

**Ε.Μ. ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ**

ΕΙΔΙΚΑ ΘΕΜΑΤΑ ΕΛΑΦΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

Β.Ν. Γεωργιάννου

Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.



ΑΘΗΝΑ – 2016

ΕΙΔΙΚΑ ΘΕΜΑΤΑ ΕΛΑΦΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

- **ΥΔΑΤΙΚΗ ΡΟΗ ΔΙΑΜΕΣΟΥ ΕΛΑΦΙΚΟΥ ΥΛΙΚΟΥ / 1**
 - ΕΛΑΦΙΚΟΣ ΙΣΤΟΣ ΚΑΙ ΝΕΡΟ / 1
 - ΜΟΝΟΔΙΑΣΤΑΤΗ ΡΟΗ / 2
 - Ροή Ιδανικού Υγρού / 2
 - Νόμος Darcy / 3
 - Εργαστηριακή Μέτρηση Συντελεστή Διαπερατότητας (k) / 5
 - Υδραυλική Υποσκαφή (Piping) / 6
 - ΔΙΔΙΑΣΤΑΤΗ ΡΟΗ / 6
 - ΣΥΝΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ / 8
 - Μη διαπερατή οριογραμμή / 8
 - Οριογραμμή κατά μήκος 'ελεύθερου' υγρού / 9
 - Επιφάνεια διήθησης / 9
 - Φρεατική γραμμή / 10
 - ΓΡΑΦΙΚΗ ΛΥΣΗ - ΔΙΚΤΥΟ ΡΟΗΣ / 10
 - ΑΝΙΣΟΤΡΟΠΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΡΟΗΣ / 13

- **ΣΤΕΡΕΟΠΟΙΗΣΗ ΕΛΑΦΙΚΟΥ ΥΛΙΚΟΥ / 15**
 - ΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΤΗΣ ΣΤΕΡΕΟΠΟΙΗΣΗΣ / 15
 - ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΟΝΟΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΣΥΜΠΙΕΣΗΣ / 18
 - Κλασσική Δοκιμή Συμπιεσομέτρου / 18
 - ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΗΣ ΣΥΜΠΙΕΣΟΜΕΤΡΟΥ / 20
 - Υπολογισμός Καθιζήσεων / 21
 - Χαρακτηριστικά Δοκιμής Συμπιεσομέτρου / 23
 - ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΟΝΟΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΣΤΕΡΕΟΠΟΙΗΣΗΣ / 27
 - ΕΞΙΣΩΣΗ ΜΟΝΟΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΣΤΕΡΕΟΠΟΙΗΣΗΣ / 29
 - Βαθμός Στερεοποίησης / 31
 - Χρόνος Στερεοποίησης / 33
 - Αρχική, Πρωτεύουσα και Δευτερεύουσα Στερεοποίηση / 33
 - Μέθοδοι Υπολογισμού του Συντελεστή Στερεοποίησης / 34

• ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΗΣ ΠΙΕΣΗΣ ΠΟΡΩΝ ΝΕΡΟΥ ΣΤΟ ΕΛΑΦΟΣ / 38

ΠΙΕΖΟΜΕΤΡΟ / 38

ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΠΙΕΖΟΜΕΤΡΩΝ / 40

Φίλτρο / 40

Χρόνος Εξισορρόπησης / 41

ΠΙΕΖΟΜΕΤΡΑ ΤΥΠΟΥ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΟΥ ΣΩΛΗΝΑ / 41

Περιγραφή / 41

Πλεονεκτήματα / Μειονεκτήματα / 44

Μέθοδοι και Στάδια Εγκατάστασης / 45

Σύγκριση Τρόπων Εγκατάστασης / 47

ΠΙΕΖΟΜΕΤΡΑ ΤΥΠΟΥ ΔΙΑΦΡΑΓΜΑΤΟΣ / 49

Πεπιεσμένου Αύρα / 50

Δονούμενης Χορδής / 51

Ηλεκτρικής Αντίστασης / 53

Μέθοδοι και Στάδια Εγκατάστασης / 54

ΥΔΡΑΥΛΙΚΑ ΠΙΕΖΟΜΕΤΡΑ / 56

Περιγραφή / 56

Πλεονεκτήματα / Μειονεκτήματα / 58

ΚΟΡΕΣΜΟΣ ΦΙΛΤΡΟΥ / 58

ΕΠΙΛΟΓΗ ΤΥΠΟΥ ΠΙΕΖΟΜΕΤΡΟΥ / 60

• ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΕΛΑΦΟΜΗΧΑΝΙΚΗ / 63

ΣΤΟΧΟΙ / 63

ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΕΔΑΦΙΚΟΥ ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ /65

Βασικές Αρχές Καταγραφής Εδαφικών Παραμέτρων / 66

Τασικές Συνθήκες και Πρακτικές Εφαρμογές / 67

ΔΟΚΙΜΗ ΣΥΜΠΙΕΣΟΜΕΤΡΟΥ / 69

ΣΥΣΚΕΥΗ ΕΠΙΠΕΔΗΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ /73

ΚΥΛΙΝΔΡΙΚΗ ΤΡΙΑΞΟΝΙΚΗ ΣΥΣΚΕΥΗ / 75

ΣΥΣΚΕΥΗ ΑΠ' ΕΥΘΕΙΑΣ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ / 79

ΣΥΣΚΕΥΗ ΑΠΛΗΣ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ / 82

ΣΥΣΚΕΥΗ ΑΜΕΣΗΣ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ (Direction Shear Cell) / 83

ΣΥΣΚΕΥΕΣ ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΟΥ ΔΑΚΤΥΛΙΟΥ (Ring Shear) / 84

ΠΡΟΣΦΑΤΕΣ ΕΞΕΛΙΞΕΙΣ ΣΤΙΣ ΤΡΙΑΞΟΝΙΚΕΣ ΣΥΣΚΕΥΕΣ / 88

Ανισότροπη Εδαφική Συμπεριφορά /88

Συσκευές Επιβολής Πραγματικών Τριαξονικών Συσκευών / 90

Δοκιμή Στρεπτικής Διάτμησης σε Κοίλο Δοκίμιο / 90

-
- **ΜΕΤΡΗΣΗ ΕΔΑΦΙΚΗΣ ΑΚΑΜΨΙΑΣ (ΔΥΣΤΜΗΣΙΑΣ) / 94**
 - Εκτίμηση εδαφικών παραμορφώσεων σε γεωτεχνικές κατασκευές / 97
 - Εργαστηριακή μέτρηση της εδαφικής δυστημής / 98
 - Η ΦΥΣΗ ΤΗΣ ΕΔΑΦΙΚΗΣ ΔΥΣΤΜΗΣΙΑΣ / 102
 - ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΣΤΑΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΔΥΝΑΜΙΚΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ / 109
 - ΑΝΑΚΥΚΛΙΖΟΜΕΝΗ ΦΟΡΤΙΣΗ / 113
 - Όριο ελαστοπλαστικής συμπεριφοράς / 113
 - Όριο ελαστικής συμπεριφοράς / 114

 - **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ / 116**
 - **ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ:**
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ

ΥΔΑΤΙΚΗ ΡΟΗ ΔΙΑΜΕΣΟΥ ΕΔΑΦΙΚΟΥ ΥΛΙΚΟΥ

ΕΔΑΦΙΚΟΣ ΙΣΤΟΣ ΚΑΙ ΝΕΡΟ

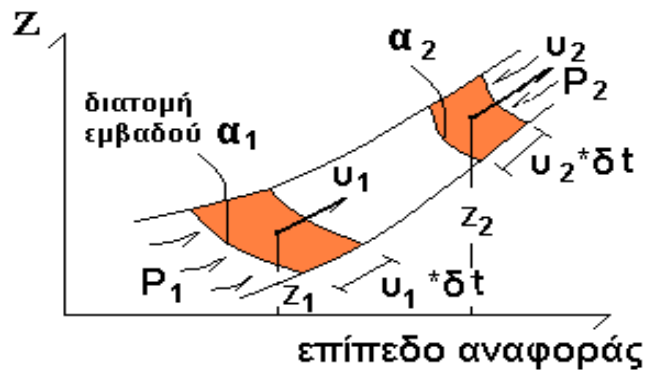
Η παρουσία του νερού μέσα στο έδαφος έχει διττό ρόλο. Επηρεάζει αφενός τον τρόπο που διατάσσονται οι κόκκοι και συνεπώς τη γεωμετρία του εδαφικού ιστού και αφετέρου επηρεάζει το μέγεθος των φορτίων που μεταφέρονται στον εδαφικό ιστό.

Στο υπέδαφος το νερό μπορεί να βρίσκεται υπό στατικές συνθήκες χωρίς να παρουσιάζει ροή. Όταν το υπόγειο νερό βρίσκεται σε κατάσταση ηρεμίας οι υδατικές πιέσεις είναι υδροστατικές. Όταν όμως εμφανίζεται ροή του νερού μέσα στο έδαφος οι συνθήκες δεν είναι πλέον υδροστατικές και η πίεση του νερού εξαρτάται από τις συνθήκες ροής. Υπάρχουν πολλές περιπτώσεις κατά τις οποίες ενώ το υπόγειο νερό βρίσκεται αρχικά σε κατάσταση ηρεμίας προκαλείται υδατική ροή μέσα στο έδαφος σαν αποτέλεσμα διαφόρων έργων όπως για παράδειγμα άντληση νερού από συγκεκριμένο βάθος, κατασκευή σήραγγας που λειτουργεί σαν στραγγιστήρας, υδατική ροή διαμέσου του πυρήνα φράγματος.

Στον εδαφικό ιστό τα κενά των πόρων επικοινωνούν μεταξύ τους και το νερό κινείται μέσα σε αλληλοσυνδεδεμένους πόρους. Στα κοκκώδη υλικά όλα τα κενά επικοινωνούν μεταξύ τους ανεξάρτητα από τον τρόπο τοποθέτησής τους όπως δείχνουν πειράματα με σφαιρίδια. Ηλεκτρονικά φωτομικρογραφήματα δείχνουν ότι ακόμα και σε λεπτόκοκκες αργίλους όλα τα κενά επικοινωνούν μεταξύ τους. Η ταχύτητα ροής του νερού διαμέσου των πόρων εξαρτάται από το μέγεθος και τη διάταξή τους με αποτέλεσμα η διαπερατότητα των εδαφικών υλικών να ποικίλλει.

ΜΟΝΟΔΙΑΣΤΑΤΗ ΡΟΗ

Ροή Ιδανικού Υγρού



Παραδοχές

1. Ασυμπίεστο υγρό.
2. Απουσία ενεργειακών απωλειών.
3. Σταθερή ροή δηλ. ταχύτητα και πίεση , παράμετροι εξαρτώμενοι μόνο από τη θέση.

$$a_1 \cdot v_1 \cdot \delta t = a_2 \cdot v_2 \cdot \delta t \quad \text{ή} \quad a_1 \cdot v_1 = a_2 \cdot v_2 = q \quad (1)$$

Έργο λόγω πίεσης p_1 στο χρονικό διάστημα δt :

$$(p_1 \cdot a_1) \cdot (v_1 \cdot \delta t) = p_1 \cdot q \cdot \delta t \quad (2)$$

Έργο που δαπανήθηκε λόγω πίεσης p_2 στο χρονικό διάστημα δt :

$$(p_2 \cdot a_2) \cdot (v_2 \cdot \delta t) = p_2 \cdot q \cdot \delta t \quad (3)$$

Αύξηση της δυναμικής ενέργειας :

$$(\rho \cdot a_1 \cdot v_1 \cdot \delta t) \cdot g \cdot (z_2 - z_1) = \gamma \cdot q \cdot \delta t \cdot (z_2 - z_1) \quad (4)$$

Αύξηση της κινητικής ενέργειας

$$\frac{1}{2} \cdot (\rho \cdot a_1 \cdot v_1 \cdot \delta t) \cdot (v_2^2 - v_1^2) = \frac{1}{2} \cdot \frac{\gamma}{g} \cdot q \cdot \delta t \cdot (v_2^2 - v_1^2) \quad (5)$$

Λόγω μηδενικών απωλειών ενέργειας : (2) = (3) + (4) + (5) και επομένως έχουμε :

$$\frac{p_1}{\gamma} + z_1 + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{p_2}{\gamma} + z_2 + \frac{v_2^2}{2g} = h, \quad \text{ολικό ύψος}$$

ή για την περίπτωση ημίρευστου υγρού

$$\frac{p_1}{\gamma} + z_1 + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{p_2}{\gamma} + z_2 + \frac{v_2^2}{2g} + \text{απώλειες}$$

όπου ρ και γ είναι η πυκνότητα και το ειδικό βάρος του υγρού αντίστοιχα.

