 0.509 αντίστοιχα. Για την προετοιμασία των δοκιμίων χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της εναπόθεσης σε νερό που προσομοιώνει τη

διαδικασία εναπόθεσης άμμου στο πεδίο και συνεπώς έχει παρόμοια εδαφική δομή σύμφωνα με τους Vait et al. (1999). Επιπλέον έχει το πλεονέκτημα της επαναληψιμότητας των δοκιμών. Τα δοκίμια παρασκευάστηκαν σε χαλαρή κατάσταση ($D_r=21-23\%$) και στερεοποιήθηκαν ανισότροπα σε μέση ενεργή τάση 200kPa. Η καταγραφή της ανισότροπης στερεοποίησης παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.63. Η αύξηση της μέσης ενεργής τάσης γινόταν ανά 25kPa και σε κάθε βήμα ρυθμιζόταν η κατακόρυφη, η ακτινική και η περιφερειακή τάση. Μετά την ολοκλήρωση της στερεοποίησης τα δοκίμια υποβλήθηκαν σε μονοτονικές και κυκλικές φορτίσεις, Πίνακες 4.9 και 4.10 αντίστοιχα. Η κυκλική φόρτιση ήταν ελεγχόμενης τάσης ημιτονοειδούς μορφής με ρυθμό 4min/cycle Σχήμα 4.64.



Σχήμα 4.62: Η συσκευή HTC στο Πανεπιστήμιο του Carleton (Sivathayalan et al., 2015).

Πίνακας 4.9: Μονοτονικές δοκιμές (Sivathayalan et al., 2015).

Test number	End of consolidation		Stress parameters during loading		
	Stress state	$D_{rc}(\%)$	σ_m (kPa)	b	$\alpha_\sigma(^{\circ})$
M01	$\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 \sigma_m = 450$ kPa	21.2	450	0	0
M02	$\sigma'_m = 200$ kPa	21.2			30
M03		22.9			45
M04		20.9			60
M05		21.9			90

Πίνακας 4.10: Κυκλικές δοκιμές (Sivathayalan et al., 2015).

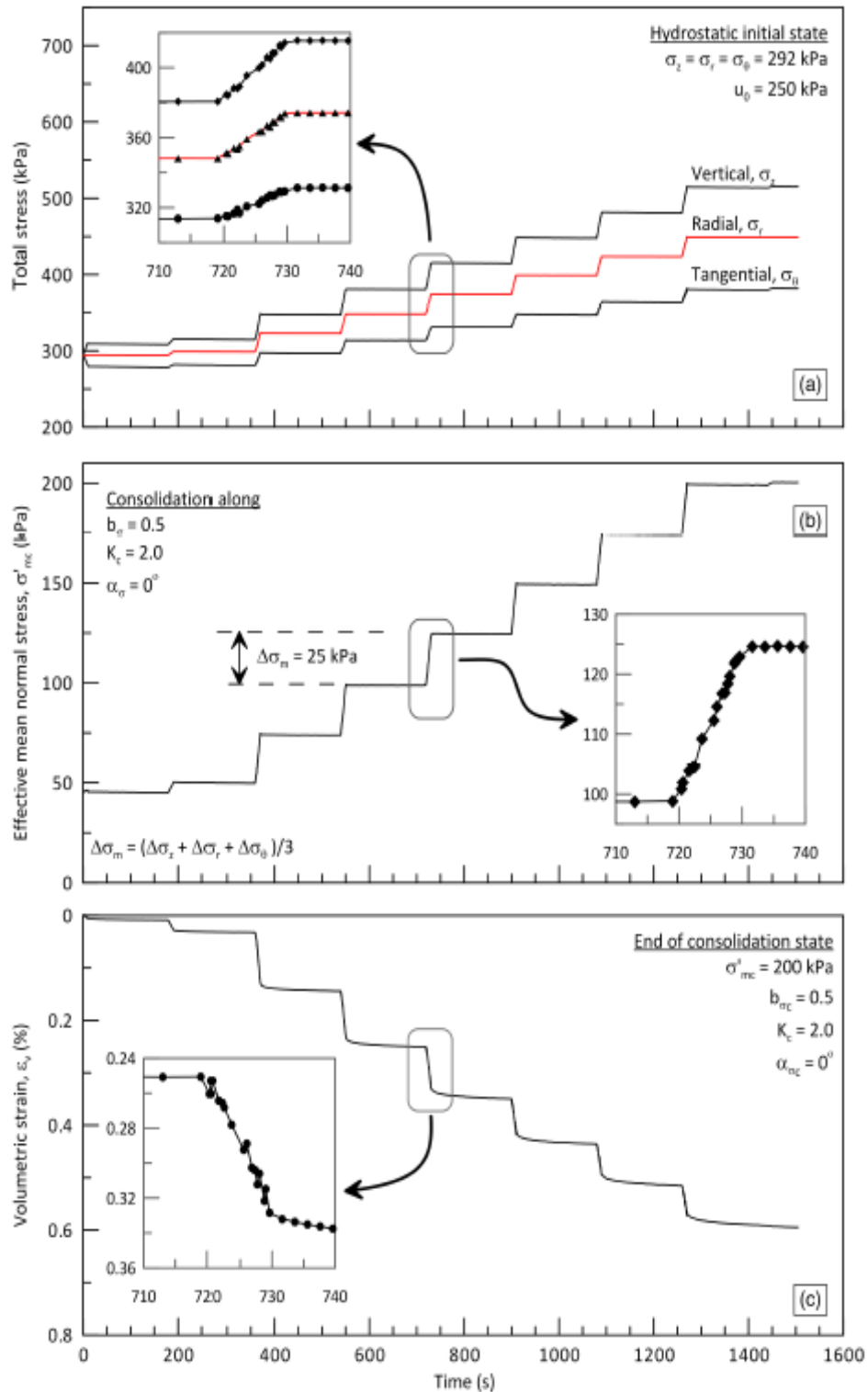
Test number	End of consolidation		Stress parameters during loading			Cyclic stress ratio
	Stress state	$D_{rc}(\%)$	σ_m (kPa)	b	α_σ (°)	
C01	$\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$ $\sigma_m = 450$ kPa $\sigma'_m = 200$ kPa	21.2	450	$0 \Leftrightarrow 1$	$0 \Leftrightarrow 90$	0.20
C02		22.2		0.4	$+45 \Leftrightarrow -45$	0.20
C03		23.2		0	$+30 \Leftrightarrow -30$	0.20
C04		20.2			$+15 \Leftrightarrow -15$	0.20
C05		22.6			$+30 \Leftrightarrow -30$	0.15
C06		20.9				0.20
C07		22.2				0.25
C08		22.2			$+45 \Leftrightarrow -45$	0.10
C09		20.9				0.15
C10		21.9				0.15
C11		20.2				0.20
C12		20.9				0.25
C13		21.5			$+60 \Leftrightarrow -60$	0.15
C14		21.9				0.15
C15		20.5				0.20
C16		22.6			$+75 \Leftrightarrow -75$	0.15
C17		22.6				0.20
C18		21.5			$+90 \Leftrightarrow -90$	0.15
C19		22.6				0.20

Στα αποτελέσματα που παρουσίασαν οι Sivathayalan et al. (2015) δεν έχει γίνει διόρθωση λόγω μεμβράνης. Στις δοκιμές η μέση ολική τάση (450kPa) και η παράμετρος b παρέμειναν σταθερές, ενώ η α_σ κυμαινόταν μεταξύ 15° και 90° κατά τη διάρκεια της φόρτισης και μάλιστα κατά αναλογία με την κυκλική διατμητική τάση. Ένας μικρός αριθμός δοκιμών έγινε με αρχικά σταθερή τιμή της α_σ και στη συνέχεια απότομη μεταβολή της σε $-\alpha_\sigma$, Σχήμα 4.64. Τα δοκίμια θεωρήθηκαν πως ρευστοποιήθηκαν σε παραμόρφωση πλάτους (μονού) 3.75%. Ο λόγος κυκλικών τάσεων CSR ορίζεται ως ο λόγος της μέγιστης κυκλικής διατμητικής τάσης $\tau_{max}(=\sigma_{d,cyc}/2)$ προς τη μέση ενεργή ορθή τάση σ'_{mc} . Καθώς τα δοκίμια στερεοποιήθηκαν υπό υδροστατική πίεση ισχύει $CSR = \sigma_{d,cyc}/(2\sigma'_{3c})$.

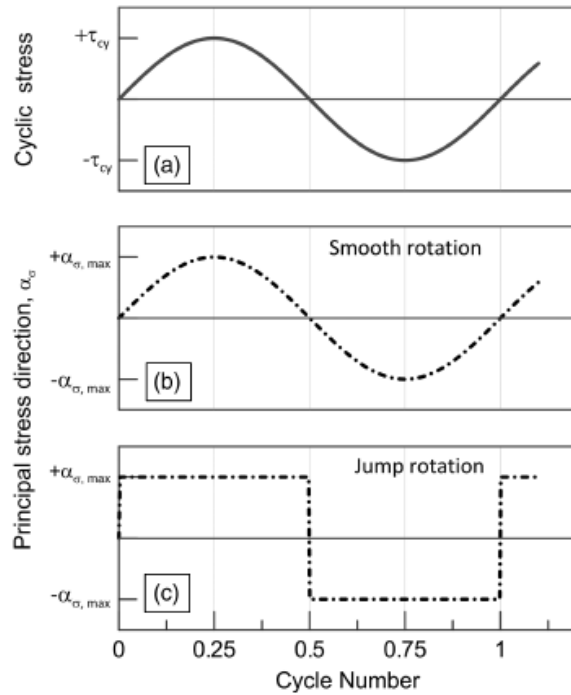
Τα αποτελέσματα των δοκιμών μονοτονικής φόρτισης παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.65. Τα δοκίμια υποβλήθηκαν σε διάτμηση με σταθερή μέση ολική τάση και μηδενική b_σ , αλλά σε ένα εύρος διαφορετικών τιμών α_σ . Παρατηρείται μείωση της αντοχής και αύξηση της πίεσης του νερού των πόρων με την αύξηση του α_σ .

Στο Σχήμα 4.66 παρουσιάζεται η διατμητική αντοχή S_{pt} της άμμου στη φάση μετάβασης από τη ψαθυρή στην όλκιμη συμπεριφορά Ishihara et al (1975). Η αντοχή S_{pt} κυμαίνεται μεταξύ 108-61kPa και μειώνεται με την αύξηση της α_σ . Πιο έντονη είναι

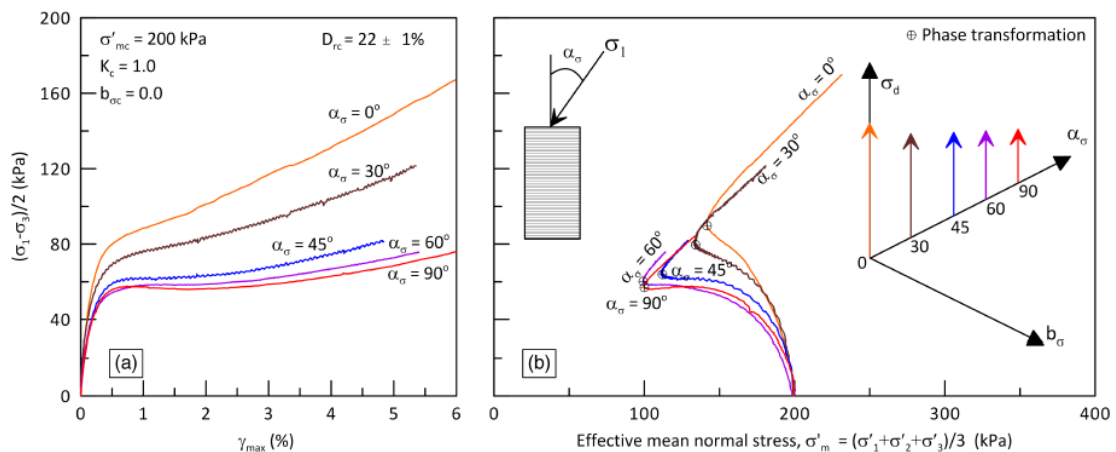
η μείωση της S_{pt} για το εύρος $\alpha=0-45^\circ$ δηλαδή κατά τη μετάβαση από την τριαξονική συμπίεση στην απλή διάτμηση. Η αντοχή στην απλή διάτμηση είναι αρκετά κοντά στον εφελκυσμό. Σημειώνεται πως στις δοκιμές ίσχυε $b=0$. Αντιθέτως, η γωνία τριβής στη φάση μετάβασης είναι σταθερή και ανεξάρτητη της διαδρομής φόρτισης.



Σχήμα 4.63: Μεταβολή τάσεων και παραμορφώσεων με το χρόνο κατά τη διάρκεια της ανισότροπης στερεοποίησης (Sivathayalan et al., 2015).

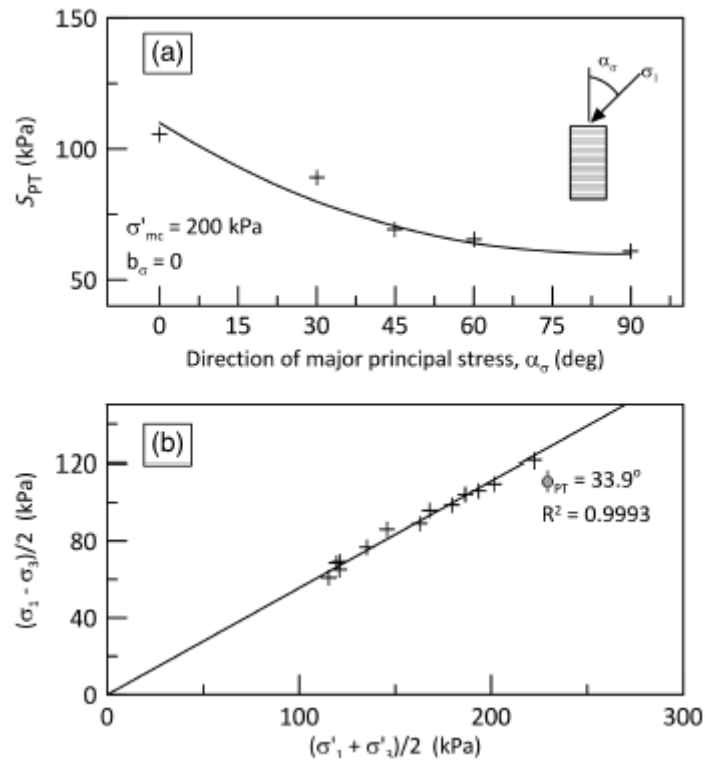


Σχήμα 4.64: Μεταβολή της γωνίας α_σ με τους κύκλους φόρτισης (Sivathayalan et al., 2015).



Σχήμα 4.65: Μονοτονική αστράγγιστη συμπεριφορά σε διαφορετικές διαδρομές φόρτισης (Sivathayalan et al., 2015).

Αποτελέσματα των δοκιμών κυκλικής φόρτισης παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.67. Παρουσιάζονται αποτελέσματα δύο δοκιμών με δείκτη πόρων $e_c \approx 0,741$, στερεοποιημένων σε τάση $\sigma'_{1c} = \sigma'_{3c} = 200 \text{ kPa}$, που υποβλήθηκαν σε κυκλική φόρτιση με $\text{CSR} = 0.20$. Οι εντατικές καταστάσεις κατά την διάρκεια της κυκλικής φόρτισης είναι $\alpha_\sigma = 0^\circ$, $b_\sigma = 0$ και $\alpha_\sigma = 90^\circ$, $b_\sigma = 1$ για την τριαξονική φόρτιση και $b_\sigma \approx 0.4$ και $\alpha_\sigma = \pm 45^\circ$ για την απλή διάτμηση. Η απότομη στροφή από $\alpha_\sigma = 0^\circ$ στο $\alpha_\sigma = 90^\circ$ ή από το $\alpha_\sigma = +45^\circ$ στο $\alpha_\sigma = -45^\circ$ προσομοιώνει την κατάσταση όπου το οριζόντιο επίπεδο είναι το επίπεδο της μέγιστης διατμητικής τάσης. Η ρευστοποίηση του δοκιμίου στην απλή διάτμηση γίνεται στον 6^ο κύκλο ενώ στην τριαξονική φόρτιση στον 34^ο κύκλο φόρτισης.



Σχήμα 4. 66: Διατμητική αντοχή και γωνιά τριβή στη φάση μετάβασης (Sivathayalan et al., 2015).

Στο Σχήμα 4.68 γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων κυκλικής φόρτισης με συνεχή (ομαλή) και στροφή των διευθύνσεων των κύριων τάσεων και αυτών με απότομη μεταβολή (μεταξύ $+30^\circ$ και -30°) σε πανομοιότυπα δοκίμια ($e = 0.744$ και 0.737). Παρατηρείται πως στην πρώτη περίπτωση το δοκίμιο ρευστοποιείται στους 14 κύκλους ενώ στη δεύτερη στους 17 κύκλους.

Στο Σχήμα 4.69 γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων κυκλικής φόρτισης με συνεχή (ομαλή) και στροφή των διευθύνσεων των κύριων τάσεων μεταξύ $+45^\circ$ και -45° σε δύο επίπεδα $CSR = 0.15$ και 0.20 . Απαιτήθηκε ένας σημαντικά υψηλότερος αριθμός κύκλων φόρτισης για την ρευστοποίηση στην περίπτωση της $CSR = 0.15$. Η άμμος που υπόκειται σε $CSR = 0.20$ ενεργοποιεί την ρευστοποίηση στους 7 πρώτους κύκλους φόρτισης, με στροφή της κύριας τάσης $\pm 45^\circ$, ενώ όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.68 ο αριθμός κύκλων είναι 15 στην ίδια $CSR = 0.20$ αλλά σε μικρότερη στροφή $\pm 30^\circ$. Η μέγιστη πίεση του νερού των πόρων που δημιουργείται λόγω ρευστοποίησης είναι περίπου ίση με 180 kPa, και στις δύο δοκιμές, που ισοδυναμεί με το 90% της αρχικής ενεργής πίεσης. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.70, παρόμοια επίπεδα υπερπίεσης πόρων αναπτύσσονται για $CSR = 0.25$, ενώ είναι σαφές ότι για $CSR = 0.10$ η άμμος δε ρευστοποιείται, εκτός αν υποβληθούν αρκετές εκατοντάδες κύκλοι φόρτισης. Μια τέτοια κατάσταση δεν θα συμβεί ακόμα και στους πιο ενεργούς σεισμούς. Η ανάπτυξη διατμητικών παραμορφώσεων είναι μεγάλη εκτός από την περίπτωση $CSR = 0.10$.

Το Σχήμα 4.71 παρουσιάζει τη μεταβολή του αριθμού των κύκλων φόρτισης στην ρευστοποίηση σε σχέση με τον λόγο κυκλικών τάσεων (CSR) στη ρευστοποίηση για δύο επίπεδα (ομαλής) στροφής της μέγιστης κύριας τάσης, α_σ . Όπως είναι αναμενόμενο, η αύξηση του CSR μειώνει τον αριθμό των κύκλων και αυτό βρίσκεται σε συμφωνία με τα βιβλιογραφικά δεδομένα για την απλή διάτμηση (Vaid και Sivathayalan, 1996) και τις κυκλικές τριαξονικές δοκιμές (Thomas, 1992). Για ένα δεδομένο CSR, ο αριθμός των κύκλων για την ρευστοποίηση είναι χαμηλότερος όταν η φόρτιση υποβάλλεται σε 90° στροφή τάσης ($\alpha_\sigma = \pm 45^\circ$) παρά σε 60° ($\alpha_\sigma = \pm 30^\circ$).

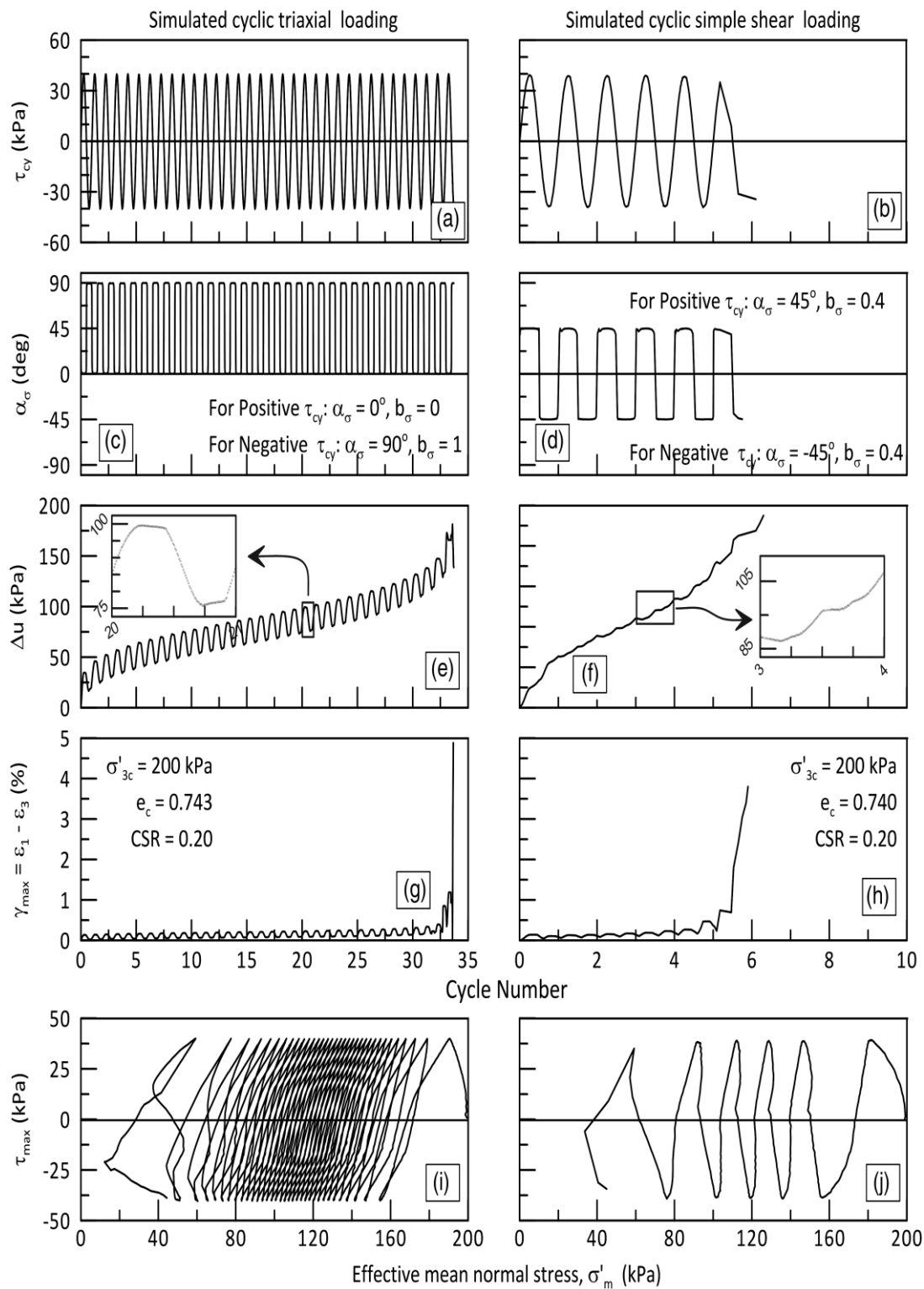
Στο Σχήμα 4.72 παρουσιάζεται η επίδραση της γωνίας στροφής του άξονα της μέγιστης κύριας τάσης, α_σ , με τον απαιτούμενο αριθμό κύκλων φόρτισης για τη ρευστοποίηση του δοκίμιου σε δύο επίπεδα CSR (0.15 και 0.20). Η επίδραση είναι σημαντική με μείωση του αριθμού κύκλων φόρτισης N με την αύξηση της α_σ μέχρι την τιμή 45°. Στη συνέχεια παρατηρείται αύξηση του N με την α_σ .

