

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10

ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΩΝ ΕΔΑΦΩΝ

ΣΤΗ ΔΟΚΙΜΗ ΤΗΣ ΚΥΛΙΝΔΡΙΚΗΣ ΤΡΙΑΞΟΝΙΚΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ

10.1 Εισαγωγή

Σε προηγούμενα Κεφάλαια μελετήθηκε η παραμόρφωση των εδαφικών υλικών (μηχανισμοί παραμόρφωσης, μοναξονική συμπίεση, στερεοποίηση) χωριστά από την αστοχία τους (κριτήρια αστοχίας). Στο Κεφάλαιο αυτό γίνεται σύνθεση των ανωτέρω και παρουσιάζεται μία ολοκληρωμένη εικόνα της μηχανικής συμπεριφοράς των εδαφικών υλικών από τα αρχικά στάδια της παραμόρφωσης μέχρι την αστοχία. Η παρουσίαση γίνεται χωριστά για φόρτιση υπό στραγγισμένες και αστράγγιστες συνθήκες. Σε κάθε περίπτωση μελετάται η συμπεριφορά των κοκκωδών εδαφών (με χαλαρή και πυκνή δομή) και των συνεκτικών εδαφών (κανονικά στερεοποιημένα και υπερστερεοποιημένα). Η μηχανική συμπεριφορά των εδαφών εξετάζεται κατά τη δοκιμή της κυλινδρικής τριαξονικής φόρτισης. Η δοκιμή αυτή επιλέχθηκε, επειδή αφενός μεν μπορεί να εκτελεσθεί υπό στραγγισμένες και αστράγγιστες συνθήκες αφετέρου δε η εντατική κατάσταση που επιβάλλει στο δοκίμιο είναι ομοιόμορφη και σχετικά απλή (μπορεί να περιγραφεί με δύο μόνον παραμέτρους: τις κύριες ενεργές τάσεις σ'_1 και σ'_3).

Η εντατική κατάσταση του δοκιμίου κατά την κυλινδρική τριαξονική φόρτιση συχνά περιγράφεται εναλλακτικά με τα εξής δύο μεγέθη:

$$s' \equiv \frac{\sigma'_1 + \sigma'_3}{2}, \quad t \equiv \frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{2} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \quad (10.1)$$

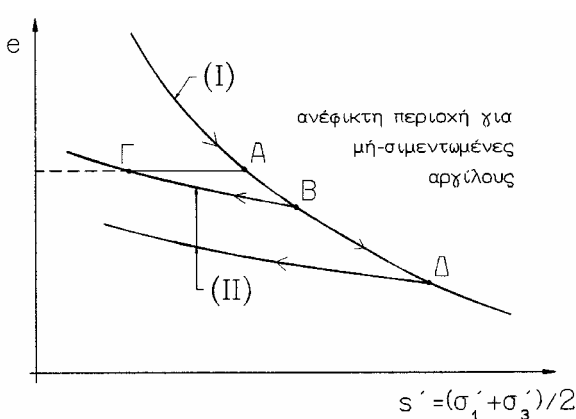
αντί των κυρίων τάσεων σ'_1 και σ'_3 . Τα εντατικά μεγέθη (s', t) αποτελούν τις συντεταγμένες της κορυφής του κύκλου του Mohr και συνεπώς διευκολύνουν τη μελέτη των διαδρομών τάσεων. Επιπλέον, το (s') εκφράζει (ατελώς) τη μέση συμπίεση του δοκιμίου, ενώ το (t) τη μέγιστη διατμητική τάση που ασκείται στο δοκίμιο (ακτίνα του κύκλου Mohr).

Στα προηγούμενα Κεφάλαια έχει επανειλημμένα τονισθεί η σημασία του δείκτη πόρων (e) στη μηχανική συμπεριφορά των εδαφών: οι χαλαρές άμμοι διαφέρουν από τις πυκνές ως προς το δείκτη πόρων και το ίδιο ισχύει για τις μαλακές και στιφρές αργίλους. Κατά συνέπεια, **σε πρώτη προσέγγιση** η μηχανική συμπεριφορά ενός εδαφικού υλικού κατά την κυλινδρική τριαξονική φόρτιση μπορεί να περιγραφεί από την τριάδα (s', t, e) , δηλαδή να παρασταθεί γραφικά με ένα σημείο στον τριδιάστατο χώρο των (s', t, e) . Στην παρούσα εργασία δεν θα μελετηθεί ο πλήρης τριδιάστατος χώρος, λόγω της δυσκολίας εμποπτείας των διαδρομών στο χώρο αυτό. Οι σχετικές διαδρομές θα παρουσιασθούν, όμως, σε δύο προβολές (υποχώρους) του τριδιάστατου χώρου: στο επίπεδο (s', t) θα παρουσιασθούν οι διαδρομές των τάσεων και στο επίπεδο (s', e) οι μεταβολές του όγκου των δοκιμίων. Το επίπεδο (s', t) έχει χρησιμοποιηθεί στα προηγούμενα Κεφάλαια για τη γραφική παράσταση των διαδρομών ενεργών τάσεων, ενώ το επίπεδο (s', e) έχει χρησιμοποιηθεί κατά τη

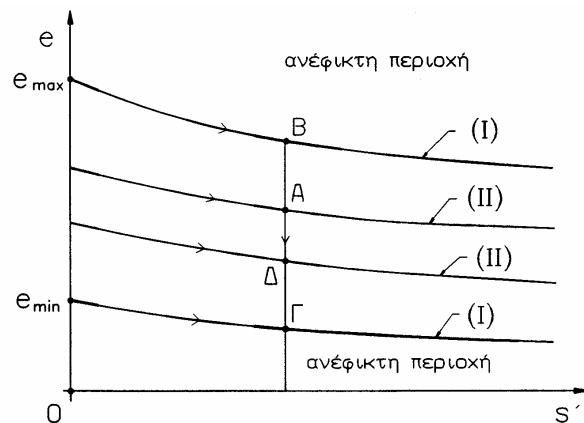
μελέτη της μοναξονικής συμπίεσης των εδαφών (Κεφάλαιο 6). Στα επόμενα περιγράφονται μερικά ουσιώδη χαρακτηριστικά της μηχανικής συμπεριφοράς των εδαφών στο επίπεδο (s', e).

Το Σχήμα 10.1 παρουσιάζει το γράφημα της ισότροπης συμπίεσης μιάς αργίλου (καμπύλη I), που εμφανίζει τα γνωστά χαρακτηριστικά "σκληρυνσης" (μείωση της συμπιεστότητας με την αύξηση του φορτίου). Το γράφημα της μονοδιάστατης συμπίεσης έχει την ίδια μορφή με την καμπύλη (I) αλλά είναι ελαφρά μετατοπισμένο προς τα αριστερά της καμπύλης (I) (δεν φαίνεται στο σχήμα για την απλότητά του μόνον). Σημεία πάνω στην καμπύλη (I) (όπως τα A, B) αντιστοιχούν στην ισότροπη φόρτιση **κανονικά στερεοποιημένων** αργίλων, δηλαδή αργίλων που δεν έχουν υποστεί στο παρελθόν μεγαλύτερη φόρτιση. Αντίθετα, σημεία αριστερά της καμπύλης (I) αντιστοιχούν στην ισότροπη φόρτιση **υπερστερεοποιημένων** αργίλων, δηλαδή αργίλων που στο παρελθόν έχουν υποστεί μεγαλύτερη φόρτιση. Έτσι, π.χ. η κατάσταση Γ αντιστοιχεί σε υπερστερεοποιημένη άργιλο που έχει προέλθει με ισότροπη αποφόρτιση από την κανονικά στερεοποιημένη κατάσταση Β. Η τάση που έχει υποστεί το δοκίμιο στην κατάσταση Β ονομάζεται **μέγιστη τάση προφόρτισης**. Οι καμπύλες (II) παρουσιάζουν τις διαδρομές ισότροπων αποφορτίσεων από κανονικά στερεοποιημένες καταστάσεις (δηλαδή από σημεία της καμπύλης I). Τέλος, τα σημεία A, Γ παρουσιάζουν δύο καταστάσεις με τον ίδιο δείκτη πόρων αλλά διαφορετική ένταση (η μία είναι κανονικά στερεοποιημένη και η άλλη υπερστερεοποιημένη). Γενικά, η περιοχή αριστερά της καμπύλης (I) παριστάνει εφικτές καταστάσεις, δηλαδή καταστάσεις που μπορούν να πραγματοποιηθούν με ισότροπη αποφόρτιση κατά μήκος μιας καμπύλης τύπου (II) από κάποιο σημείο της καμπύλης (I). Αντίθετα, η περιοχή δεξιά της καμπύλης (I) είναι ανέφικτη για μή-σιμεντωμένες αργίλους, επειδή αντιστοιχεί σε δείκτες πόρων μεγαλύτερους από την τιμή ισορροπίας του εδαφικού σκελετού για κάθε φορτίο.

Η γραφική παράσταση της συμπεριφοράς των αμμωδών εδαφών στο επίπεδο (s', e) είναι διαφορετική, επειδή στα εδάφη αυτά ο δείκτης πόρων μπορεί να μεταβληθεί χωρίς αντίστοιχη μεταβολή της φόρτισης (π.χ. με δόνηση). Έτσι, τα κύρια χαρακτηριστικά των αμμωδών εδαφών είναι ο μέγιστος (e_{max}) και ο ελάχιστος (e_{min}) δείκτης πόρων στην αφόρτιστη κατάσταση, δηλαδή το εύρος των εφικτών τιμών του δείκτη πόρων. Το Σχήμα 10.2 παρουσιάζει τους οριακούς δείκτες πόρων στην αφόρτιστη κατάσταση, τις καμπύλες ισότροπης συμπίεσης που εκκινούν από τους οριακούς δείκτες πόρων (καμπύλες I) και τις αντίστοιχες καμπύλες που εκκινούν από κάποια ενδιάμεση τιμή του δείκτη πόρων (καμπύλες II). Η περιοχή μεταξύ των δύο καμπύλων τύπου (I) ορίζει την εφικτή περιοχή για τα αμμώδη εδάφη, ενώ η περιοχή εκτός των ορίων των καμπύλων (I) είναι ανέφικτη. Καταστάσεις στην εφικτή περιοχή