Για την περίπτωση διήθησης μέσω εδαφικού υλικού, ταχύτητα του υγρού της τάξης του 1cm/sec είναι αρκετά μεγάλη και επομένως ο όρος

$$\frac{v^2}{2g} = \frac{0.01^2}{2 \cdot 9.81} = 5.1 \times 10^{-6} \text{ m είναι αμελητέος. Συνεπώς,}$$

$$\frac{p_1}{\gamma} + z_1 = \frac{p_2}{\gamma} + z_2 = h$$

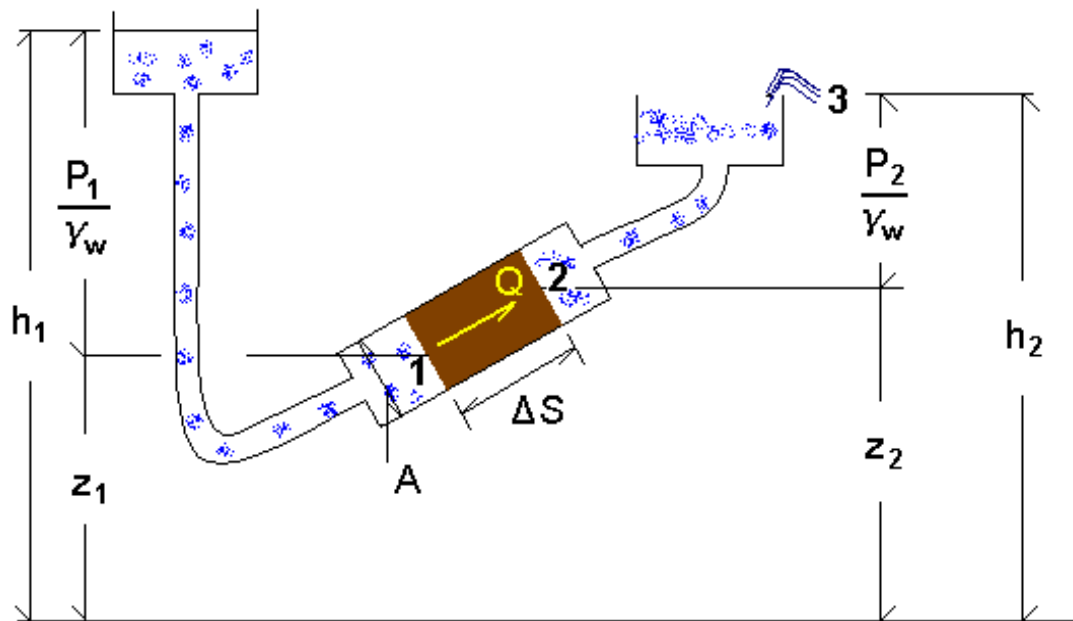
όπου z είναι το γεωμετρικό ύψος ή στάθμη η οποία εξαρτάται από τη θέση του επιπέδου αναφοράς

$\frac{p}{\gamma}$ είναι το πιεζομετρικό ύψος που αντανακλά τις πιέσεις των πόρων σε συγκεκριμένο σημείο. Δηλαδή εάν ένα πιεζόμετρο τοποθετηθεί στην συγκεκριμένη θέση το ύψος του νερού στο πιεζόμετρο είναι το πιεζομετρικό ύψος

Νόμος DARCY

Σε πειράματα με τη διάταξη του σχήματος ο Darcy μέτρησε την ποσότητα νερού που περνά στη μονάδα του χρόνου (παροχή) από το δοκίμιο της άμμου μεταβάλλοντας το

μήκος και την πίεση του νερού στα άκρα του δοκιμίου. Τα πειράματα έδειξαν ότι η παροχή μεταβάλλεται γραμμικά με την υδραυλική κλίση σύμφωνα με τη σχέση



Εάν Q είναι η ποσότητα του νερού που συγκεντρώνεται στο σημείο 3 στη μονάδα του χρόνου

$$\frac{Q}{A} = k \cdot \frac{h_1 - h_2}{\Delta S}$$

$$\frac{Q}{A} = v = \text{ταχύτητα ροής}$$

$$i = \frac{h_2 - h_1}{\Delta S} = \text{υδραυλική κλίση}$$

$$v = -k \cdot i \quad \text{και} \quad Q = -k \cdot i \cdot A$$

k = συντελεστής διαπερατότητας (σε μονάδες ταχύτητας)

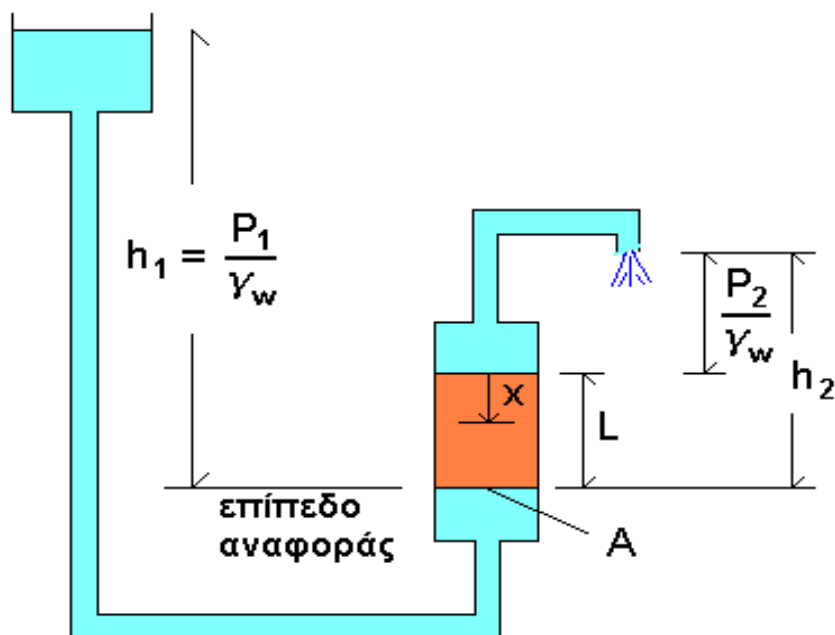
Το πιεζομετρικό ύψος και το γεωμετρικό ύψος συμβάλλουν στην κίνηση του υγρού μέσα στο έδαφος (νόμος Bernoulli), το δε ολικό ύψος καθορίζει την ταχύτητα ροής

(νόμος Darcy). Η υδραυλική κλίση είναι η διαφορά του ολικού ύψους στη θέση εισόδου και εξόδου του νερού από το εδαφικό υλικό. Ας σημειωθεί ότι:

- η ροή μεταξύ δύο σημείων λαμβάνει χώρα μόνο όταν το ολικό ύψος είναι διαφορετικό στα δύο αυτά σημεία
- η επιλογή του επιπέδου αναφοράς είναι τυχαία. Η διαφορά της στάθμης μεταξύ δύο σημείων είναι ανεξάρτητη από τη θέση του επιπέδου αναφοράς

Εργαστηριακή Μέτρηση Συντελεστή Διαπερατότητας (k)

Δοκιμή σταθερού υδραυλικού φορτίου Δh :



Q , παροχή νερού

$$Q = A \cdot k \cdot \frac{h_1 - h_2}{L} = A \cdot k \cdot (-i)$$

$$k = \frac{Q \cdot L}{A \cdot (h_1 - h_2)}$$

Ισχύει για άμμους και αμμώδεις ιλύες.

Υδραυλική Υποσκαφή (Piping)

Το φαινόμενο λαμβάνει χώρα όταν η πίεση των πόρων εξισούται με την κατακόρυφη ολική τάση δηλ. όταν η κατακόρυφη ενεργός τάση είναι μηδενική.

Ας θεωρήσουμε έδαφος σε βάθος x . Η ολική τάση είναι $\sigma_v = p_2 + \gamma \cdot x$ (1)

Η πίεση των πόρων σε βάθος x είναι ίση προς $p_2 + \frac{p_1 - p_2}{L} \cdot x$ (2)

Αλλά (1) = (2) και επομένως $\frac{p_1 - p_2}{L} = \gamma$ (3)

Αυτό συμβαίνει όταν $i = i_{crit}$ όπου

$$i_{crit} = \frac{h_2 - h_1}{L} = \frac{\frac{p_2}{\gamma_w} + L - \frac{p_1}{\gamma_w}}{L} = 1 - \frac{p_1 - p_2}{\gamma_w \cdot L} \quad (4)$$

Από (3) και (4) $-i_{crit} = \frac{\gamma}{\gamma_w} - 1$

Για τις άμμους $\gamma \approx 2 \cdot \gamma_w$ $\therefore -i_{crit} \approx 1$

ΔΙΔΙΑΣΤΑΤΗ ΡΟΗ

Η παροχή μέσω εδαφικού στοιχείου είναι :

$$q = q_x + q_y + q_z$$

Η παροχή στην κατακόρυφη διεύθυνση κατά την είσοδο στο εδαφικό στοιχείο είναι σύμφωνα με το νόμο του Darcy :

$$q_z = k_z \cdot i \cdot A, \quad \text{όπου } A = dy \cdot dx$$

$$q_z = k_z \cdot \left(-\frac{\partial h}{\partial z} \right) \cdot dy \cdot dx$$

Η παροχή κατά την έξοδο από το εδαφικό στοιχείο είναι

$$q_z = \left(k_z + \frac{\partial k_z}{\partial z} \cdot dz \right) \cdot \left(-\frac{\partial h}{\partial z} - \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} \cdot dz \right) \cdot dy \cdot dx$$

όπου $k_z =$ διαπερατότητα στην κατεύθυνση z

$h =$ ολικό ύψος

Για συνθήκες μόνιμης ροής

$$\begin{aligned} \Delta q_z &= k_z \cdot \left(-\frac{\partial h}{\partial z} \right) \cdot dy \cdot dx - \left(k_z + \frac{\partial k_z}{\partial z} \cdot dz \right) \cdot \left(-\frac{\partial h}{\partial z} - \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} \cdot dz \right) \cdot dy \cdot dx \\ &= \left(k_z \cdot \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} + \frac{\partial k_z}{\partial z} \cdot \frac{\partial h}{\partial z} + \frac{\partial k_z}{\partial z} \cdot dz \cdot \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} \right) \cdot dx \cdot dy \cdot dz = 0 \end{aligned}$$

για σταθερή διαπερατότητα $\frac{\partial k_z}{\partial z} = 0$ και

$$\Delta q_z = \left(k_z \cdot \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} \right) \cdot dx \cdot dy \cdot dz = 0$$

Όμοια για ροή στην κατεύθυνση x :

$$\Delta q_x = \left(k_x \cdot \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} \right) \cdot dx \cdot dy \cdot dz = 0$$

Για διδιάστατη ροή $q_y = 0$

$$\Delta q = \Delta q_z + \Delta q_x = \left(k_z \cdot \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} + k_x \cdot \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} \right) \cdot dx \cdot dy \cdot dz = 0$$

$$\rightarrow k_z \cdot \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} + k_x \cdot \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} = 0$$

δηλ. το άθροισμα της μεταβολής της υδραυλικής κλίσης στην κατεύθυνση z και της μεταβολής της υδραυλικής κλίσης στην κατεύθυνση x είναι μηδενικό.

Η εξίσωση αυτή μπορεί να αναλυθεί με τους γνωστούς τρόπους ανάλυσης της εξίσωσης Laplace. Η εξίσωση μπορεί να επιλυθεί προσεγγιστικά γραφικά με τη χάραξη του δικτύου ροής. Για ισότροπο υλικό

$$\frac{\partial^2 h}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} = 0$$

και επομένως οι καμπύλες ροής είναι κάθετες στις ισοδυναμικές καμπύλες.

ΣΥΝΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

Μη διαπερατή οριογραμμή

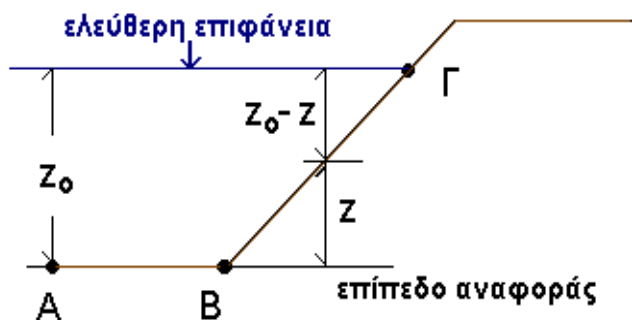
Το υγρό των πόρων δεν μπορεί να περάσει την οριακή γραμμή.

Η ταχύτητα κάθετα στην οριακή γραμμή πρέπει να είναι μηδενική δηλ. $\frac{\partial \Phi}{\partial n} = 0$

όπου n είναι ο κάθετος άξονας στην οριακή γραμμή.

Επομένως, η μη διαπερατή οριακή γραμμή είναι καμπύλη ροής (streamline)

Οριογραμμή κατά μήκος 'ελεύθερου' υγρού



Κατά μήκος της διαδρομής ΑΒΓ.