Στο Σχήμα 4.73 παρουσιάζονται οι εντατικές καταστάσεις με τις στιγμιαίες μέγιστες διατμητικές τάσεις με τη αντίστοιχη στροφή αξόνων. Η μέγιστη διατμητική τάση τ_{max} στην $\alpha_{\sigma,max}=90^\circ$ είναι $(\sigma_\theta - \sigma_z)/2$ και στο οριζόντιο επίπεδο είναι $\tau_h=0$. Παρότι οι συγκρίσεις γίνονται σε σταθερό CSR και συνεπώς σταθερή τ_{max} , το επίπεδο στο οποίο ενεργεί η τ_{max} μεταβάλλεται με τη στροφή των αξόνων α_σ . Τη μεταβολή του επιπέδου στο οποίο ενεργεί η τ_{max} (για δεδομένο CSR) με την α_σ παρουσιάζει το Σχήμα 4.74. Η τ_h υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση, όπου t/T είναι ο αριθμός κύκλων:

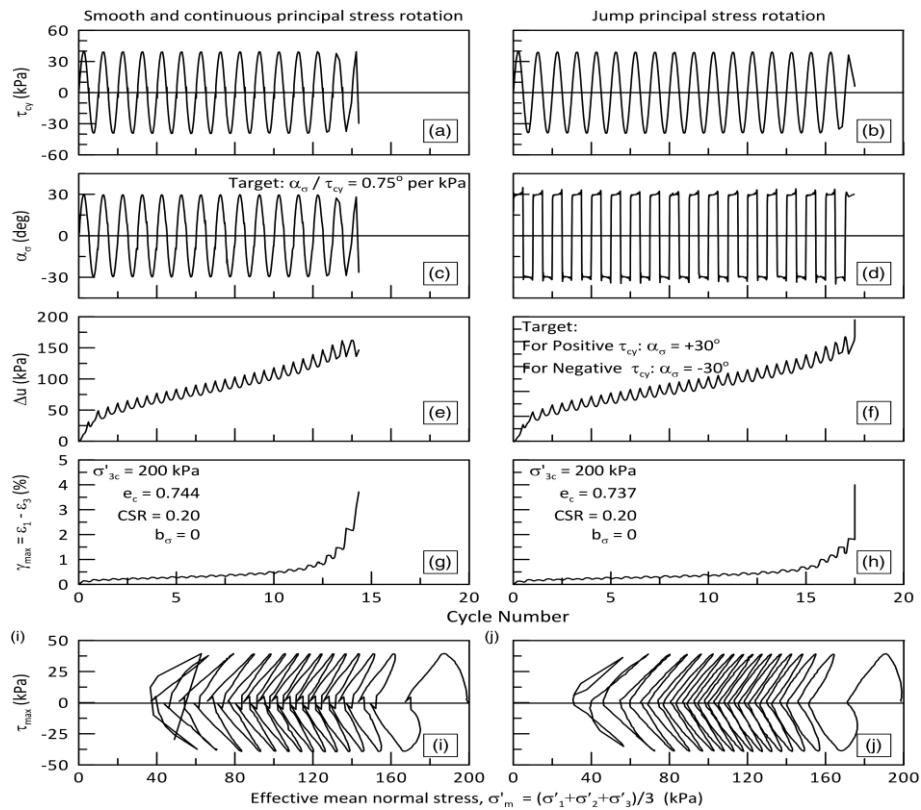
$$\tau_h = \tau_{max} \cdot \left| \sin \left[2 \cdot \alpha_{\sigma,max} \cdot \sin \left(\frac{2\pi t}{T} \right) \right] \right| \cdot \sin \left(\frac{2\pi t}{T} \right) \quad (4.33)$$

Στο Σχήμα 4.75 παρουσιάζεται η μεταβολή της τ_h με τον αριθμό των κύκλων φόρτισης και την κανονικοποιημένη $\alpha_\sigma/\alpha_{\sigma,max}$. Βεβαίως στην τριαξονική φόρτιση η τ_h είναι μηδενική ($\alpha_\sigma=0$).

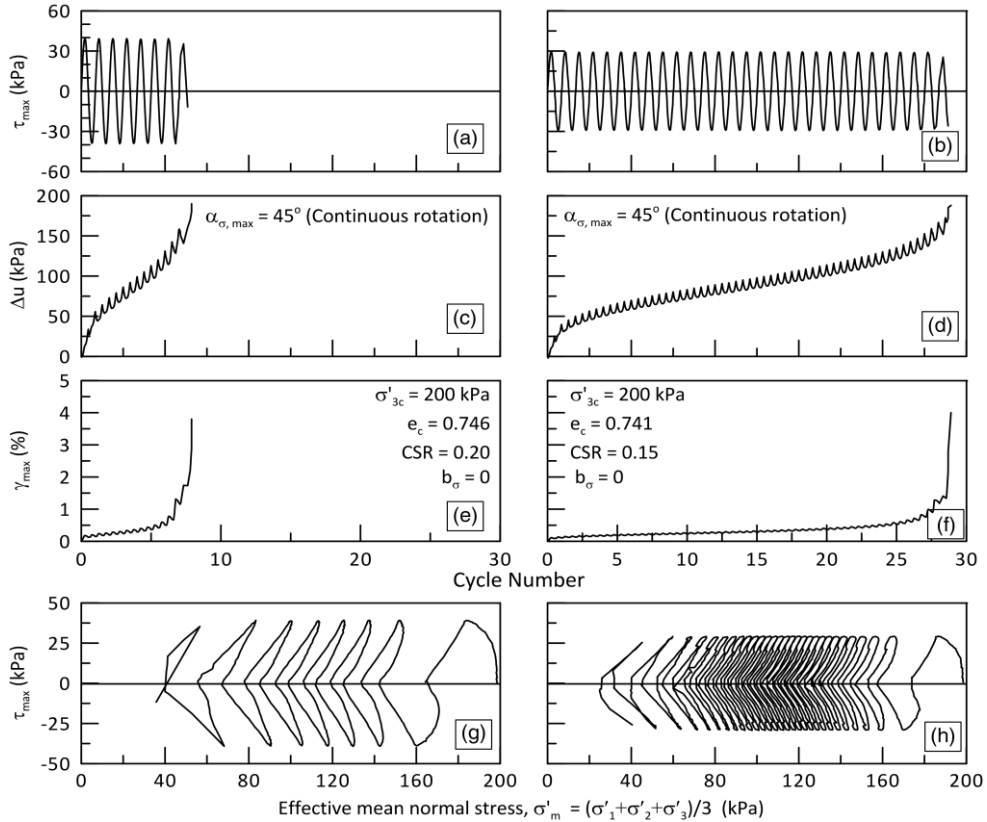
Τα κυριότερα συμπεράσματα των Sivathayalan et al. (2015) είναι τα ακόλουθα: (α) το δυναμικό ρευστοποίησης εξαρτάται από τη στροφή των αξόνων των κύριων τάσεων. (β) Η συνεχής στροφή των αξόνων παρουσιάζει μεγαλύτερη επίδραση συγκριτικά με την απότομη και στιγμιαία αλλαγή της στροφής. (γ) Η χαμηλότερη τιμή της αντίστασης ρευστοποίησης παρατηρείται για στροφή $\alpha_\sigma = \pm 45^\circ - \pm 60^\circ$. (δ) Η ανισοτροπία δεν εξαρτάται μόνο από τη διεύθυνση της μέγιστης κύριας τάσης σε σχέση με το επίπεδο εναπόθεσης, αλλά εξαρτάται επίσης και από την κλίση του επιπέδου της μέγιστης διατμητικής τάσης ως προς το επίπεδο εναπόθεσης καθώς και το μέγεθος της διατμητικής τάσης στο επίπεδο εναπόθεσης. (ε) Η χρήση δοκιμών κυκλικής φόρτισης σε απλή διάτμηση οδηγεί σε ασφαλή σχεδιασμό έναντι ρευστοποίησης.



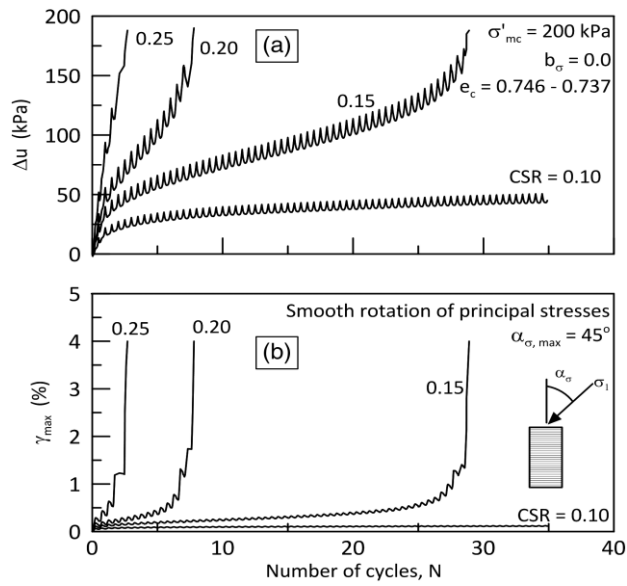
Σχήμα 4.67: Προσομοίωση τριαξονικής φόρτισης ($\alpha_\sigma=0$ και απότομη μεταβολή σε $\alpha_\sigma=90^\circ$) και απλής διάτμησης ($\alpha_\sigma=+45^\circ$ και απότομη μεταβολή σε $\alpha_\sigma=-45^\circ$) με κυκλική φόρτισης (Sivathayalan et al., 2015).



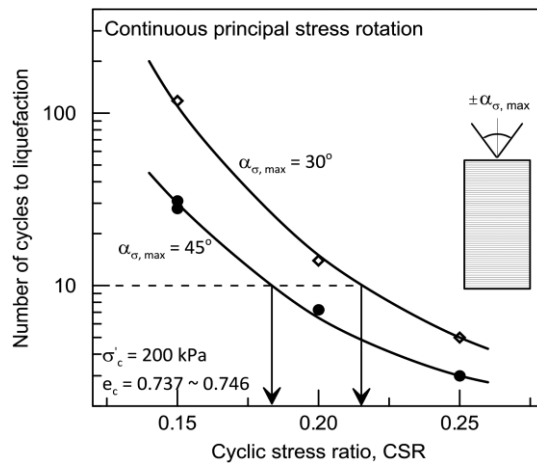
Σχήμα 4.68: Απόκριση άμμου που υπόκειται σε ομαλή και συνεχή στροφή της κύριας τάσης αλλά και σε στροφή με άλμα (Sivathayalan et al., 2015).



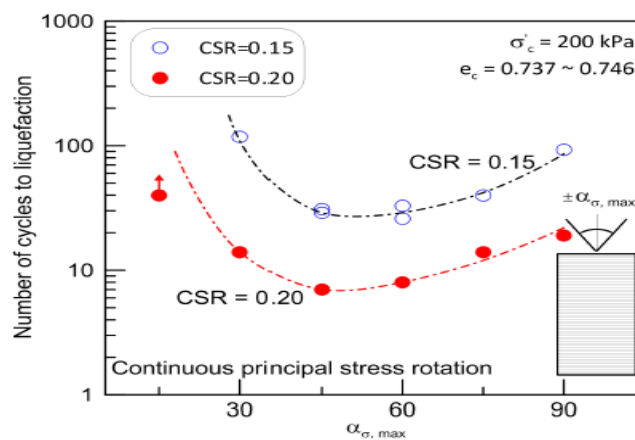
Σχήμα 4.69: Απόκριση άμμου που υπόκειται σε συνεχή περιστροφή της κύριας τάσης σε δύο επίπεδα CSR (Sivathayalan et al., 2015).



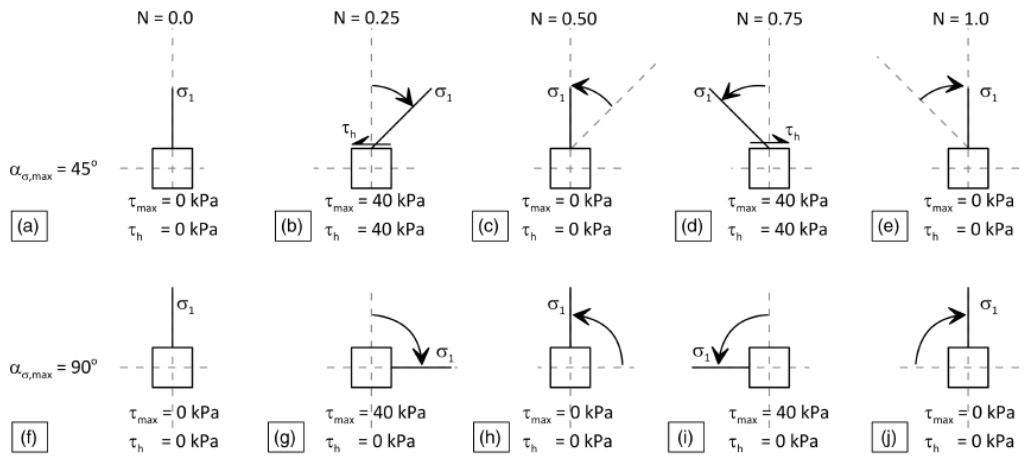
Σχήμα 4.70: Μεταβολή της διατμητικής παραμόρφωσης και της πίεσης του νερού των πόρων κατά την διάρκεια κυκλικής φόρτισης (Sivathayalan et al., 2015).



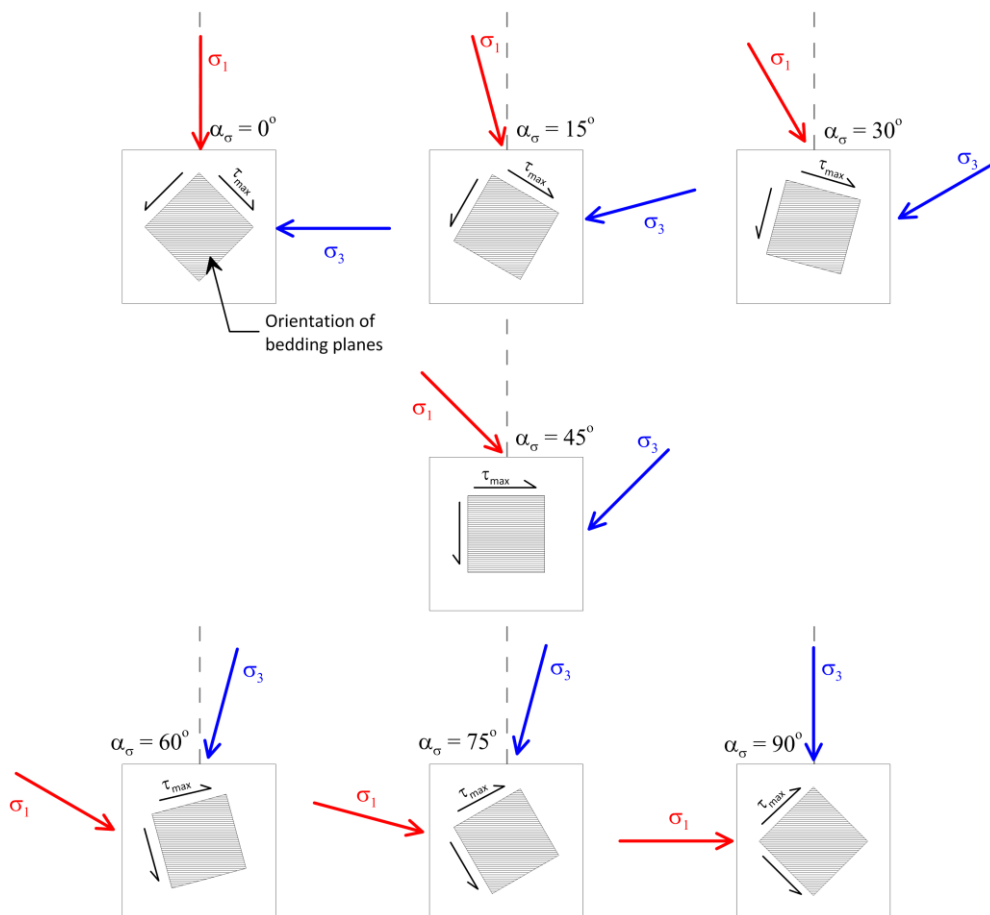
Σχήμα 4.71: Καμπύλες αντίστασης σε ρευστοποίηση για διαφορετικές τιμές α_σ (Sivathayalan et al., 2015).



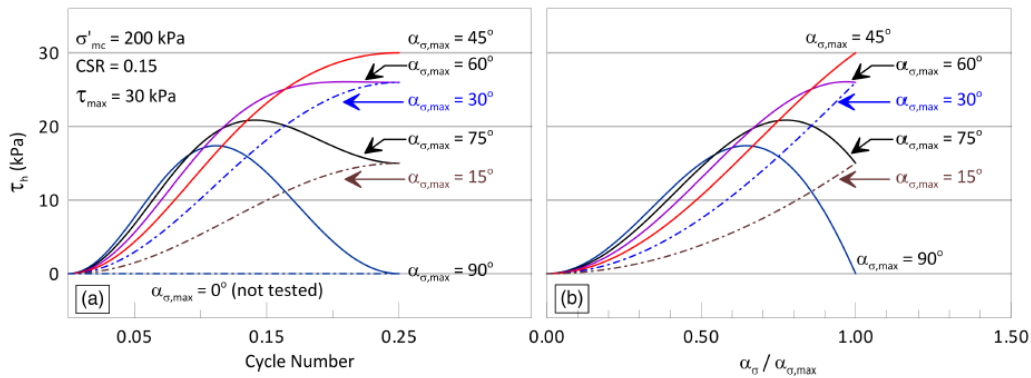
Σχήμα 4.72: Επίδραση της τιμής της α_σ στον αριθμό κύκλων φόρτισης στη ρευστοποίηση (Sivathayalan et al., 2015).



Σχήμα 4.73: Σχηματικό διάγραμμα του μεγέθους των τάσεων (Sivathayalan et al., 2015).



Σχήμα 4.74: Προσανατολισμός της μέγιστης κύριας τάσης και στροφή του επιπέδου της μέγιστης διατμητικής τάσης σε σχέση με το επίπεδο εναπόθεσης (Sivathayalan et al., 2015).



Σχήμα 4.75: Μεταβολή της τ_h με τον αριθμό κύκλων φόρτισης και την κανονικοποιημένη γωνία στροφής (Sivathayalan et al., 2015).

4.8 Επίδραση της διεύθυνσης του άξονα της κύριας τάσης στη ρευστοποίηση ιλύος

Το μεγαλύτερο πλήθος των δημοσιευμένων ερευνών για τη μελέτη της επίδρασης της διεύθυνσης του άξονα της κύριας τάσης στην εδαφική μηχανική συμπεριφορά αφορά τη μονοτονική φόρτιση υπό αστράγγιστες συνθήκες. Περιορισμένος είναι ο αριθμός των ερευνών που αφορά στην κυκλική φόρτιση. Μία από αυτές είναι η μελέτη των Sato & Yoshida (1999), όπου δοκιμές κυκλικής φόρτισης σε πυκνά κοίλα κυλινδρικά και πυκνά δοκίμια άμμου πραγματοποιήθηκαν με απότομη στροφή 90° της μέγιστης κύριας τάσης διατηρώντας σταθερή τη μέση τάση p' και την παραμέτρο b . Τα αποτελέσματα έδειξαν τη μικρότερη αντοχή για περιστροφή του άξονα της μέγιστης κύριας τάσης κατά 45° ως προς την αρχική διεύθυνση. Μια άλλη έρευνα από τους Sivathayalan et al. (2005) πάλι σε δοκίμια άμμου που υποβλήθηκαν σε κυκλική φόρτιση με σταθερή παράμετρο $b=0$, έδειξαν πως έδειξαν σημαντική μείωση της αντοχής για περιστροφή του άξονα της μέγιστης κύριας τάσης κατά 45° – 60° ως προς την αρχική διεύθυνση. Για μεγαλύτερες γωνίες παρατηρήθηκε αύξηση της αντοχής.

Οι Zhenglong et al. (2017) είναι ίσως η μοναδική έρευνα που ασχολήθηκαν με την επίδραση της διεύθυνσης του άξονα της κύριας τάσης στη μηχανική συμπεριφορά κορεσμένης ιλύος υπό αστράγγιστες συνθήκες κυκλικής φόρτισης. Η μελέτη τους έχει μεγάλη πρακτική σημασία καθώς οι ιλεις είναι ρευστοποιήσιμα εδάφη με περισσότερο πολύπλοκη συμπεριφορά συγκριτικά με τις άμμους. Πραγματοποίησαν δοκιμές σε κοίλα κυλινδρικά δοκίμια στη συσκευή στρεπτικής διάτμησης της εταιρείας GDS, Σχήμα 4.76. Οι εξισώσεις που χρησιμοποιήθηκαν για την επεξεργασία των δεδομένων παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.11 μαζί με την επεξήγηση του Σχήματος 4.77. Επίσης χρησιμοποιήθηκε η Εξίσωση 4.34 για τον υπολογισμό της εκτροπικής παραμόρφωσης:

$$\gamma_q = \varepsilon_1 - \varepsilon_3 \quad (4.34)$$

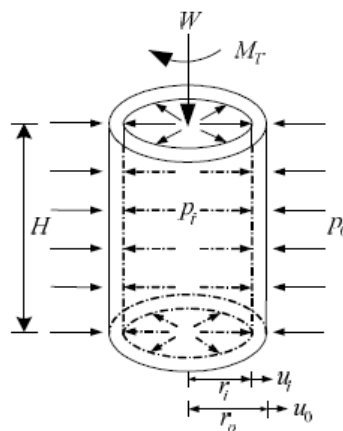


Σχήμα 4.76: Συσκευή στρεπτικής διάτμησης κόιλου κυλινδρικού δοκιμίου της εταιρείας GDS (Zhenglong et al., 2017).

Πίνακας 4.11: Εξισώσεις για την επεξεργασία των πειραματικών μετρήσεων (Zhenglong et al., 2017).