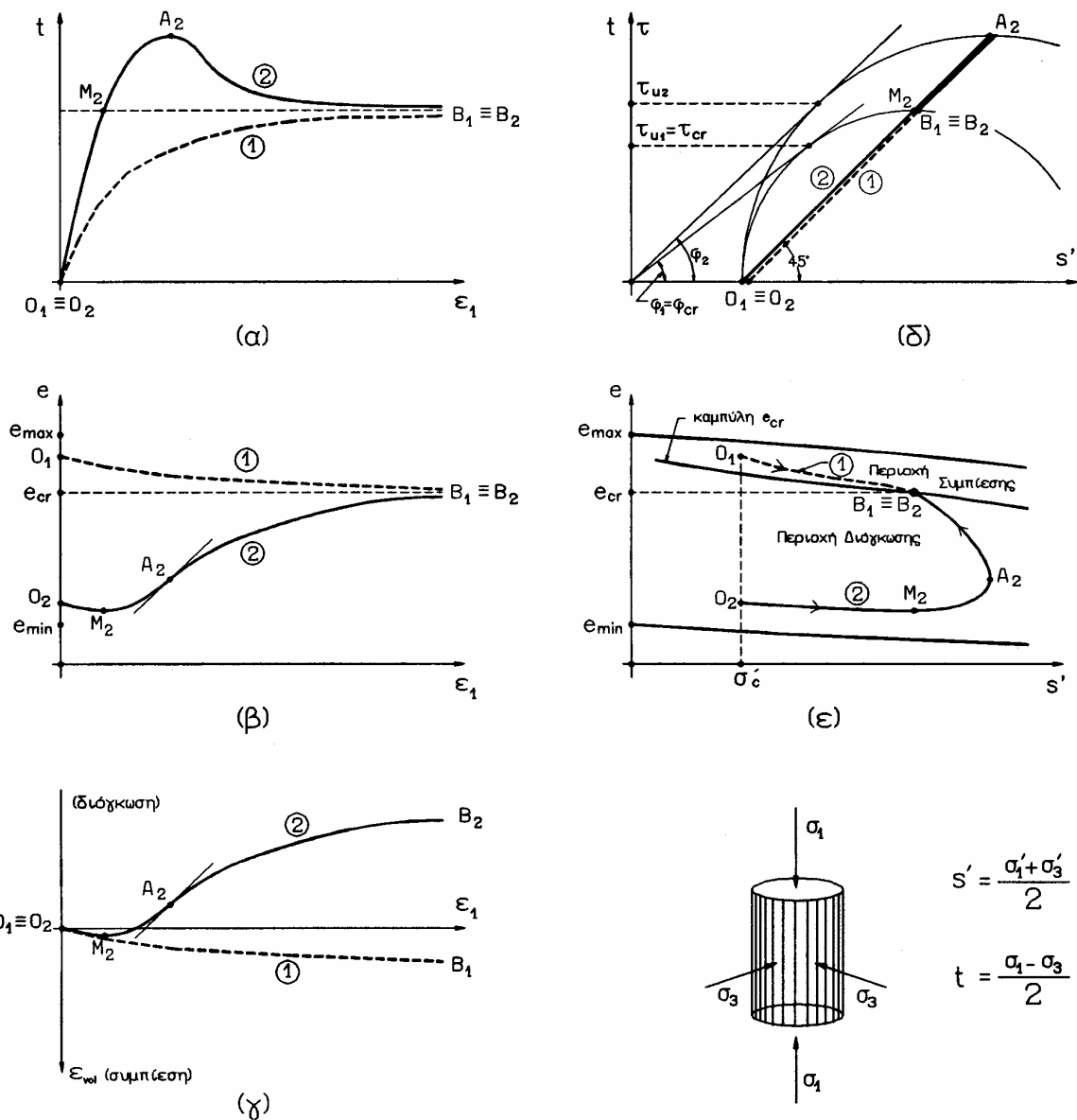
Σχ. 10.1: Ισότροπη συμπίεση αργίλων



Σχ. 10.2: Ισότροπη συμπίεση άμμων

μπορούν να πραγματοποιηθούν είτε με ισότροπη συμπίεση κατά μήκος μιας καμπύλης τύπου (II), είτε με δονητική συμπύκνωση (χωρίς μεταβολή του φορτίου) κατά μήκος της κατακόρυφης διαδρομής ΒΑΔΓ.

Τέλος, θα πρέπει να τονισθεί ότι η συμπεριφορά των εδαφών και σε άλλες εντατικές καταστάσεις που οδηγούν στην αστοχία είναι ποιοτικά τουλάχιστον όμοια με τη συμπεριφορά τους κατά την κυλινδρική τριαξονική φόρτιση. Συνεπώς, τα συμπεράσματα που θα συναχθούν στα επόμενα με βάση τα αποτελέσματα της κυλινδρικής τριαξονικής δοκιμής ισχύουν κατά ποιοτική προσέγγιση και σε άλλες, περισσότερο σύνθετες, εντατικές καταστάσεις. Η γενίκευση της συμπεριφοράς των εδαφών κατά την κυλινδρική τριαξονική δοκιμή σε άλλες εντατικές καταστάσεις αποτελεί τον κύριο σκοπό των **καταστατικών νόμων**, όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 6. Μία από τις πρώτες (και ιδιαίτερα επιτυχημένες) προσπάθειες για την ικανοποιητική περιγραφή της μηχανικής συμπεριφοράς των εδαφών με βάση τη λογική της γενίκευσης της συμπεριφοράς τους κατά την κυλινδρική τριαξονική δοκιμή, έγινε από την ερευνητική ομάδα του Πανεπιστημίου Cambridge και φέρει το όνομα "Θεωρία της Κρίσιμης Κατάστασης".



Σχ. 10.3: Στραγγισμένη φόρτιση - Κοκκώδη εδάφη

10.2 Συμπεριφορά υπό Πλήρως Στραγγισμένες Συνθήκες

10.2.1 Κοκκώδη εδάφη

Το Σχήμα 10.3 παρουσιάζει τυπικά αποτελέσματα από δύο στραγγισμένες δοκιμές κυλινδρικής τριαξονικής φόρτισης σε μεσόκοκκη άμμο. Η πρώτη δοκιμή (καμπύλη 1) έγινε σε δοκίμιο χαλαρής άμμου ($D_r = 15\%$), ενώ η δεύτερη (καμπύλη 2) σε δοκίμιο πυκνής άμμου ($D_r = 90\%$). Και τα δύο δοκίμια στερεοποιήθηκαν ισότροπα στην ίδια πίεση ($O_1 \equiv O_2$) και στη συνέχεια υποβλήθηκαν σε διάτμηση υπό πλήρως στραγγισμένες συνθήκες με αύξηση του κατακόρυφου φορτίου μέχρι τη θραύση.

Ειδικότερα, το Σχήμα 10.3(α) παρουσιάζει τις καμπύλες της διατμητικής τάσης (t) ως προς την αξονική παραμόρφωση (ε_1). Στη χαλαρή άμμο η διατμητική τάση αυξάνει μονοτονικά μέχρι την αστοχία (σημείο B_1), που συμβαίνει σε μεγάλη παραμόρφωση (10-20%). Αντίθετα, η πυκνή άμμος παρουσιάζει μεγαλύτερη δυσκαμψία, η διατμητική τάση αυξάνει μέχρι την αστοχία (σημείο A_2), που συμβαίνει σε μικρή αξονική παραμόρφωση (1-3%), ενώ στη συνέχεια μειώνεται μέχρι μία τελική τιμή (σημείο B_2), που είναι πρακτικά ίση με τη διατμητική αντοχή της χαλαρής άμμου. Το Σχήμα 10.3(δ) παρουσιάζει τις διαδρομές ενεργών τάσεων των δύο δοκιμών. Η ευθεία O_1B_1 αντιστοιχεί στο δοκίμιο (1) της χαλαρής άμμου, ενώ η ευθεία $O_2M_2A_2B_2$ στο δοκίμιο (2) της πυκνής άμμου. Η χαλαρή άμμος παρουσιάζει γωνία τριβής (ϕ_1) μικρότερη από τη γωνία τριβής (ϕ_2) της πυκνής άμμου, αλλά σε μεγάλες παραμορφώσεις η διατμητική τάση που αναλαμβάνει η πυκνή άμμος μειώνεται και γίνεται ίση με τη γωνία τριβής (ϕ_1) της χαλαρής άμμου. Οι διαφορές στη διατμητική αντοχή (και στη γωνία τριβής) μεταξύ της χαλαρής και της πυκνής άμμου ερμηνεύονται στα Σχήματα 10.3(β) και 10.3(γ), που παρουσιάζουν το δείκτη πόρων (e) και την ογκομετρική παραμόρφωση (ε_{vol}) ως προς την αξονική παραμόρφωση. Η χαλαρή άμμος συμπυκνώνεται, ενώ η πυκνή άμμος, μετά από μία μικρή μείωση του όγκου, διογκώνεται σημαντικά. Η συσχέτιση μεταξύ των δύο δοκιμών φαίνεται ίσως καλύτερα στο Σχήμα 10.3(β) που παρουσιάζει τη μεταβολή του δείκτη πόρων (e). Οι καμπύλες εκκινούν από διαφορετικά σημεία (O_1 και O_2), τα οποία βρίσκονται κοντά στο μέγιστο δείκτη πόρων (χαλαρή άμμος) και στον ελάχιστο δείκτη πόρων (πυκνή άμμος). Ο δείκτης πόρων της χαλαρής άμμου μειώνεται μέχρι την **κρίσιμη τιμή** (e_{cr}), που αντιστοιχεί στην αστοχία. Αντίθετα, ο δείκτης πόρων της πυκνής άμμου αυξάνει (μετά από μία μικρή αρχική μείωση) και η τελική του τιμή είναι ίδια με αυτήν της χαλαρής άμμου. Αν, επιπλέον, παρατηρηθεί ότι σε μεγάλες παραμορφώσεις η διατμητική αντοχή (αλλά και η αντίστοιχη γωνία τριβής) της πυκνής και της χαλαρής άμμου είναι ίσες, συνάγεται το συμπέρασμα ότι **υπάρχει μονοσήμαντη αντιστοιχία μεταξύ του κρίσιμου δείκτη πόρων** (e_{cr}), της γωνίας τριβής (ϕ_{cr}) και της διατμητικής αντοχής (τ_{cr}). Κατά συνέπεια, η συμπεριφορά των δύο δοκιμών σε μεγάλες παραμορφώσεις είναι όμοια, επειδή, ενώ στην αρχή της διάτμησης είχαν διαφορετικό δείκτη πόρων, τελικώς απέκτησαν **κοινό δείκτη πόρων** (e_{cr}). Η μέγιστη τιμή της διατμητικής τάσης της πυκνής άμμου (σημείο A_2) συμβαίνει όταν η τάση για διόγκωση είναι μέγιστη, δηλαδή όταν $d\varepsilon_{vol}/d\varepsilon_1 = \max$ (Σχήμα 10.3γ). Η αυξημένη τάση για διόγκωση οδηγεί σε μακροσκοπική αύξηση της γωνίας τριβής, επειδή το δοκίμιο απορροφά πρόσθετο έργο παραμόρφωσης κατά τη διόγκωσή του. Το φαινόμενο αυτό μελετήθηκε με το μηχανικό ανάλογο του κεκλιμένου επιπέδου στο εδάφιο 9.2. Αντίθετα, η γωνία τριβής (ϕ_{cr}) σε μεγάλες παραμορφώσεις αντιστοιχεί σε μηδενική τάση του δοκιμίου να διογκωθεί.