Ολικό ύψος

$$h = \frac{p}{\gamma_w} + z$$

όπου

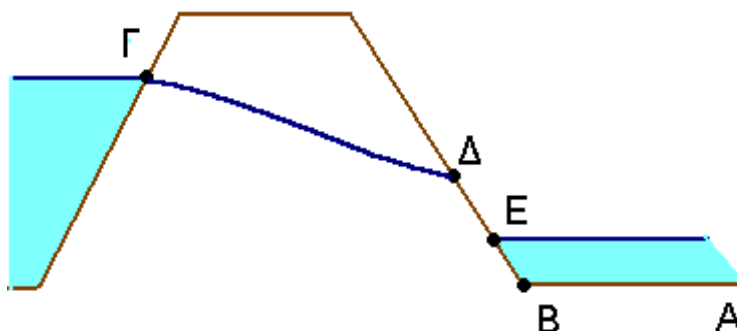
$$p = \gamma_w \cdot (z_0 - z)$$

\Rightarrow

$$h = z_0 - z + z = z_0$$

Επομένως η οριογραμμή είναι γραμμή ίσου δυναμικού (equipotential line).

Επιφάνεια διήθησης

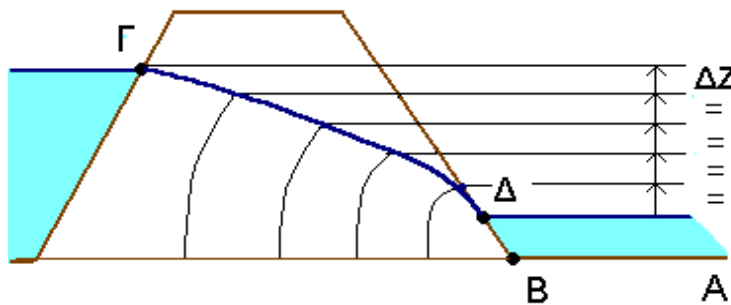


Η οριογραμμή ΔΕ αποτελεί το όριο όπου η διηθούμενη ποσότητα νερού εγκαταλείπει την περιοχή ροής και εισέρχεται σε μία ζώνη χωρίς έδαφος ή υγρό.

Η πίεση σε αυτή την επιφάνεια είναι ατμοσφαιρική και συνεπώς σταθερή.
Επομένως η γραμμή ΔΕ δεν είναι γραμμή ίσου δυναμικού.

$$h = \frac{p}{\gamma_w} + z \quad \text{αλλά} \quad p = 0 \quad \rightarrow \quad h = z$$

Φρεατική γραμμή



Είναι η υψηλότερη
καμπύλη ροής ή
το σύνορο της
περιοχής ροής από
την περιοχή όπου
δεν εμφανίζεται ροή
του υγρού στοιχείου
(στο σχήμα είναι η

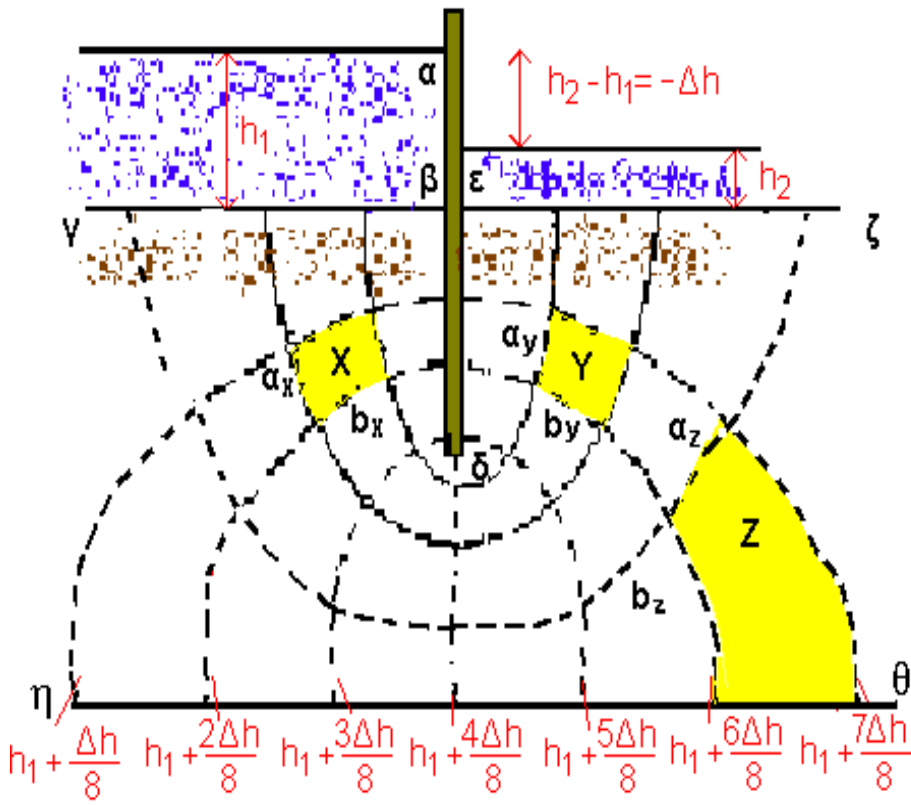
γραμμή ΓΔ).

Η πίεση στην οριογραμμή ΓΔ είναι ατμοσφαιρική και άρα το ολικό ύψος h μεταβάλλεται γραμμικά με τη στάθμη z . Επομένως οι ισοδυναμικές καμπύλες οφείλουν να τέμνουν τη φρεατική γραμμή σε θέσεις που αντιστοιχούν σε ίσες μεταβολές της στάθμης από το επίπεδο αναφοράς.

ΓΡΑΦΙΚΗ ΛΥΣΗ - ΔΙΚΤΥΟ ΡΟΗΣ

Παρατηρήσαμε ότι για ισότροπες συνθήκες στο πεδίο ροής ($K = \text{σταθερά}$) οι ισοδυναμικές καμπύλες και οι καμπύλες ροής τέμνονται υπό ορθές γωνίες. Η γραφική λύση βασίζεται στην ανωτέρω ιδιότητα. Το δίκτυο καμπυλών που ακολουθεί την καθετότητα ικανοποιεί την εξίσωση Laplace.

Ροή κάτω από πασσαλότοιχο



Συνοριακές συνθήκες

$\beta\gamma =$ ισοδυναμική καμπύλη

$\epsilon\zeta =$ ισοδυναμική καμπύλη

$\beta\delta\epsilon =$ καμπύλη ροής

$\eta\theta =$ καμπύλη ροής

Το δίκτυο ροής σχεδιάζεται για τις ανωτέρω οριακές συνθήκες.

Το ολικό ύψος του συστήματος είναι $\Delta h = H$.

$$q_x = -k \cdot \frac{\Delta h}{a_x} \cdot b_x \cdot 1$$

$$q_y = -k \cdot \frac{-\frac{\Delta h}{8}}{a_y} \cdot b_y \cdot 1$$

$$q_z = -k \cdot \frac{-\frac{\Delta h}{8}}{a_z} \cdot b_z \cdot 1$$

Αλλά $q_x = q_y$ αφού x,y περιβάλλονται από τις ίδιες καμπύλες ροής

$$\frac{b_x}{a_x} = \frac{b_y}{a_y}$$

y,z περιβάλλονται από τις ίδιες ισοδυναμικές καμπύλες και αν διατηρηθούν οι λόγοι

$$\text{ίσοι} \quad \frac{b_z}{a_z} = \frac{b_y}{a_y} \quad \rightarrow \quad q_z = q_y$$

Κατά το σχεδιασμό του δικτύου διατηρούμε λόγο $(b_x = a_x)$ ίσο προς τη μονάδα, άρα

$$q_x = q_y = q_z$$

Εάν $N_\delta =$ αριθμός πτώσεων δυναμικού (8 στο παράδειγμα)

$N_\rho =$ αριθμός καναλιών ροής (4 στο παράδειγμα)

$$\text{η ολική παροχή} \quad Q = N_\rho \cdot q_x = -N_\rho \cdot k \cdot \frac{-H}{N_\delta} \cdot \frac{b_x}{a_x}$$

$$\text{για τετράγωνα} \quad b_x = a_x \quad \text{καί} \quad H = (h_1 - h_2) = -(h_2 - h_1)$$

$$Q = -k \cdot (-H) \cdot \frac{N_{\rho}}{N_{\delta}} = -k \cdot (h_2 - h_1) \cdot \frac{N_{\rho}}{N_{\delta}}$$

$$Q = k \cdot (h_1 - h_2) \cdot \frac{N_{\rho}}{N_{\delta}}$$

Ο λόγος $\lambda = \frac{N_{\rho}}{N_{\delta}}$ ονομάζεται συντελεστής σχήματος. Επομένως,

παροχή = (συντελ. σχήματος) * (απώλεια ολικού ύψους) * (διαπερατότητα)

και ισχύει για ισότροπα διαπερατά υλικά.

1. Ένα δίκτυο ροής αποτελείται από τετράγωνα που δημιουργούνται από αλληλοτεμνόμενες υπό ορθή γωνία ισοδυναμικές καμπύλες και καμπύλες ροής. Αρχικά πρέπει να προσδιοριστούν οι συνοριακές συνθήκες του προβλήματος και οι μεταβολές διαπερατότητας του εδαφικού υλικού. Η διαδικασία του σχεδιασμού είναι χρονοβόρα.
2. Από το δίκτυο ροής προσδιορίζονται η παροχή, η πίεση των πόρων και η υδραυλική κλίση. Η παροχή είναι $Q = k \cdot H \cdot \lambda$ όπου λ είναι ο συντελεστής σχήματος που προσδιορίζεται από το δίκτυο ροής.

ΑΝΙΣΟΤΡΟΠΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΡΟΗΣ

Η διαδικασία απόθεσης εδαφικών υλικών, ιζηματογένεση, έχει σαν αποτέλεσμα η κατακόρυφη τάση να είναι μεγαλύτερη από την οριζόντια τάση. Για κανονικώς φορτισμένο έδαφος η ενεργός οριζόντια τάση είναι περίπου το μισό της ενεργού κατακόρυφης τάσης. Σε ιζηματογενές εδαφικό υλικό τα αργιλικά πλακίδια συνήθως επικάθονται με τον μεγάλο τους άξονα στην οριζόντια κατεύθυνση με αποτέλεσμα να εμφανίζουν μικρότερη διαπερατότητα στην κατακόρυφη σε σχέση με την οριζόντια κατεύθυνση. Ο λόγος της οριζόντιας ως προς την κατακόρυφη διαπερατότητα είναι μεταξύ 2 και 10 για κανονικώς φορτισμένα δοκίμια. Ο λόγος τείνει σε ακόμη μεγαλύτερες τιμές κατά τη διάρκεια τεχνητής συμπίκνωσης κατά την κατασκευή επιχωμάτων.

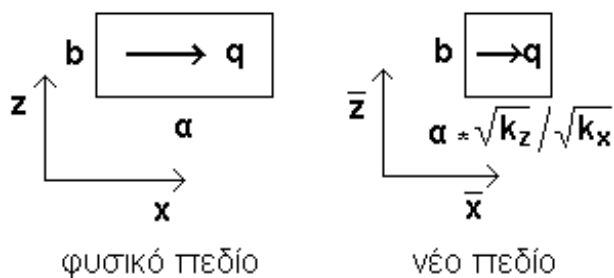
Η εξίσωση ροής

$$k_z \cdot \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} + k_x \cdot \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} = 0 \quad \rightarrow \quad \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 h}{\left(\frac{k_z}{k_x}\right) \cdot \partial x^2} = 0 \quad \rightarrow$$

$$\frac{\partial^2 h}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial x_T^2} = 0 \quad (1) \quad \text{όπου} \quad x_T = \left(\frac{k_z}{k_x}\right)^{1/2} \cdot x \quad (2)$$

Η εξίσωση Laplace λύνεται γραφικά με την κατασκευή δικτύου ροής αφού προηγουμένως οι διαστάσεις στον άξονα x μετατρέπονται με βάση την εξίσωση (2). Η

διαπερατότητα του νέου πεδίου ροής είναι $\bar{k} = \sqrt{k_x \cdot k_z}$



Εάν η απώλεια δυναμικού είναι δh_x για μοναδιαίο βάθος

$$q = -k_x \cdot \frac{\delta h}{a} \cdot b \cdot 1 \quad \text{ή} \quad q = -\bar{k} \cdot \frac{\delta h}{a} \cdot \frac{\sqrt{k_x}}{\sqrt{k_z}} \cdot b \cdot 1$$

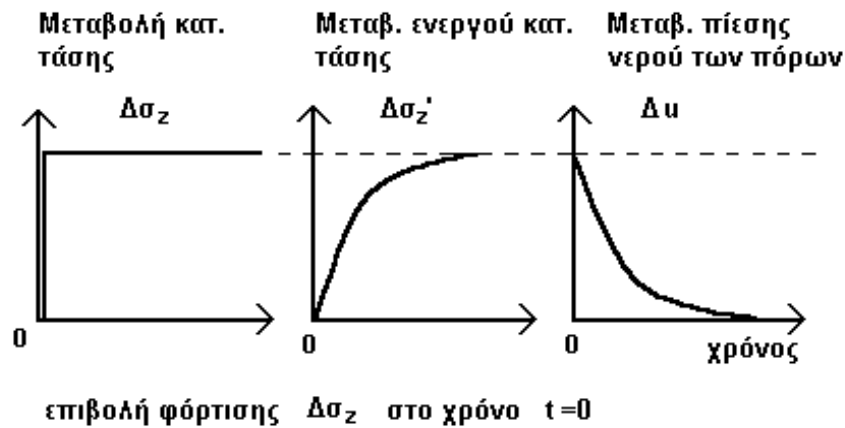
και συνολική ροή
$$Q = \sqrt{k_x \cdot k_z} \cdot (h_1 - h_2) \cdot \frac{N_\rho}{N_\delta}$$

ΣΤΕΡΕΟΠΟΙΗΣΗ ΕΔΑΦΙΚΟΥ ΥΛΙΚΟΥ

ΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΤΗΣ ΣΤΕΡΕΟΠΟΙΗΣΗΣ

Η παρουσία του νερού μέσα στο έδαφος επηρεάζει τον τρόπο που διατάσσονται οι κόκκοι και το μέγεθος των φορτίων που παραλαμβάνονται από τον εδαφικό ιστό. Όταν φορτίο εφαρμόζεται σε ξηρό έδαφος οι κόκκοι μετακινούνται υποχρεωτικά σε θέσεις πλησιέστερες μεταξύ τους. Αντίθετα όταν το έδαφος είναι κορεσμένο οι κόκκοι δεν μπορούν να μετακινηθούν αφού οι μεταξύ τους θέσεις είναι γεμάτες με νερό και το νερό είναι ασυμπίεστο υλικό. Το φορτίο παραλαμβάνεται αρχικά από το νερό με αποτέλεσμα την εκδήλωση υπερπίεσης πόρων.