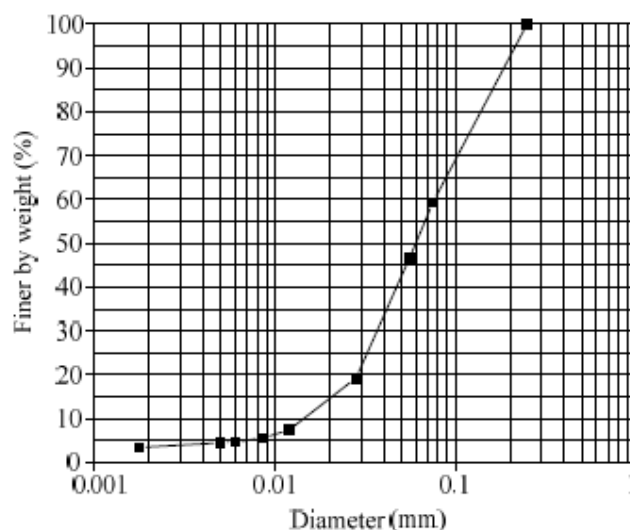
	Stress	Strain
Vertical	$\sigma_z = \frac{W}{\pi(r_o^2 - r_i^2)} + \frac{P_o r_o^2 - P_i r_i^2}{(r_o^2 - r_i^2)}$	$\varepsilon_z = \frac{z}{H}$
Radial	$\sigma_r = \frac{P_o r_o + P_i r_i}{r_o + r_i}$	$\varepsilon_r = -\frac{(u_o - u_i)}{(r_o - r_i)}$
Circumferential	$\sigma_\theta = \frac{P_o r_o - P_i r_i}{r_o - r_i}$	$\varepsilon_\theta = -\frac{(u_o + u_i)}{(r_o + r_i)}$
Shear	$\tau_{z\theta} = \frac{3M_T}{2\pi(r_o^3 - r_i^3)}$	$\gamma_{z\theta} = \frac{2\theta(r_o^3 - r_i^3)}{3H(r_o^2 - r_i^2)}$
Major principal	$\sigma_1 = \frac{\sigma_z + \sigma_\theta}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_z - \sigma_\theta}{2}\right)^2 + (\tau_{z\theta})^2}$	$\varepsilon_1 = \frac{\varepsilon_z + \varepsilon_\theta}{2} + \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_z - \varepsilon_\theta}{2}\right)^2 + (\gamma_{z\theta})^2}$
Intermediate principal	$\sigma_2 = \sigma_r$	$\varepsilon_2 = \varepsilon_r$
Minor principal	$\sigma_3 = \frac{\sigma_z + \sigma_\theta}{2} - \sqrt{\left(\frac{\sigma_z - \sigma_\theta}{2}\right)^2 + (\tau_{z\theta})^2}$	$\varepsilon_3 = \frac{\varepsilon_z + \varepsilon_\theta}{2} - \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_z - \varepsilon_\theta}{2}\right)^2 + (\gamma_{z\theta})^2}$

Notes: r_o , outer radius; r_i , inner radius; H , height of specimen; z , axial deformation; u_o and u_i , radial deformations of the outer and inner walls calculated from the change of inner and outer volumes, respectively, assuming that the specimen deforms as a right cylinder; θ , torsional deformation.



Σχήμα 4.77: Γραφική απεικόνιση της επιβαλλόμενης φόρτισης (Zhenglong et al., 2017).

Το δείγμα ιλύος που μελετήθηκε στην έρευνα των Zhenglong et al. (2017) προήλθε από την περιοχή Nantong της Κίνας. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.78, το εδαφικό υλικό αποτελείται από 57,7% ιλύ, 1,3% άργιλο και 41% λεπτόκοκκης άμμου. Οι φυσικές ιδιότητες της ιλύος δίνονται στον Πίνακα 4.12.



Σχήμα 4.78: Κοκκομετρική καμπύλη ιλύος (Zhenglong et al., 2017).

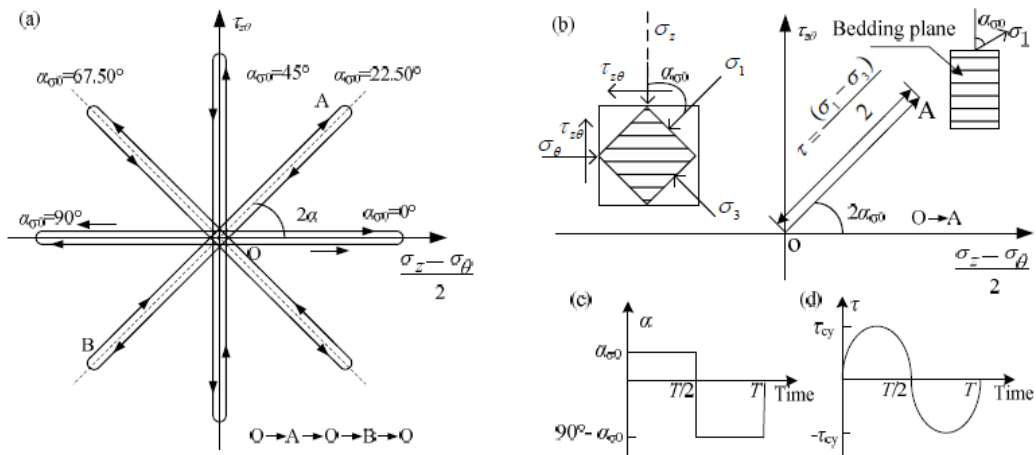
Πίνακας 4.12: Φυσικές ιδιότητες ιλύος (Zhenglong et al., 2017).

Plastic Index	Specific gravity	Maximum void ratio	Minimum void ratio
PI	G_s	e_{max}	e_{min}
3	2.70	1.14	0.62

Από το εδαφικό υλικό παρασκευάστηκαν κοίλα δοκίμια με σχετική πυκνότητα 50 %. Οι διαστάσεις των δοκίμων ήταν 60mm για την εσωτερική διάμετρο, 100mm για την εξωτερική και 200mm για το ύψος. Χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της ξηρής εναπόθεσης. Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή, το εδαφικό υλικό αρχικά ξηραίνεται στον κλίβανο και στη συνέχεια χωρίζεται σε ίσες ποσότητες για την έγχυση κάθε μιας ξεχωριστά (8 ποσότητες στη συγκεκριμένη μελέτη). Η ρίψη κάθε ποσότητας γίνεται με κουτάλι ή χωνί από μηδενική ύψος. Μετά τη ρίψη μιας ποσότητας η μήτρα δονείται εξωτερικά με τη χρήση ενός ελαστικού σφυριού για τη συμπύκνωση της στρώσης (εδώ για $D_r=50\%$). Στη συνέχεια η επιφάνεια της στρώσης χαράζεται για την καλύτερη πρόσφυσης της επόμενης στρώσης. Μετά τη διάστρωση του ξηρού δείγματος, ακολούθησε η διαδικασία του κορεσμού με τη μέθοδο της επιβολής κυκλοφορίας αρχικά του διοξειδίου του άνθρακα (CO_2) και στη συνέχεια του αραιωμένου νερού στο εσωτερικό του δοκιμίου, σε συνδυασμό με τη μέθοδο της ενδοπίεσης ως την τελική τιμή της back pressure των 400 kPa για την επίτευξη της τιμής της παραμέτρου $B>0.98$.

Τα δοκίμια υποβλήθηκαν σε ισότροπη στερεοποίηση υπό την επίδραση της ενεργής $p'_o = p'_i = 100 \text{ kPa}$. Μετά την ολοκλήρωση της στερεοποίησης διεξήχθησαν δοκιμές ελεγχόμενης παραμόρφωσης υπό σταθερή μέση τάση $p' = 100 \text{ kPa}$ και σταθερή παράμετρο $b = 0$. Σύμφωνα με τους Tatsuoka et al. (1986) η επίδραση της συχνότητας φόρτισης για το εύρος 0.05-1.0Hz είναι πρακτικά αμελητέα. Έτσι λοιπόν, επιλέχθηκε και επιβλήθηκε μια ημιτονοειδής σταθερού πλάτους κυκλική φόρτιση συχνότητας 1.0Hz υπό αστράγγιστες συνθήκες, ώστε να διασφαλιστεί ο ακριβής έλεγχος του σχήματος της διαδρομής τάσεων. Οι διαδρομές τάσεων που προέκυψαν από αστράγγιστες κυκλικές δοκιμές διάτμησης με ποικίλο προσανατολισμό των αξόνων των κύριων τάσεων, απεικονίζονται στο Σχήμα 4.79(α) και παρουσιάζονται ως γραμμές διαφορετικής κλίσης στο επίπεδο των εκτροπικών τάσεων. Σε όλες τις δοκιμές έλαβε χώρα μια απότομη μεταβολή της διεύθυνσης της κύριας τάσης κατά 90° . Η διεύθυνση της κύριας τάσης στην αρχή της κυκλικής φόρτισης ορίστηκε ως α_{so} , όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.79 (b) και η τιμή της κυμαινόταν μεταξύ $0 - 90^\circ$. Για την επιβολή τρισδιάστατης εντατικής κατάστασης επιβλήθηκε και η διατμητική τάση τ ως συνάρτηση της $(\sigma_1 - \sigma_3)/2$, Σχήμα 4.79(b). Σε όλες τις δοκιμές, ο προσανατολισμός της κύριας τάσης διατηρήθηκε στο α_{so} για τον πρώτο μισό κύκλο φόρτισης και μετά άλλαξε απότομα στο $90^\circ - \alpha_{so}$ για το δεύτερο μισό κύκλο φόρτισης (Σχήμα 4.79(c)), ενώ η διατμητική τάση εφαρμόστηκε ως ημιτονοειδής κύκλος (Σχήμα 4.79 (d)). Οι αρχικές συνθήκες φόρτισης των δοκιμών καθώς και οι τιμές του λόγου κυκλικής τάσης, CSR, παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.13.

Πραγματοποιήθηκαν συνολικά 15 δοκιμές στρεπτικής διάτμησης υπό αστράγγιστες συνθήκες με ενεργή πίεση $p'_o = 100 \text{ kPa}$ και σταθερή παράμετρο ενδιάμεσης κύριας τάσης $b = 0.5$, και ενδεικτικά αποτελέσματα αυτών των δοκιμών παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.80. Συγκεκριμένα, παρουσιάζονται αποτελέσματα δοκιμής με αρχική διεύθυνση της σ_1 την $\alpha_{so} = 22.5^\circ$ και λόγο κυκλικής τάσης $\text{CSR} = 0.15$. Δίνονται γραφικά η μεταβολή της μέσης ενεργής τάσης, της εκτροπικής τάσης, παραμέτρου ενδιάμεσης κύριας τάσης, της διεύθυνσης της μέγιστης κύριας τάσης, της πίεσης του νερού των πόρων και της εκτροπικής παραμόρφωσης. Παρατηρείται πως η μέση ενεργή τάση και η παράμετρος της ενδιάμεσης κύριας τάσης είναι σταθερά κατά την επιβολή της κυκλικής φόρτισης. Αντιθέτως, η εκτροπική τάση και η διεύθυνση της μέγιστης κύριας τάσης μεταβάλλονται κυκλικά. Επίσης, η πίεση του νερού των πόρων αυξάνεται σταδιακά ώσπου να φτάσει την τιμή της ενεργής μέσης τάσης $p'_o = 100 \text{ kPa}$, και σε αυτό το σημείο θεωρείται πως λαμβάνει χώρα το φαινόμενο της ρευστοποίησης. Θεωρείται πως η αρχική ρευστοποίηση συμβαίνει με μια απότομη ανάπτυξη της υπερπίεσης του νερού των πόρων που εκδηλώνεται με μια απότομη αύξηση της εκτροπικής παραμόρφωσης.



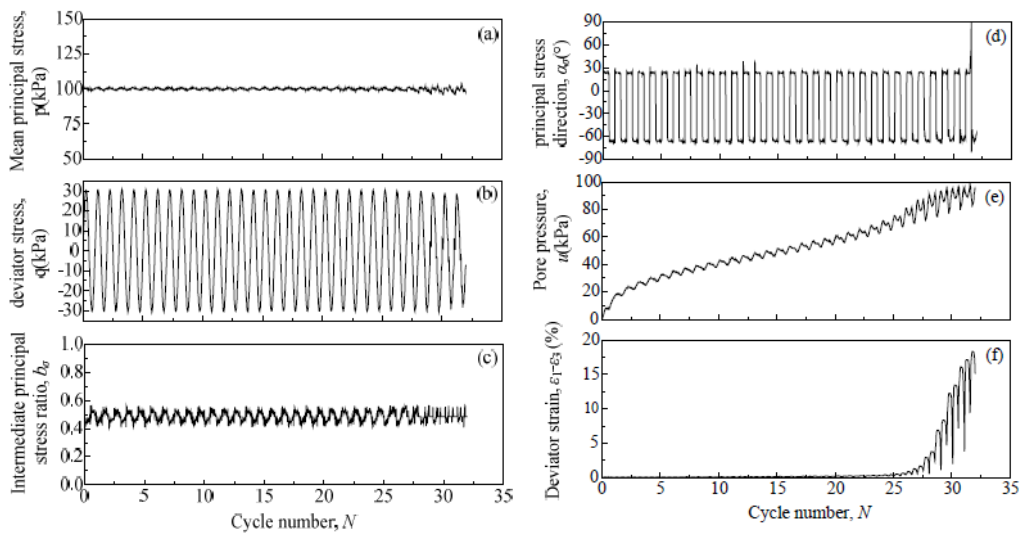
Σχήμα 4.79: Διαδρομές τάσεων (Zhenglong et al., 2017).

Πίνακας 4.13: Συνθήκες φόρτισης (Zhenglong et al., 2017).

Case ID	Effective mean confining stress p'_0 (kPa)	The intermediate principal stress coefficient b	Initial loading principal stress direction $\alpha_{\sigma 0}$ ($^\circ$)	Cyclic stress ratio $CSR = \tau_{cy} / 2 p'_0$
C1	100	0.5	0	0.10
C2	100	0.5	0	0.15
C3	100	0.5	0	0.20
C4	100	0.5	22.5	0.10
C5	100	0.5	22.5	0.15
C6	100	0.5	22.5	0.20
C7	100	0.5	45	0.10
C8	100	0.5	45	0.15
C9	100	0.5	45	0.20
C10	100	0.5	67.5	0.10
C11	100	0.5	67.5	0.15
C12	100	0.5	67.5	0.20
C13	100	0.5	90	0.10
C14	100	0.5	90	0.15
C15	100	0.5	90	0.20

Η υπερπίεση του νερού των πόρων συχνά εκφράζεται με τον όρο του λόγου της πίεσης πόρων, που ορίζεται ως εξής:

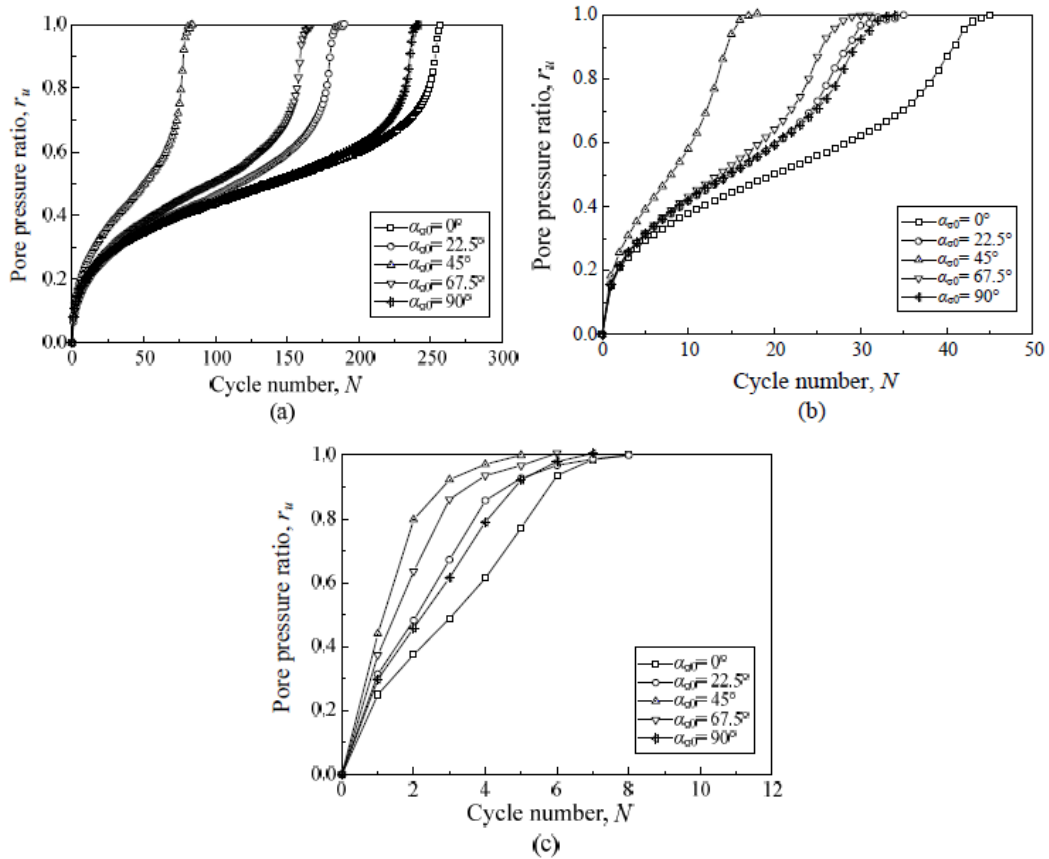
$$r_u = u / p'_0 \quad (4.35)$$



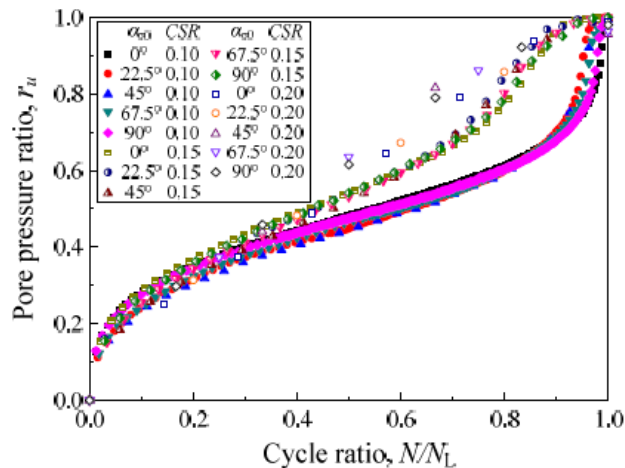
Σχήμα 4.80: Ενδεικτικά αποτελέσματα για δοκιμή με $\alpha_{\sigma 0}=22.5^\circ$ και $CSR=0.15$ (Zhenglong et al., 2017).

Στο Σχήμα 4.81 παρουσιάζεται η μεταβολή του λόγου της πίεσης πόρων με τον αριθμό των κύκλων φόρτισης για διάφορες τιμές της $\alpha_{\sigma 0}$ ($0, 22.5^\circ, 45^\circ, 67.5^\circ$ & 90°) και του CSR ($0.10, 0.15$ & 0.20). Είναι ξεκάθαρο πως η ανάπτυξη της υπερπίεσης του νερού των πόρων κατά την κυκλική φόρτιση εξαρτάται από τη διεύθυνση του άξονα της μέγιστης κύριας τάσης καθώς και από το λόγο της κυκλικής τάσης. Η πιο ταχεία ανάπτυξη της υπερπίεσης του νερού των πόρων παρατηρείται για $\alpha_{\sigma 0}=45^\circ$ ανεξάρτητα από την τιμή του CSR . Επίσης παρατηρείται ταχύτερη ανάπτυξη της υπερπίεσης του νερού των πόρων με την αύξηση του CSR . Οι διαφορές στις τιμές του r_u λόγω της $\alpha_{\sigma 0}$ μειώνονται με την αύξηση του CSR .

Στο Σχήμα 4.82 παρουσιάζεται η μεταβολή του λόγου της πίεσης πόρων r_u με τον κανονικοποιημένο αριθμό των κύκλων φόρτισης, N/N_L . Όπου N_L είναι ο αριθμός των κύκλων φόρτισης που απαιτείται για την ανάπτυξη του $r_u = 1$. Στη σχέση αυτή δεν παρατηρείται επίδραση της $\alpha_{\sigma 0}$, ενώ εξαρτάται από την τιμή του CSR . Συγκεκριμένα, για $CSR=0.10$, η καμπύλη μεταβολής του r_u με το N/N_L χωρίζεται σε τρία τμήματα με δύο σημεία μεταβολής της κλίσης. Στο πρώτο και στο τρίτο τμήμα παρατηρείται εντονότερη κλίση συγκριτικά με το δεύτερο. Για $CSR=0.15$ τα συμπεράσματα είναι ίδια με αυτά για την περίπτωση $CSR=0.10$, εκτός από τα σημεία μεταβολής της κλίσης που είναι μακριά από τη ρευστοποίηση. Τέλος για $CSR=0.20$ η καμπύλη είναι υπερβολική χωρίς σημεία μεταβολής.



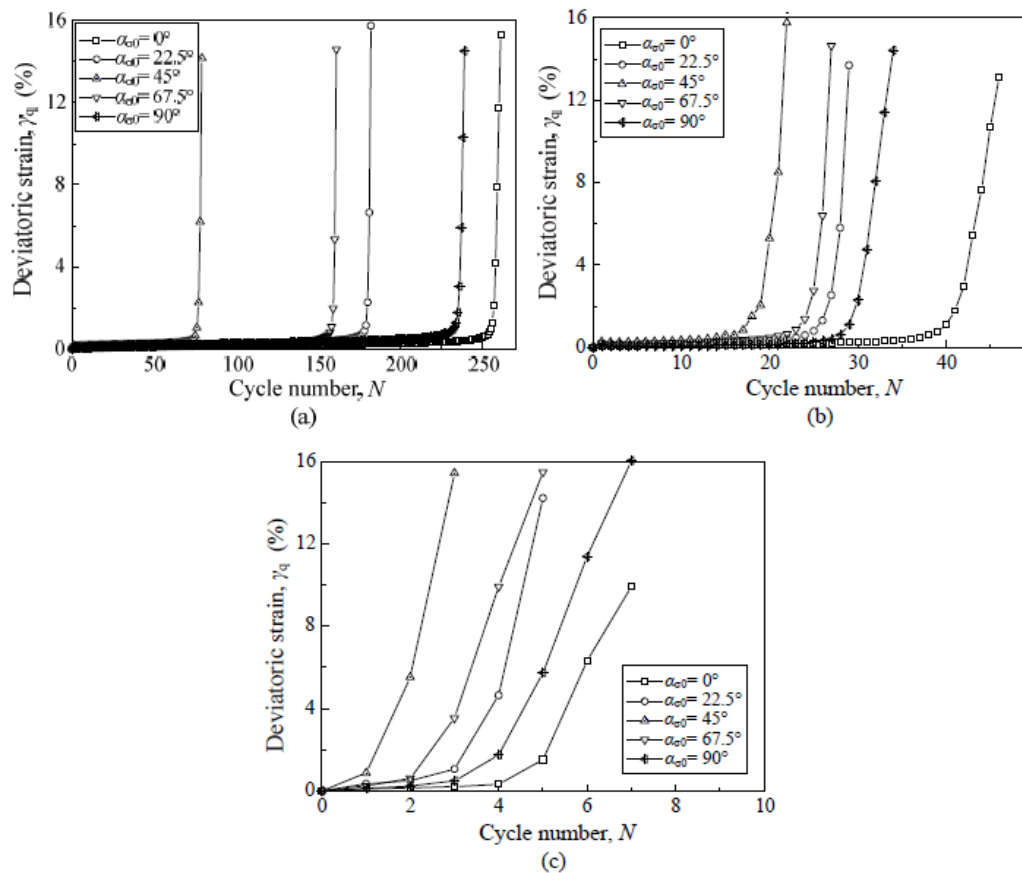
Σχήμα 4.81: Μεταβολή του λόγου υπερπίεσης του νερού των πόρων συναρτήσει των κύκλων φόρτισης για διάφορες τιμές της $\alpha_{\sigma 0}$ και για CSR=0.10 (α), CSR=0.15 (β) & CSR=0.20 (γ) (Zhenglong et al., 2017).