Το Σχήμα 10.3(ε) παρουσιάζει τις διαδρομές των δοκιμών φόρτισης της χαλαρής (1) και πυκνής άμμου (2) στο διάγραμμα (s', e) . Στο ίδιο διάγραμμα φαίνονται και τα όρια της εφικτής περιοχής που αντιστοιχούν στις καμπύλες ισότροπης συμπίεσης της πλέον χαλαρής και της πλέον πυκνής δομής. Το τελικό σημείο και των δύο διαδρομών ($B_1 \equiv B_2$), που αντιστοιχεί στον κρίσιμο δείκτη πόρων, ανήκει στην **περιβάλλουσα κρίσιμου δείκτη πόρων** (καμπύλη e_{cr}). Η περιβάλλουσα αυτή χωρίζει την εφικτή περιοχή σε δύο τμήματα: την **περιοχή διόγκωσης** κάτω από την περιβάλλουσα και την **περιοχή συμπίεσης** πάνω από την περιβάλλουσα. Εδαφικά στοιχεία που παριστάνονται με σημεία στην περιοχή συμπίεσης έχουν τάση για μείωση του όγκου κατά τη διάτμηση, ενώ εδαφικά στοιχεία που παριστάνονται με σημεία στην περιοχή διόγκωσης έχουν τάση για αύξηση του όγκου (διασταλτικότητα) κατά τη διάτμηση. Η περιβάλλουσα του κρίσιμου δείκτη πόρων προσεγγίζει το μέγιστο δείκτη πόρων για μικρές τάσεις (s'), ενώ απομακρύνεται σημαντικά από αυτόν με την αύξηση της τάσης. Συνεπώς, μία άμμος που έχει τάση για διόγκωση σε μικρές πιέσεις είναι δυνατόν να εμφανίσει τάση για συμπίεση, όταν η πίεση αυξηθεί σημαντικά (επειδή η μείωση του δείκτη πόρων κατά την ισότροπη φόρτιση είναι μικρή).

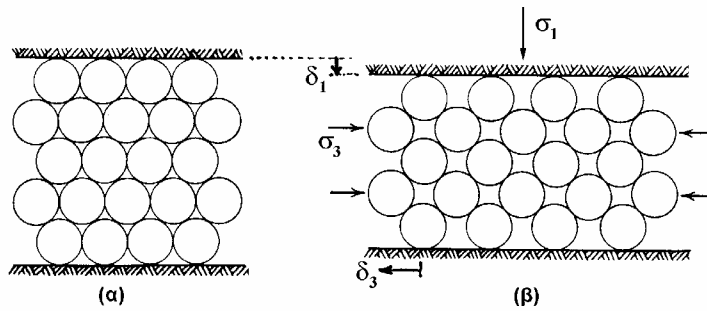
Τέλος, θα πρέπει να αναφερθεί ότι συχνά, σε δοκιμές επί πολύ πυκνών άμμων, ο κατιών κλάδος της καμπύλης φόρτισης, μετά τη (μέγιστη) διατμητική τάση (κλάδος A_2, B_2), δεν παρουσιάζει τη μορφή που περιγράφηκε στο προηγούμενο παράδειγμα, δηλαδή δεν συγκλίνει στη διατμητική αντοχή της χαλαρής άμμου (σημείο B_1). Τούτο συμβαίνει επειδή μετά την αστοχία (σημείο A_2) συχνά αναπτύσσεται μία ζώνη ολίσθησης (shear band) στο εσωτερικό του δοκιμίου, με συνέπεια οι περαιτέρω παραμορφώσεις να εντοπίζονται στη ζώνη αυτή, η κατάσταση του δοκιμίου να είναι ανομοιόμορφη και οι μετρούμενες παραμορφώσεις να μην είναι πλέον ίσες με τις πραγματικές.

Τα προηγούμενα συμπεράσματα φαίνονται παραστατικά και στο Σχήμα 9.6, που παρουσιάζει τις συνιστώσες της γωνίας τριβής ως προς το πορώδες για μία μεσόκοκκη άμμο. Η γωνία τριβής αυξάνει σημαντικά με τη μείωση του πορώδους (δηλαδή με την αύξηση της σχετικής πυκνότητας) και η αύξηση οφείλεται αποκλειστικά στη συνιστώσα $(\phi - \phi_{cv})$ που εκφράζει την τάση για διόγκωση (διασταλτικότητα) της άμμου. Αντίθετα, οι συνιστώσες της πραγματικής τριβής μεταξύ των κόκκων (ϕ_{μ}) και της αλληλεμπλοκής μεταξύ των κόκκων $(\phi_{cv} - \phi_{\mu})$ παραμένουν σταθερές.

Η **διασταλτικότητα** των πυκνών άμμων είναι ένα από τα φαινόμενα που δεν μπορούν να ερμηνευθούν με τη θεωρία της γραμμικής ισότροπης ελαστικότητας¹ και οφείλεται στη φύση των εδαφικών υλικών, δηλαδή στην ύπαρξη ασύνδετων κόκκων που αλληλεπιδρούν μέσω δυνάμεων τριβής. Ειδικότερα, όταν σε ένα εδαφικό υλικό επιβληθεί μία διατμητική τάση, η αντίστοιχη διατμητική παραμόρφωση υλοποιείται μέσω σχετικών ολισθήσεων μεταξύ των κόκκων. Η αναδιάταξη αυτή της δομής των κόκκων συνοδεύεται και από μεταβολή του όγκου των κενών, δηλαδή από ογκομετρική παραμόρφωση του εδαφικού υλικού. Συγκεκριμένα, αν η αρχική δομή του υλικού είναι χαλαρή, η ογκομετρική παραμόρφωση είναι θετική (μείωση του όγκου), ενώ, αν η αρχική δομή είναι πυκνή, η ογκομετρική παραμόρφωση είναι αρνητική (διασταλτικότητα).

Το φαινόμενο της διασταλτικότητας κατά την κυλινδρική τριαξονική φόρτιση μπορεί να εξηγηθεί με το απλό φυσικό μοντέλο της κατακόρυφης φόρτισης

¹ κατά την οποία η επιβολή διατμητικής τάσης σε ένα δοκίμιο προκαλεί **μόνο** διατμητικές παραμορφώσεις



Σχ. 10.4: Φόρτιση ισομεγεθών σφαιρών

ισομεγεθών σφαιρών σε πυκνή διάταξη, που φαίνεται στο Σχήμα 10.4. Το Σχήμα 10.4α παρουσιάζει την κατάσταση πριν από την επιβολή του αξονικού φορτίου σ_1 , που οδηγεί σε συμπίεση του υλικού στην κατακόρυφη διεύθυνση κατά δ_1 (Σχήμα 10.4β). Αποδεικνύεται ότι η πλευρική διόγκωση του υλικού είναι $\delta_3 \approx -2.88 \delta_1$, οπότε η καθαρή μεταβολή του όγκου για συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης ($\delta_2 = 0$) είναι:

$$\Delta V = \delta_1 + \delta_2 + \delta_3 = -1.88 \delta_1$$

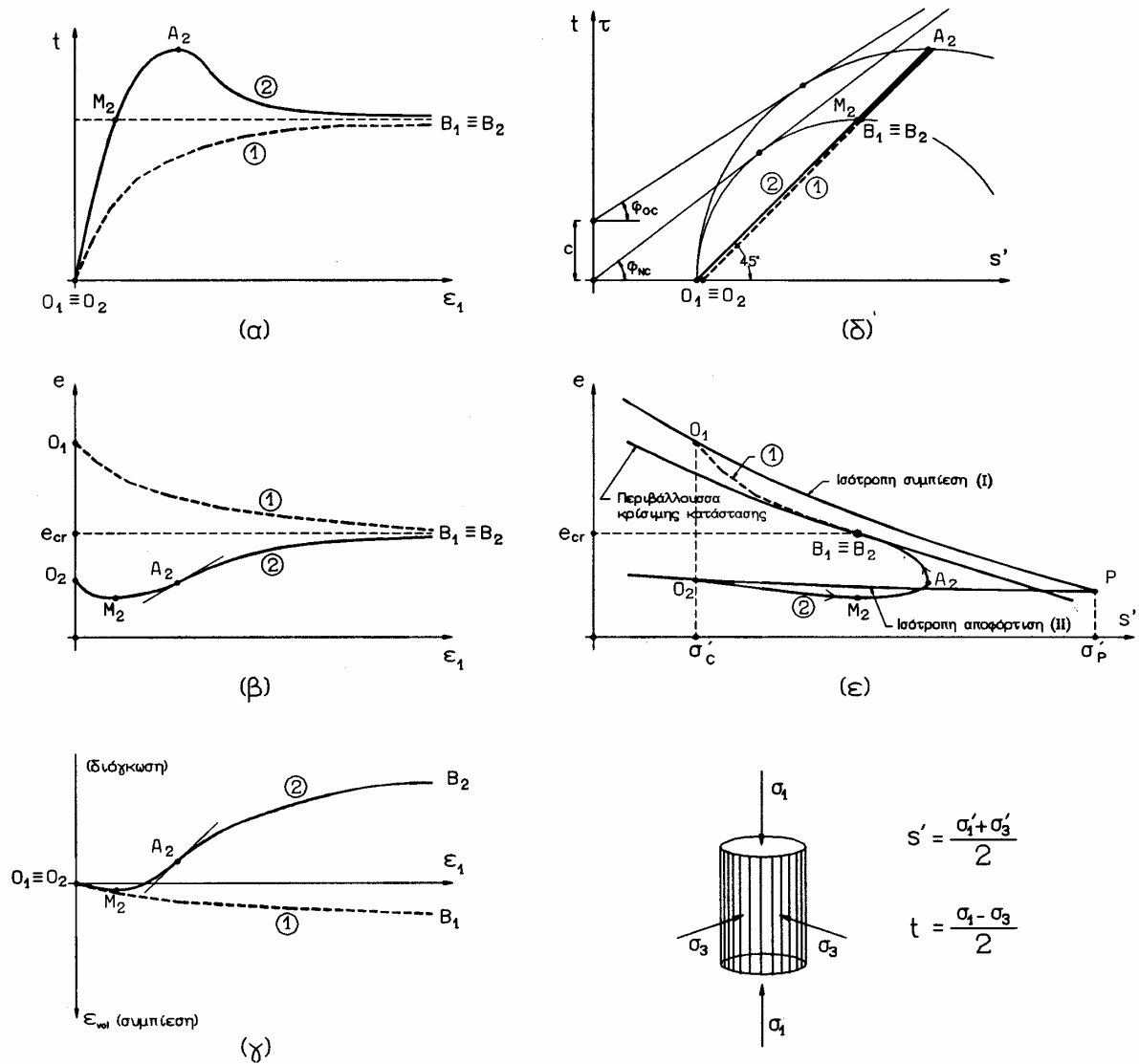
δηλαδή αντιστοιχεί σε αύξηση του όγκου (και συνεπώς αύξηση του δείκτη πόρων). Αντίθετα, όταν η αρχική δομή των σφαιρών είναι χαλαρή, ο όγκος του δοκιμίου θα μειώνεται κατά τη φόρτιση.