Η υπερπίεση του νερού των πόρων έχει σαν αποτέλεσμα τη ροή του νερού από τους πόρους προς τις περιοχές του εδάφους όπου η πίεση είναι χαμηλότερη. Η ροή του νερού σε περιοχές χαμηλότερης πίεσης διαρκεί έως ότου να μηδενιστεί η αρχική υπερπίεση. Καθώς το νερό απομακρύνεται από τους πόρους, οι κόκκοι δύνανται πλέον να μετακινηθούν σε πλησιέστερες θέσεις, ο όγκος που καταλαμβάνει ο εδαφικός ιστός μειώνεται, με αποτέλεσμα την καθίζηση του εδάφους. Ταυτόχρονα καθώς η υπερπίεση του νερού των πόρων διαρκώς μειώνεται το εξωτερικό φορτίο μεταφέρεται σταδιακά στον εδαφικό ιστό υπό τη μορφή ενεργού τάσης. Όταν η υπερπίεση του νερού των πόρων μηδενιστεί όλο το εξωτερικό φορτίο έχει μεταφερθεί στον εδαφικό ιστό. Το φαινόμενο της σταδιακής διαφυγής του νερού των πόρων με ταυτόχρονη μεταφορά της ολικής τάσης σε ενεργό τάση και μείωση της υπερπίεσης του νερού των πόρων ονομάζεται στερεοποίηση και περιγράφεται στο ακόλουθο Σχήμα.



Η θεωρία της ελαστικότητας (για υλικό με γραμμική, ισότροπη συμπεριφορά) προβλέπει ότι μεταβολή της ενεργού τάσης πρέπει να συνοδεύεται με μεταβολή του όγκου του υλικού δηλαδή με αναδιάταξη των κόκκων.

E = μέτρο ελαστικότητας

ν = λόγος Poisson

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E} \left(\sigma'_x - \nu(\sigma'_y + \sigma'_z) \right)$$

$$\varepsilon_y = \frac{1}{E} \left(\sigma'_y - \nu(\sigma'_z + \sigma'_x) \right)$$

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E} \left(\sigma'_z - \nu(\sigma'_x + \sigma'_y) \right)$$

Με άθροιση κατά μέλη

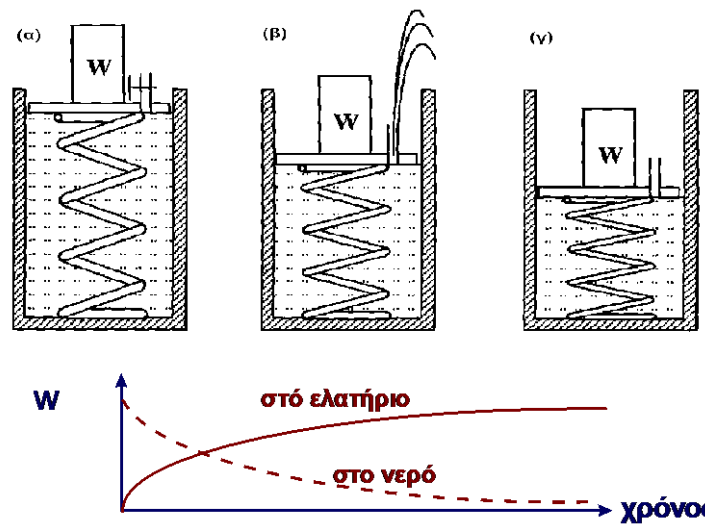
$$\varepsilon_v = \frac{1}{K} \left(\frac{\sigma'_x + \sigma'_y + \sigma'_z}{3} \right)$$

όπου
$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)}$$

Επομένως
$$p' = K \cdot \varepsilon_v$$

Στον εδαφικό ιστό τα κενά των πόρων επικοινωνούν μεταξύ τους και το νερό κινείται μέσα σε αλληλοσυνδεόμενους πόρους. Η ταχύτητα ροής του νερού διαμέσου των πόρων εξαρτάται από το μέγεθος και τη διάταξη τους με αποτέλεσμα η διαπερατότητα των διαφόρων εδαφικών υλικών να ποικίλλει.

Υδρομηχανικό ανάλογο στερεοποίησης εδαφών



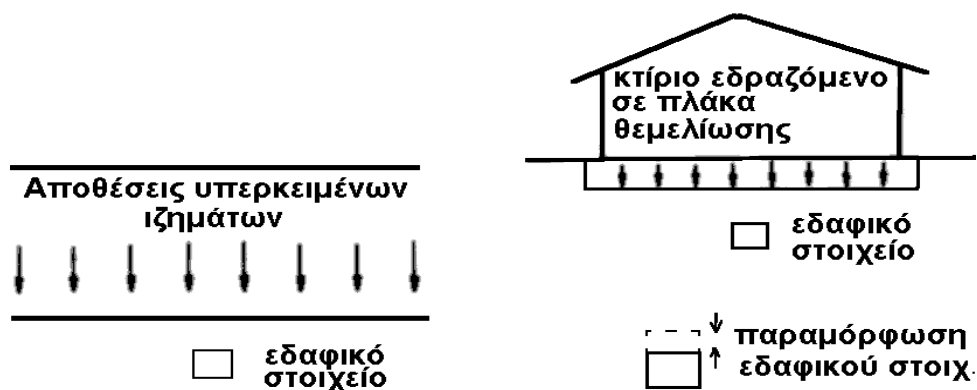
Το υδρομηχανικό ανάλογο του φαινομένου της στερεοποίησης περιγράφεται στο Σχήμα. Αρχικά το εξωτερικό φορτίο παραλαμβάνεται από το νερό (α) καθώς εμποδίζεται η συμπίεση του ελατηρίου λόγω του ασυμπίεστου νερού. Μόνον όταν ανοίξει η βαλβίδα διέλευσης του νερού (β) είναι δυνατή η συμπίεση του ελατηρίου και η μεταφορά φορτίου από το νερό στο ελατήριο. Όταν σταματήσει η διαφυγή νερού (γ) όλο το φορτίο έχει παραληφθεί από το ελατήριο.

Ο ρυθμός μείωσης της υπερπίεσης του νερού των πόρων εξαρτάται από την διαπερατότητα του εδάφους. Σε κοκκώδη υλικά η στερεοποίηση είναι άμεση. Σε υλικά μικρής διαπερατότητας όπως οι άργιλοι η στερεοποίηση μπορεί να διαρκέσει μήνες ή χρόνια.

Το φαινόμενο της στερεοποίησης συνδέεται με διάφορες κατασκευαστικές εργασίες π.χ. την κατασκευή επιχωμάτων. Στην περίπτωση της κατασκευής επιχωμάτων αρχικά προσδιορίζεται η αντοχή του υποκείμενου εδάφους. Σειρά πιεζομέτρων εγκαθίστανται για την συνεχή παρακολούθηση της πίεσης του νερού των πόρων σε διάφορες αποστάσεις από τις περιοχές στράγγισης. Στη συνέχεια τοποθετείται η πρώτη στρώση του επιχώματος. Ακολουθεί στερεοποίηση του εδάφους συνεπώς αύξηση της ενεργού τάσης και της αντοχής του. Με τα πιεζόμετρα προσδιορίζεται ο βαθμός στερεοποίησης. Η αυξημένη αντοχή του εδάφους επιτρέπει την προσθήκη της επόμενης στρώσης του επιχώματος.

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΟΝΟΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΣΥΜΠΙΕΣΗΣ

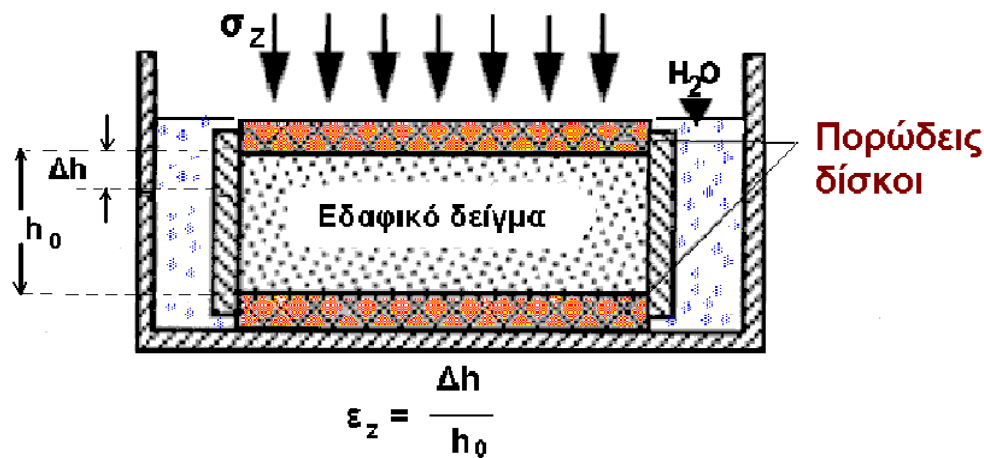
Το φαινόμενο της μονοδιάστατης συμπίεσης / διόγκωσης εδαφικού υλικού παρατηρείται λόγω φυσικών φαινομένων όπως η απόθεση εδαφικών υλικών στους πυθμένες των θαλασσών, η απομάκρυνση των παγετώνων ή λόγω της κατασκευής έργων όπως η κατασκευή δεξαμενών υγρών καυσίμων μεγάλης διαμέτρου όπως φαίνεται στο Σχήμα.



Λόγω της μεγάλης έκτασης φορτιζόμενης επιφάνειας η παραμόρφωση του εδαφικού στοιχείου κάτω από την επιφάνεια περιορίζεται στον κατακόρυφο άξονα. Για την προσομοίωση του φαινομένου της μονοδιάστατης συμπίεσης απαιτείται η επιβολή ορθής παραμόρφωσης στον κατακόρυφο άξονα με ταυτόχρονη παρεμπόδιση ορθών παραμορφώσεων στο οριζόντιο επίπεδο και όλων των διατμητικών παραμορφώσεων.

Κλασική Δοκιμή Συμπιεσομέτρου

Η συσκευή προσομοίωσης του φαινομένου της μονοδιάστατης στερεοποίησης αναπτύχθηκε στη Γαλλία από τον J. Frontard περί το 1910. Ο Terzaghi διατύπωσε την αρχή της ενεργού τάσης βασιζόμενος σε αποτελέσματα πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν στην παραπάνω συσκευή περί το 1920. Η συσκευή ονομάστηκε οιδήμετρο (oedometer) από την Ελληνική λέξη 'οίδημα'.



Σκοπός του πειράματος είναι η μελέτη της σχέσης τάσεων παραμορφώσεων υλικών με σχετικά μικρή διαπερατότητα όπως άργιλοι και ιλεις. Τα μετρούμενα μεγέθη κατά τη διάρκεια του πειράματος είναι η επιβαλλόμενη τάση, η παραμόρφωση του δοκιμίου και ο χρόνος. Το δοκίμιο είναι κυλινδρικό διαμέτρου 75mm και ύψους 20mm, τοποθετείται σε μεταλλικό δακτύλιο και καλύπτεται με νερό. Με την επιβολή της τάσης σ_z , το δοκίμιο αρχικού ύψους h_0 παραμορφώνεται στον κατακόρυφο άξονα με το χρόνο. Η συνολική μεταβολή του ύψους του είναι Δh και αντιστοιχεί στο μηδενισμό της υπερπίεσης πόρων, δηλ. όταν η ενεργός τάση γίνει ίση με την εξωτερικά επιβαλλόμενη τάση. Η αντίστοιχη αξονική παραμόρφωση είναι $\varepsilon_z = \Delta h / h_0$. Η διαφυγή του νερού των πόρων γίνεται μέσω των πορωδών δίσκων του ανωτέρω Σχήματος.