Σχήμα 4.82: Μεταβολή του λόγου υπερπίεσης του νερού των πόρων συναρτήσει του κανονικοποιημένου αριθμού κύκλων φόρτισης για διάφορες τιμές του $\alpha_{\sigma 0}$ και CSR (Zhenglong et al., 2017).

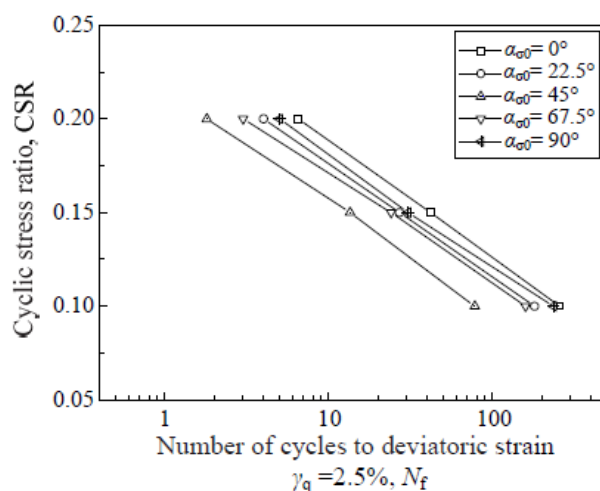
Η μεταβολή της εκτροπικής παραμόρφωσης με τον αριθμό των κύκλων φόρτισης παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.83. Παρατηρείται πολύ μικρή ανάπτυξη της παραμόρφωσης μέχρι έναν αριθμό N , πέραν του οποίου η παραμόρφωση αυξάνεται

απότομα μέχρι την αστοχία. Το έδαφος γίνεται πιο επιρρεπής στη ρευστοποίηση για $\alpha_{\sigma 0} = 45^\circ$, ενώ πιο ανθεκτικό για $\alpha_{\sigma 0} = 0^\circ$.



Σχήμα 4.83: Μεταβολή της εκτροπικής παραμόρφωσης με τον αριθμό των κύκλων φόρτισης για διάφορες τιμές της της $\alpha_{\sigma 0}$ και για CSR=0.10 (α), CSR=0.15 (β) & CSR=0.20 (γ) (Zhenglong et al., 2017).

Στο Σχήμα 4.84 παρουσιάζεται η σχέση του λόγου κυκλικής τάσης και του αριθμού κύκλων στην αστοχία, που αντιστοιχεί βάσει της βιβλιογραφίας στην ανάπτυξης της $\gamma_q = 2.5\%$. Παρατηρείται μια σαφής μείωση του CSR με το N_f . Η μείωση αυτή είναι γραμμική σε ημιλογαριθμικό διάγραμμα με την ίδια κλίση για όλες τις $\alpha_{\sigma 0}$, αλλά με την ελάχιστη αντοχή για $\alpha_{\sigma 0} = 45^\circ$ και τη μέγιστη για $\alpha_{\sigma 0} = 0^\circ$. Η αύξηση της $\alpha_{\sigma 0}$ από 0 έως 45° οδηγεί σε μείωση της εδαφικής δυσκαμψίας ενώ η περαιτέρω αύξηση για $\alpha_{\sigma 0} (>45^\circ)$ οδηγεί σε αύξησή της. Η ελάχιστη αντοχή παρατηρείται όταν το επίπεδο αστοχίας είναι παράλληλο με το επίπεδο εναπόθεσης των κόκκων (εδώ για $\alpha_{\sigma 0} = 45^\circ$). Οι αντίστοιχες τιμές που αναφέρονται στη βιβλιογραφία είναι για $\alpha_{\sigma 0} = 60^\circ$, όμως προέρχονται από δοκιμές σε πυκνές άμμους (Sato & Yoshida, 1999). Η διαφορά αυτή αποδίδεται στη διαφορετική εδαφική δομή, του σχήματος κόκκων και της ορυκτολογικής σύστασης μεταξύ της άμμου και της λύσος.



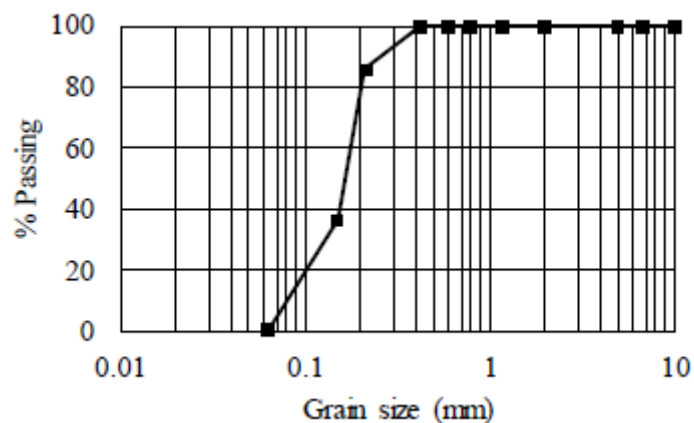
Σχήμα 4.84: Σχέση του λόγου κυκλικής τάσης CSR με τον αριθμό κύκλων στην αστοχία, N_f , σε καθορισμένο επίπεδο παραμόρφωσης $\gamma_q=2.5\%$ (Zhenglong et al., 2017).

Τα κυριότερα συμπεράσματα της μελέτης των Zhenglong et al. (2017) για την ιλύ είναι τα εξής: (α) η επίδραση της διεύθυνσης του άξονα της μέγιστης κύριας τάσης, α_{σ_0} , στην ανάπτυξη υπερπίεσης του νερού των πόρων και των παραμορφώσεων κατά την επιβολή κυκλικής φόρτισης είναι σημαντική, και (β) η χαμηλότερη τιμή της κυκλικής αντοχής παρατηρείται για $\alpha_{\sigma_0}=45^\circ$.

4.9 Επίδραση της διεύθυνσης του άξονα της κύριας τάσης στη ρευστοποίηση άμμων

Σύμφωνα με τους Ishihara et al. (1985) και τους Sivathayalan et al. (2014): (α) η διεύθυνση και η στροφή των αξόνων των κύριων τάσεων ως προς τον άξονα του εδάφους (που είναι η διεύθυνση της εναπόθεσης των κόκκων) επηρεάζουν σημαντικά τον απαιτούμενο αριθμό κύκλων φόρτισης για τη ρευστοποίηση του εδάφους, (β) ο απαιτούμενος λόγος των κυκλικών τάσεων για τη ρευστοποίηση του εδάφους μειώνεται σημαντικά με τη συνεχή στροφή των αξόνων των κύριων τάσεων (πχ κατά την επιβολή μιας κυκλικής διαδρομής τάσεων με διαφορά φάσης 90° μεταξύ της τριαξονικής και της στρεπτικής φόρτισης), και (γ) η συνεχής στροφή παρά η απότομη μεταβολή κατά 90° των αξόνων των κύριων τάσεων έχει μεγαλύτερη επίδραση στο φαινόμενο ρευστοποίησης. Παρότι οι πιο διαδεδομένες πειραματικές μέθοδοι για την επιβολή κυκλικής φόρτισης στα εδάφη είναι η κυκλική τριαξονική φόρτιση, η απλή κυκλική διάτμηση και κυκλική στρεπτική διάτμηση, δεν είναι εφικτή η επιβολή της στροφής των αξόνων των κύριων τάσεων. Ωστόσο, η σεισμική δράση στους εδαφικούς σχηματισμούς περιλαμβάνει στροφή των αξόνων των κύριων τάσεων ως αποτέλεσμα του συνδυασμού των κυκλικών κατακόρυφων και οριζόντιων τάσεων. Για το σκοπό αυτό και συμπληρωματικά στις παραπάνω μελέτες, οι Diambra et al. (2019), ασχολήθηκαν με την πειραματική διερεύνηση του θέματος.

Το υλικό που μελετήθηκε από τους Diambra et al. (2019) είναι η πυριτική άμμος Red Hill 110, Σχήμα 4.85. Η άμμος αποτελείται από ημιστρογγυλούς κόκκους, έχει μέσο μέγεθος κόκκων $D_{50}=0.17\text{mm}$, συντελεστή ομοιομορφίας $C_u=2.25$, ειδικό βάρος στερεών κόκκων $G_s=2.65$, και ελάχιστο και μέγιστο δείκτη πόρων 0.608 και 1.035 αντίστοιχα.



Σχήμα 4.85: Κοκκομετρική καμπύλη της άμμου Red Hill 110 (Diambra et al., 2019).

Για τις δοκιμές χρησιμοποιήθηκε η συσκευή κούλου κυλινδρικού δοκιμίου (HCA) στο University of Bristol. Τα εδαφικά δοκίμια είχαν τυπικό κούλο κυλινδρικό σχήμα με 100mm εξωτερική διάμετρο, 60mm εσωτερική διάμετρο και 200mm ύψος, Σχήμα 4.86. Η γεωμετρία του δοκιμίου συμβάλλει στην ελαχιστοποίηση της ανομοιομορφίας ανάπτυξης τάσεων. Για την προετοιμασία των δοκιμών επιλέχθηκε η μέθοδος της ξηρής εναπόθεσης. Η ρίψη της άμμου εντός της μεταλλικής μήτρας έγινε μέσω ενός χωνιού, το οποίο μετακινούνταν διαρκώς στη βάση της μήτρας και πάντα σε μηδενικό ύψος από το επίπεδο της άμμου που είχε ήδη εγχυθεί. Για την επίτευξη μεγαλύτερης πυκνότητας εφαρμόστηκε μικρή δόνηση. Τα δοκίμια μελετήθηκαν σε συνθήκες πλήρους κορεσμού, ο οποίος εφαρμόστηκε με τις μεθόδους του CO_2 , της διέλευσης απαερωμένου νερού και της επιβολής back pressure έως το επίπεδο των 300kPa. Η ονομαστική πυκνότητα των δοκιμών ήταν $D_r=50\%$. Μετά τον κορεσμό, το δοκίμιο υποβλήθηκε σε ισότροπη στερεοποίηση με τη χειροκίνητη ρύθμιση της πίεσης της κυψέλης ($\sigma'_r=50\text{kPa}$).

Το πρόγραμμα δοκιμών περιλάμβανε 8 δοκιμές κυκλικής φόρτισης υπό αστράγγιστες συνθήκες σε διαφορετικές διευθύνσεις φόρτισης, α_σ , και σε δύο επίπεδα του λόγου κυκλικών τάσεων, CSR, 0.12 και 0.16, Πίνακας 4.14. Ο αριθμός των κύκλων προσδιορίστηκε στην κατάσταση ρευστοποίησης, δηλαδή όταν η ενεργός τάση μηδενίστηκε λόγω της αναπτυσσόμενης υπερπίεσης του νερού των πόρων. Στον προσδιορισμό των κύκλων φόρτισης ελήφθη υπόψη η επίδραση της μεμβράνης. Η συχνότητα της κυκλικής φόρτισης ήταν 0.1Hz, το αξονικό φορτίο και η στρεπτική ροπή είχαν ημιτονοειδή μορφή και ήταν σε φάση μεταξύ τους (ταυτόχρονη επιβολή των μέγιστων).



Σχήμα 4.86: Εδαφικό δοκίμιο (Diambra et al., 2019).

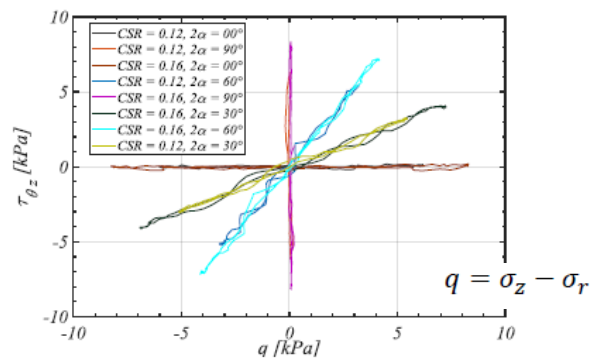
Πίνακας 4.14: Συνθήκες δοκιμών (Diambra et al., 2019).

Name	CSR	$2\alpha_\sigma$	D_r (%)	No. cycles
T0.12_00	0.12	0°	49	83
T0.12_30	0.12	30°	51	26
T0.12_60	0.12	60°	50	43
T0.12_90	0.12	90°	59	132
T0.16_00	0.16	0°	49	12
T0.16_30	0.16	30°	48	7
T0.16_60	0.16	60°	49	14
T0.16_90	0.16	90°	60	27

Ο λόγος των κυκλικών τάσεων υπολογίζεται από την Εξίσωση 4.36.

$$CSR = \frac{q_{cyc}}{p'_0} \quad (4.36)$$

Όπου q_{cyc} είναι το μήκος του κύκλου στο επίπεδο $\tau_{\theta z}$ - q , Σχήμα 4.87. Παρατηρείται στο σχήμα πως υπάρχει συμμετρία στις τάσεις.



Σχήμα 4.87: Διαδρομές τάσεων για CSR=0.12 και CSR=0.16 στο επίπεδο (Diambra et al., 2019).

Τα υπόλοιπα μεγέθη των δοκιμών υπολογίστηκαν από τις παρακάτω εξισώσεις και βάσει του Σχήματος 4.88:

$$p' = \frac{\sigma_z + \sigma_\theta + \sigma_r}{3} - \mu = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} - \mu \quad (4.37)$$

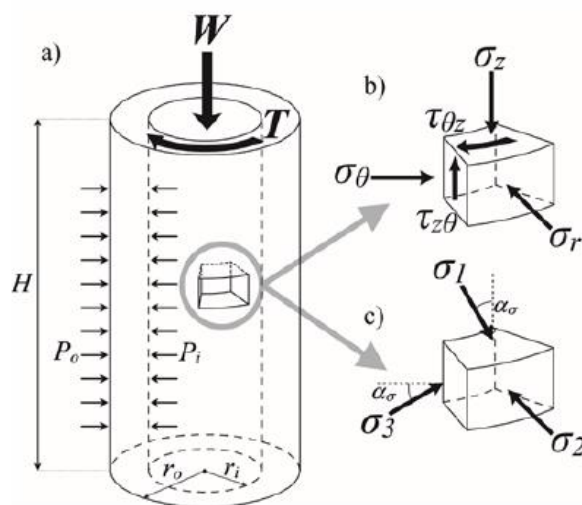
Όπου μ η πίεση του νερού των πόρων του δοκιμίου

$$q_g = \sqrt{\frac{(\sigma_z - \sigma_r)^2 + (\sigma_r - \sigma_\theta)^2 + (\sigma_\theta - \sigma_z)^2}{2} + 3\tau_{\theta z}^2} \quad (4.38)$$

$$b = \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} \quad (4.39)$$

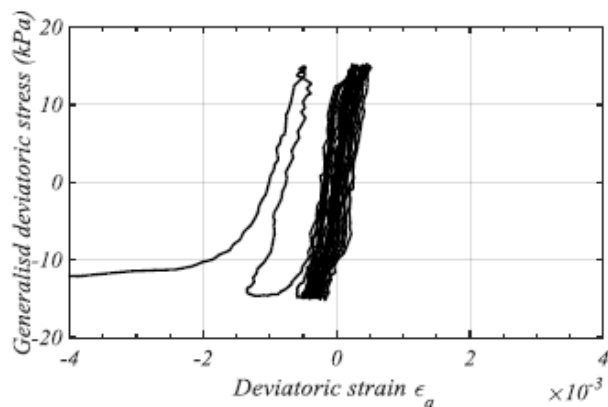
$$\alpha_\sigma = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{2\tau_{\theta z}}{\sigma_z - \sigma_\theta} \right) \quad (4.40)$$

$$\varepsilon_q = \frac{1}{3} \sqrt{4(\varepsilon_z - \varepsilon_r)^2 + 3\gamma_{\theta z}^2} \quad (4.41)$$



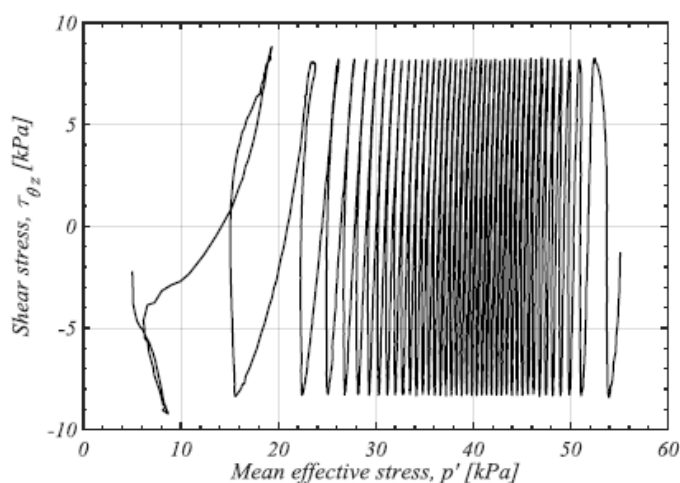
Σχήμα 4.88: Συνθήκες φόρτισης και αναπτυσσόμενες τάσεις (Diambra et al., 2019).

Τυπικά αποτελέσματα με τη μεταβολή της εκτροπικής τάσης με την παραμόρφωση κατά τη διάρκεια της κυκλικής φόρτισης, παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.89. Η συμπεριφορά του εδάφους χαρακτηρίζεται από μια αρχική άκαμπτη απόκριση με περιορισμένη συσσωρευμένη πλαστική παραμόρφωση (ε_q) μέχρι την ενεργοποίηση των συνθηκών ρευστοποίησης.



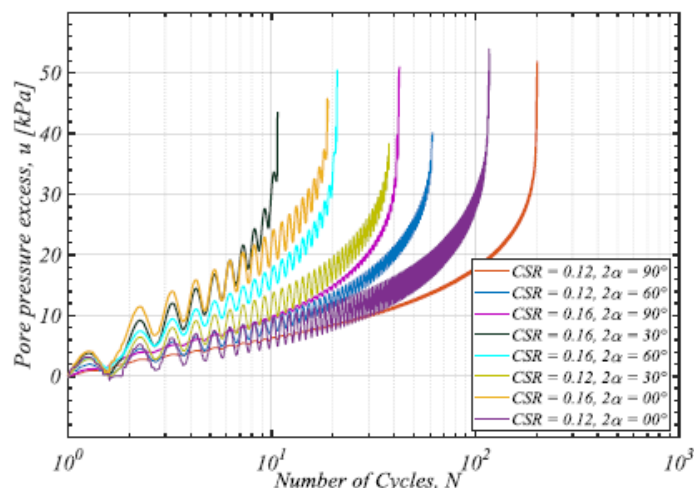
Σχήμα 4.89: Μεταβολή εκτροπικής τάσης με την παραμόρφωση, T0.16_60 (Diambra et al., 2019).

Όπως ήταν αναμενόμενο, σημειώθηκε προοδευτική αύξηση της πίεσης του νερού των πόρων κατά την διάρκεια των αστράγγιστων κυκλικών δοκιμών. Τυπικά αποτελέσματα της διαδρομής ενεργών τάσεων στο επίπεδο $\tau_{\theta z}$ - p' παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.90 για δοκίμιο με $2\alpha_{\sigma}=90^{\circ}$. Μεγάλες τιμές της πίεσης πόρων παρουσιάζονται από τους δύο πρώτους κύκλους φόρτισης, ενώ οι επόμενοι κύκλοι είναι πολύ κοντά ο ένας στον άλλον. Αυτό δηλώνει μικρή μεταβολή στην ενεργή μέση τάση μέχρι τους τελευταίους δύο ή τρεις κύκλους πριν τη ρευστοποίηση όπου μεγάλες πιέσεις πόρων καταγράφονται.



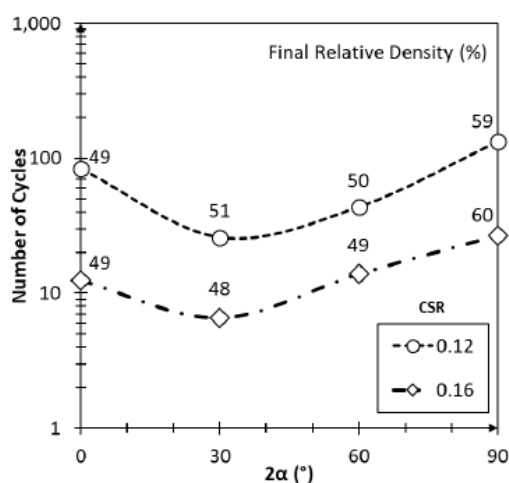
Σχήμα 4.90: Διαδρομή τάσεων στο επίπεδο $\tau_{\theta z}$ - p' , T0.16_60 (Diambra et al., 2019).

Η προοδευτική ανάπτυξη της υπερπίεσης του νερού των πόρων με τον αυξανόμενο αριθμό των κύκλων φόρτισης παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.91. Το σχήμα αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό του απαιτούμενου αριθμού των κύκλων φόρτισης για την ενεργοποίηση της ρευστοποίησης.



Σχήμα 4.91: Ανάπτυξη της υπερπίεσης του νερού των πόρων για όλες τις δοκιμές (Diambra et al., 2019).

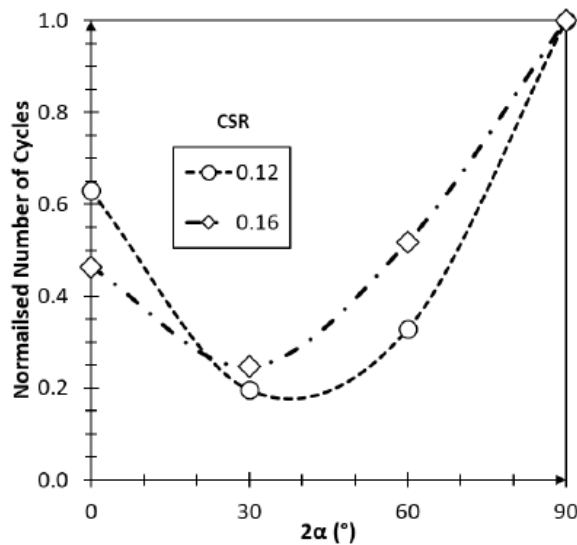
Ο αριθμός των κύκλων φόρτισης που απαιτούνται για την ενεργοποίηση της ρευστοποίησης έναντι της κλίσης $2\alpha_\sigma$ των κύριων αξόνων τάσης, παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.92. Επισημαίνεται πως η όταν η στροφή των αξόνων των κύριων τάσεων είναι διαφορετική από αυτήν στην καθαρή συμπίεση ($2\alpha_\sigma=0^\circ$) και στην καθαρή στρέψη ($2\alpha_\sigma=90^\circ$) ο απαιτούμενος αριθμός κύκλων μειώνεται. Η χαμηλότερη αντίσταση στην ρευστοποίηση εμφανίζεται στην κλίση $\alpha_\sigma=15^\circ$.



Σχήμα 4.92: Μεταβολή του αριθμού των κύκλων φόρτισης στη ρευστοποίηση με την κλίση $2\alpha_\sigma$ (Diambra et al., 2019).