10.2.2 Συνεκτικά εδάφη

Το Σχήμα 10.5 παρουσιάζει τυπικά αποτελέσματα από δύο στραγγισμένες δοκιμές κυλινδρικής τριαξονικής φόρτισης σε άργιλο μέσης πλαστικότητας. Η πρώτη δοκιμή (καμπύλες 1) έγινε σε δείγμα κανονικά στερεοποιημένου αργίλου, ενώ η δεύτερη δοκιμή (καμπύλες 2) σε δείγμα ισχυρά προφορτισμένου αργίλου. Οι αρχικές καταστάσεις των δύο δοκιμών φαίνονται στο Σχήμα 10.5(ε). Η κατάσταση του κανονικά στερεοποιημένου δοκιμίου (O_1) ανήκει στην καμπύλη της ισότροπης συμπίεσης (I), ενώ η κατάσταση του υπερστερεοποιημένου δοκιμίου (O_2) ανήκει στην καμπύλη ισότροπης αποφόρτισης από το σημείο P με μέγιστη τάση προφόρτισης (σ'_p). Έτσι, στην αρχική κατάσταση και τα δύο δοκίμια είναι στερεοποιημένα στην ίδια ισότροπη τάση (σ'_c) αλλά, ενώ το δοκίμιο (1) στερεοποιήθηκε κατά μήκος της καμπύλης ισότροπης συμπίεσης μέχρι το σημείο O_1 , το δοκίμιο (2) φορτίσθηκε ισότροπα μέχρι την τάση (σ'_p) (σημείο P) και στη συνέχεια αποφορτίσθηκε μέχρι την τάση (σ'_c) κατά μήκος της καμπύλης (II).

Κατά τη διατμητική φόρτιση στην κυλινδρική τριαξονική συσκευή, η συμπεριφορά των δύο αργιλικών δοκιμών είναι κατά ποιοτική θεώρηση όμοια με τη συμπεριφορά των αμμωδών δοκιμών που μελετήθηκαν προηγουμένως και συγκεκριμένα: η κανονικά στερεοποιημένη άργιλος παρουσιάζει αντίστοιχη συμπεριφορά με τη χαλαρή άμμο, ενώ η υπερστερεοποιημένη άργιλος αντίστοιχη συμπεριφορά με την πυκνή άμμο. Συνεπώς, ισχύουν όλα όσα αναφέρθηκαν στο προηγούμενο εδάφιο με τις εξής διαφορές:

1. Η ομοιότητα είναι μόνον ποιοτική, δηλαδή, ενώ η μορφή των καμπύλων είναι όμοια, οι απόλυτες τιμές των διαφόρων μεγεθών (π.χ. διατμητική αντοχή, συμπίεστικότητα, δείκτες πόρων, γωνία τριβής) μπορεί να διαφέρουν σημαντικά.



Σχ. 10.5: Στραγγισμένη φόρτιση - Συνεκτικά εδάφη

2. Στην περίπτωση των άμμων, με την αύξηση της πυκνότητας αυξάνει η γωνία τριβής και η συνοχή παραμένει μηδενική². Αντίθετα, ενώ η κανονικά στερεοποιημένη άργιλος δεν εμφανίζει συνοχή αλλά μόνον γωνία τριβής (ϕ_{NC}), η υπερστερεοποιημένη άργιλος παρουσιάζει συνοχή ($c \neq 0$) και γωνία τριβής ($\phi_{OC} < \phi_{NC}$). Στην περίπτωση της υπερστερεοποιημένης άργιλου, μετά την αστοχία (σημείο A_2) η διατμητική τάση μειώνεται και καταλήγει στη διατμητική αντοχή της κανονικά στερεοποιημένης άργιλου ($B_2 \equiv B_1$), που αντιστοιχεί σε μηδενική συνοχή και γωνία τριβής ϕ_{NC} . Φαίνεται δηλαδή ότι με την παρατεινόμενη παραμόρφωση η συνοχή της υπερστερεοποιημένης άργιλου καταστρέφεται και η άργιλος επανέρχεται στην κανονικά στερεοποιημένη κατάσταση. Η συνοχή των συνεκτικών εδαφών οφείλεται σε "συγκόλληση" των αργιλικών πλακιδίων με ηλεκτροχημικές δυνάμεις, που αναπτύσσονται με την προσέγγιση των πλακιδίων κατά την επιβολή μιας (μεγάλης) πίεσης προφόρτισης.

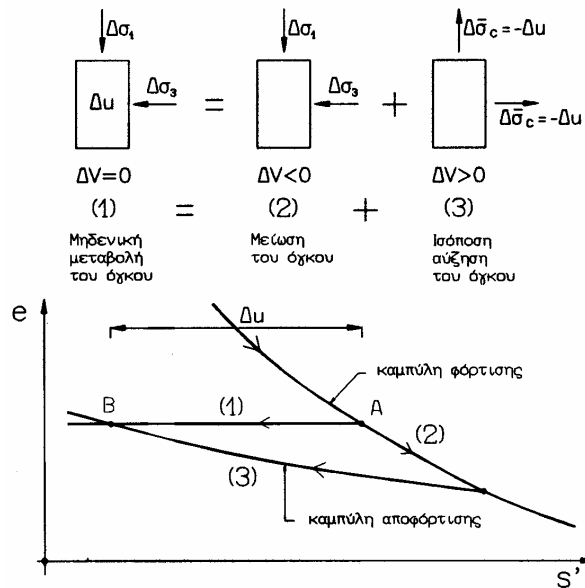
² οι άμμοι **δεν** εμφανίζουν συνοχή, εκτός αν είναι σιμεντωμένες

10.3 Συμπεριφορά υπό Αστράγγιστες Συνθήκες

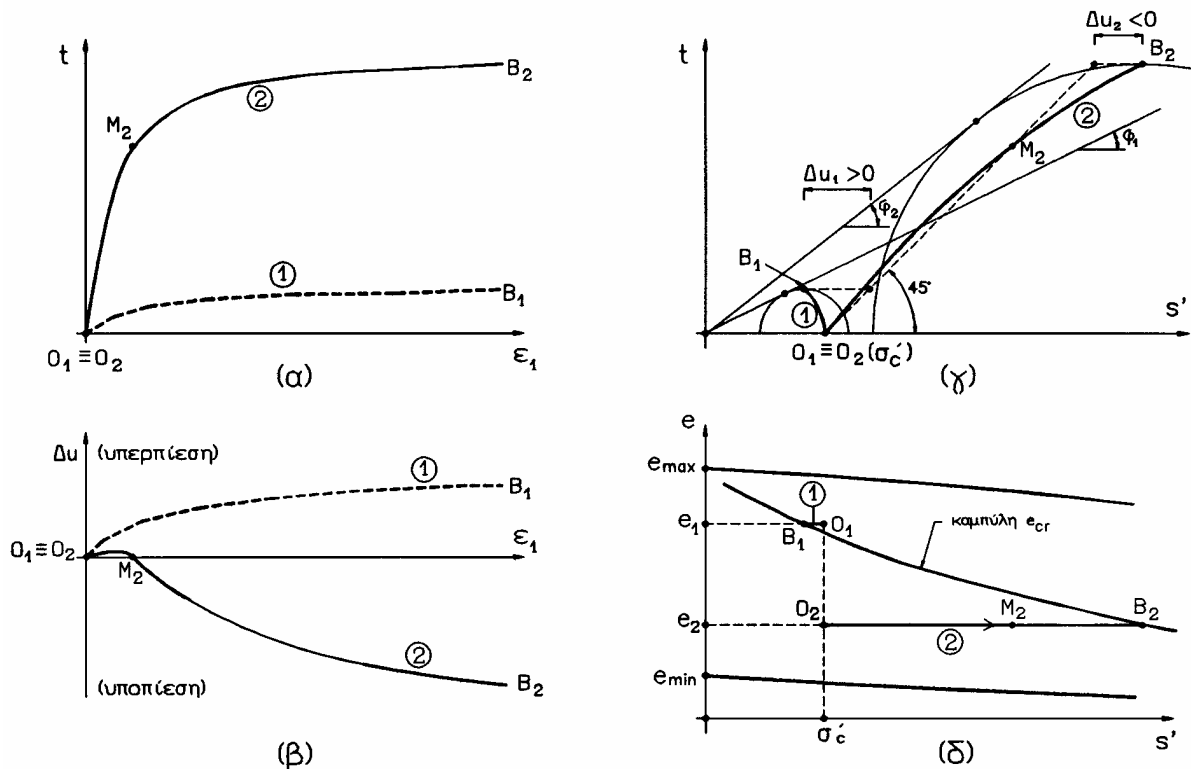
10.3.1 Κοκκώδη εδάφη

Κατά την αστράγγιστη κυλινδρική τριαξονική φόρτιση, η βαλβίδα στράγγισης του δοκιμίου είναι κλειστή, οπότε ο όγκος του δοκιμίου δεν μεταβάλλεται ($\Delta \varepsilon_{vol} = 0$). Συνεπώς, αν το δοκίμιο (υπό στραγγισμένες συνθήκες) έχει τάση για μείωση του όγκου, κατά τη φόρτιση υπό αστράγγιστες συνθήκες θα αναπτυχθούν υπερπίεσεις πόρων επειδή παρεμποδίζεται η μείωση του όγκου. Ο μηχανισμός ανάπτυξης πιέσεων πόρων σε αντιστάθμιση της τάσης για μείωση του όγκου φαίνεται στο Σχήμα 10.6. Η αστράγγιστη επιβολή της φόρτισης (1) αντιστοιχεί στη διαδρομή (AB), δηλαδή σε μείωση της μέσης ενεργού τάσης (s') υπό σταθερό δείκτη πόρων και ανάπτυξη ισόποσης υπερπίεσης πόρων (Δu). Η διαδρομή αυτή είναι ισοδύναμη με τη συνισταμένη της φόρτισης (2), διαδρομή (ΑΓ), και της φόρτισης (3), διαδρομή (ΓΒ). Εξ αυτών, η φόρτιση (2) προκαλεί μείωση του όγκου (και του δείκτη πόρων), ενώ η φόρτιση (3) προκαλεί ισόποση αύξηση του όγκου (και του δείκτη πόρων). Η ισότητα: (1)=(2)+(3) ισχύει ως προς τις μεταβολές του όγκου αλλά και ως προς τις μεταβολές των ολικών τάσεων, επειδή κατά τη φόρτιση (3) $\Delta \sigma_c = 0$. Κατ' επέκταση, αν η φόρτιση ενός δοκιμίου υπό στραγγισμένες συνθήκες προκαλεί αύξηση του όγκου (διασταλτικότητα), τότε η ίδια φόρτιση υπό αστράγγιστες συνθήκες θα προκαλέσει την ανάπτυξη υποπιέσεων πόρων, δηλαδή τη μείωση της πίεσης πόρων του δοκιμίου.