Σχέση ορθής παραμόρφωσης ε_z και δείκτη πόρων e

Επειδή ο άκαμπτος δακτύλιος παρεμποδίζει την ανάπτυξη των ορθών παραμορφώσεων στο οριζόντιο επίπεδο $\varepsilon_x = \varepsilon_y = 0$, η παραμόρφωση του όγκου του δοκιμίου ε_v είναι ίση με την κατακόρυφη ορθή παραμόρφωση.

$$\varepsilon_v = \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z = \varepsilon_z = \frac{\Delta h}{h_0}$$

Επίσης

$$\varepsilon_v = \frac{V_0 - V}{V_0} = \frac{\frac{V_0}{V_s} - \frac{V}{V_s}}{\frac{V_0}{V_s}} = \frac{e_0 - e}{1 + e_0}$$

όπου e, e_0 είναι η αρχική και η παρούσα τιμή του δείκτη πόρων

V, V_0 είναι η αρχική και η παρούσα τιμή του όγκου του δοκιμίου

και V_s είναι ο όγκος της στερεάς φάσης του δοκιμίου

Επομένως συνεπάγεται ότι :

$$e = e_0 - \varepsilon_v(1 + e_0) = e_0 - \frac{\Delta h}{h_0}(1 + e_0)$$

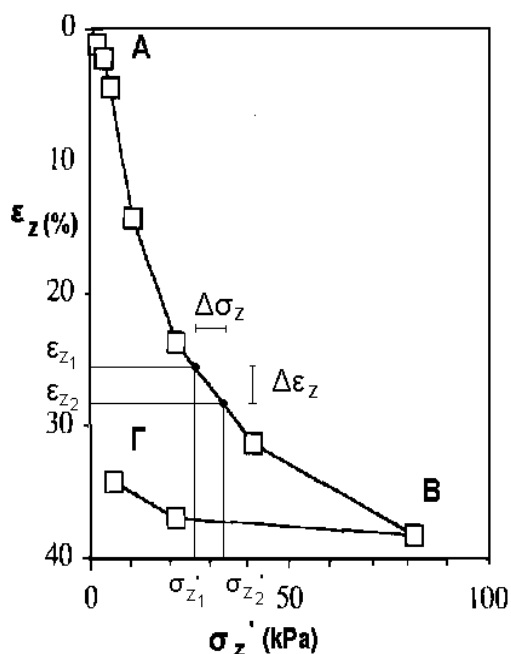
Ενώ η κατακόρυφη παραμόρφωση είναι η μόνη μη μηδενική συνιστώσα της παραμόρφωσης όσον αφορά στις τάσεις, εκτός από την κατακόρυφη τάση, αναπτύσσονται και οριζόντιες τάσεις κάθετες στην επιφάνεια του δακτυλίου. Με τη συμπίεση στην κατακόρυφη διεύθυνση, το έδαφος τείνει να διογκωθεί πλευρικά και επειδή παρεμποδίζεται αναπτύσσονται θλιπτικές τάσεις σ_h οι οποίες αυξάνουν με την αύξηση της κατακόρυφης τάσης σ_v ή σ_z . Εργαστηριακές μετρήσεις δείχνουν ότι κατά τη διάρκεια της μονοδιάστατης συμπίεσης ο λόγος $\sigma_h/\sigma_v = K_0$ παραμένει σταθερός (~0.4 έως 0.6). Ο λόγος K_0 καλείται συντελεστής οριζόντιας ώθησης με παρεμπόδιση της πλευρικής παραμόρφωσης. Κατά την αποφόρτιση η οριζόντια τάση μειώνεται με ρυθμό πολύ βραδύτερο από τη μείωση της κατακόρυφης τάσης διότι κατά την αποφόρτιση οι ολισθήσεις και οι κυλίσεις που είναι συνυφασμένες με την ανάπτυξη των οριζόντιων τάσεων είναι μη αντιστρεπτές, και επομένως ο λόγος K_0 αυξάνει.

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

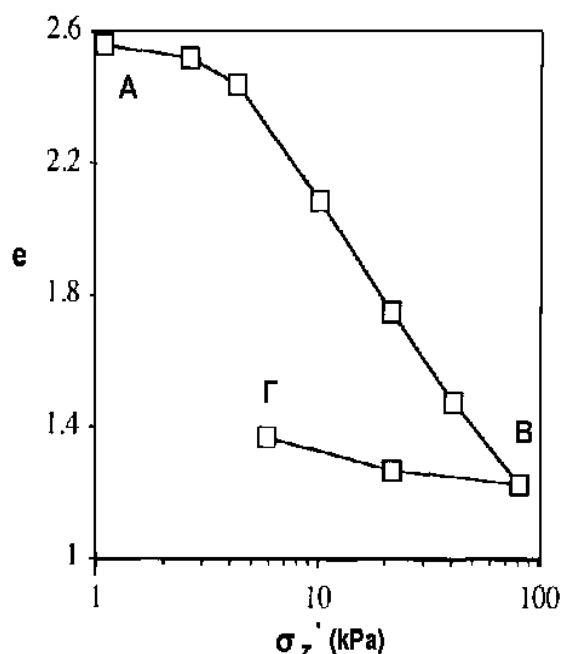
ΔΟΚΙΜΗΣ ΣΥΜΠΙΕΣΟΜΕΤΡΟΥ

Με τη βοήθεια της δοκιμής συμπίεσομέτρου μπορούμε να υπολογίσουμε τα ακόλουθα μεγέθη :

1. Για κάθε επιβαλλόμενο φορτίο από το διάγραμμα της κατακόρυφης παραμόρφωσης προς το χρόνο μπορούμε να εκτιμήσουμε το χρόνο που θα χρειασθεί για να ολοκληρωθεί η ανάπτυξη των παραμορφώσεων (π.χ. καθιζήσεων) όταν το έδαφος υποβάλλεται σε αύξηση φορτίου.
2. Με τη βοήθεια των καταγραφών συνολικής παραμόρφωσης για διάφορα στάδια φόρτισης (ή αποφόρτισης) μπορούμε να προσδιορίσουμε τη σχέση ενεργών τάσεων-παραμορφώσεων εδαφικού υλικού καταπονούμενου σε μονοδιάστατη συμπίεση (ή διόγκωση) και κατ' επέκταση το μέγεθος των καθιζήσεων στη φύση. Όμως δεν γνωρίζουμε το χρονικό διάστημα που απαιτείται για την ολοκλήρωση των καθιζήσεων.



(α)



(β)

Η συνολική παραμόρφωση (από την έναρξη του πειράματος) για αρκετά στάδια φόρτισης ή αποφόρτισης δοκιμής συμπίεσομέτρου μπορεί να σχεδιαστεί σαν καμπύλη τάσεων παραμορφώσεων όπως φαίνεται στο Σχήμα. Η καμπύλη του Σχήματος

αντιστοιχεί σε δοκίμιο πολύ μαλακής αργίλου όπως υποδεικνύει η σχεδόν μηδενική αρχική ενεργός τάση. Η κλίμακα του άξονα των τάσεων στο γράφημα (α) του Σχήματος είναι γραμμική, ενώ στο γράφημα (β) είναι λογαριθμική.

Υπολογισμός Καθιζήσεων

Η καμπύλη τάσεων-παραμορφώσεων του Σχήματος (α) είναι μη γραμμική και μη αναστρέψιμη όπως φαίνεται από τη σύγκριση των κλάδων φόρτισης (ΑΒ) και αποφόρτισης (ΒΓ). Εάν θεωρήσουμε μικρές μεταβολές τάσης $\Delta\sigma_z' = \sigma_{z2}' - \sigma_{z1}'$ στην καμπύλη τάσεων-παραμορφώσεων, ο συντελεστής μονοδιάστατης συμπίεσης m_v δίνεται από τη σχέση:

$$m_v = \frac{\varepsilon_{z2} - \varepsilon_{z1}}{\sigma_{z2}' - \sigma_{z1}'} = \frac{1}{D}$$

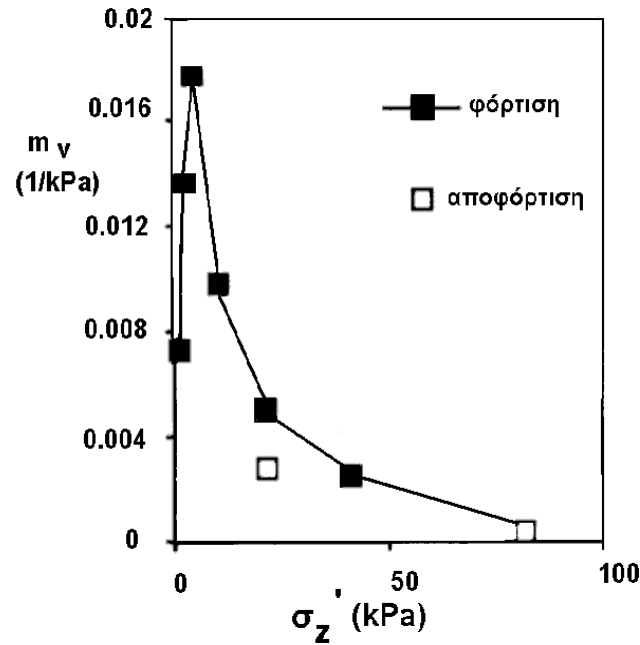
$$m_v = \frac{e_1 - e_2}{1 + e_1} * \frac{1}{\sigma_{z2}' - \sigma_{z1}'}, \text{για } \rightarrow (\varepsilon_z = \varepsilon_v)$$

Όπου $D = \frac{\Delta\sigma_z'}{\Delta\varepsilon_z}$ είναι το μέτρο μονοδιάστατης συμπίεσης

και για την περίπτωση γραμμικών, ελαστικών υλικών δίνεται από τη σχέση :

$$D = [E(1-\nu)] / [(1+\nu)(1-2\nu)]$$

Ο συντελεστής m_v εξαρτάται τόσο από τη μεταβολή των τάσεων όσο και από την κατεύθυνση της φόρτισης όπως φαίνεται στο Σχήμα όπου παρουσιάζονται τα αποτελέσματα πειράματος σε μαλακή άργιλο.



Ο συντελεστής m_v χρησιμοποιείται στον υπολογισμό των καθιζήσεων δ που απορρέουν από την αύξηση της επιβαλλόμενης κατακόρυφης τάσης σε εδαφική στρώση αρχικού ύψους h_0 , με την προϋπόθεση ότι το έδαφος στο εργαστήριο και τη φύση υποβάλλεται σε παρόμοια τάση, μεταβολή τάσης και κατεύθυνση φόρτισης.

$$\delta = m_v * h_0 * \Delta\sigma'_z = \frac{1}{D} * h_0 * \Delta\sigma'_z$$

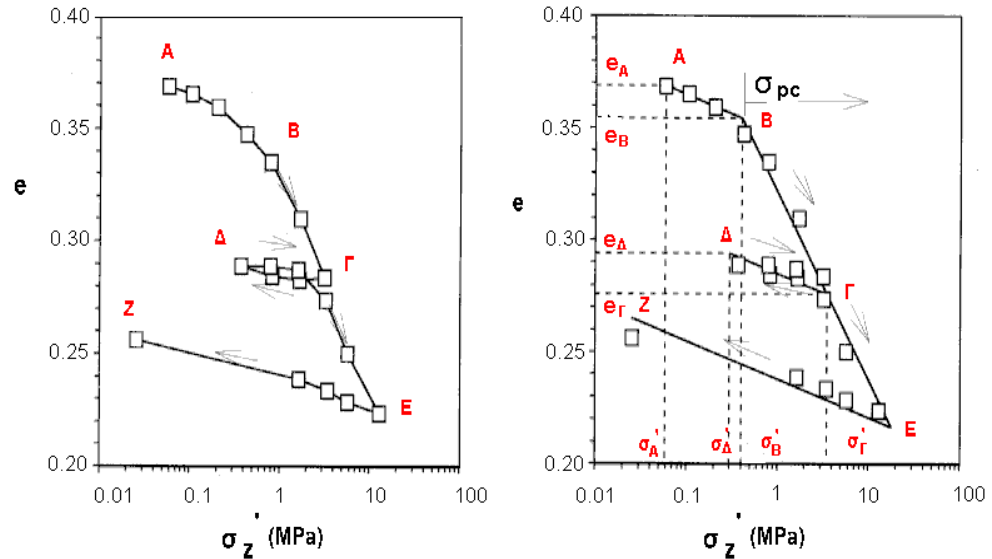
Όταν η καμπύλη τάσεων παραμορφώσεων του προηγούμενου Σχήματος (β) σχεδιασθεί σαν συνάρτηση του δείκτη πόρων e και της ενεργού τάσης σ'_z σε ημιλογαριθμική κλίμακα, ο δείκτης e μεταβάλλεται γραμμικά με το λογάριθμο της τάσης σ'_z σε μερικά τμήματα της καμπύλης. Συνεπώς η χρησιμοποίηση του δείκτη e είναι προτιμότερη από την παραμόρφωση ϵ_z για τη γραφική παράσταση των αποτελεσμάτων της δοκιμής συμπίεσομέτρου.