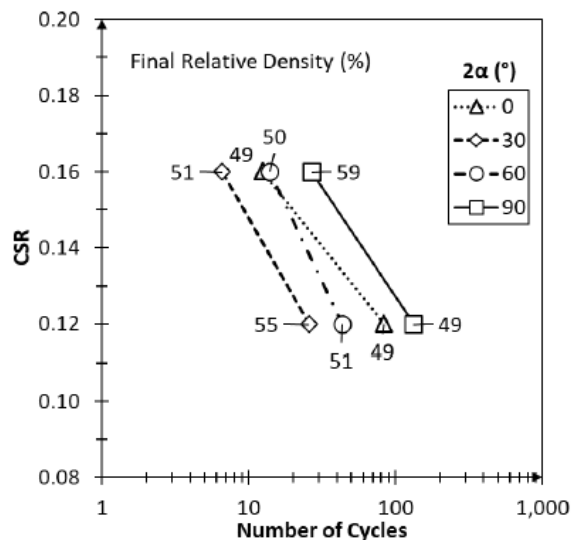
Εάν ο αριθμός των κύκλων φόρτισης που απαιτούνται για την ενεργοποίηση της ρευστοποίησης κανονικοποιηθεί με τον αριθμό κύκλων φόρτισης στην καθαρή στρέψη ($2\alpha_\sigma=90^\circ$), τότε τα αποτελέσματα των δοκιμών παίρνουν τη μορφή του Σχήματος 4.93. Παρατηρείται πως ο αριθμός κύκλων που απαιτείται στην κλίση

$2\alpha_{\sigma}=30^{\circ}$ είναι το $1/5$ του αριθμού κύκλων στην καθαρή στρέψη, και το $1/2$ έως $1/3$ στην καθαρή συμπίεση, όπου όμως πρέπει να ληφθεί υπόψη και η επίδραση της πυκνότητας.



Σχήμα 4.93: Μεταβολή του κανονικοποιημένου αριθμού των κύκλων φόρτισης στη ρευστοποίηση με την κλίση $2\alpha_{\sigma}$ (Diambra et al., 2019).

Η αντίσταση σε ρευστοποίηση με τον αριθμό κύκλων φόρτισης παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.94.



Σχήμα 4.94: Σχέση του λόγου κυκλικής τάσης CSR με τον αριθμό κύκλων στην αστοχία, N , (Diambra et al., 2019).

Τα κυριότερα συμπεράσματα της μελέτης των Diambra et al. (2019) για την άμμο που μελετήθηκε είναι τα εξής: (α) η επίδραση της διεύθυνσης του άξονα της μέγιστης

κύριας τάσης, α_{σ_0} , στην ανάπτυξη υπερπίεσης του νερού των πόρων κατά την επιβολή κυκλικής φόρτισης είναι σημαντική, και (β) η χαμηλότερη τιμή της κυκλικής αντοχής έναντι ρευστοποίησης παρατηρείται για $\alpha_{\sigma_0}=15^\circ$.

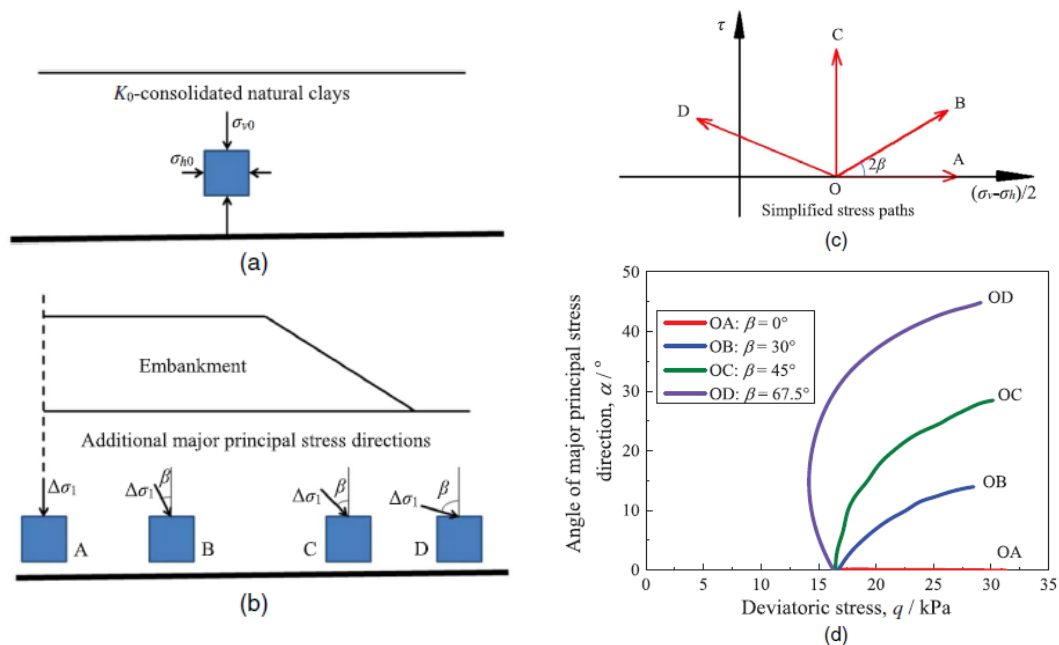
4.10 Επίδραση της στροφής των αξόνων των κύριων τάσεων και της μη-ομοαξονικότητας στη συμπεριφορά K_0 -στερεοποιημένης φυσικής αργίλου

Η κατάσταση της στροφής των αξόνων των κύριων τάσεων στο έδαφος συναντάται μεταξύ άλλων στις φάσεις κατασκευής εκσκαφών και επιχωμάτων (η στροφή λαμβάνει χώρα με την αύξηση του ύψους της επίχωσης). Στο Σχήμα 4.95(b) παρουσιάζεται η μεταβολή της διεύθυνσης του άξονα της μέγιστης κύριας τάσης στο έδαφος στήριξης (φυσικό αργιλικό έδαφος) ενός επιχώματος σε διάφορα εδαφικά στοιχεία της βάσης του επιχώματος. Η φυσική άργιλος έχει ανισότροπα στερεοποιηθεί (K_0) και η κατακόρυφη τάση (σ_{v0}) είναι μεγαλύτερη από την οριζόντια τάση (σ_{h0}), Σχήμα 4.95(a). Η διαδρομή τάσεων σε κάθε εδαφικό στοιχείο λόγω του φορτίου του επιχώματος παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.95(c). Στο Σχήμα 4.95(d) δίνεται η σχέση της διεύθυνσης του άξονα των κύριων τάσεων με την κατακόρυφο (γωνία α) με την εκτροπική τάση. Σε αυτές τις συνθήκες οι άργιλοι εμφανίζουν ανισότροπη συμπεριφορά που οφείλεται τόσο στην εγγενή ανισοτροπία (φυσική εδαφική δομή και K_0 στερεοποίηση) όσο και στην ανισοτροπία λόγω φόρτισης.

Τα σωματίδια της αργίλου τείνουν να προσανατολιστούν με το μεγάλο τους άξονα κάθετο στον άξονα της εναπόθεσης των κόκκων και του άξονα της φόρτισης κατά την K_0 στερεοποίηση, για αυτό και αποκτά εγγενή ανισοτροπία. Η αντοχή και η σχέση τάσεων – παραμορφώσεων στην άργιλο εξαρτάται από τον προσανατολισμό των αργιλικών σωματιδίων. Οι αρχικές μελέτες της ανισότροπης συμπεριφοράς αυτών των αργίλων έγιναν στη συσκευή τριαξονικής φόρτισης, στην οποία ωστόσο μόνο η πίεση κυψέλης και η εκτροπική τάση ελέγχονται. Για το λόγο αυτό, οι έρευνες που ακολούθησαν έγιναν σε δοκίμια που διαμορφώθηκαν σε άξονες διαφορετικούς από τον άξονα εναπόθεσης (Kirkgaard & Lade, 1991). Ωστόσο τα κεκλιμένα δοκίμια δεν παραμορφώνονται συμμετρικά και τα αποτελέσματα των δοκιμών τους δεν είναι αξιόπιστα. Έτσι λοιπόν η καταλληλότερη τεχνική θεωρείται η στροφή των αξόνων των τάσεων σε κατακόρυφα δοκίμια και για το λόγο αυτό αναπτύχθηκαν ειδικές συσκευές. Σε μια τέτοια συσκευή στρεπτικής φόρτισης, οι Sture et al (1987) μελέτησαν τη σχέση μεταξύ του βαθμού ανισοτροπίας στη δυσκαμψία πυκνής άμμου με τη διατμητική παραμόρφωση, και παρατήρησαν πως μεγάλες παραμορφώσεις λαμβάνουν χώρα με τη στροφή των αξόνων των τάσεων ακόμη και στην περίπτωση που το μέγεθος των τελευταίων είναι σταθερό. Στη συνέχεια, οι επόμενες έρευνες έγιναν κυρίως σε συσκευές τύπου HCA που επικεντρώθηκαν σε κοκκώδη εδάφη και σπανίως σε αργιλικά, πολύ δε περισσότερο σε φυσικές αργίλους.

Υπό το καθεστώς της σταθερής διεύθυνσης ή της στροφής των αξόνων των κύριων τάσεων, ακολούθησαν έρευνες πάνω στην επίδραση της μη-ομοαξονικότητας

κοκκωδών εδαφών, που ως η απόκλιση της διεύθυνσης της αύξησης της κύριας παραμόρφωσης από τη διεύθυνση της αντίστοιχης κύριας τάσης. Η έννοια της μη-ομοαξονικότητας εισάχθηκε από τους Roscoe et al. (1967), και μελετήθηκε στη συσκευή απλής διάτμησης. Οι Qian et al. (2017) και οι Wang et al. (2018) ήταν οι πρώτοι που μελέτησαν το θέμα της μη-ομοαξονικότητας σε αργιλικά εδάφη (Shanghai clay & Wenzhou clay), ελέγχοντας την παράμετρο της ενδιάμεσης κύριας τάσης, b , και τις συνθήκες στράγγισης, αλλά υπό αρχική ισότροπη στερεοποίηση των δοκιμίων ($K_0=1$). Ωστόσο, οι Lade & Kirkgard (2000) έδειξαν πως τα K_0 ανισότροπα αργιλικά δοκίμια συμπεριφέρονται διαφορετικά από τα ισότροπα στερεοποιημένα, με τα τελευταία να παρουσιάζουν αλλοίωση της εδαφικής δομής και μείωση της μηχανικής αντοχής. Για το λόγο αυτό οι Wang et al. (2019) μελέτησαν την επίδραση της διεύθυνσης των κύριων τάσεων και της μη-ομοαξονικότητας στην Wenzhou clay υπό αρχική ανισότροπη στερεοποίηση, με σκοπό να χρησιμοποιηθούν στο σχεδιασμό επιχωμάτων.



Σχήμα 4.95: Εντατικές καταστάσεις στο έδαφος κάτω από ένα επίχωμα (Wang et al., 2019).

Αρχικά η θεωρία της πλαστικότητας βασίστηκε στην ομοαξονικότητα, δηλαδή στο ότι η διεύθυνση της αύξησης της κύριας παραμόρφωσης συμπίπτει με αυτήν της αντίστοιχης κύριας τάσης. Στη συνέχεια η κλασική θεωρία πλαστικότητας άρχισε να ενσωματώνει τα αποτελέσματα της μη-ομοαξονικότητας που ωστόσο προέρχονταν από πειράματα σε χάλικες και άμμους και να αναπτύσσονται εξελιγμένοι καταστατικοί νόμοι, όπως αυτός των Gutierrez & Ishihara (2000). Τα προβλήματα που αφορούσαν στα αργιλικά εδάφη είναι: (α) η αδυναμία αδιατάρακτης δειγματοληψίας φυσικών αργιλικών K_0 δειγμάτων, (β) οι δοκιμές K_0 στερεοποίησης έχουν μεγάλη διάρκεια, και (γ) ο απαιτούμενος εργαστηριακός εξοπλισμός είναι ειδικός και όχι ο κλασικός συμβατικός.

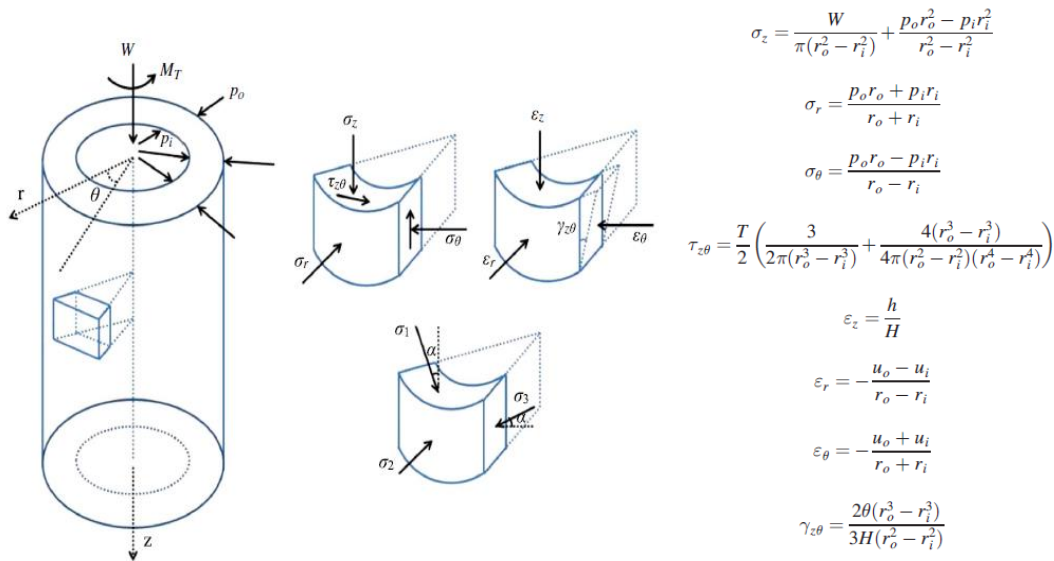
Στη μελέτη των Wang et al. (2019) χρησιμοποιήθηκε η συσκευή 5-Hz Dynamic Hollow Cylinder Apparatus (DYNHCA) της εταιρίας GDS (Global Digital Systems). Τα χαρακτηριστικά του εξοπλισμού δίνονται στον Πίνακα 4.15. Οι εξισώσεις που χρησιμοποιήθηκαν είναι αυτές που παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.96 μαζί με το σχηματικό διάγραμμα της εντατικής κατάστασης του δοκιμίου. Το έδαφος που μελετήθηκε είναι η Wenzhou clay, η οποία προέρχεται από την ομώνυμη παραθαλάσσια πόλη της Κίνας, και είναι αναγνωρισμένη ως ένα πολύ προβληματικό αργιλικό έδαφος με μεγάλη υγρασία και συμπιεστότητα καθώς και χαμηλή διαπερατότητα και αντοχή, Πίνακας 4.16. Η δειγματοληψία έγινε σε εκσκαφή 3m, με μεταλλικούς λεπτότοιχους σωλήνες διαμέτρου 160mm και μήκους 250mm. Η διατάραξη λόγω δειγματοληψίας εκτιμήθηκε από το λόγο $\Delta e/e_0$ (Lunne et al., 2006). Η στερεοποίηση των δοκιμών στην τάση πεδίου έδωσε μια τιμή του λόγου $\Delta e/e_0 = 5.6\%$ και η ποιότητα του δείγματος χαρακτηρίζεται ως καλή. Τα δοκίμια που διαμορφώθηκαν είχαν τυπικό κοίλο κυλινδρικό σχήμα με 100mm εξωτερική διάμετρο, 60mm εσωτερική διάμετρο και 200mm ύψος. Για τη μείωση του χρόνου στερεοποίησης τοποθετήθηκαν πλευρικά στραγγιστήρια στην εξωτερική επιφάνεια των δοκιμών πριν την τοποθέτηση της μεμβράνης. Για τον κορεσμό επιβλήθηκε back pressure 300kPa υπό σταθερή ενεργή τάση $p' = 10\text{kPa}$ ($B > 0.98$). Ακολούθησε η στερεοποίηση του δοκιμίου σε $K_0 = 0.55$, Σχήμα 4.97.

Πίνακας 4.15: Τεχνικά χαρακτηριστικά του εξοπλισμού DYNHCA (Wang et al., 2019).

Transducer	Measurement range	Resolution
Vertical load cell	0–3 kN	0.3 N
Torque transducer	0–30 Nm	0.03 Nm
Vertical displacement transducer	0–40 mm	0.001 mm
Rotating angle transducer	Without restriction	0.0036°
Pressure transducer (inner/outer cell pressure and back-pressure)	0–2 MPa	0.5 kPa
Volume change transducers (inner/outer cell pressure and back-pressure)	0–200 cm ³	1 mm ³
Pore-water pressure transducer	0–1 MPa	0.5 kPa

Πίνακας 4.16: Φυσικά χαρακτηριστικά της αργίλου Wenzhou (Wang et al., 2019).

Index property	Value
Specific gravity, G_s (g/cm ³)	2.75
Natural water content, w_n (%)	56–59
Initial density, ρ_0 (g/cm ³)	1.68–1.71
Initial void ratio, e_0	1.55–1.59
Liquid limit, w_L (%)	64
Plasticity index, I_p	36
Clay fraction (%)	55
Silt fraction (%)	41



Σχήμα 4.96: Εντατική κατάσταση του δοκιμίου (Wang et al., 2019).

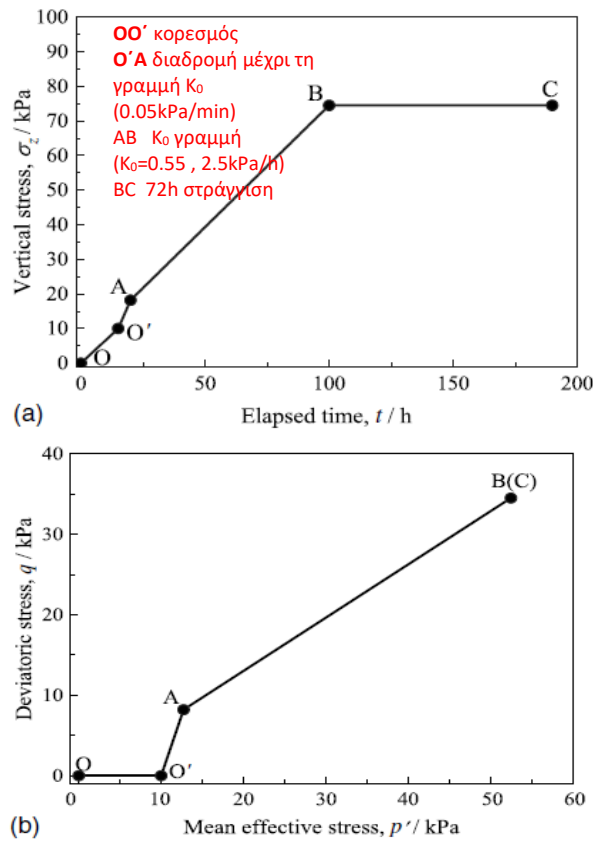
Η εντατική κατάσταση στο δοκίμιο στο τέλος της K_0 στερεοποίησης και πριν την επιβολή της διάτμησης περιγράφεται ως: $\sigma'_{z0}=74.5\text{kPa}$, $\sigma'_{c0}=\sigma'_{r0}=\sigma'_{\theta0}=41\text{kPa}$ & $p'_0=(\sigma'_{z0}+\sigma'_{r0}+\sigma'_{\theta0})/3=52.2\text{kPa}$. Στη συνέχεια επιβλήθηκε η πρόσθετη κάθετη τάση $\Delta\sigma_z$ και η διατμητική τάση $\Delta\tau_{z\theta}$ με ρυθμό $0.05\text{kPa}/\text{min}$ που αντιστοιχεί σε ρυθμό παραμόρφωσης $0.05\%/ \text{min}$ και υπό αστράγγιστες συνθήκες. Από το συνδυασμό των $\Delta\sigma_z$ και $\Delta\tau_{z\theta}$ επιλέγεται και καθορίζεται η γωνία β , που δίνει τη διεύθυνση της πρόσθετης κύριας τάσης $\Delta\sigma_1$ ως προς την κατακόρυφο. Στη μελέτη των Wang et al. (2019) επιλέχθηκαν οι εξής τιμές $\beta=0, 22.5^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 67.5^\circ, 80^\circ$ & 90° , Σχήμα 4.98. Η τιμή $\beta=45^\circ$ αντιστοιχεί σε καθαρή στρέψη (η κατακόρυφη τάση διατηρήθηκε σταθερή). Για τις υπόλοιπες τιμές $\beta=22.5^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 67.5^\circ$ & 80° ο λόγος $\Delta\sigma_z / \Delta\tau_{z\theta}$ έπρεπε να είναι σταθερός και ίσος με $0.5, 0.866, -0.866, -0.5$ & -0.289 αντίστοιχα. Ωστόσο καθώς πολλές παράμετροι πρέπει να ρυθμιστούν, αυτό δεν ήταν εύκολο να γίνει. Η εξίσωση από την οποία προκύπτουν οι παραπάνω τιμές είναι η εξής:

$$\Delta q \left[\Delta q = \Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3 = \sqrt{\left(\frac{\Delta\sigma_z - \Delta\sigma_\theta}{2}\right)^2 + \Delta\tau_{z\theta}^2} \right] \quad (4.42)$$

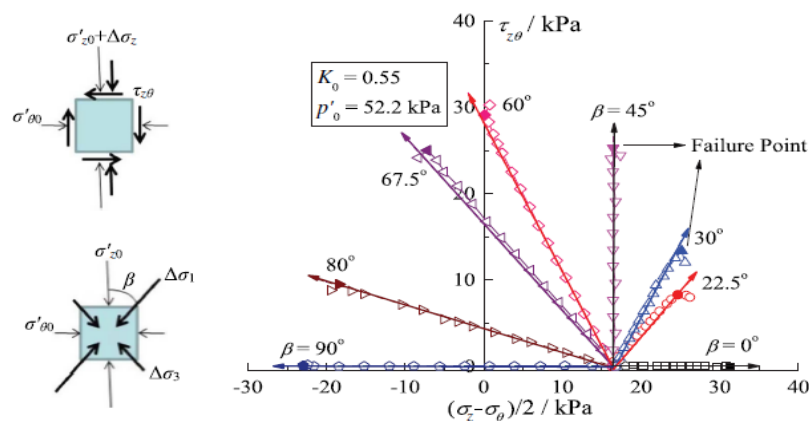
Η σχέση τάσεων (Δq) και όλων των παραμορφώσεων για όλες τις τιμές β παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.99.