Η εφαρμογή των ανωτέρω στην περίπτωση της αστράγγιστης φόρτισης των κοκκωδών εδαφών φαίνεται στο Σχήμα 10.7, που παρουσιάζει τα διαγράμματα κυλινδρικής τριαξονικής φόρτισης μιας χαλαρής άμμου (1) και μιας πυκνής άμμου (2) μετά από ισότροπη στερεοποίηση στην ίδια τάση (σ'_c). Το Σχήμα 10.7(β) παρουσιάζει τις μεταβολές της πίεσης πόρων στα δύο δοκίμια. Η χαλαρή άμμος (που έχει τάση για μείωση του όγκου) αναπτύσσει υπερπίεσεις πόρων, ενώ η πυκνή άμμος (που έχει τάση για αύξηση του όγκου) αναπτύσσει υποπιέσεις πόρων. Η συμπεριφορά αυτή είναι απόλυτα συμβιβαστή με τη συμπεριφορά των ίδιων εδαφών υπό στραγγισμένες συνθήκες (βλέπε και Σχήμα 10.3). Η αναλογία της συμπεριφοράς παρουσιάζεται και στις διαδρομές ενεργών τάσεων (Σχήμα 10.7γ). Η ΔΕΤ της χαλαρής άμμου κινείται προς τα αριστερά και ο κύκλος αστοχίας εφάπτεται στην περιβάλλουσα με γωνία τριβής ϕ_1 (πρακτικά ίδια με τη γωνία τριβής της χαλαρής άμμου υπό στραγγισμένες συνθήκες). Αντίθετα, η ΔΕΤ της πυκνής άμμου κινείται προς τα δεξιά και ο κύκλος αστοχίας εφάπτεται στην περιβάλλουσα με γωνία τριβής ϕ_2 (πρακτικά ίδια με τη γωνία τριβής της πυκνής άμμου υπό στραγγισμένες συνθήκες). Στην περίπτωση της αστράγγιστης φόρτισης της πυκνής άμμου, όμως, η διατμητική τάση μετά την αστοχία δεν μειώνεται (Σχήμα 10.7α), όπως είχε



Σχ. 10.6: Αστράγγιστη φόρτιση εδαφών



Σχ. 10.7: Αστράγγιστη φόρτιση - Κοκκώδη εδάφη

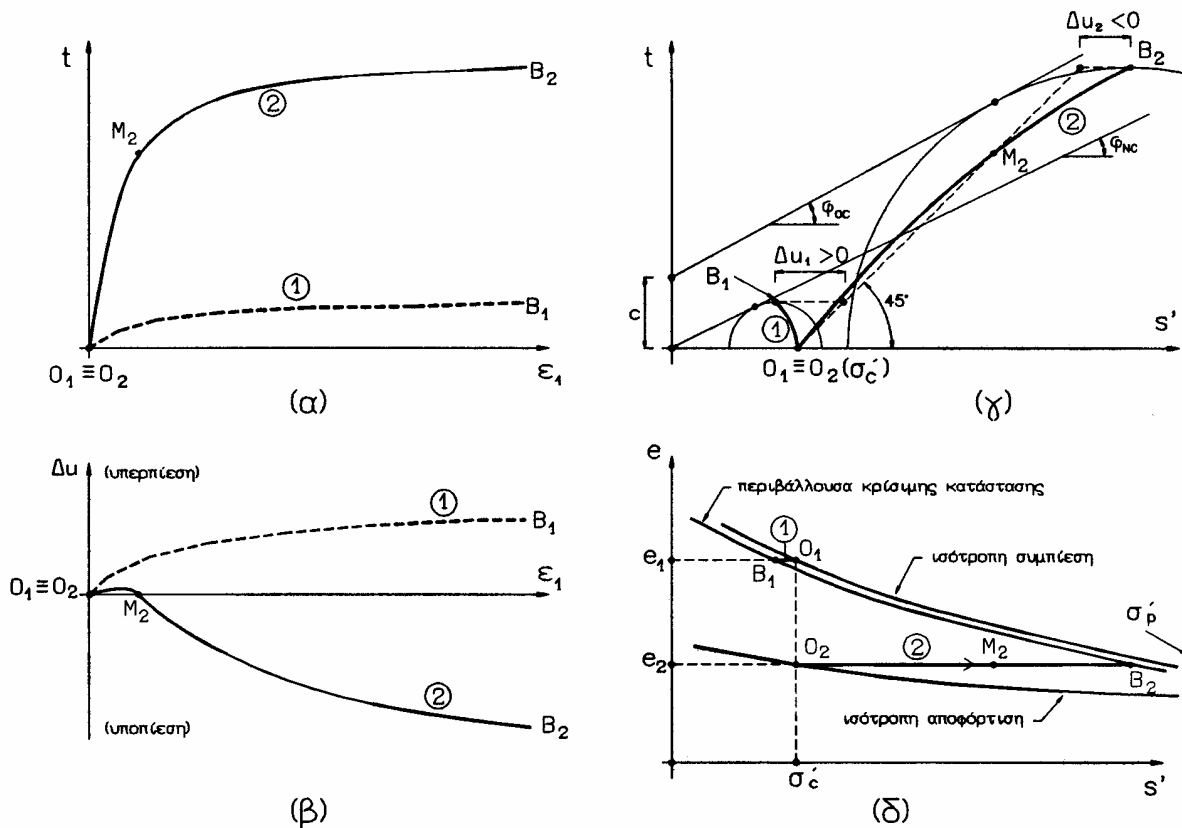
παρατηρηθεί κατά τη φόρτιση υπό στραγγισμένες συνθήκες (Σχήμα 10.3). Η διαφορά αυτή εξηγείται, επειδή κατά τη φόρτιση υπό στραγγισμένες συνθήκες ο δείκτης πόρων της πυκνής άμμου αυξάνει, οπότε η δομή της γίνεται χαλαρότερη και η γωνία τριβής μειώνεται. Αντίθετα, κατά την αστράγγιστη φόρτιση ο δείκτης πόρων παραμένει σταθερός και συνεπώς, η γωνία τριβής δεν μεταβάλλεται.

Η αναλογία μεταξύ στραγγισμένης και αστράγγιστης φόρτισης φαίνεται και στα διαγράμματα του Σχήματος 10.7(δ), όπου οι καταστάσεις αστοχίας των αστράγγιστων δοκιμών (1) και (2) (σημεία B₁ και B₂) πρακτικά ανήκουν στην καμπύλη του κρίσιμου δείκτη πόρων που είχε προσδιορισθεί και από τις στραγγισμένες δοκιμές (Σχήμα 10.3). Όσον αφορά τις αστράγγιστες δοκιμές, η καμπύλη του κρίσιμου δείκτη πόρων ορίζει μία περιοχή κάτω από την καμπύλη όπου η άμμος αναπτύσσει υποπίεσεις πόρων και μία περιοχή πάνω από την καμπύλη όπου η άμμος αναπτύσσει υπερπίεσεις πόρων.

10.3.2 Συνεκτικά εδάφη

Η συμπεριφορά των συνεκτικών εδαφών κατά την αστράγγιστη φόρτιση είναι ποιοτικά ανάλογη με των κοκκωδών εδαφών και μάλιστα οι κανονικά στερεοποιημένες άργιλοι συμπεριφέρονται όπως οι χαλαρές άμμοι, ενώ οι ισχυρά υπερστερεοποιημένες άργιλοι όπως οι πυκνές άμμοι. Το Σχήμα 10.8 παρουσιάζει τυπικά διαγράμματα της αστράγγιστης κυλινδρικής τριαξονικής φόρτισης μιας κανονικά στερεοποιημένης άργιλου (1) και μιας ισχυρά υπερστερεοποιημένης άργιλου (2). Η μορφή των διαγραμμάτων είναι όμοια με των κοκκωδών εδαφών (Σχήμα 10.7) και συνεπώς ισχύουν οι προηγούμενες παρατηρήσεις με τις εξής διαφορές:

1. Στο Σχήμα 10.8(δ) η κανονικά στερεοποιημένη άργιλος (1) στερεοποιήθηκε κατά μήκος της καμπύλης ισότροπης συμπίεσης μέχρι το σημείο O₁ (πίεση σ'_c), ενώ η



Σχ. 10.8: Αστράγγιστη φόρτιση - Συνεκτικά εδάφη

υπερστερεοποιημένη άργιλος αρχικά στερεοποιήθηκε ισότροπα μέχρι το σημείο P (τάση προφόρτισης σ'_p) και στη συνέχεια αποφορτίστηκε σε πίεση σ'_c ίδια με την τάση στερεοποίησης της κανονικά στερεοποιημένης άργιλου (σημείο O_2). Κατά την αστράγγιστη φόρτιση ο δείκτης πόρων παραμένει σταθερός και τα σημεία αστοχίας (B_1 και B_2) πρακτικά ανήκουν στην περιβάλλουσα κρίσιμης κατάστασης που είχε προσδιορισθεί κατά την πλήρως στραγγισμένη φόρτιση (Σχήμα 10.5).

2. Στο Σχήμα 10.8(γ) η διαδρομή ενεργών τάσεων της κανονικά στερεοποιημένης άργιλου καταλήγει (κατά την αστοχία) σε κύκλο Mohr, ο οποίος εφάπτεται στην περιβάλλουσα αστοχίας που προσδιορίστηκε κατά τη στραγγισμένη φόρτιση της κανονικά στερεοποιημένης άργιλου ($c = 0, \phi = \phi_{NC}$). Η ίδια παρατήρηση ισχύει και για την υπερστερεοποιημένη άργιλο ($c \neq 0, \phi = \phi_{oc}$). Κατά την αστράγγιστη φόρτιση, όμως, η διατμητική τάση της υπερστερεοποιημένης άργιλου μετά την αστοχία δεν μειώνεται όπως κατά τη στραγγισμένη φόρτιση, επειδή ο όγκος του δοκιμίου δεν μεταβάλλεται, τα πλακίδια της άργιλου δεν απομακρύνονται το ένα από το άλλο και η μεταξύ τους συγκόλληση (συνοχή) δεν καταστρέφεται.

10.3.3 Τελικές παρατηρήσεις

Από τα προηγούμενα προκύπτει ότι η συμπεριφορά των κοκκωδών και συνεκτικών εδαφών είναι ποιοτικά ανάλογη και μάλιστα οι χαλαρές άμμοι συμπεριφέρονται όπως οι κανονικά στερεοποιημένες άργιλοι, ενώ οι πυκνές άμμοι όπως οι ισχυρά υπερστερεοποιημένες άργιλοι. Βεβαίως, η συμπεριφορά που περιγράφηκε στις προηγούμενες δοκιμές κυλινδρικής τριαξονικής φόρτισης είναι εξιδανικευμένη, οπότε η πραγματική συμπεριφορά πολλών εδαφικών υλικών είναι

διαφορετική. Τούτο κυρίως οφείλεται σε παράγοντες που επηρεάζουν δευτερογενώς τη συμπεριφορά των εδαφών, όπως:

1. η αρχική ανισοτροπία (στερεοποίηση υπό ανισότροπη εντατική κατάσταση αντί της ισότροπης συμπίεσης που θεωρήθηκε στα παραδείγματα),
2. η γήρανση, λόγω του μεγάλου χρόνου που παρήλθε από την αρχική στερεοποίηση των πραγματικών εδαφικών σχηματισμών, με συνέπεια την ανάπτυξη θιξοτροπικών δεσμών, δεσμών σιμέντωσης κλπ,
3. η φόρτιση με εντατικές καταστάσεις διάφορες της κυλινδρικής τριαξονικής συμπίεσης,
4. η διαφορετική ταχύτητα φόρτισης στη φύση από ότι στο εργαστήριο,
5. η μερική εκτόνωση των πιέσεων πόρων στη φύση (η **απόλυτα** αστράγγιστη φόρτιση είναι οριακή κατάσταση που σπάνια συμβαίνει στη φύση).