Χαρακτηριστικά Δοκιμής Συμπιεσομέτρου

Δείκτες Στερεοποίησης

Αποτελέσματα δοκιμής συμπίεσομέτρου σε στιφρές αργίλους όπου η πειραματική καμπύλη προσομοιώνεται με ευθύγραμμα τμήματα απεικονίζονται στο επόμενο

Σχήμα. Στα επιμέρους τμήματα η μεταβολή του δείκτη πόρων, e , ως προς το λογάριθμο της ενεργού τάσης, $\log \sigma'$, είναι γραμμική και επομένως είναι δυνατός ο προσδιορισμός των ακόλουθων χαρακτηριστικών της δοκιμής συμπίεσομέτρου.



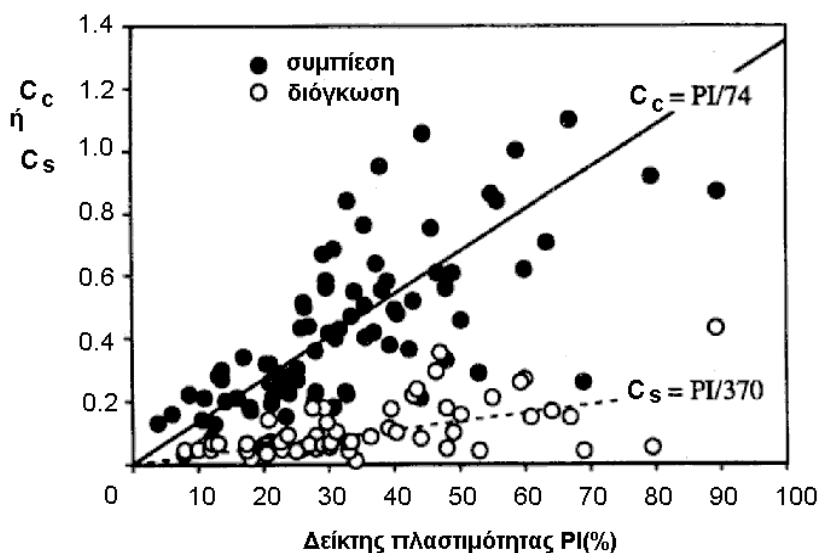
Στον κλάδο ΒΓΕ η καμπύλη $e-\sigma_z'$ παρουσιάζει τη μέγιστη κλίση της. Η κλίση του κλάδου ΒΓΕ αντιστοιχεί στο δείκτη συμπίεσης, C_c . Κατά την αποφόρτιση ο κλάδος ΓΔ είναι παράλληλος στους κλάδους ΑΒ και ΕΖ. Η κλίση του κλάδου ΓΔ αντιστοιχεί στο δείκτη διόγκωσης, C_s ,

$$\text{όπου: } C_c = \frac{e_B - e_\Gamma}{\log(\sigma_\Gamma' / \sigma_B')} \quad \text{και} \quad C_s = \frac{e_\Delta - e_\Gamma}{\log(\sigma_\Gamma' / \sigma_\Delta')}$$

Κατά την επαναφόρτιση από το σημείο Δ η καμπύλη $e-\sigma_z'$ ακολουθεί τον κλάδο ΔΓ έως το σημείο Γ και στη συνέχεια κινείται επί της ΓΕ προς το σημείο Ε. Περαιτέρω αποφόρτιση ακολουθεί στον κλάδο ΕΖ. Η γραμμή ΒΓΕ καλείται γραμμή στερεοποίησης (virgin consolidation line, VCL) ενώ οι γραμμές ΑΒ, ΓΔ και ΕΖ ονομάζονται γραμμές διόγκωσης (swelling lines).

Είναι προφανές ότι οι δείκτες C_c και C_s αντιπροσωπεύουν τις κλίσεις των γραμμών στερεοποίησης και διόγκωσης αντίστοιχα. Στο Σχήμα έχουν σχεδιασθεί διάφορες τιμές των ανωτέρω δεικτών ως προς τον δείκτη πλασιμότητας που μετρήθηκαν

πειραματικά για μεγάλο εύρος αργίλων. Οι τιμές του δείκτη στερεοποίησης είναι περίπου πενταπλάσιες των αντίστοιχων τιμών του δείκτη διόγκωσης.



Τάση Προστερεοποίησης

Η συμπεριφορά του εδαφικού υλικού χαρακτηρίζεται επίσης από την τάση προστερεοποίησης (προφόρτισης) που είναι η μέγιστη ενεργός τάση σ'_{pc} υπό την οποία έχει υποβληθεί το υλικό σε συμπίεση. Όταν η επιβαλλόμενη τάση στο υλικό είναι μικρότερη της σ'_{pc} η συμπεριφορά του υλικού περιγράφεται από τον κλάδο διόγκωσης. Όταν η επιβαλλόμενη τάση είναι ίση με σ'_{pc} το υλικό ακολουθεί τη γραμμή στερεοποίησης κατά τη φόρτιση και μία γραμμή διόγκωσης κατά την αποφόρτιση. Η τάση προστερεοποίησης σ'_{pc} δύναται να αυξηθεί ή να παραμείνει σταθερή. Φυσικά η τάση προστερεοποίησης δεν είναι δυνατόν να μειωθεί. Στον κλάδο ΑΒΓ του Σχήματος η σ'_{pc} είναι ίση διαδοχικά με τη σ'_B και τη σ'_Γ , στον κλάδο ΓΔ, ΔΓ παραμένει σταθερή και στη συνέχεια αυξάνεται στην τιμή σ'_E κατά τη φόρτιση στον κλάδο ΓΕ.

Η συσχέτιση της παρούσας εντατικής κατάστασης του υλικού (e, σ') με την τάση προστερεοποίησης σ'_{pc} περιγράφεται από το λόγο προστερεοποίησης OCR, όπου

$$OCR = \frac{\sigma'_{pc}}{\sigma'}$$

Με βάση το λόγο προστερεοποίησης τα εδάφη διακρίνονται σε

κανονικώς στερεοποιημένα (όταν δεν έχουν υποβληθεί σε εντατική κατάσταση μεγαλύτερη της παρούσας, $OCR=1$) και υπερστερεοποιημένα ή (προφορτισμένα) (όταν έχουν υποβληθεί στο παρελθόν σε ενεργό τάση μεγαλύτερη της παρούσας, $OCR>1$).

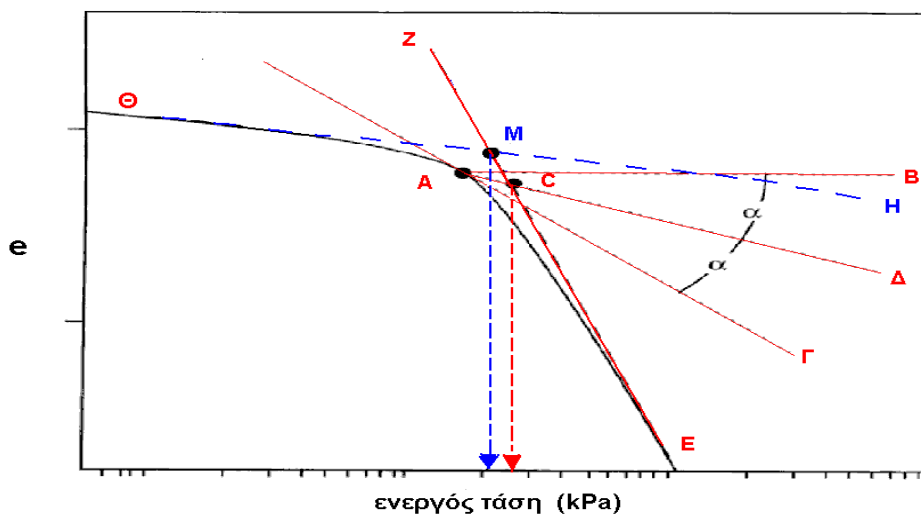
Μέθοδοι Υπολογισμού της Τάσης Προστερεοποίησης

Η τάση προστερεοποίησης, δηλ. η μέγιστη ενεργός τάση στερεοποίησης που έχει επιβληθεί στο δοκίμιο από γεννέσεώς του, υπολογίζεται με δύο μεθόδους. Και οι δύο μέθοδοι βασίζονται στον προσδιορισμό της σ_{pc}' από τις καμπύλες e - $\log \sigma'$.

Τα βήματα υπολογισμού της τάσης προστερεοποίησης κατά Casagrande είναι τα ακόλουθα:

- Προσδιορισμός του σημείου ελάχιστης καμπυλότητας της καμπύλης στερεοποίησης (σημείο A του Σχήματος)
- Χάραξη της οριζόντιας AB
- Χάραξη της εφαπτόμενης ΑΓ της καμπύλης στο A
- Χάραξη της διχοτόμου της γωνίας ΒΑΔ
- Προέκταση του ευθύγραμμου τμήματος της καμπύλης στερεοποίησης, EZ

Η τάση προστερεοποίησης είναι η τάση που αντιστοιχεί στο σημείο τομής C των ευθειών EZ και ΑΔ



Τα βήματα υπολογισμού της τάσης προστερεοποίησης της δεύτερης μεθόδου είναι:

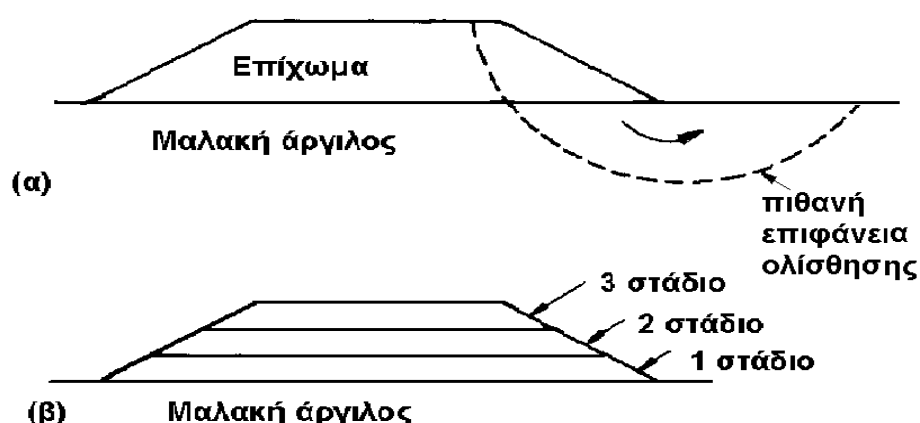
- Χάραξη της προέκτασης του ευθυγράμμου τμήματος της καμπύλης στερεοποίησης EZ
- Χάραξη της προέκτασης του αρχικού τμήματος φόρτισης ΘΗ

Η τομή των ευθειών EZ και ΘΗ στο σημείο M, προσδιορίζει την τάση προφόρτισης.

Διάφορες άλλες μέθοδοι χρησιμοποιούνται ανάλογα με τη φύση του εδαφικού υλικού όπως η χρήση λογαριθμικής κλίμακας και για τους δύο άξονες στην περίπτωση στιφρών αργίλων.

Χρονική εξέλιξη καθιζήσεων

Ο χρόνος που απαιτείται για την ολοκλήρωση των καθιζήσεων είναι κρίσιμος για διάφορες κατασκευές όπως η κατασκευή του επιχώματος του Σχήματος σε μαλακή άργιλο. Η σταδιακή κατασκευή του επιχώματος με εξωτερική φόρτιση ακολουθούμενη από μία περίοδο στερεοποίησης της αργίλου, κατά την οποία ο δείκτης πόρων της αργίλου μειώνεται και η αστράγγιστη διατμητική αντοχή που καθορίζει τις συνθήκες αστοχίας της αυξάνεται, απομακρύνει τον κίνδυνο αστοχίας (Σχήμα (α)). Ο χρόνος στερεοποίησης μεταξύ των σταδίων κατασκευής μπορεί να είναι αρκετοί μήνες και είναι καθοριστικός παράγοντας για την πρόοδο των εργασιών κατασκευής.