Το Σχήμα 4.100 παρουσιάζει τη σχέση αξονικής τάσης-παραμόρφωσης και διατμητικής τάσης-παραμόρφωσης για όλες τις τιμές β . Για τις δοκιμές με $\beta=0^\circ$ και $\beta=90^\circ$, οι οποίες αναφέρονται σε δοκιμές καθαρής συμπίεσης και εφελκυσμού αντίστοιχα, οι διατμητικές τάσεις είναι σχεδόν μηδενικές. Ωστόσο για $\beta=22.5^\circ$ και $\beta=30^\circ$, τα δοκίμια συμπιέζονται και περιστρέφονται (αξονικές και διατμητικές παραμορφώσεις αναπτύσσονται). Για την δοκιμή με $\beta=45^\circ$, η κατακόρυφη παραμόρφωση αναπτύσσεται και μπορεί να προκαλέσει μη-ομοαξονική συμπεριφορά. Τέλος, για $\beta=60^\circ$ έως 90° , τα δοκίμια εφελκύνονται και περιστρέφονται,

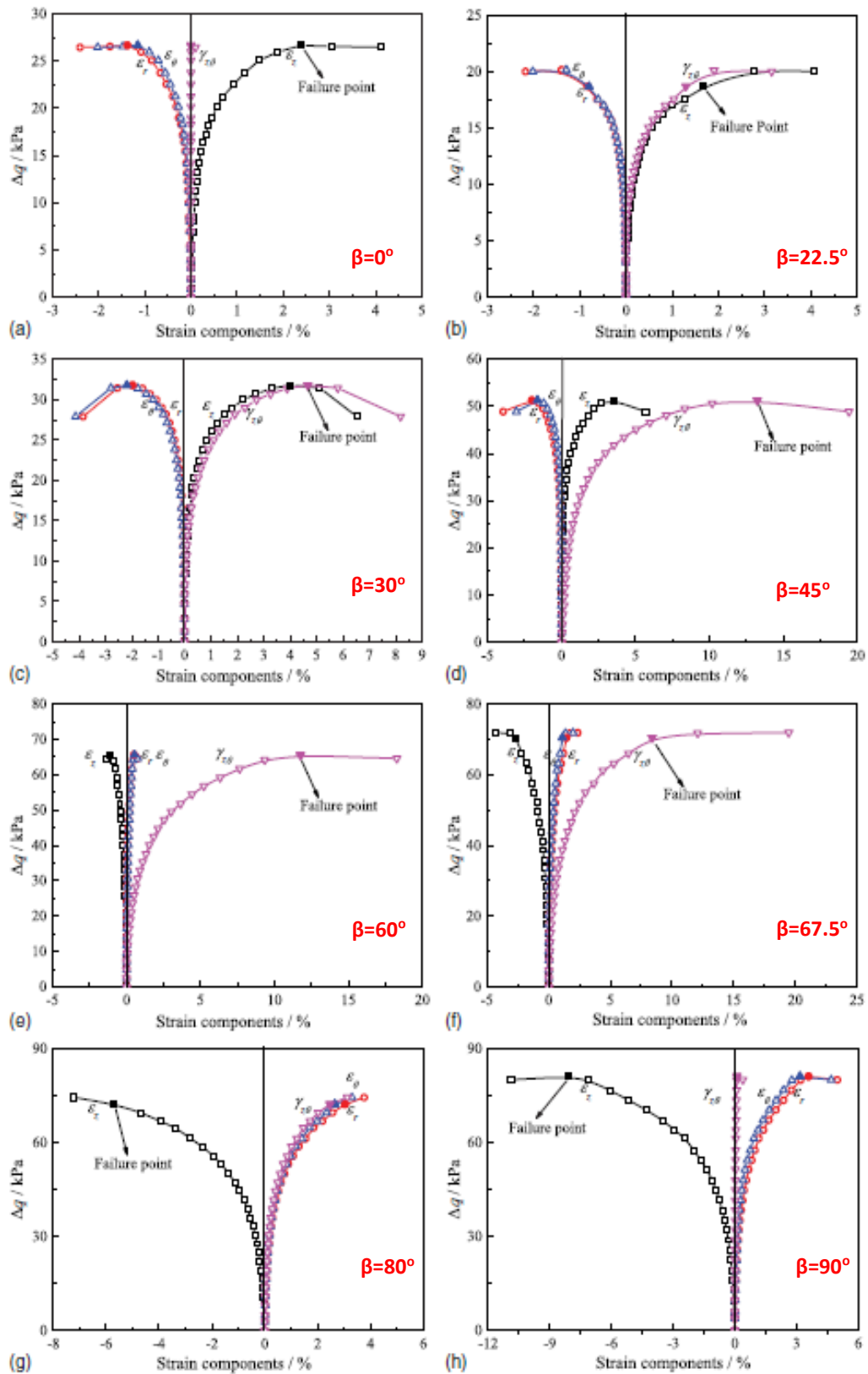
οι παραμορφώσεις αυξάνονται με αρνητικό πρόσημο και οι διατμητικές παραμορφώσεις μειώνονται σταδιακά με την αύξηση των τιμών β . Η σύγκριση στα Σχήματα 4.100 (α) και (β) δείχνουν ότι η αντοχή της φυσικής αργίλου σε συνθήκες Κοστερεοποίησης, σε δοκιμές συμπίεσης είναι υψηλότερη από τις δοκιμές εφελκυσμού. Τα δοκίμια στις δοκιμές συμπίεσης έδειξαν εξαιρετικά ψαθυρή συμπεριφορά, ενώ στις δοκιμές εφελκυσμού έδειξαν πολύ όλκιμη συμπεριφορά. Επιπλέον, η ελάχιστη αξονική παραμόρφωση και η μέγιστη διατμητική παραμόρφωση εμφανίστηκε για $\beta=60^\circ$ αντί για 45° , και αυτό οφείλεται στην συμπεριφορά της φυσικής αργίλου που προκαλείται από την κατάσταση K_0 -στερεοποίησης.



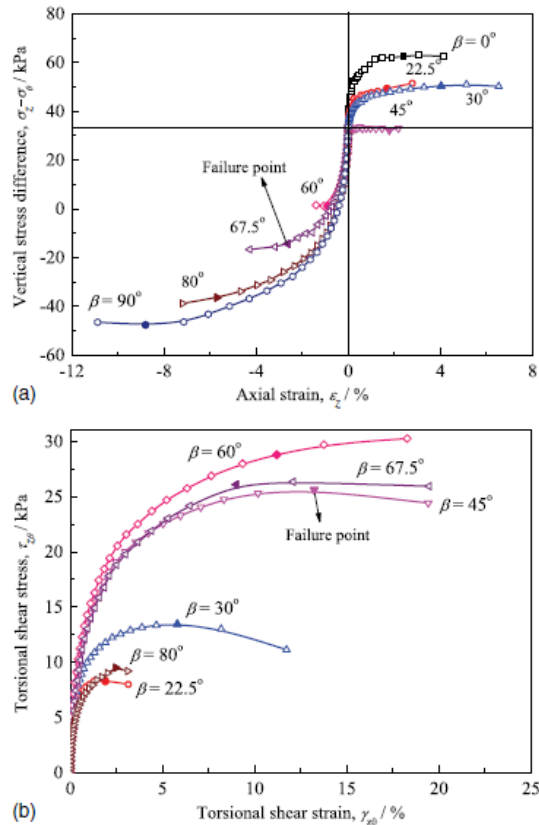
Σχήμα 4.97: Διαδρομή τάσεων για κορεσμό και στερεοποίηση (Wang et al., 2019).



Σχήμα 4.98: Διαδρομή τάσεων στη διάτμηση (Wang et al., 2019).



Σχήμα 4.99: Σχέση τάσεων παραμορφώσεων στη διάτμηση (Wang et al., 2019).

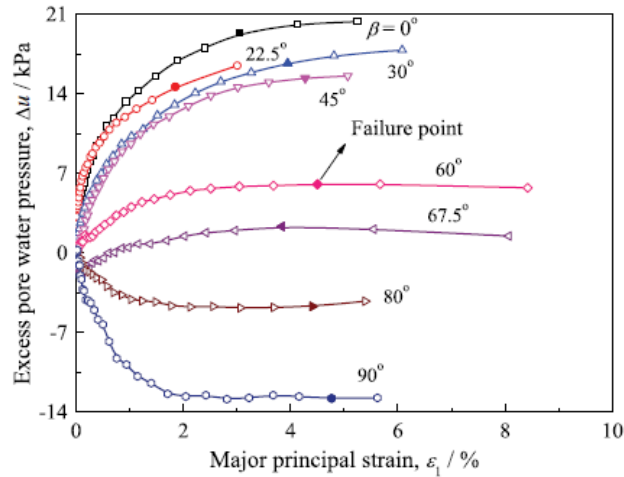


Σχήμα 4.100: Σχέση τάσης-παραμόρφωση στο στάδιο στρεπτικής διάτμησης : (α) αξονική τάση-παραμόρφωση και (β) διατμητική τάση-καταπόνηση (Wang et al., 2019).

Η ανάπτυξη της υπερπίεσης του νερού των πόρων, Δu , σε διάφορες τιμές του β , σε σχέση με την κύρια μέγιστη παραμόρφωση, ϵ_1 , (Εξίσωση 4.43) παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.101.

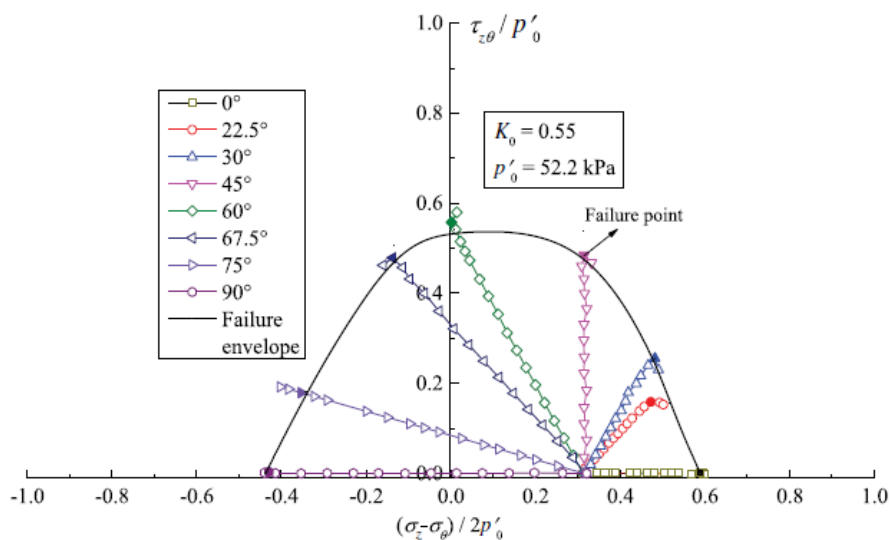
$$\epsilon_1 = (\epsilon_z + \epsilon_\theta) / 2 + \sqrt{\left(\frac{\epsilon_z - \epsilon_\theta}{2}\right)^2 + \gamma_{z\theta}^2} \quad (4.43)$$

Όπως φαίνεται, η υπερπίεση του νερού των πόρων μειώνεται με την αύξηση των τιμών του β . Για $\beta \leq 45^\circ$, η κατακόρυφη τάση και η διατμητική τάση, που εφαρμόζονται στα δοκίμια, αυξάνονται κι έτσι η Δu που αναπτύσσεται είναι θετική. Ωστόσο για $\beta > 45^\circ$, η κατακόρυφη τάση μειώνεται ενώ η διατμητική τάση αυξάνεται κι έτσι η Δu που αναπτύσσεται έχει μικρότερες τιμές αλλά παραμένει θετική καθώς η διατμητική τάση είναι κυρίαρχη. Για $\beta = 67.5^\circ$, η κατακόρυφη τάση και η διατμητική τάση έχουν περίπου την ίδια επίδραση, οπότε Δu είναι σχεδόν μηδενική. Για $\beta > 67.5^\circ$, η μείωση της κατακόρυφης τάσης είναι κυρίαρχη, οπότε Δu είναι αρνητική.



Σχήμα 4.101: Εξέλιξη της πίεσης του νερού των πόρων (Wang et al., 2019).

Το Σχήμα 4.102 απεικονίζει τις διαδρομές τάσεων έως την αστοχία στο επίπεδο $\tau_{z\theta} - (\sigma_z - \sigma_\theta)/2$ για όλες τις τιμές β που μελετήθηκαν. Το επίπεδο αυτό θεωρείται κατάλληλο καθώς το τριαξονικό επίπεδο αναφέρεται στην αξονοσυμμετρική κατάσταση (όπου $\sigma_2 = \sigma_3$) και το οκταεδρικό επίπεδο στην κατάσταση με σταθερή την πρώτη αναλλοίωτη τάσεων (όπου $I_1 = p = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3 = \text{σταθερό}$). Αυτές οι καταστάσεις όμως δεν ίσχυαν στις δοκιμές των Wang et al. (2019). Παρατηρείται πως η περιβάλλουσα αστοχίας έχει ελλειπτικό σχήμα, το οποίο είναι ασύμμετρο ως προς τον άξονα των τεταγμένων. Η αντοχή του εδάφους σε διάτμηση για $\beta = 0^\circ$ είναι αισθητά μεγαλύτερη συγκριτικά με αυτήν για $\beta = 90^\circ$. Επομένως, τόσο η κατάσταση αστοχίας όσο και η διαδρομή των τάσεων δείχνουν σαφώς ότι η φυσική άργιλος Wenzhou, παρουσιάζει ισχυρή ανισοτροπία λόγω της μικροδομής που αναπτύχθηκε μετά την στερεοποίηση με Κο-συνθήκες.



Σχήμα 4.102: Διαδρομές τάσεων στο επίπεδο $\tau_{z\theta} - (\sigma_z - \sigma_\theta)/2$ (Wang et al., 2019).

Το Σχήμα 4.103 παρουσιάζει τις διάφορες τιμές της γωνίας εσωτερικής τριβής σε διάφορες διαδρομές τάσεων. Η σύνδεση γίνεται με τις παραμέτρους α_f και b_f που είναι η γωνία της διεύθυνσης της σ_1 με την κατακόρυφο και η παράμετρος της ενδιάμεσης κύριας τάσης στην αστοχία αντίστοιχα. Όταν η εσωτερική και η εξωτερική πίεση στην κυψέλη είναι ίσες ($p_o=p_i$), τότε ως γνωστό $b_f=\sin^2\alpha_f$. Η διαφορά με το Σχήμα 4.102 είναι πως αυτό αναφέρεται σε τιμές β , όπου είναι η γωνία της $\Delta\sigma_1$ με την κατακόρυφο. Βεβαίως υπάρχει μεταξύ αυτών συσχέτιση, πχ. για $\beta=30^\circ$ είναι $\alpha_f=14^\circ$ και $b_f=0.058$, για $\beta=80^\circ$ είναι $\alpha_f=76.1^\circ$ και $b_f=0.940$. Το Σχήμα 4.103 παρουσιάζει επίσης τη μεταβολή της ϕ' με τις τιμές του b_f . Παρατηρείται πως για $b_f=0$ η $\phi'=33^\circ$, στη συνέχεια η ϕ' αυξάνεται με την αύξηση του b_f ως την τιμή $\phi'=52^\circ$ και στη συνέχεια μένει σταθερή.

Η αστράγγιστη διατμητική αντοχή [$s_u=(\sigma_1-\sigma_3)/2$] συνδέεται με την ϕ' και μεταβάλλεται με τη γωνία α . Η μεταβολή της κανονικοποιημένης αστράγγιστης διατμητικής αντοχής s_u/σ'_{v0} με τη γωνία α παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.104. Η σ'_{v0} είναι μετά την ολοκλήρωση της K_0 στερεοποίησης. Στο σχήμα παρουσιάζονται αποτελέσματα και από τη βιβλιογραφία. Οι διαφορές στη συμπεριφορά πιθανά οφείλονται στην ανισοτροπία των αργίλων.

Για τη μελέτη της μη-ομοαξονικότητας χρησιμοποιούνται οι ακόλουθες εξισώσεις με βάση το Σχήμα 4.105.

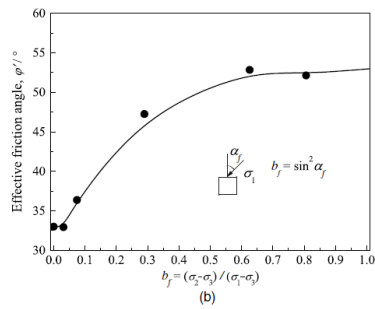
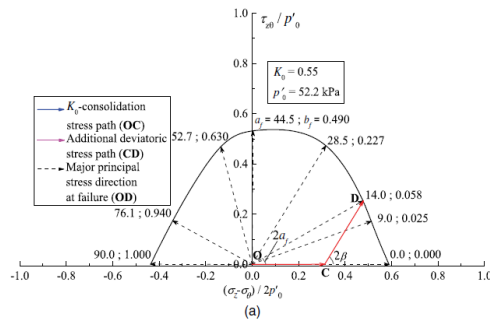
$$\tan 2\alpha = \frac{2\Delta\tau_{z\theta}}{(\sigma'_{z0} - \sigma_{\theta0}) + \Delta\sigma_z} \quad (4.44)$$

$$\tan 2\beta = \frac{2\Delta\tau_{z\theta}}{\Delta\sigma_z} \quad (4.45)$$

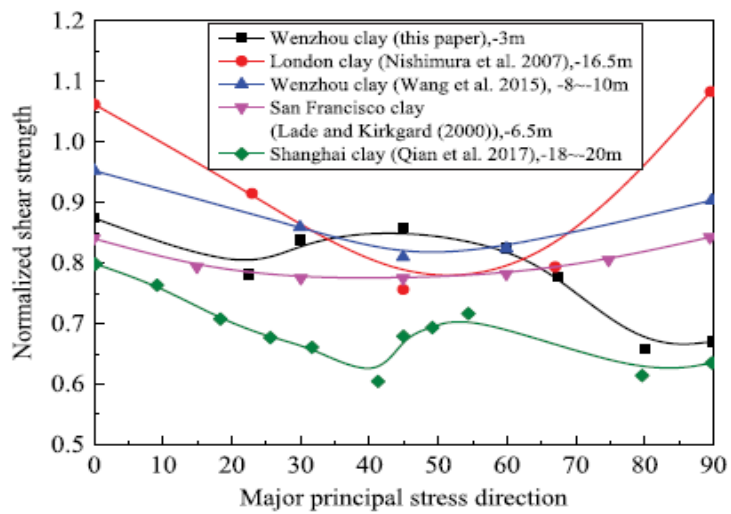
$$\tan 2\xi = \frac{\Delta\gamma_{z\theta}}{\Delta\varepsilon_z - \Delta\varepsilon_\theta} \quad (4.46)$$

Συνδυάζοντας τις Εξισώσεις (4.35) και (4.36) με τις αρχικές τάσεις $\sigma'_{z0}=74.5\text{kPa}$ και $\sigma'_{\theta0}=41\text{kPa}$ προκύπτει η παρακάτω σχέση:

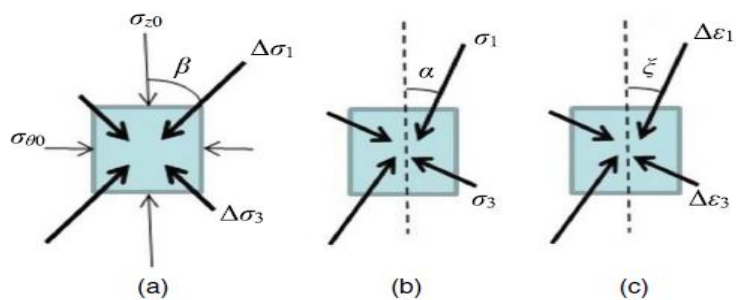
$$\tan 2\alpha = \frac{\Delta\sigma_z}{33.5 + \Delta\sigma_z} \tan 2\beta \quad (4.47)$$



Σχήμα 4.103: Διαδρομές τάσεων στο επίπεδο $\tau_{z\theta} - (\sigma_z - \sigma_\theta)/2$ (Wang et al., 2019).



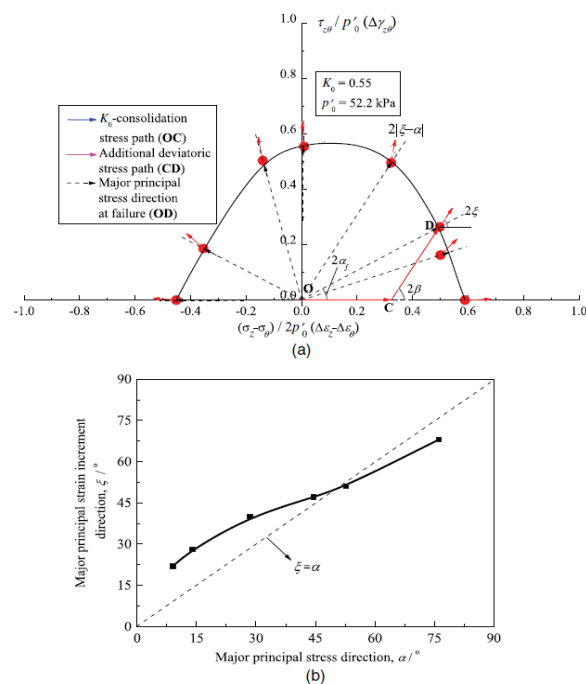
Σχήμα 4.104: Κανονικοποιημένη αστράγγιστη διατμητική αντοχή με τη γωνία α (Wang et al., 2019).



Σχήμα 4.105: Τάσεις και παραμορφώσεις στο εδαφικό στοιχείο (Wang et al., 2019).

Στη μελέτη των Wang et al. (2019) η μη-ομοαξονικότητα καταγράφηκε ξεκάθαρα και παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.106, όπου παρουσιάζονται οι γωνίες α και ξ σε διάφορες διαδρομές τάσεων. Τα διανύσματα της αύξησης της παραμόρφωσης παρουσιάζονται με έντονα κόκκινα βέλη. Η διακεκομμένη γραμμή παρουσιάζει τη γωνία α . Όπως φαίνεται, η γωνίες ξ και α διαφέρουν.

Τα κυριότερα συμπεράσματα της μελέτης των Wang et al. (2019) είναι τα εξής: (α) οι δοκιμές HCA δίνουν τη δυνατότητα ρεαλιστικής προσομοίωσης της εντατικής κατάστασης αργιλικών εδαφών κατά την κατασκευή επιχωμάτων, που λαμβάνουν υπόψη την ανισοτροπία και τη μη-ομοαξονικότητα. Οι συμβατικές τριαξονικές ή άμεσης διάτμησης συσκευές μπορούν να πετύχουν την εφαρμογή μόνο ειδικών διαδρομών τάσης. (β) η αύξηση της γωνίας β μεταβάλλει το είδος των παραμορφώσεων, από συμπίεση (όπου $\epsilon_z > 0$), σε διάτμηση (όπου $\epsilon_z = 0$) και μετά σε εφελκυσμό (όπου $\epsilon_z < 0$). (γ) Η αντοχή σε συμπίεση είναι μεγαλύτερη από την αντοχή σε εφελκυσμό όταν η άργιλος είναι K_0 στερεοποιημένη. (δ) Η ελάχιστη αξονική τάση και η μέγιστη διατμητική τάση παρατηρούνται για $\beta = 60^\circ$ αντί για $\beta = 45^\circ$ που παρατηρείται για ισότροπη στερεοποίηση. (ε) Η εντατική κατάσταση λόγω της στροφής των αξόνων είναι διαφορετική από αυτήν της καθαρής συμπίεσης ή εφελκυσμού καθώς η Δu μεταβάλλεται με τη γωνία β από θετική σε αρνητική. (στ) Υπάρχει μη γραμμική σχέση μεταξύ της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής και της γωνίας α . (ζ) Η περιβάλλουσα αστοχίας έχει ελλειπτικό σχήμα και είναι συμμετρική. (η) Η απόκλιση μεταξύ της αύξησης της μέγιστης κύριας παραμόρφωσης και της διεύθυνσης της αντίστοιχης μέγιστης κύριας τάσης στην αστοχία είναι θετική για $\beta < 50^\circ$ και αρνητική για $\beta > 50^\circ$ αντίστοιχα. Αυτό δηλώνει ένα μη συζευγμένο κανόνα ροής στη σχέση τάσης-παραμόρφωσης και μπορεί να αποτελέσει βάση για την τροποποίηση καταστατικών νόμων.