Παρά ταύτα, τα προηγούμενα παραδείγματα έχουν αξία, επειδή θέτουν ένα **πλαίσιο συμπεριφοράς των εδαφικών σχηματισμών με το οποίο μπορεί να συγκρίνεται η συμπεριφορά των πραγματικών εδαφών, να εντοπίζονται οι παράγοντες που προκαλούν τις τυχόν αποκλίσεις και να εκτιμάται η σημασία τους στο συγκεκριμένο Γεωτεχνικό πρόβλημα.**

Τα αποτελέσματα των δοκιμών κυλινδρικής τριαξονικής φόρτισης είναι χρήσιμα και για τον προσδιορισμό των παραμέτρων συμπίεσότητας του εδάφους, με την αξιοποίηση του αρχικού τμήματος των καμπύλων φόρτισης πριν από την αστοχία. Ειδικότερα, οι κλίσεις των διαγραμμάτων (t, ε_1) και $(\varepsilon_{vol}, \varepsilon_1)$ ή $(\Delta u, \varepsilon_1)$ συνδέονται με τις "ελαστικές" παραμέτρους (E, ν) του εδάφους ως εξής:

1. Κατά τις στραγγισμένες δοκιμές:

$$\frac{dt}{d\varepsilon_1} = \frac{1}{2}E \quad , \quad \frac{d\varepsilon_{vol}}{d\varepsilon_1} = 1 - 2\nu \quad (10.3)$$

2. Κατά τις αστράγγιστες δοκιμές:

$$\frac{dt}{d\varepsilon_1} = \frac{1}{2}E_u \quad , \quad \frac{d(\Delta u)}{d\varepsilon_1} = \frac{1}{3}E_u \quad (10.4)$$

όπου (ως γνωστόν) οι "αστράγγιστες" παράμετροι συνδέονται με τις ελαστικές σταθερές ως εξής:

$$E_u = \frac{3E}{2(1+\nu)} = 3G \quad , \quad \nu_u = 0.50 \quad (10.5)$$

Η εκτίμηση των αναπτυσσόμενων υπερπίεσεων (ή υποπίεσεων) πόρων κατά την αστράγγιστη φόρτιση των εδαφικών σχηματισμών έχει μεγάλη πρακτική σημασία, επειδή οι πιέσεις πόρων μεταβάλλουν τις ενεργές τάσεις και συνεπώς την αντοχή του εδάφους. Στα περισσότερα όμως προβλήματα, η επιβαλλόμενη φόρτιση προκαλεί σύνθετες τριδιάστατες διαδρομές τάσεων που δεν μπορούν να προσομοιωθούν στο Εργαστήριο. Στις περιπτώσεις αυτές είναι απαραίτητη μία μέθοδος για την (κατά προσέγγιση) εκτίμηση των μεταβολών της πίεσης πόρων. Μία τέτοια μέθοδος περιγράφεται στα επόμενα και βασίζεται στην ανάλυση της πίεσης πόρων που αναπτύσσεται κατά την αστράγγιστη κυλινδρική τριαξονική φόρτιση. Κατά τη φόρτιση αυτή, η μεταβολή των επιβαλλόμενων ολικών τάσεων $(\Delta\sigma_1, \Delta\sigma_3)$ μπορεί να αναλυθεί σε δύο συνιστώσες:

1. μία ισότροπη συμπίεση με ολόπλευρη μεταβολή της τάσης κατά $\Delta\sigma_3$ και
2. μία αξονική φόρτιση με τάση $(\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3)$, χωρίς μεταβολή της παράπλευρης τάσης.

Η μεταβολή της πίεσης πόρων λόγω της πρώτης συνιστώσας είναι (κατά τα γνωστά για κορεσμένα εδάφη):

$$\Delta u_1 = \Delta \sigma_3$$

Η μεταβολή της πίεσης πόρων λόγω της δεύτερης συνιστώσας εξαρτάται από την ένταση της φόρτισης $(\Delta \sigma_1 - \Delta \sigma_3)$ και συνεπώς μπορεί να γραφεί με τη μορφή:

$$\Delta u_2 = A(\Delta \sigma_1 - \Delta \sigma_3)$$

όπου A είναι ένας συντελεστής όχι απαραίτητα σταθερός. Κατά τη συνισταμένη αστράγγιστη φόρτιση θα ισχύει:

$$\Delta u = \Delta \sigma_3 + A(\Delta \sigma_1 - \Delta \sigma_3) \quad (10.6)$$

Η σχέση αυτή ονομάζεται εξίσωση Skempton και δίνει τη μεταβολή της πίεσης πόρων κατά την αστράγγιστη φόρτιση εδαφών στην **κυλινδρική τριαξονική δοκιμή** (δηλαδή όταν $\Delta \sigma_1 = \Delta \sigma_3$ και οι διευθύνσεις των κύριων τάσεων δεν στρέφονται).

Ο συντελεστής (A) δεν είναι σταθερός αλλά εξαρτάται από την ένταση της φόρτισης και την αρχική κατάσταση του δοκιμίου (δηλαδή τη σχετική πυκνότητα στις άμμους και το βαθμό υπερστερεοποίησης στις αργίλους). Στην περίπτωση ενός γραμμικού ελαστικού υλικού ο συντελεστής (A) έχει σταθερή τιμή ίση με $1/3$, επειδή ως γνωστόν:

$$\Delta u = \frac{1}{3}(\Delta \sigma_1 + \Delta \sigma_2 + \Delta \sigma_3) = \Delta \sigma_3 + \frac{1}{3}(\Delta \sigma_1 - \Delta \sigma_3)$$

Στα πραγματικά εδάφη, οι τιμές του συντελεστή A κατά την αστοχία είναι της τάξης του 0.70 έως 1.00 στις κανονικά στερεοποιημένες αργίλους και της τάξης του 0.20 έως (-0.30) στις ισχυρά υπερστερεοποιημένες αργίλους.

Κατά την τριδιάστατη αστράγγιστη φόρτιση των κορεσμένων εδαφών, η ισότροπη συνιστώσα της φόρτισης (Δp) προκαλεί ισόποση μεταβολή της πίεσης πόρων, ενώ η διατμητική συνιστώσα της φόρτισης (Δq) προκαλεί μεταβολή της πίεσης πόρων που εξαρτάται από το Δq , οπότε η αναπτυσσόμενη πίεση πόρων μπορεί να γραφεί με τη μορφή (εξίσωση Henkel):

$$\Delta u = \Delta p + \left(A - \frac{1}{3} \right) \cdot \Delta q \quad (10.7)$$

όπου:

$$\Delta p = \frac{1}{3}(\Delta \sigma_1 + \Delta \sigma_2 + \Delta \sigma_3)$$

$$\Delta q = \sqrt{\frac{1}{2} [(\Delta \sigma_1 - \Delta \sigma_2)^2 + (\Delta \sigma_2 - \Delta \sigma_3)^2 + (\Delta \sigma_3 - \Delta \sigma_1)^2]}$$

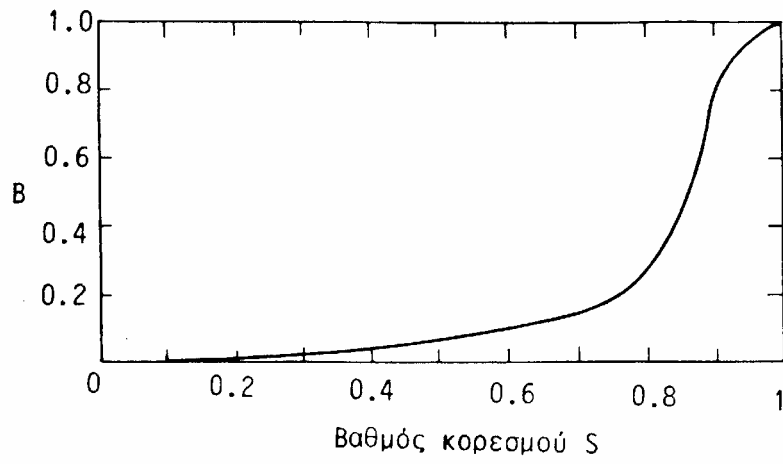
Τέλος, στην περίπτωση που το εδαφικό υλικό δεν είναι πλήρως κορεσμένο, οπότε η μεταβολή της πίεσης πόρων εξαρτάται και από το συντελεστή απόκρισης B (βλέπε εδάφιο 9.4.2.1), η εξίσωση Skempton (σχέση 10.6) γενικεύεται ως εξής:

$$\Delta u = B[\Delta \sigma_3 + A(\Delta \sigma_1 - \Delta \sigma_3)] \quad (10.8)$$

ενώ η εξίσωση Henkel (σχέση 10.7) δίνει:

$$\Delta u = B \left[\Delta p + \left(A - \frac{1}{3} \right) \cdot \Delta q \right] \quad (10.9)$$

Οι τιμές του συντελεστή B εξαρτώνται από το βαθμό κορεσμού του εδαφικού υλικού και από το λόγο της συμπιεστότητας του εδαφικού σκελετού προς τη συμπιεστότητα του νερού των πόρων. Για σχετικά μαλακές αργίλους η εξάρτηση του B από το βαθμό κορεσμού φαίνεται στο Σχήμα 10.9.



Σχ. 10.9: Μεταβολή του συντελεστή απόκρισης B

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ

Παράδειγμα 10.1

Κυλινδρικό δοκίμιο εδαφικού υλικού (διάμετρος $d_o = 35$ mm, ύψος $H_o = 70$ mm) υποβάλλεται σε δοκιμή κυλινδρικής τριαξονικής συμπίεσης.

Κατά τον κορεσμό του δοκιμίου, με κλειστή τη βαλβίδα στράγγισης, η πίεση της κυψέλης αυξήθηκε μέχρι την τιμή των 150 kPa και μετρήθηκε πίεση πόρων $u_o = 120$ kPa. Στη συνέχεια, το δοκίμιο στερεοποιήθηκε με την επιβολή ισότροπης ενεργού τάσης $\sigma'_c = 130$ kPa ($\sigma_c = 250$ kPa, $u_o = 120$ kPa). Η μεταβολή του όγκου του δοκιμίου κατά τη στερεοποίηση ήταν μικρή και μπορεί να θεωρηθεί (χωρίς σημαντικό σφάλμα) ότι οι διαστάσεις του δοκιμίου μετά τη στερεοποίηση είναι πρακτικά ίσες με τις αρχικές του διαστάσεις.

Μετά τη στερεοποίηση ακολούθησε φόρτιση (συμπίεση) του δοκιμίου στην κατακόρυφη διεύθυνση υπό αστράγγιστες συνθήκες. Κατά τη φόρτιση, η πίεση της κυψέλης (σ_c) διατηρήθηκε σταθερή (ίση με 250 kPa) και σε τακτά χρονικά διαστήματα μετρούντο: η μεταβολή του ύψους του δοκιμίου (βράχυνση ΔH), η πίεση πόρων του δοκιμίου (u) και η δύναμη (P) στο έμβολο που φόρτιζε το δοκίμιο (διάμετρος του εμβόλου $D = 10$ mm). Ο Πίνακας 10.1-1 παρουσιάζει τις μετρήσεις που λήφθηκαν κατά τη διάρκεια της δοκιμής.