Αν και η συμπεριφορά μιάς μεγάλης εδαφικής μάζας δεν μπορεί να υπολογιστεί με ακρίβεια από ένα πείραμα στη δοκιμή συμπίεσομέτρου, οι παράμετροι στερεοποίησης

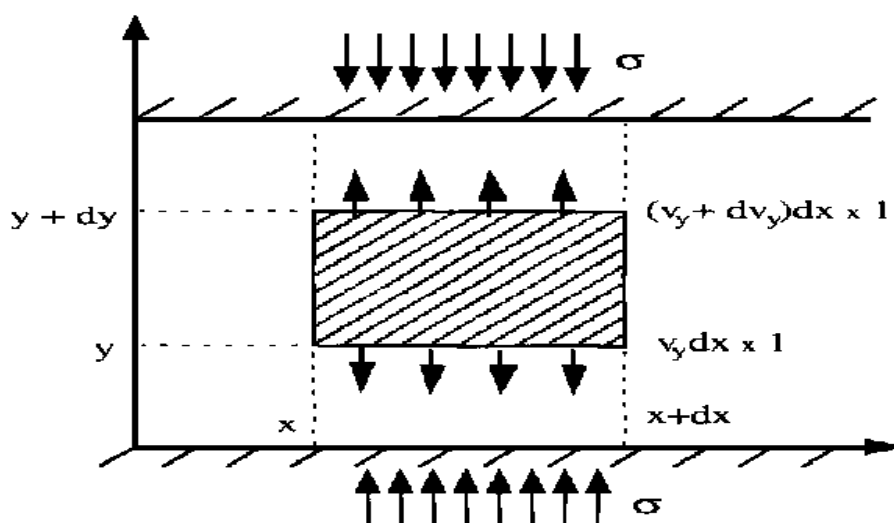
που χρησιμοποιούνται στις αναλύσεις προσδιορίζονται από διαγράμματα καθίζησης προς χρόνο για το κατάλληλο στάδιο φόρτισης της δοκιμής συμπίεσομέτρου.

Η δραστική μείωση του χρόνου που απαιτείται για να συντελεστεί η στερεοποίηση με τη μείωση του εύρους της φορτιζόμενης επιφάνειας οφείλεται στην ενεργοποίηση του μηχανισμού της στράγγισης στην οριζόντια διεύθυνση εκτός από τη γνωστή στράγγιση στην κατακόρυφη διεύθυνση.

ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΟΥ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ ΤΗΣ ΜΟΝΟΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΣΤΕΡΕΟΠΟΙΗΣΗΣ

Παραδοχές φαινομένου μονοδιάστατης στερεοποίησης

- Το εδαφικό υλικό είναι πλήρως κορεσμένο.
- Οι κόκκοι και το νερό των πόρων είναι ασυμπίεστα.
- Το εδαφικό υλικό είναι ομοιογενές και συμπεριφέρεται ελαστικά.
- Η πλευρική παραμόρφωση του υλικού εμποδίζεται.
- Η υδατική ροή διά μέσου των πόρων είναι μονοδιάστατη και διέπεται από το νόμο του Darcy για ισότροπη και σταθερή διαπερατότητα.



- Νόμος Darcy

Ταχύτητα ροής : $v_y = -k \frac{\partial h}{\partial y}$

- Εξίσωση συνέχειας

εκροή - εισροή = μεταβολή όγκου στη χρονική μονάδα

$$\begin{aligned} \frac{dV_w}{dt} &= \left(v_y + \frac{\partial v_y}{\partial y} \cdot dy \right) \cdot dx \cdot 1 - v_y \cdot dx \cdot 1 \\ &= \frac{\partial v_y}{\partial y} \cdot dy \cdot dx = -k \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} \cdot dx \cdot dy \end{aligned}$$

$$h = h_{\gamma_{\epsilon\omega\mu}} + \frac{1}{\gamma_w} \cdot (u_0 + u) \Rightarrow \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = \frac{1}{\gamma_w} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right)$$

Επομένως
$$\frac{dV_w}{dt} = -\frac{k}{\gamma_w} \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \cdot dx \cdot dy \quad \dots\dots(1)$$

- Για συνθήκες ελαστικότητας :

$$\frac{de}{1 + e_0} = m_v \cdot d\sigma'$$

$$\frac{de}{1 + e_0} = \frac{d(V_v - V_s)}{V_0} = \frac{dV_v}{V_0} = \frac{dV_v}{dx \cdot dy \cdot 1}$$

όπου V_0 αρχικός όγκος
 V_s όγκος στερεών
 V_v όγκος πόρων

Επομένως
$$\frac{dV_v}{dt} = m_v \cdot \frac{\partial \sigma'}{\partial t} \cdot dx \cdot dy \quad \dots\dots(2)$$

- Για σταθερή ολική τάση σ :

$$\frac{\partial \sigma}{\partial t} = \frac{\partial \sigma'}{\partial t} + \frac{\partial u}{\partial t} = 0$$

$$\frac{\partial \sigma'}{\partial t} = -\frac{\partial u}{\partial t} \quad \dots\dots(3)$$

όπου u υπερπίεση του νερού των πόρων

Απο (2) και (3) συνεπάγεται :

$$\frac{dV_v}{dt} = -m_v \cdot \frac{\partial u}{\partial t} \cdot dx \cdot dy \quad \dots\dots(4)$$

• Για κορεσμένο υλικό :

$$\frac{dV_v}{dt} = \frac{dV_w}{dt}$$

Επομένως απο (1) και (4) :

$$\frac{k}{\gamma_w} \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = m_v \cdot \frac{\partial u}{\partial t}$$

ΕΞΙΣΩΣΗ ΜΟΝΟΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΣΤΕΡΕΟΠΟΙΗΣΗΣ

$$\boxed{c_v \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = \frac{\partial u}{\partial t}}$$

όπου $c_v = \frac{k}{m_v \cdot \gamma_w}$, συντελεστής στερεοποίησης

k = διαπερατότητα εδάφους

u = υπερπίεση του νερού των πόρων

m_v = συντελεστής μονοδιάστατης συμπίεσης

Η επίλυση της εξίσωσης της στερεοποίησης οφείλει να ικανοποιεί τόσο τις συνοριακές όσο και τις αρχικές συνθήκες των προβλημάτων. Στην περίπτωση μονοδιάστατης στερεοποίησης στράγγιση είναι στο ένα ή και τα δύο άκρα, όπως φαίνεται στο Σχήμα. Για την περίπτωση διπλής στράγγισης οι συνθήκες είναι:

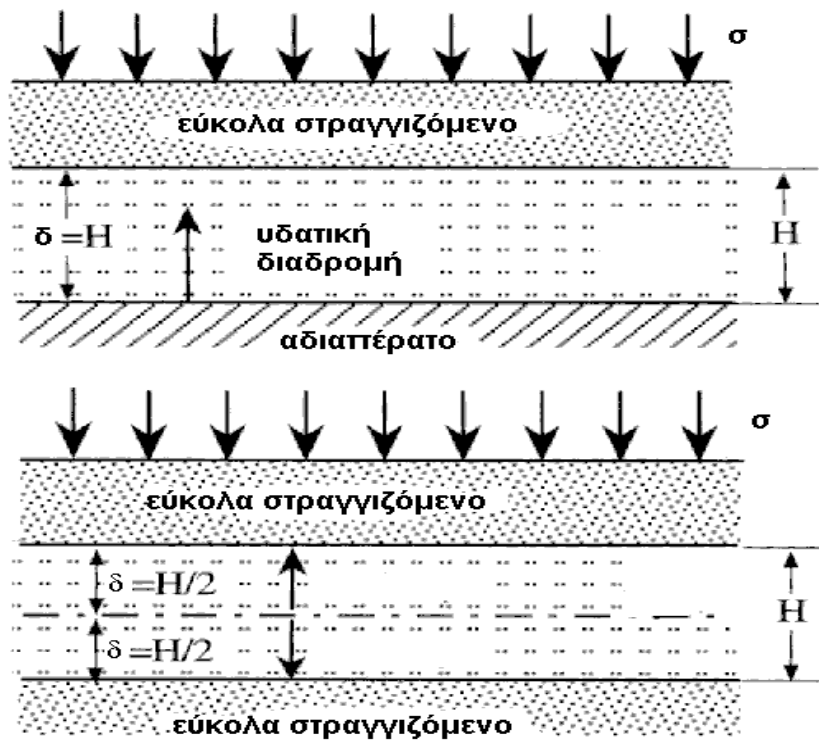
Αρχικές συνθήκες

$$u(y,0) = u_{αρχ} = \Delta\sigma_v \quad \text{γιά} \quad 0 < y < H$$

Συνοριακές συνθήκες

$$u(0,t) = u(H,t) = 0 \quad \text{γιά} \quad t > 0$$

όπου δ = μήκος μέγιστης υδατικής διαδρομής



Η λύση της εξίσωσης της στερεοποίησης για τις ανωτέρω αρχικές συνθήκες είναι:

$$u(y,t) = u_i \sum_{n=0}^{\infty} \frac{4}{(2n+1)\pi} \sin \left[(2n+1)\pi \frac{y}{H} \right] e^{-(2n+1)^2 \pi^2 T_v / 4}$$

όπου $T_v = \frac{c_v * t}{\delta^2}$ είναι αδιάστατος χρονικός παράγοντας και $\delta=H/2$ είναι το μήκος μέγιστης υδατικής διαδρομής για συνθήκες διπλής στράγγισης όπως στη δοκιμή του συμπιεσομέτρου.

Βαθμός Στερεοποίησης U - Χρονικός Παράγοντας T_v

Η εξέλιξη του φαινομένου της στερεοποίησης στη θέση y και στο χρόνο t περιγράφεται και από τον βαθμό στερεοποίησης U_y ο οποίος ορίζεται ως εξής:

$$\text{Αρχή στερεοποίησης} \quad \Delta\sigma'(y,t) = 0 \quad \text{και} \quad u(y,t) = u_{\text{αρχ}}$$

$$\text{Τέλος στερεοποίησης} \quad \Delta\sigma'(y,t) = \Delta\sigma \quad \text{και} \quad u(y,t) = 0$$

$$\text{Βαθμός στερεοποίησης} \quad U_y = \frac{u_{\text{αρχ}} - u(y,t)}{u_{\text{αρχ}}} = \frac{\Delta\sigma'(y,t)}{\Delta\sigma}$$

$$\text{όπου} \quad U_y = 0 \quad \text{στην αρχή της στερεοποίησης}$$

$$\text{και} \quad U_y = 1 \quad \text{στο τέλος της στερεοποίησης}$$

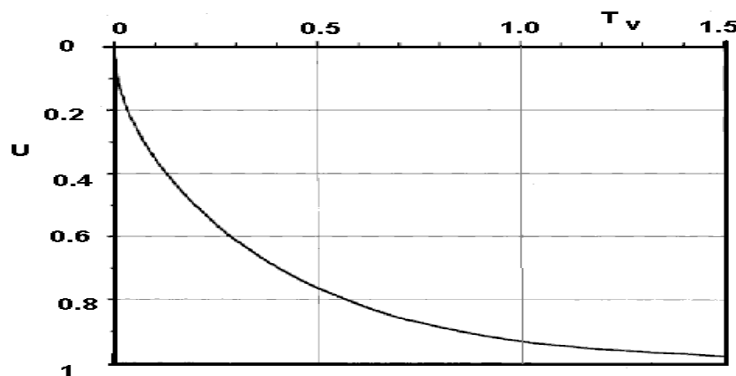
Η λύση της εξίσωσης της στερεοποίησης για συνθήκες μονοδιάστατης συμπίεσης εκφράζεται μέσω των παραμέτρων U και T_v ως εξής:

$$U = 1 - \frac{8}{\pi^2} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{e^{-m^2 \pi^2 T_v / 4}}{m^2}$$

$$\text{όπου } U \text{ είναι ο μέσος βαθμός στερεοποίησης :} \quad U = \frac{1}{H_0} \int_0^y U_y dy$$

Όπως δηλώνει η ανωτέρω εξίσωση, η σχέση μεταξύ του μέσου βαθμού στερεοποίησης U και του χρονικού παράγοντα $T_v = \frac{c_v * t}{\delta^2}$ είναι εκθετική και

περιγράφεται από το ακόλουθο Σχήμα.



Θεωρητική καμπύλη $U(T_v)$

Ο μέσος βαθμός στερεοποίησης U είναι μηδενικός στην αρχή της στερεοποίησης ($T_v=0$) και τείνει προς τη μονάδα κατά την ολοκλήρωση του φαινομένου ($T_v \rightarrow \infty$).

Η σχέση μεταξύ U και T_v δύναται να προσομοιωθεί αριθμητικά από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$T_{v1}(U) = \pi * U^2 / 4 \quad U < 0.6$$

$$T_{v2}(U) = -0.085 - 0.933 \log(1 - U) \quad U \geq 0.6$$

Οι μέθοδοι υπολογισμού του συντελεστή στερεοποίησης από πειραματικά αποτελέσματα βασίζονται στις ανωτέρω εξισώσεις και θα παρουσιασθούν αναλυτικά στη συνέχεια.