Σχήμα 4.106: Διαγράμματα μη-ομοαξονικότητας (Wang et al., 2019).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η διπλωματική εργασία επικεντρώθηκε στη βιβλιογραφική ανασκόπηση των πειραματικών ερευνών της ανισοτροπίας στη μηχανική συμπεριφορά διαφόρων τύπων εδαφών, όπως χαλικώδη εδάφη, καθαρές άμμοι, άμμοι με λεπτόκοκκα, ιλείς και αργιλικά εδάφη. Η επίδραση της ανισοτροπίας στη μηχανική συμπεριφορά των εδαφών διερευνήθηκε πειραματικά: (α) μέσω των παραμέτρων 'α' (κλίση της μέγιστης κύριας τάσης ως προς την κατακόρυφο) και 'b' (παράμετρος ενδιάμεσης κύριας τάσης) για την ανισοτροπία λόγω φόρτισης, και (β) μέσω του συντελεστή ωθήσεων σε ηρεμία, K_0 , για την αρχική ανισοτροπία (λόγω των συνθηκών εναπόθεσης των κόκκων στο στάδιο της ιζηματογένεσης στο πεδίο). Η πειραματική μελέτη των παραμέτρων α , b και K_0 πραγματοποιήθηκε με τη χρήση συσκευών στρεπτικής διάτμησης κοίλου κυλινδρικού δοκιμίου. Οι συσκευές αυτές, αποτελούν ίσως το μοναδικό είδος συσκευών που προσομοιώνουν με επιτυχία την πραγματική εντατική κατάσταση στο πεδίο, τόσο υπό στραγγιζόμενες όσο και υπό αστραγγιστες συνθήκες, κατά την οποία ένα αρχικά ανισότροπο έδαφος (K_0 στερεοποίηση) υποβάλλεται σε τρισδιάστατη φόρτιση (μονοτονική ή και κυκλική), με ταυτόχρονη (συνεχή ή απότομη) στροφή των αξόνων των κυρίων τάσεων και δυνατότητα επιβολής ενδιάμεσης κύριας τάσης σ_2 ($\neq \sigma_3$). Οι εντατικές αυτές καταστάσεις λαμβάνουν χώρα στο πεδίο κατά την επιβολή (α) σεισμικής δράσης στο έδαφος, όπου προκαλείται συνεχής μεταβολή των εντατικών μεγεθών με ταυτόχρονη στροφή των αξόνων των κυρίων τάσεων, (β) κυκλοφοριακών φορτίων τύπου συρμού στην εδαφική βάση των σιδηροδρομικών υποδομών, (γ) φορτίων κυματισμού που μεταφέρονται στο θαλάσσιο πυθμένα, (δ) φορτίων στα στάδια κατασκευής επιχωμάτων ή εκσκαφών στο έδαφος (προβλήματα επίπεδης παραμόρφωσης), (ε) φορτίων στο σώμα και στη βάση φραγμάτων, κλπ.

Στη συνέχεια, με βάση τα βιβλιογραφικά δεδομένα εξάγονται τα σημαντικότερα συγκριτικά συμπεράσματα αναφορικά με την επίδραση της ανισοτροπίας λόγω φόρτισης και της αρχικής ανισοτροπίας στη διατμητική αντοχή στην αντίσταση έναντι ρευστοποίησης, στην ανάπτυξη των παραμορφώσεων και υπερπίεσης του νερού των πόρων των εδαφών κ.ά., που έχουν βαρύνουσα σημασία στο σχεδιασμό γεωτεχνικών έργων. Τα συμπεράσματα αυτά είναι τα εξής:

(α) Επίδραση της ανισότροπης στερεοποίησης (K_0 -στερεοποίηση) στην ανάπτυξη τάσεων, παραμορφώσεων και πίεσης του νερού των πόρων

(α.1) Ο λόγος κυκλικών τάσεων τ_{vh}/σ'_{vo} για δεδομένη παραμόρφωση άμμου αυξάνεται με τη μείωση του αριθμού των κύκλων φόρτισης, την αύξηση της

πυκνότητας D_r , και την αύξηση του K_0 . Επίσης, ο λόγος τ_{vh}/σ'_{v0} αυξάνεται με την αύξηση της παραμόρφωσης.

(α.2) Η επίδραση του K_0 στην κυκλική αντοχή άμμου λαμβάνεται υπόψη μέσω της ενεργής ισότροπης τάσης, σ'_{v0} , σε κάθε επίπεδο της D_r . Δηλαδή ο λόγος τ_{vh}/σ'_{v0} είναι ανεξάρτητος της τιμής του K_0 .

(α.3) Η ανάπτυξη της υπερπίεσης του ύδατος πόρων Δu στις άμμους είναι ταχύτερη στην K_0 στερεοποίηση συγκριτικά με την ισότροπη στερεοποίηση σε μαλακές αργίλους.

(α.4) Η K_0 στερεοποίηση σε μαλακές αργίλους οδηγεί σε αύξηση της απαιτούμενης γωνίας β (μεταξύ της διεύθυνσης της μεταβολής της μέγιστης κύριας τάσης, $\Delta\sigma_1$, με τον κατακόρυφο άξονα) για την ανάπτυξη της ελάχιστης αξονικής τάσης και της μέγιστης διατμητικής τάσης, από $\beta=45^\circ$ που παρατηρείται για ισότροπη στερεοποίηση σε $\beta=60^\circ$.

(β) Επίδραση της παραμέτρου α στην ανάπτυξη τάσεων και παραμορφώσεων

(β.1) Η στροφή της μέγιστης κύριας τάσης (πaráμετρος α) έχει σημαντική επίδραση στη συσσώρευση πλαστικών, δηλαδή μόνιμων παραμορφώσεων στα κοκκώδη εδάφη (άμμοι και ιλεις). Η επίδραση αυτή μειώνεται με την αύξηση του ποσοστού λεπτοκόκκων στο έδαφος.

(β.2) Η επίδραση της παραμέτρου α στην ανάπτυξη των μόνιμων παραμορφώσεων εξαρτάται από το λόγο των κύριων τάσεων $\eta^* = \sigma'_1/\sigma'_3$, και αυξάνεται με την αύξησή του κατά τη διάρκεια της κυκλικής φόρτισης.

(β.3) Κατά την πειραματική μελέτη της κατάστασης επίπεδης παραμόρφωσης ($\epsilon_r = \epsilon_z = 0$, $\sigma_z = 0$ & $K_\theta = \sigma'_\theta/\sigma'_z = \text{σταθερό}$) οι παράμετροι α , b , K_θ και $K_r (= \sigma'_r/\sigma'_z)$ δεν είναι ανεξάρτητες κατά τη διάτμηση, αλλά συσχετίζονται μεταξύ τους μέσω της Εξίσωσης (3.26). Η αρχική τιμή της α εξαρτάται από τη αρχική διεύθυνση της σ_1 (δηλαδή πριν τη διάτμηση). Κατά τη διάτμηση σε δεδομένη διατμητική παραμόρφωση, οι μεγάλες τιμές του K_θ οδηγούν σε μεγαλύτερες τιμές του α και του K_r , ενώ το b τείνει στο 0.25 ανεξάρτητα από την τιμή του K_θ . Οι μεγάλες τιμές του K_θ (μεγάλες σ'_θ & θετικές τιμές ϵ_θ) προκύπτουν κατά την πλευρική συμπίεση, όπου παρατηρούνται στον πόδα του εδαφικού πρανούς. Οι μικρές τιμές του K_θ παρατηρούνται στην κορυφή του εδαφικού πρανούς.

(β.4) Η αύξηση της γωνίας β , μεταξύ της διεύθυνσης της μεταβολής της μέγιστης κύριας τάσης, $\Delta\sigma_1$, με τον κατακόρυφο άξονα, μεταβάλλει το είδος των παραμορφώσεων, από συμπίεση (όπου $\epsilon_z > 0$), σε διάτμηση (όπου $\epsilon_z = 0$) και μετά σε εφελκυσμό (όπου $\epsilon_z < 0$).

(γ) Επίδραση των παραμέτρων α & b στην πίεση του νερού των πόρων και στο δυναμικό ρευστοποίησης

(γ.1) Η στροφή της μέγιστης κύριας τάσης (πaráμετρος α) κατά την επιβολή κυκλικής φόρτισης σε κορεσμένα αμμώδη εδάφη και ιλεις υπό αστράγγιστες συνθήκες

προκαλεί μεταβολή της πίεσης του ύδατος των πόρων υπό σταθερή διατμητική τάση. Η πίεση του ύδατος πόρων μεταβάλλεται συνεχώς με την παραμόρφωση και οδηγεί σταδιακά στην αστοχία.

(γ.2) Η επίδραση της παραμέτρου α στην ανάπτυξη υπερπίεσης του νερού των πόρων μεγαλώνει με την αύξηση του ποσοστού του χονδρόκοκκου κλάσματος στα εδάφη.

(γ.3) Η επίδραση της αρχικής τιμής της παραμέτρου α_0 στην οριακή ογκομετρική διατμητική παραμόρφωση γ_t άμμων, που αντιστοιχεί στο λόγο $\Delta u' / \Delta \sigma' = 0.2$, είναι σημαντική. Η τιμή του γ_t φτάνει στο μέγιστο όταν $\alpha_0 = 0^\circ$ και στο ελάχιστο όταν $\alpha_0 = 45^\circ$. Παρατηρείται πως η γ_t μειώνεται όταν το α_0 αυξάνεται από 0° σε 45° , ενώ αυξάνεται όταν το α_0 αυξάνεται από 45° έως 90° . Η τιμή της α_0 μεταβάλλεται μέσω της στρεπτικής ροπής M_T . Στις ακραίες τιμές $\alpha_0 = 0^\circ$ ή $\alpha_0 = 90^\circ$ η στρεπτική ροπή M_T είναι μηδενική, ενώ όταν $\alpha_0 = 45^\circ$ η ροπή M_T έχει τη μεγαλύτερη τιμή της.

(γ.4) Η εντατική κατάσταση λόγω της στροφής των αξόνων είναι διαφορετική από αυτήν της καθαρής συμπίεσης ή εφελκυσμού καθώς η Δu στις μαλακές αργίλους μεταβάλλεται με τη γωνία β (μεταξύ της διεύθυνσης της μεταβολής της μέγιστης κύριας τάσης, $\Delta \sigma_1$, με τον κατακόρυφο άξονα) από θετική σε αρνητική.

(γ.5) Η επίδραση της αρχικής τιμής της παραμέτρου b_0 στη γ_t άμμων, που αντιστοιχεί στο λόγο $\Delta u' / \Delta \sigma' = 0.2$, είναι σημαντική. Η τιμή του b_0 αυξάνεται όταν η τάση σ_2 προσεγγίζει την τιμή της τάσης σ_1 (μεγαλύτερη επαφή μεταξύ των εδαφικών κόκκων, με συνέπεια την αύξηση της διατμητικής αντοχής του και τη βραδύτερη ανάπτυξη της πίεσης του νερού των πόρων). Η γ_t αυξάνεται όταν το b_0 αυξάνεται.

(γ.6) Το δυναμικό ρευστοποίησης αμμωδών εδαφών εξαρτάται από τη στροφή των αξόνων των κύριων τάσεων (παράμετρος α). Η χαμηλότερη τιμή της αντίστασης ρευστοποίησης παρατηρείται για στροφή $\alpha = \pm 45^\circ - \pm 60^\circ$.

(γ.7) Η συνεχής στροφή των αξόνων παρουσιάζει μεγαλύτερη επίδραση στο δυναμικό ρευστοποίησης αμμωδών εδαφών συγκριτικά με την απότομη και στιγμιαία αλλαγή της στροφής.

(γ.8) Το δυναμικό ρευστοποίησης ιλυωδών εδαφών εξαρτάται από τη στροφή των αξόνων των κύριων τάσεων (παράμετρος α). Η χαμηλότερη τιμή της αντίστασης ρευστοποίησης παρατηρείται για στροφή $\alpha = \pm 45^\circ$.

(γ.9) Το δυναμικό ρευστοποίησης αμμωδών εδαφών εξαρτάται από τη διεύθυνση της μέγιστης κύριας τάσης σε σχέση με το επίπεδο εναπόθεσης των κόκκων, καθώς και από την κλίση του επιπέδου της μέγιστης διατμητικής τάσης στο επίπεδο εναπόθεσης.

(δ) Επίδραση των παραμέτρων α & b στις παραμορφώσεις και στις παραμέτρους μηχανικής αντοχής σε χονδρόκοκκα εδάφη υπό στραγγιζόμενες συνθήκες

(δ.1) Η στροφή των κύριων τάσεων (παράμετρος α) κατά την επιβολή κυκλικής φόρτισης σε κορεσμένα χαλαρά έως μετρίως πυκνά αμμώδη εδάφη υπό στραγγιζόμενες συνθήκες προκαλεί συμπίεση του εδάφους.

(δ.2) Η αύξηση της παραμέτρου ενδιάμεσης κύριας τάσης (παραμέτρος b) οδηγεί στην μείωση του λόγου $\eta=q/p'$ στην ίδια παραμόρφωση και στην αύξηση της ογκομετρικής παραμόρφωσης για χαλικώδη εδάφη υπό στραγγιζόμενες συνθήκες φόρτισης.

(δ.3) Η μέγιστη γωνία τριβής και η γωνία κρίσιμης κατάστασης του χαλικώδους γεωυλικού, σε μια δεδομένη σ_3 αυξάνεται μέχρι μια μέγιστη τιμή και στην συνέχεια μειώνεται με την αύξηση της τιμής b . Η γωνία διασταλτικότητας σε μια δεδομένη σ_3 μειώνεται με την αύξηση της τιμής b . Η μέγιστη γωνία τριβής, η γωνία κρίσιμης κατάστασης και η γωνία διασταλτικότητας του χαλικώδους γεωυλικού, σε μια δεδομένη b , μειώνεται με την αύξηση της τιμής σ_3 . Μια αύξηση στην τιμή b με $\sigma_3=400\text{kPa}$ οδηγεί σε θραύση των κόκκων, η οποία εξαρτάται από τη διαδρομή των τάσεων.

(ε) Επίδραση των παραμέτρων a & b στην εδαφική δυσκαμψία και στο λόγο απόσβεσης

(ε.1) Το κανονικοποιημένο μέτρο διάτμησης και ο λόγος απόσβεσης δεν επηρεάζονται σημαντικά από τις παραμέτρους a και b .

(στ) Επίδραση της παραμέτρου a στην αντοχή στη φάση μετάβασης αμμωδών εδαφών

(στ.1) Η διατμητική αντοχή S_{pt} της άμμου στη φάση μετάβασης από τη ψαθυρή στην όλκιμη συμπεριφορά μειώνεται με την αύξηση της a . Πιο έντονη είναι η μείωση της S_{pt} για το εύρος $\alpha=0-45^\circ$ δηλαδή κατά τη μετάβαση από την τριαξονική συμπίεση στην απλή διάτμηση. Η αντοχή στην απλή διάτμηση είναι αρκετά κοντά στον εφελκυσμό. Αντιθέτως, η γωνία τριβής στη φάση μετάβασης είναι σταθερή και ανεξάρτητη της διαδρομής φόρτισης (δηλαδή της τιμής a).

(ζ) Επίδραση της παραμέτρου a στην αστράγγιστη διατμητική αντοχή αργίλου

(ζ.1) Υπάρχει μη γραμμική σχέση μεταξύ της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής και της γωνίας α σε μαλακούς αργίλους.

(η) Επίδραση της παραμέτρου a νόμο ροής αργίλου

(η.1) Η απόκλιση μεταξύ της αύξησης της μέγιστης κύριας παραμόρφωσης και της διεύθυνσης της αντίστοιχης μέγιστης κύριας τάσης στην αστοχία μαλακών αργίλων είναι θετική για $\beta < 50^\circ$ και αρνητική για $\beta > 50^\circ$ αντίστοιχα. Αυτό δηλώνει ένα μη συζευγμένο κανόνα ροής στη σχέση τάσης-παραμόρφωσης και μπορεί να αποτελέσει βάση για την τροποποίηση καταστατικών νόμων.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Albert, C., Zdravkovic, and Jardine, R.J., (2003), 'Behaviour of Bothkennar clay under rotation of principal stresses'. Int. Workshop on Geotechnics of Soft Soils-Theory and Practice. Vermeer, Schweiger, Karstunen and Cundny , eds. VGE, pp.1-6.
2. Arthur, J. R. F., Bekenstein, S., Germaine, J. T., and Ladd, C. C., (1981), 'Stress path tests with controlled rotation of principal stress direction', Laboratory Shear Strength of Soil, American Society for Testing and Materials STP 740, pp. 516-540.
3. Arthur, R. F., and Menzies, B.K., (1972), 'Inherent anisotropy in sand', Géotechnique, Vol. 22, No. 1, pp. 115-131.
4. Arthur, R. F., and Phillips, A.B., (1975), 'Homogeneous and layered sand in triaxial compression', Géotechnique, Vol. 25, No.4, pp. 799-815.
5. Arthur, R. F., Chua K.S., Dunstan T., (1977), 'Induced anisotropy in sand', Geotechnique, Vol. 27, No.1, pp.13-30.
6. Arthur, R. F., Chua, K.S., Dunstan, T. and Rodriguez del Camino, J.I., (1980), 'Principal stress rotation: a missing parameter', Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, GT4, pp. 419-433.
7. Baldi, G., and Nova, R., (1984), 'Membrane penetration effects in triaxial testing. Journal of Geotechnical Engineering', ASCE, Vol. 110, No.3, 403-420.
8. Bishop, A. W., (1966), 'The strength of soils as engineering materials', 6th Rankine Lecture. Geotechnique, Vol. 16, No.2, pp. 91-128.
9. Bjerrum, L. and Kummeneje, O., (1961), 'Shearing resistance of sand samples with circular and rectangular cross sections', Norwegian Geotechnical Institute Publication, Vol. 44, No. 1.
10. Bjerrum, L. and Landva, A. (1966). 'Direct simple-shear tests on a Norwegian quick clay', Geotechnique, Vol.16, No. 1, pp. 1-20.
11. British Standards, (1990), 'BS 1377-4: Compaction-Related Tests. Determination of maximum and minimum dry densities for granular material" B.S.I, London.
12. Broms, B. B., and Casbarian, A. O., (1965), 'Effects of rotation of the principal stress axes and of the intermediate stress on shear strength', Proc., 6th Int. Conf. Soil Mechanics, Vol. 1, pp. 179-183.
13. Cai, Y.Y., (2010), 'An experimental study of non-coaxial soil behaviour using hollow cylinder testing' PhD thesis submitted to the department of civil engineering, the University of Nottingham.
14. Cai, Y.Y., Yu, H. S., Wanatowski, D., and Li, X. (2012), 'Non-coaxial behavior of sand under various stress paths'. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering.
15. Cambou, B., Dubujet, P., Emeriault, F. and Sidoroff, F., (1995), 'Homogenization for granular materials', Eur. J. Mech. A, Solids, Vol. 14, No. 2, pp. 225-276.
16. Casagrande, A. and Carrillo, N., (1944), 'Shear Failure on Anisotropic Materials', Proc. Boston. Soc. of Civil Eng., Vol. 31, pp. 74-87.
17. Cornforth, D. H., (1964), 'Some experiments on the influence of strain conditions on the strength of sand', Geotechnique, Vol. 14, No. 2, pp. 143-167.

18. Cundall, P A, Drescher, A and Strack, O D L., (1982), 'Numerical experiments on granular assemblies: measures and observations', *Deformation and Failure of Granular Materials*, Balkema, 355-370.
19. Cundall, P. A., and Strack, O. D. L., (1979), 'A Discrete Numerical Model for Granular Assemblies', *Geotechnique*, Vol. 29, pp. 47-65
20. Darwin, G. H., (1918) 'On the horizontal thrust of a mass of sand', *Minut. Proc. Instn Civ. Engrs*, Vol. 71, pp. 350-378.
21. Desai, C. S., Janardahanam, R., and Sture, S., (1982), 'High capacity multiaxial testing apparatus', *Geotechnical Testing J., GTJODJ*, 5(1/2), pp. 26-33.
22. Diambra A., Ibraim E., & Camacho Tauta J., (2019). Effect of rientation of principal stress axes on cyclic liquefaction potential of soils. 17th European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 2019.
23. Donald, M.E., (1985), 'stress-strain-strength behaviour of very soft soil sediment' PhD thesis submitted to the Department of Civil Engineering, the University of Oxford.
24. Drescher, A., (1976), 'An experimental investigation of flow rules for granular materials using optically sensitive glass particles', *Géotechnique*, Vol. 26, pp. 591-601.
25. Drescher, A., and de Josselin de Jong. G., (1972), 'Photoelastic verification of a mechanical model for the flow of a granular material', *J. Mech. Phys. Solids*, Vol. 20, pp. 337-351.
26. Duncan, J.M. and Seed, H.B., (1965), 'Errors in strength tests and recommended corrections', Report, University of California, Berkeley.
27. Ergun, M. U., (1981), 'Evaluation of three-dimensional shear testing', *Proc. of 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Eng.*, Stockholm, pp. 593- 596.
28. Gens, A., Potts, D.M., (1984), 'Formulation of quasi-axisymmetric boundary value problems for finite element analysis', *Engineering Computations*, Vol.1, pp. 144-150.
29. Grabe P. J. & Clayton C. R. I. (2009). Effects of Principal Stress Rotation on Permanent Deformation in Rail Track Foundations. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, April 2009.
30. Guoxing Ch., & Hua P., (2010). Effect of Initial Stress Conditions on the Threshold Shear Strain of Nanjing's Saturated Fine Sand. *Earthquake Research in China*, Vol. 24, No.1,2010.
31. Gutierrez, M., and Ishihara, K., (2000), 'Non-coaxiality and energy dissipation in granular materials', *Soils and Foundations*, Vol. 40, No.2, pp. 49-59.
32. Gutierrez, M., Ishihara, K. and Towhata, I. (1991), 'Flow theory for sand during rotation of principal stress direction', *Soils and Foundations*, Vol. 31, No. 4, pp. 121-132.
33. Habib, P., (1953), 'Influence de la variation de la contrainte principale moyenne sur la résistance au cisaillement des sols', *Proc. Third ICSMFE* 1, pp. 131–136.