Ζητούνται:

1. Να σχεδιασθούν τα διαγράμματα $t - \varepsilon_1$, $\Delta u - \varepsilon_1$ και $t - s'$ κατά την αστράγγιστη συμπίεση του δοκιμίου (ε_1 είναι η αξονική παραμόρφωση).
2. Να προσδιορισθούν:
 - (α) Η αστράγγιστη διατμητική αντοχή του δοκιμίου.
 - (β) Το αρχικό μέτρο ελαστικότητας του δοκιμίου (ας θεωρηθεί ότι ο λόγος του Poisson είναι $\nu = 0.25$).
 - (γ) Οι παράμετροι διατμητικής αντοχής του εδάφους (c , ϕ), εάν είναι γνωστό ότι σε ένα άλλο δοκίμιο του ίδιου υλικού που υποβλήθηκε σε δοκιμή κυλινδρικής τριαξονικής συμπίεσης υπό αστράγγιστες συνθήκες, μετά από στερεοποίηση σε ενεργό τάση $\sigma'_c = 250$ kPa ($\sigma_c = 350$ kPa, $u_o = 100$ kPa), στην κατάσταση αστοχίας μετρήθηκαν: $\Delta H = 0.7$ mm, $P = 461$ N, $u = 159$ kPa.

ΠΙΝΑΚΑΣ 10.1-1

ΔH (mm)	P (N)	u (kPa)
0	20	120
0.125	90	128
0.25	150	134
0.375	190	139
0.50	220	142
0.625	245	145
0.75	262	147
0.875	274	149
1.0	280	150
1.125	278	150.5
1.25	276	151
1.50	274	152
1.75	270	154
2.0	260	155
2.50	240	156
3.0	220	157
3.50	210	158
4.0	200	159
5.0	200	159

Λύση:

1. Το εμβαδόν του εμβόλου είναι: $\alpha = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{3.14 \times 1^2}{4} = 0.785 \text{ cm}^2$.

Η αξονική θλιπτική παραμόρφωση του δοκιμίου δίνεται από τη σχέση: $\epsilon_1 = \Delta H / H_o$.

Το εμβαδόν της διατομής του δοκιμίου μεταβάλλεται κατά την αξονική συμπίεση, επειδή ο όγκος του δοκιμίου διατηρείται σταθερός (αστράγγιστη φόρτιση) ενώ το ύψος του μειώνεται. Η αρχική τιμή της διατομής του δοκιμίου είναι:

$$A_o = \frac{\pi d_o^2}{4} = \frac{3.14 \times 3.5^2}{4} = 9.621 \text{ cm}^2$$

ενώ, για την εκάστοτε διατομή του δοκιμίου (A), ισχύει: $A_o \cdot H_o = V_o = V = A (H_o - \Delta H)$, δηλαδή:

$$A = A_o \frac{H_o}{H_o - \Delta H} \tag{10.1-1}$$

Επιπλέον, η αξονική τάση σ_1 , κατά την κυλινδρική τριαξονική συμπίεση, δίνεται από τη σχέση (βλέπε Κεφάλαιο 9):

$$\sigma_1 = \frac{P}{A} + \sigma_c \left(1 - \frac{\alpha}{A} \right) \tag{10.1-2}$$

Τέλος:

$$t \equiv (\sigma_1 - \sigma_3) / 2 = (\sigma_1 - \sigma_c) / 2$$

$$\Delta u = u - u_o$$

$$s' \equiv (\sigma'_1 + \sigma'_3) / 2 = (\sigma_1 + \sigma_c) / 2 - u$$

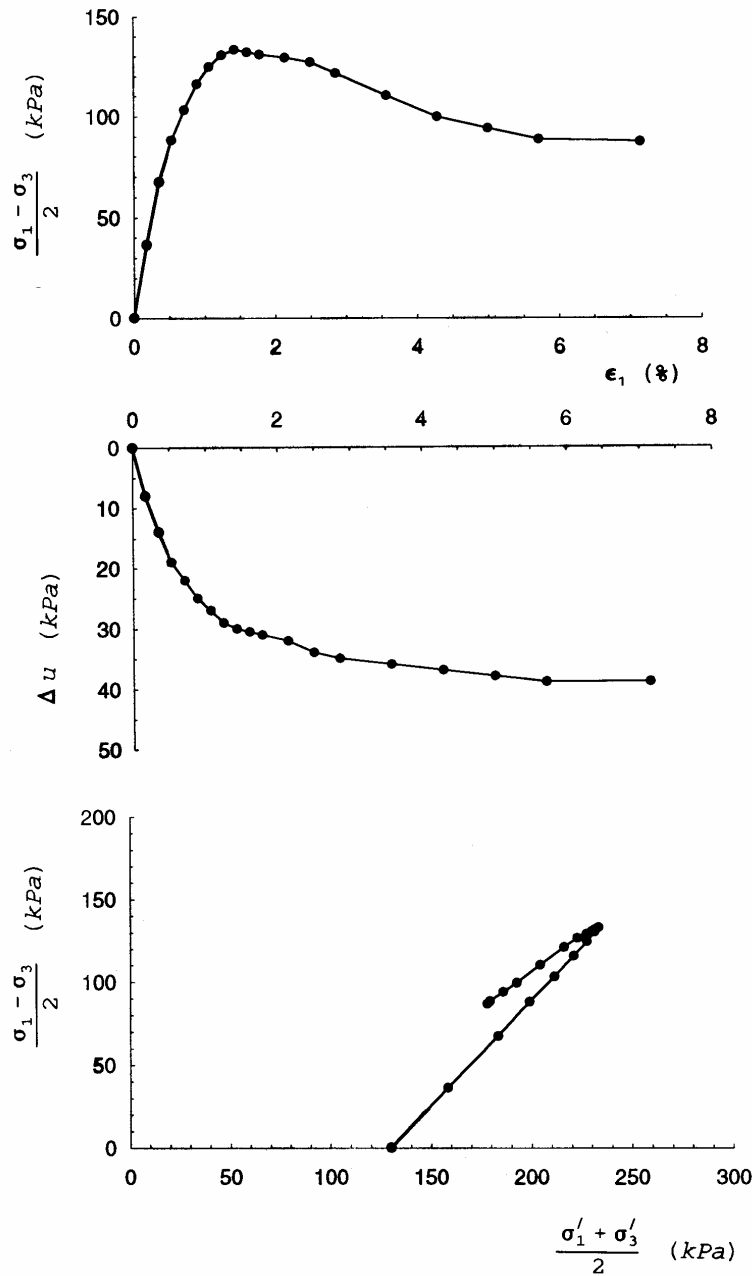
Από τις ανωτέρω σχέσεις προκύπτουν οι τιμές που φαίνονται στον Πίνακα 10.1-2. Τα ζητούμενα διαγράμματα φαίνονται στο Σχήμα 10.1-1.

ΠΙΝΑΚΑΣ 10.1-2

ΔH (mm)	A (cm ²)	σ_1 (kPa)	t (kPa)	Δu (kPa)	s' (kPa)
0	9.62	250	0	0	130
0.125	9.64	323	37	8	159
0.25	9.66	385	68	14	184
0.375	9.67	426	88	19	199
0.50	9.69	457	104	22	211
0.625	9.71	482	116	25	221
0.75	9.73	499	125	27	228
0.875	9.74	511	131	29	232
1.0	9.76	517	133	30	233
1.125	9.78	514	132	30.5	232
1.25	9.80	512	131	31	230
1.50	9.83	509	129	32	227
1.75	9.87	504	127	34	223
2.0	9.90	493	121	35	216
2.50	9.98	471	110	36	204
3.0	10.05	449	100	37	193
3.50	10.13	438	94	38	186
4.0	10.20	427	88	39	179
5.0	10.36	424	87	39	178

2(α). Από τον Πίνακα 10.1-1 προκύπτει ότι η μέγιστη τιμή του t είναι 133 kPa και συνεπώς, η αστράγγιστη διατμητική αντοχή του δοκιμίου είναι:

$$c_u \equiv \frac{1}{2} (\sigma_1 - \sigma_3)_{\max} = 133 \text{ kPa}$$



Σχήμα 10.1-1: Παράδειγμα 10.1

2(β). Από τις γνωστές σχέσεις (βλέπε Κεφάλαιο 10) προκύπτουν οι εξής αρχικές τιμές των ελαστικών σταθερών του δοκιμίου:

$$E_u = 2 \frac{dt}{d\varepsilon_1} = 2 \frac{104}{0.5 \times 0.01} = 41600 \text{ kPa} = 41.6 \text{ MPa}$$

$$E = \frac{2(1+\nu)E_u}{3} = \frac{2 \times (1+0.25) \times 41.6}{3} = 34.7 \text{ MPa}$$

Συνεπώς, το αρχικό μέτρο ελαστικότητας του δοκιμίου (για παραμόρφωση $\varepsilon_1 = 0.5\%$) είναι 34.7 MPa.

Σημείωση: Το μέτρο ελαστικότητας μπορεί να εκτιμηθεί και με βάση την αναπτυσσόμενη υπερπίεση πόρων κατά την αστράγγιστη κυλινδρική τριαξονική συμπίεση (βλέπε Κεφάλαιο 10) από τη σχέση:

$$E_u = 3 \frac{d(\Delta u)}{d\varepsilon_1}$$

Στην προκείμενη περίπτωση, για αξονική παραμόρφωση 0.5%:

$$E_u = 3 \times \frac{22}{0.5 \times 0.01} = 13200 \text{ kPa} = 3.2 \text{ MPa}$$

οπότε:

$$E = \frac{2(1+\nu)E_u}{3} = \frac{2 \times (1.25) \times 13.2}{3} = 11 \text{ MPa}$$

Η τιμή αυτή είναι σημαντικά μικρότερη από την τιμή $E = 34.7 \text{ MPa}$, που εκτιμήθηκε προηγουμένως με βάση την καμπύλη τάσεων-παραμορφώσεων ($t - \varepsilon_1$). Η διαφορά μεταξύ των δύο τιμών οφείλεται προφανώς στην παραδοχή της ισότροπης γραμμικής ελαστικότητας, από την οποία προκύπτουν οι σχέσεις:

$$E_u = 2 \frac{dt}{d\varepsilon_1} \quad , \quad E_u = 3 \frac{d(\Delta u)}{d\varepsilon_1}$$

γεγονός που υποδηλώνει ότι οι κλίσεις των καμπύλων $t - \varepsilon_1$ και $\Delta u - \varepsilon_1$ είναι συσχετισμένες. Οι διαφορετικές τιμές του E_u που υπολογίστηκαν προηγουμένως σημαίνουν ότι η συμπεριφορά του συγκεκριμένου εδαφικού δείγματος δεν περιγράφεται ικανοποιητικά από το ισότροπο γραμμικώς ελαστικό μοντέλο. Όπως φαίνεται και από τις καμπύλες του Σχήματος 10.1-1, η συμπεριφορά του δοκιμίου είναι πρακτικώς γραμμική στο διάστημα 0-0.5%. Συνεπώς, το σφάλμα πρέπει να είναι αποτέλεσμα της παραδοχής ισότροπης συμπεριφοράς. Πράγματι, λόγω του τρόπου γένεσης (απόθεσης), τα εδαφικά υλικά παρουσιάζουν οριζόντια στρώση και συνεπώς μπορούν να περιγραφούν καλύτερα ως ανισότροπα υλικά με άξονα ανισοτροπίας την κατακόρυφο (διεύθυνση της απόθεσης). Μερικά βασικά χαρακτηριστικά της συμπεριφοράς υλικών με τέτοια ανισοτροπία δίνονται στο Παράδειγμα 6.2 (βλέπε Κεφάλαιο 6).

2(γ). Από την πρώτη δοκιμή κυλινδρικής τριαξονικής συμπίεσης, προκύπτει ότι κατά την αστοχία:

$$\sigma'_1 = \sigma_1 - u = 517 - 150 = 367 \text{ kPa}$$

$$\sigma'_3 = \sigma_c - u = 250 - 150 = 100 \text{ kPa}$$

Από τη δεύτερη δοκιμή, στην κατάσταση αστοχίας, προκύπτει με βάση τις σχέσεις (1), (2):

$$A = A_o \frac{H_o}{H_o - \Delta H} = 9.621 \times \frac{70}{70 - 0.7} = 9.718 \text{ cm}^2$$

$$\sigma_1 = \frac{461 \times 0.001}{9.718 \times 0.0001} + 350 \times \left(1 - \frac{0.785}{9.718} \right) = 796 \text{ kPa}$$

$$\sigma'_1 = 796 - 159 = 637 \text{ kPa}$$

$$\sigma'_3 = 350 - 159 = 191 \text{ kPa}$$

Από τα ανωτέρω δύο ζεύγη τιμών (σ'_1 , σ'_3) κατά την αστοχία, και από τη γνωστή σχέση αστοχίας: $\sigma'_1 = \sigma'_3 \tan^2 \left(45 + \frac{\phi}{2} \right) + 2c \tan \left(45 + \frac{\phi}{2} \right)$ προκύπτει ότι οι παράμετροι διατμητικής αντοχής του υλικού είναι: $c = 20.4 \text{ kPa}$, $\phi = 29.7^\circ$.

Παράδειγμα 10.2

Για τη μελέτη της διατμητικής αντοχής μιας υπερστερεοποιημένης αργίλου, εκτελέστηκαν τέσσερις δοκιμές κυλινδρικής τριαξονικής συμπίεσης σε τέσσερα όμοια δοκίμια της αργίλου. Και τα τέσσερα δοκίμια αρχικά στερεοποιήθηκαν με πίεση κυψέλης $\sigma_{cm} = 900 \text{ kPa}$ και αντιπίεση πόρων $u_o = 100 \text{ kPa}$ (ισότροπη ενεργός τάση: $\sigma'_c = 900 - 100 = 800 \text{ kPa}$). Το ποσοστό υγρασίας μετά τη στερεοποίηση ήταν 18.5% και στα τέσσερα δοκίμια.

Στη συνέχεια, για να επιτευχθούν διάφοροι βαθμοί υπερστερεοποίησης (OCR) στα τέσσερα δοκίμια, ακολουθήθηκε η εξής διαδικασία:

1. Στο πρώτο δοκίμιο η πίεση της κυψέλης και η αντιπίεση πόρων δεν μεταβλήθηκαν. Το δοκίμιο αυτό θεωρείται ως κανονικά στερεοποιημένο ($OCR = 1$).
2. Στο δεύτερο δοκίμιο η πίεση της κυψέλης μειώθηκε σε $\sigma_c = 500$ kPa, ενώ η αντιπίεση πόρων διατηρήθηκε σταθερή ($u_o = 100$ kPa). Το δοκίμιο διογκώθηκε (ενεργός τάση: $\sigma'_c = 500 - 100 = 400$ kPa) και το ποσοστό υγρασίας μετά τη διόγκωση ήταν 19.40%. Το δοκίμιο αυτό έχει βαθμό υπερστερεοποίησης: $OCR = 800/400 = 2$.
3. Στο τρίτο δοκίμιο η πίεση της κυψέλης μειώθηκε σε $\sigma_c = 300$ kPa, ενώ η αντιπίεση πόρων διατηρήθηκε σταθερή ($u_o = 100$ kPa). Το δοκίμιο διογκώθηκε (ενεργός τάση: $\sigma'_c = 300 - 100 = 200$ kPa) και το ποσοστό υγρασίας μετά τη διόγκωση ήταν 20.31%. Το δοκίμιο αυτό έχει βαθμό υπερστερεοποίησης: $OCR = 800/200 = 4$.
4. Τέλος, στο τέταρτο δοκίμιο η πίεση της κυψέλης μειώθηκε σε $\sigma_c = 200$ kPa, ενώ η αντιπίεση πόρων διατηρήθηκε σταθερή ($\sigma_c = 100$ kPa). Το δοκίμιο διογκώθηκε (ενεργός τάση: $\sigma'_c = 200 - 100 = 100$ kPa) και το ποσοστό υγρασίας μετά τη διόγκωση ήταν 21.21%. Το δοκίμιο αυτό έχει βαθμό υπερστερεοποίησης: $OCR = 800/100 = 8$.

Μετά τη διόγκωσή τους τα τέσσερα δοκίμια υποβλήθηκαν σε αστράγγιστη αξονική συμπίεση μέχρι την αστοχία, κατά την οποία μετρήθηκαν οι εξής τιμές της μέγιστης κύριας τάσης (σ_{1f}) και της αντιπίεσης πόρων (u_f):

Δοκίμιο 1: $\sigma_{1f} = 1380$ kPa, $u_f = 556$ kPa.

Δοκίμιο 2: $\sigma_{1f} = 868$ kPa, $u_f = 210$ kPa.

Δοκίμιο 3: $\sigma_{1f} = 576$ kPa, $u_f = 86$ kPa.

Δοκίμιο 4: $\sigma_{1f} = 394$ kPa, $u_f = 57$ kPa.

Ζητείται να εκτιμηθούν οι παράμετροι διατμητικής αντοχής της κανονικά στερεοποιημένης αργίλου και να σχεδιασθούν οι καταστάσεις αστοχίας των τεσσάρων δοκιμίων στα εξής διαγράμματα:

1. Διάγραμμα $t - \sigma'_c$.
2. Διάγραμμα $(\sigma_1 - \sigma_3) / (2 \sigma'_c)$ ως προς OCR.
3. Διάγραμμα A_f ως προς OCR.

Λύση:

Η κανονικά στερεοποιημένη άργιλος έχει κατά τα γνωστά $c = 0$ και γωνία τριβής (ϕ), που υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\tan^2\left(45 + \frac{\phi}{2}\right) = \frac{\sigma'_{1f}}{\sigma'_{3f}} = \frac{\sigma_{1f} - u_f}{\sigma_c - u_f} = \frac{1380 - 556}{900 - 556} = 2.395$$

δηλαδή: $\phi = 24.3$ μοίρες. Γενικώς, στις τέσσερις δοκιμές, στην κατάσταση αστοχίας, ισχύει:

Δοκιμή	σ'_{1f} (kPa)	σ'_{3f} (kPa)
1	824	344
2	658	290
3	490	214
4	337	143

Οι απαιτούμενες για το σχεδιασμό των διαγραμμάτων τιμές κατά την αστοχία υπολογίζονται από τις εξής σχέσεις:

$$\begin{aligned} \sigma_{3f} &= \sigma_c, \quad \sigma'_c = \sigma_c - u_o \\ t &= \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = \frac{\sigma_{1f} - \sigma_c}{2} \\ s' &= \frac{\sigma'_1 + \sigma'_3}{2} = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} - u_f = \frac{\sigma_{1f} + \sigma_c}{2} - u_f \end{aligned}$$

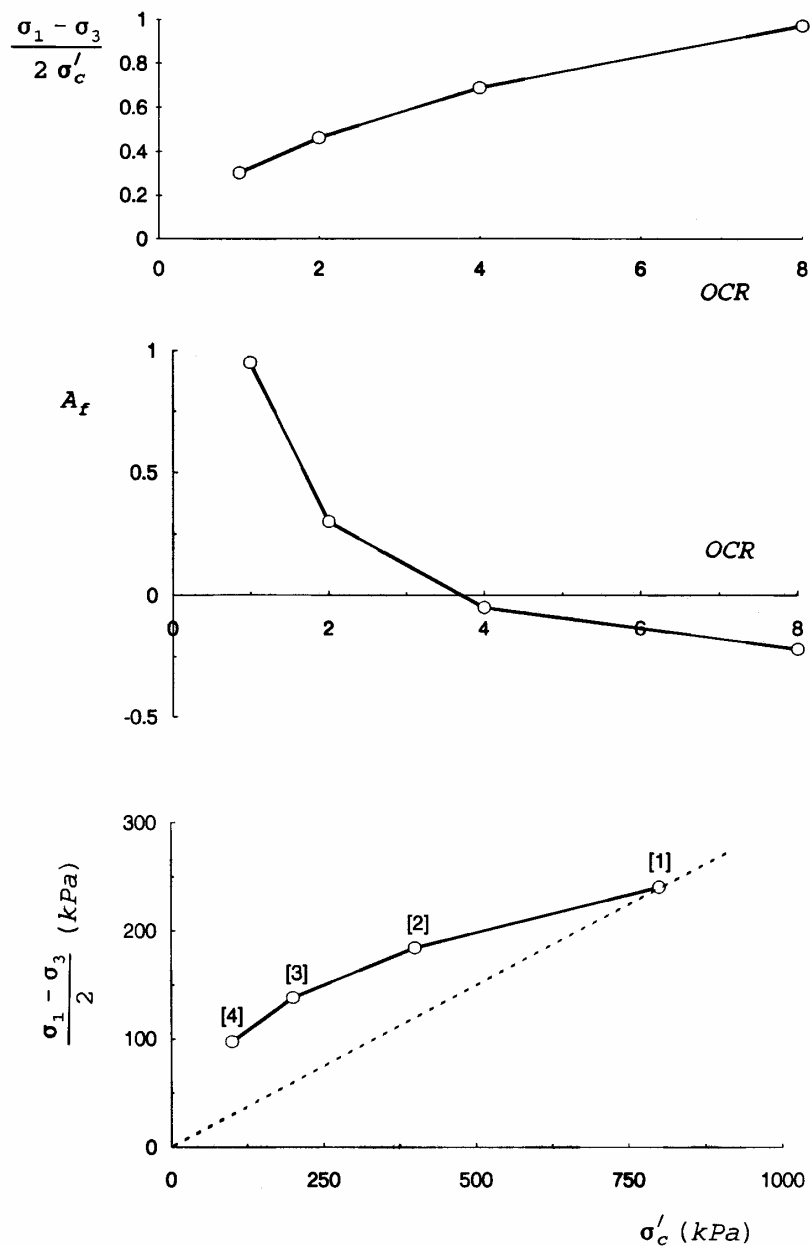
$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2\sigma'_c} = \frac{\sigma_{1f} - \sigma_c}{2(\sigma_c - u_o)}$$

$$A_f = \frac{\Delta u - \Delta \sigma_3}{\Delta \sigma_1 - \Delta \sigma_3} = \frac{\Delta u}{\Delta \sigma_1} = \frac{u_f - u_o}{\sigma_{1f} - \sigma_c}$$

και δίνονται στον Πίνακα 10.2-1. Τα ζητούμενα διαγράμματα φαίνονται στο Σχήμα 10.2-1.

ΠΙΝΑΚΑΣ 10.2-1

Δοκίμιο	σ_c (kPa)	OCR	σ'_c (kPa)	t (kPa)	s' (kPa)	$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2\sigma'_c}$	A_f
1	900	1	800	240	584	0.30	0.95
2	500	2	400	184	474	0.46	0.30
3	300	4	200	138	352	0.69	-0.05
4	200	8	100	97	240	0.97	-0.22



Σχήμα 10.2-1: Παράδειγμα 10.2