34. Hambly, E. C. and Roscoe, K. H., (1969), 'Observations and predictions of stresses and strains during plane strain of wet clays', Proc. 7th Int. Conf. Soil Mech., pp. 173-181.
35. Hight, D.W., Gens, A., Symes, M.J., (1983), 'The development of a new hollow cylinder apparatus for investigating the effects of principal stress rotation in soils', Geotechnique, Vol. 33, No. 4, pp. 355-383.
36. Hosseininia, E. S., (2012) 'Discrete element modelling of inherently anisotropic granular assemblies with polygonal particles', Particuology, Vol. 10, Issue 5, Pages 542-552.
37. Ibraim, E., Lanier, J., Muir Wood, D. and Viggiani, G. (2010), 'Strain path controlled shear tests on an analogue granular material', Géotechnique, Vol. 60, No. 7, pp. 545-559.
38. Ishihara, K., (1993) 'Liquefaction and flow failure during earthquakes', Géotechnique, Vol. 43, No. 3, pp. 351-415.
39. Ishihara, K., and Li S.-I., (1972), 'Liquefaction of Saturated Sand in Triaxial Torsion Shear Test', Soils and Foundations, Vol.12, No.3, pp. 19-39.
40. Ishihara, K., and Towhata, I., (1983), 'Sand response to cyclic rotation of principal stress directions as induced by wave loads', Soils and Foundations, Vol. 23, No. 4, pp. 11-26.
41. Ishihara K., Yanazaki A., & Haga K. (1985). Liquefaction of K_0 -consolidated sand under cyclic rotation of principal stress direction with lateral constraint. Soils and foundations Vol.25, No.4, pp 63-74, Dec. 1985.
42. Jafarzadeth F., & Zamanian M. (2013). Effect of stress anisotropy on cyclic behaviour of dense sand with dynamic hollow cylinder apparatus. Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Paris 2013.
43. Joer H.A., Lanier J., Fahey M., (1998), 'Deformation of granular materials due to rotation of principal axes', Geotechnique, Vol. 48, No.5, pp. 605-619.
44. Kallstenius, T. and Bergau, W., (1961), 'Research on the texture of granular masses', Proc. 5th Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 1, pp. 165-170.
45. Kirkgard, M. M., and Lade, P. V. , (1993), 'Anisotropic three-dimensional behavior of a normally consolidated clay', Can. Geotech. J., 30, pp. 848-858.
46. Ko, H.-Y., and Scott, R. F., (1968), 'Deformation of Sand at Failure', Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 94, No. SM4, Proc. Paper 6028, pp. 883-898.
47. Kramer, S. L., Sivaneswaran, N. and David, R. O., (1990), 'Analysis of membrane penetration in triaxial test', Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1990, Vol. 116, pp. 773-789.
48. Kramer, S.L. and Sivaneswaran, N., (1989), 'A stress path dependent correction for membrane. penetration', Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 115, No. 12, pp.1787-1804.

49. Kurukulasuriya, L.C., Oda, M. and Kazama, H., (1999), 'Anisotropy of undrained shear strength of an over consolidated soil by triaxial and plain strain tests', *Soils and Foundations*, Vol. 39, No. 1, pp. 21-29.
50. Kuwano, R., (1999), 'The stiffness and yielding anisotropy of sand', PhD thesis submitted to the Department of Civil Engineering, the University of London.
51. Κωνσταντίνου, Μ.(2013). 'Πειραματική Διερεύνηση της ανισότροπης συμπεριφοράς μη συνεκτικών εδαφών σε στρεπτική διάτμηση', Διδακτορική διατριβή, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
52. Lade, P. V. (2006), 'Assessment of test data for selection of 3-D failure criterion for sand', *Int. J. Numer. Anal. Methods Geomech.*, 30 (4), pp. 307–333.
53. Lade, P. V., Nam, Y., and Hong, W. P., (2009), 'Interpretation of strains in torsion shear tests', *Comp. Geotech.*, 36(1-2), pp. 211-225.
54. Lade, P.V., Duncan, J.M., (1973), 'Cubical triaxial tests on cohesionless soil', *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE*, 99(SM10), pp. 793-811.
55. Lade, P.V., Nam, J., and Hong, W.P., (2008), 'Shear banding and cross-anisotropic behaviour observed in laboratory sand tests with stress rotation', *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.45, pp. 74-84.
56. Li, X. and Yu H.S., (2009), 'Influence of loading direction on the behaviour of anisotropic granular materials', *International Journal of Engineering Science* 47 (2009), 1284-1296.
57. Li, X. and Yu H.S., (2010), 'Numerical investigation of granular material behaviour under rotation shear', *Geotechnique* 60, No.5, pp. 381-394.
58. Mahmood, Z. and Iwashita, K., (2010), 'Influence of inherent anisotropy on mechanical behavior of granular materials based on DEM simulations', *International Journal of Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol. 34, No. 8, pp. 795–819.
59. Matsuoka, H., and Ishizaki, H., (1981), 'Deformation and strength of anisotropic soil', *Proc., 10th Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Balkema, Rotterdam, the Netherlands, Vol. 1, pp. 699–702.
60. Matsuoka, H., and Nakai, T., (1974), 'Stress-deformation and strength characteristics of soil under different principal stresses', *Proc., Japan Society of Civil Engineers (JSCE)*, Japan Society of Civil Engineers, Vol. 232, pp. 59-70.
61. Matsushima, T. and Konagai, K., (2001), 'Grain-shape effect on peak strength of granular materials', *Computer Methods and Advances in Geomechanics, Proc. 10ACMAG*, Vol. 1, pp. 361-366.
62. Menkiti, C.O., (1995), 'Behaviour of clay and clayey-sand, with particular reference to principal stress rotation', *Msc. Dissertation*, Imperial College of Science, Technology and Medicine, University of London.
63. Miura, S. and Toki S., (1984), 'Anisotropy in mechanical properties and its simulation of sands sampled from natural deposits', *Soils and Foundations*, Vol. 24. No. 3, pp. 69-84.
64. Miura, S. and Toki S., (1986), 'Deformations prediction for anisotropic sand during the rotation of principal stress axes', *Soils and Foundations*, Vol. 26, No.3, pp. 42-56.

65. Miura, S., and Kawamura, S., (1996), 'A procedure minimizing membrane penetration effects in undrained triaxial test', *Soils and Foundations*, Vol. 36, No.4, pp. 119-126.
66. Miura, S., and Toki, S., (1982), 'A sample preparation method and its effect on static and cyclic deformation-strength properties of sand', *Soils and Foundation*, Vol. 22, No. 1, pp. 61–77.
67. Molenkamp, F., and Luger, H.J., (1981), 'Modeling and minimization of membrane penetration effects in tests on granular soils', *Geotechnique*, Vol. 31, No. 4, pp. 471-486.
68. Mould, J. C., (1979), 'Multiaxial testing and analytical constitutive characterization of granular materials', Master Thesis, Virginia Polytechnical Institute and State University, pp. 50-82.
69. Nabil, S.E., (1976), 'Shear strength of a cohesionless soil under plane strain and triaxial conditions', *Open Access Dissertations and Theses*. Paper 484.
70. Nakata, Y., Hyodo, M., Murata, H., and Yasufuku, N., (1998), 'Flow deformation of sands subjected to principal stress rotation', *Soils and Foundations*, Vol. 38, No.3, pp. 115-128.
71. Nakata, Y., Hyodo, M., Murata, H., Itakura, S. and Yamada, Y., (1997), 'Flow deformation of sands subjected to principal stress rotation', *Memoirs of the Faculty of Engineering, Yamaguchi University*, Vol. 48, No. 1, pp. 57-64.
72. Naughton, P.J., and O'Kelly, B.C., (2003), 'The anisotropy of Leighton Buzzard Sand under general stress conditions', *Proceedings Third International Symposium on Deformation Characteristics of Geomaterials*, Vol. 1, pp. 285–291.
73. Naughton, P. J. and O'Kelly B. C., (2007), 'Stress non-uniformity in a hollow cylinder torsional sand specimen', *Geomechanics and Geoengineering*, Vol. 2, No. 2, pp. 117-122.
74. Newland, P. L. and Allely, B. H., (1959), 'Volume change during undrained traxial tests on saturated dilatant granular materials', *Géotechnique*, Vol. 9, No. 4, pp. 174-182.
75. Ochiai, H., and Lade, P. V., (1983), 'Three-dimensional behavior of sand with anisotropic fabric', *J. Geotech. Eng.*, Vol. 109, No. 10, pp. 1313-1328
76. Oda, M. and Iwashita K., (1999), 'Mechanics of granular materials: an introduction', Balkema, Rotterdam/Brookfield.
77. Oda, M., (1972a), 'Initial fabrics and their relations to the mechanical properties of granular materials', *Soils and Foundations*, Vol. 12, No.1, pp. 17-36.
78. Oda, M., (1972b), 'The mechanics of fabric changes during compressional deformation of sand', *Soils and Foundations*, Vol. 12, No.2, pp. 1-18.
79. Oda, M., (1981), 'Anisotropic strength of cohesionless sands', *Journal of the Geot. Eng. Div., ASCE*, Vol. 107, No. GT9, pp. 1219-1231.
80. Oda, M., Isao K. and Toshio H., (1978), 'Experimental study of anisotropic shear strength of sand by plane strain test', *Soils and Foundations*, Vol. 18, No. 1, pp. 25-38.
81. Oda, M., Nemat-Masser S. and Konishi J., (1985), 'Stress-induced anisotropy in granular masses', *Soils and Foundations*, Vol. 25, No. 3, pp. 85-97.

82. Oda, M. and Konishi J., (1974), 'Microscopic deformation mechanism of granular material in simple shear'. *Soils and Foundations*, Vol.14, No. 4, pp. 25–38.
83. Ohara, S., and Yamamoto, T., (1991), 'Practical method for obtaining correction factor of liquefaction resistance for membrane penetration', *Soils and Foundation*, Vol. 31, No.2, pp.188-196.
84. Parkin, A. K., Gerrard, C. M., and Willoughby, D. R., (1968), 'Deformation of sand in hydrostatic compression. *Soil mechanics. Found. Div. 94*, No. SM 1, pp. 336-340.
85. Phillips, A. B. and May, P. H., (1967), 'A form of anisotropy in granular media.' Special Task Report , Dept. of Civil and Municipal Engineering, Univ. College, London
86. Porovic, E., (1995), 'Investigation of soil behaviour using a resonant column torsional shear hollow cylinder apparatus', PhD thesis submitted to the Department of Civil Engineering, University of London.
87. Pradhan, B.S., Tatsuoka, F. and Horii, N., (1988), 'Simple shear testing on sand in a torsional shear apparatus', *Soils and Foundations*, Vol. 28, No. 2, pp. 95-112.
88. Reinaldo, R., (2003), 'The anisotropic stress-strain-strength behaviour of brittle sediments', PhD thesis submitted to the Department of Civil Engineering, the University of London.
89. Rodriguez, N.M., (2012), 'Experimental Study of 3D failure surface for cross-anisotropic sand deposits during stress rotation', PhD thesis submitted to the Department of Civil Engineering, The Catholic University of America.
90. Roscoe, K. H., Bassett, R. H., and Cole, E. R. L., (1967), 'Principal axes observed during simple shear of a sand', *Proc. 4th Eur. Conf. Soil Mech. Found. Eng., Oslo*, pp. 231-237.
91. Rothenburg, L. and Bathurst, R. J., (1989), 'Analytical study of induced anisotropy in idealized granular materials', *Géotechnique*, Vol. 49, pp. 601-614.
92. Rudnicki, J. W. and Rice, J. R., (1975) 'Conditions for the localisation of deformation in pressure-sensitive dilatant materials', *Journal of Mechanics and Physics of Solids* 1975, Vol. 23, pp. 371–394.
93. Saada, A.S. and Townsend, F.C., (1981), 'State of the art: laboratory strength testing of soils', *ASTM Spec. Tech. Publ.*, No. 740, pp. 7-77.
94. Saada, A.S., (1988), 'State of the art: Hollow cylinder torsional devices: their advantages and limitations', *Advance triaxial testing of soil and rock. ASTM STP 977*, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, pp.766-795
95. Sadrekarimi, A. and Olson, S.M., (2012), 'Effect of sample preparation method on critical state behavior of sands', *Geotechnical Testing Journal, ASTM*, Vol. 35, No. 4.
96. Sayao, A.S.F.J., (1989), 'Behaviour of sand under generalised stress paths in the hollow cylinder torsional device', PhD Thesis, University of British Columbia, Vancouver, Canada.
97. Sayao, A.S.F.J., and Vaid, Y.P., (1991), 'A critical assessment of stress nonuniformities in hollow cylinder test specimens', *Soils and Foundations*, Vol. 31, No. 1, pp. 60-72.

98. Sayao, A.S.F.J., and Vaid, Y.P., (1996), 'Influence of intermediate principal stress on the deformation response of sand', *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.33, pp. 822-828.
99. Sayao, A.S.F.J., and Vaid, Y.P., (1997), 'Effect of intermediate principal stress on the deformation response of sand', *Geomechanics Abstracts*, Vol. 1997, No. 2, p. 70.
100. Sazzad, M.M. and Suzuki, K., (2010), 'Micromechanical behavior of granular materials with inherent anisotropy under cyclic loading using 2D DEM', *Granular Matter*, Vol. 12, No. 6, pp. 597-605.
101. Serra, J. P. B., and Patrick Hooker, (2003), 'A New Computer Controlled Hollow Cylinder Torsional Shear Apparatus', *13th European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*.
102. Shibuya, S. (1985), 'Undrained behaviour of granular materials under principal stress rotation', PhD. Thesis, Imperial College of Science, Technology and Medicine, University of London.
103. Shibuya, S., and Hight, D.W., and Jardine, R.J. (2003a). 'Four-dimensional local boundary surfaces of an isotropically consolidated loose sand', *Soils and Foundations*, Vol. 43, No. 2, pp.89-103.
104. Shibuya, S., and Hight, D.W., and Jardine, R.J.(2003b). 'Local boundary surfaces of a loose sand dependent on consolidated path', *Soils and Foundations*, Vol. 43, No. 3, pp. 85-93.
105. Sivathayalan S., Logeswaran P., & Manmatharajan V. (2015). *Cyclic Resistance of a Loose Sand Subjected to Rotation of Principal Stresses. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2015.
106. Sivathayalan, S. & Vaid, Y.P., (1998), 'Truly undrained response of granular soils with no membrane penetration effects', *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 35, pp. 730-739.
107. Surachat, S., (1977), 'Stress-strain-strength anisotropy of varved clays', Sc.D. thesis submitted to the Department of Civil Engineering, Massachusetts Institute of Technology.
108. Symes, M. J., (1983), 'Rotation of principal stresses in sand', PhD. Thesis, Imperial College of Science, Technology and Medicine, University of London.
109. Symes, M. J., Gens, A. and Hight, D.W., (1984), 'Undrained Anisotropy and Principal Stress Rotation in Saturated Sand', *Géotechnique*, Vol. 34, No. 1, pp. 11-27.
110. Symes, M. J., Gens, A., and Hight, D. W., (1988), 'Drained principal stress rotation in saturated sand', *Géotechnique*, Vol. 38., No. 1, pp. 59-81.
111. Symes, M.J., Hight, D.W and Gens, A., (1982), 'Investigation anisotropy and the effects of principal stress rotation and of the intermediate principal stress using a hollow cylinder apparatus', *IUTAM Conference on deformation and failure of granular materials. Delft*, pp. 441-449.
112. Tatsuoka, F., (1980), 'Stress-strain behavior of an idealized anisotropic granular material', *Soils and Foundations*, Vol. 20, No. 3, pp.75-90.

113. Tian, Y., Yao, Y-P. (2018). 'Constitutive modelling of principal stress rotation by considering inherent and induced anisotropy of soils', *Acta Geotechnica* 13, 1299-1311 (2018), doi: 10.1007/s11440-018-0680-3.
114. Tokimatsu, K. and Nakamura, K., (1986), 'A liquefaction test without membrane penetration effects', *Soils and Foundations*, Vol. 26, No. 4, pp. 127-138.
115. Tong, Z. X., Zhang J-M, Yu Y. L., Zhang G., (2010), 'Drained deformation behavior of anisotropic sands during cyclic rotation of stress principal axes', *J. Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. ASCE. Vol. 136, No.11.
116. Towhata, I., and Ishihara, K., (1985), 'Undrained strength of sand undergoing cyclic rotation of principal stress axes', *Soils Found.*, Vol. 25, No.2, pp: 135–147.
117. Τσομώκος, R. K., Murthy, T. G. (2014). 'Effect of Intermediate Principal Stress on the Mechanical Behavior of Angular Sand', *Geo-Shanghai 2014, Conference*, May 26-28, 2014, Shanghai, China.
118. Τσομώκος, Α. (2005). 'Πειραματική Διερεύνηση της Συμπεριφοράς Εδαφικού Στοιχείου σε Δοκιμές Στατικής και Δυναμικής Στρέψης Κοίλου Δοκιμίου', *Διδακτορική Διατριβή*, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
119. Uthayakumar, M., and Vaid, Y. P., (1998), 'Static liquefaction of sands under multiaxial loading', *Can. Geotech. J.*, Vol. 35, No. 2, pp. 273-283.
120. Vaid, Y. P., Sivathayalan, S., and Stedman, D., (1999), 'Influence of Specimen-Reconstituting Method on the Undrained Response of Sand', *Geotech. Test. J.*, Vol. 22, No. 3, pp. 187-195.
121. Vaid, Y.P., and Campanella, R.G., (1974), 'Comparison of Triaxial and Plane Strain Behaviour of an Undisturbed Clay', *ASCE, Geotech. Eng. Div.*, Vol. 100, GT3, pp. 207-225.
122. Vaid, Y.P., Sayao, A.S.F, Hou, E. and Negussey, D., (1990), 'Generalised stress-path dependent behaviour with a new hollow cylinder torsional apparatus', *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 27, pp. 601-616.
123. Vaid, Y.P., Stedman, J. D., and Sivathayalan, S. (2001), "Confining stress and static shear effects in cyclic liquefaction", *Canadian Geotechnical Journal* 38, 580-591.
124. Van Dyck, E.J., (2012), 'Effects of Principal Stress direction and the intermediate principal stress on the stress-strain-strength behavior of a cross-anisotropic fine sand deposit' PhD thesis submitted to the Department of Civil Engineering, The Catholic University of America.
125. Wang J., Feng D., Guo L., Fu H., Cai Y., Wu T. & Shi L. (2019). Anisotropic and Noncoaxial behaviour of K0-Consolidated Soft Clays under Stress Paths with Principal Stress Rotation. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2019.
126. Wang, Q., and Lade, P.V., (2001), 'Shear banding in true triaxial tests and its effect on failure in sand', *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol. 127, No.8, pp. 754-761.
127. Wijewickreme, D. and Vaid. Y. P., (1993), 'Behavior of Loose Sand under Simultaneous Increase in Stress Ratio and Principal Stress Rotation', *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 30, No. 6, pp. 953-964.

128. Wijewickreme, D., Vald, Y. P., (1991), 'Stress nonuniformities in hollow cylinder torsional specimens', ASTM, Geotechnical Testing Journal, Vol. 14, pp. 349-362.
129. Wong, R.C.K., (2003), 'Strain-induced anisotropy in fabric and hydraulic parameters of oil sand in triaxial compression', Canadian Geotechnical Journal, Vol.40, No.3, pp. 489-500.
130. Wong, R.K.S. and Arthur, J.F.R., (1985), 'Induced and inherent anisotropy in sand', Géotechnique, Vol. 35, No. 4, pp. 471-481.
131. Xiao Y., Liu H., Chen Y., & Chu J. (2014). Influence of Intermediate Principal Stress on the Strength and Dilatancy Behaviour of Rockfill Material. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2014.
132. Yamada, Y., and Ishihara, K., (1979), 'Anisotropic deformation characteristics of sand under three dimensional stress conditions', Soils and Foundations, Vol. 19, No. 2, pp. 79-94,.
133. Yamamuro, J. A. and Wood, F. M., (2004), 'Effect of depositional method on the undrained behavior and microstructure of sand with silt', Soil Dynamic Earthquake Eng., Vol. 24, Nos. 9-10, pp. 751-760.
134. Yang, D.S., (2013), ' Numerical study of 3D granular material behaviour using DEM', PhD thesis submitted to the department of civil engineering, the University of Nottingham.
135. Yang, L., (2013), 'Experimental Study of Soil Anisotropy using Hollow Cylinder Testing', Thesis submitted to the University of Nottingham for the degree of Doctor of Philosophy, September 2013.
136. Yang, Y. and Yu, H. S., (2006), 'A non-coaxial critical state soil model and its application to simple shear simulations', International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, Vol. 30, No.13, pp. 1369-1390.
137. Yang, Z.X., Li X.S., Yang J., (2007), 'Undrained anisotropy and rotational shear in granular soil', Géotechnique 57, No. 4, 371-384.
138. Yang, Z.X., Li X.S., Yang J., (2008), 'Quantifying and modelling fabric anisotropy of granular soils', Géotechnique 58, No. 4, pp. 337-348.
139. Yin, J.H., and Kumruzzaman, M., (2008), 'The stress-strain-strength behaviour of a completely decomposed granite soil using a new advanced true triaxial testing system', Proc. of the 12th Int. Conf. of Int. Assoc. Comp. Meth. Adv. Geom. (IACMAG), Goa, India, pp. 1571-1579.
140. Yoshimine, M., Ishihara, K., and Vargas, W.(1998), "Effects of principal stress direction and intermediate principal stress on undrained shear behaviour of sand", Soils and Foundations 38, No.3, 179-188.
141. Yoshimine M., Ozay R., Sezen A., & Ansal A., (2009). Undrained Plate Strain Shear Tests on Saturated Sand using a Hollow Cylinder Torsional Shear Apparatus. Soils and foundations Vol.39, No.2, pp 131-136, April 1999.
142. Yu, H. S., Yang, Y., Yuan, X., (2005) 'Application of non-coaxial plasticity models in geotechnical analysis', Proceedings of the 16th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Vol. 2, Osaka, pp. 993-996.

143. Yu, H.S., Yuan, X., (2005), 'The importance of accounting for non-coaxial behavior in modeling soil–structure interaction', Proceedings of the 11th IACMAG, Invited Issue Paper, Vol. 4, pp. 709–718.
144. Yu, H. S., (2006) 'Plasticity and geotechnics', Springer.
145. Yu, H. S., and Yuan, X., (2006), 'On a class of non-coaxial plasticity models for granular soils', Proc. Royal Soc. A, 462, pp. 725-748.
146. Yu, H. S., (2008), 'Non-coaxial theories of plasticity for granular materials', Proc. 12th Int. Conf. of Int. Assoc. Comp. Meth. Adv. Geom. (IACMAG), Goa, India, pp. 361-378.
147. Zhang, K.Y., Yin Z.Z., Mei G.X., (2003), 'Development of the study on soil anisotropy', Journal of Rock and Soil Mechanics, Vol. 25. No. 9.
148. Zhenglong Z., Guoxing Ch., Lingyu X., & Kai Zh. (2017). Effect of the Principal Stress Direction on undrained Cyclic behaviour of Saturated silt using a Hollow Cylinder Apparatus. 16th World Conference in Earthquake, Santiago Chile, January, 2017.
149. Zlatovic, S., and Ishihara, K., (1997), 'Normalized behaviour of very loose non-plastic soils: effects of fabric', Soils and Foundation, Vol. 37, No. 4, pp. 47-56.

Διαδίκτυο:

1. Πληροφορίες διάταξης για την συσκευή κοίλου κυλίνδρου από την ιστοσελίδα: <https://www.gdsinstruments.com/gds-products/type/hollow-cylinder>