Χρόνος Στερεοποίησης

Γενικά ο χρόνος που απαιτείται για την ολοκλήρωση του 90% της στερεοποίησης καλείται χρόνος στερεοποίησης t_c .

$$\text{Για } U = 0.92 \quad T_v \sim 1 \quad \text{και} \quad t_c \cong \frac{\delta^2}{c_v} = \gamma_w \frac{m_v \cdot \delta^2}{k}$$

Επομένως ο χρόνος στερεοποίησης :

- αυξάνει όσο μεγαλώνει η συμπιεστότητα, m_v
- αυξάνει ανάλογα με το τετράγωνο του μήκους της μέγιστης υδατικής διαδρομής, δ^2
- μειώνεται όσο μεγαλώνει η διαπερατότητα, k
- είναι ανεξάρτητος της επιβαλλόμενης μεταβολής τάσης, $\Delta\sigma_v$

Αρχική, Πρωτεύουσα και Δευτερεύουσα Στερεοποίηση

Η εξίσωση της στερεοποίησης που περιγράφηκε προηγουμένως αναφέρεται στην παραμόρφωση που απορρέει από την αποτόνωση της υπερπίεσης πόρων. Η φάση αυτή του φαινομένου ονομάζεται *πρωτεύουσα στερεοποίηση* σε αντιδιαστολή με την *δευτερεύουσα στερεοποίηση* ή ερπυσμό που ακολουθεί και είναι αποτέλεσμα των μετακινήσεων των κόκκων υπό σταθερά ενεργό τάση και αφού η υπερπίεση των πόρων έχει μηδενισθεί.

Κατά τη διάρκεια του πειράματος η ένδειξη του μετρητή μετατοπίσεων στο χρόνο $t=0$ είναι διαφορετική από την ένδειξη στην αρχή της πρωτεύουσας στερεοποίησης. Αυτή η *αρχική στερεοποίηση* προηγείται της πρωτεύουσας στερεοποίησης, λαμβάνει χώρα σχεδόν ταυτόχρονα με την επιβολή του φορτίου και οφείλεται κατά ένα μέρος στη συμπίεση μικρών θυλάκων αέρα μέσα στους πόρους και κατά ένα μέρος σε ελαστική συμπίεση του εδαφικού ιστού.

Η παραμόρφωση κατά τη διάρκεια της δευτερεύουσας στερεοποίησης δίδεται από τη σχέση:

$$\epsilon_s = c_{ae} * \log_{10} (t / t_s)$$

όπου t_s ο χρόνος έναρξης της δευτερεύουσας στερεοποίησης

t ο χρόνος υπολογισμού των συνολικών παραμορφώσεων

c_{ae} συντελεστής δευτερεύουσας στερεοποίησης

Γιά ένα μεγάλο αριθμό αργίλων τα πειραματικά αποτελέσματα υποδεικνύουν την

σχέση: $c_{ae} = 0.0001 * w$

όπου w το φυσικό ποσοστό υγρασίας του εδαφικού υλικού.

Μέθοδοι Υπολογισμού του Συντελεστή Στερεοποίησης

Λογαριθμική Μέθοδος

Η θεωρητική καμπύλη $U - T_v$ σχεδιάζεται για λογαριθμική κλίμακα του T_v . Η μέθοδος χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του συντελεστή στερεοποίησης c_v , και

των μετατοπίσεων στην αρχή και το τέλος της πρωτεύουσας στερεοποίησης δ_0 και δ_{100} αντίστοιχα, όπως φαίνεται στο Σχήμα. Αυτό επιτυγχάνεται θεωρώντας ότι έχει επιτευχθεί σύμπτωση της *θεωρητικής* και *πειραματικής* καμπύλης στερεοποίησης.

Στην περίπτωση αυτή για δύο σημεία A και B της πειραματικής καμπύλης τα οποία στη θεωρητική καμπύλη ανήκουν στο τμήμα για το οποίο $U < 0.6$, ισχύει:

$$\frac{t_B}{t_A} = \frac{T_v^B}{T_v^A} = \frac{U_B^2}{U_A^2} = \frac{(\delta_B - \delta_0)^2}{(\delta_A - \delta_0)^2}$$

$$\Rightarrow \delta_0 = \frac{\delta_A * \sqrt{t_B} - \delta_B * \sqrt{t_A}}{\sqrt{t_B} - \sqrt{t_A}}$$

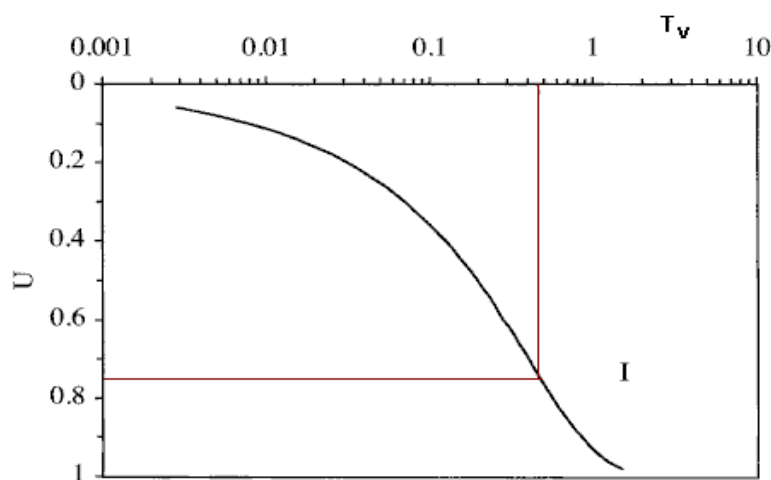
Συνήθως επιλέγεται ο χρόνος $t_A = 1 \text{ min}$ και $t_B = 4 \text{ min}$ έτσι ώστε

$$\delta_0 = 2 * \delta_A - \delta_B$$

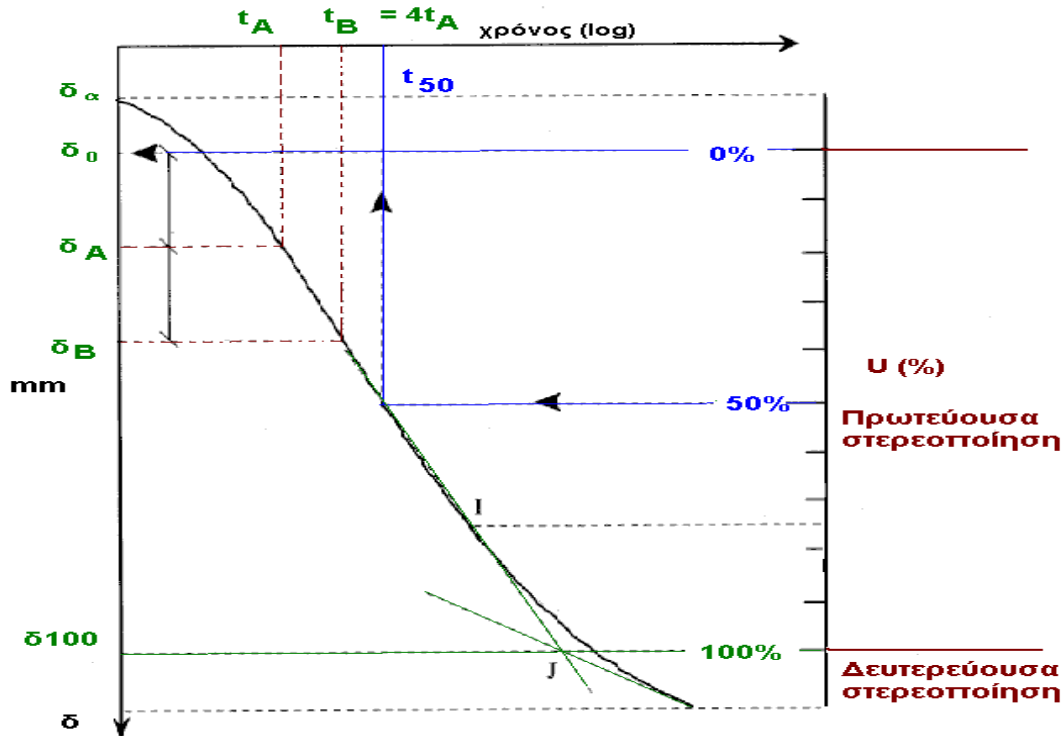
όπου δ_A μέτρηση μηκυσιομέτρου στο σημείο A στο χρόνο t_A

T_v^A χρονικός παράγοντας στο σημείο A

U_A βαθμός στερεοποίησης στο σημείο A



Θεωρητική καμπύλη $U(T_v)$ με λογαριθμική κλίμακα για T_v



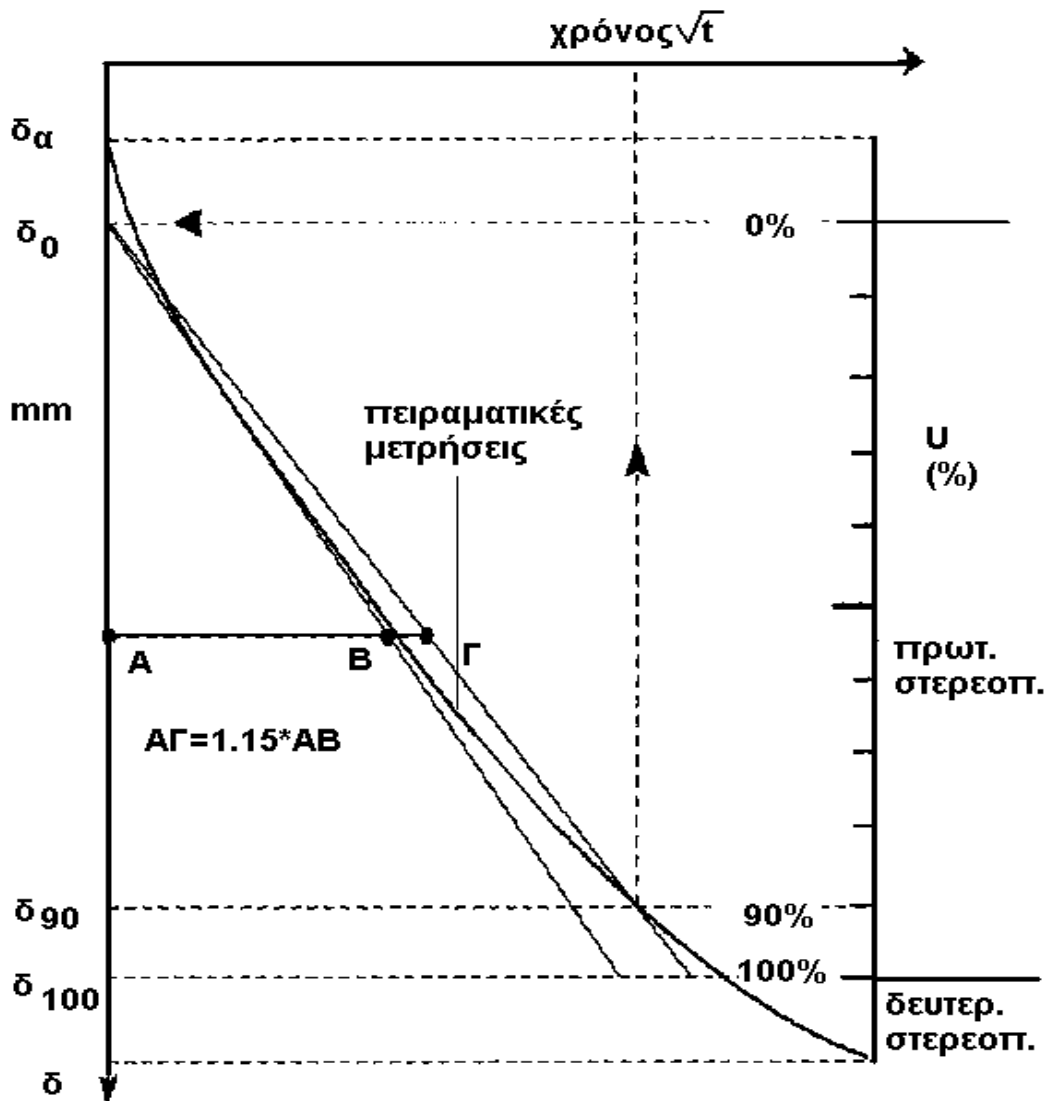
Στο σημείο I και για $U \sim 75\%$ η θεωρητική καμπύλη αλλάζει καμπυλότητα και παρουσιάζει μέγιστη κλίση. Στην πειραματική καμπύλη η τομή της εφαπτόμενης στο I με την προέκταση της καμπύλης δευτερεύουσας στερεοποίησης προσδιορίζουν το σημείο όπου $U=100\%$.

Συνεπώς $\delta_{50} = 1/2(\delta_0 + \delta_{100})$ που αντιστοιχεί σε $U=50\%$. Από τη θεωρητική καμπύλη και για χρόνο t_{50} , $T_v = 0.197$. Έχοντας προσδιορίσει το t_{50} στην πειραματική καμπύλη μπορούμε να προσδιορίσουμε το συντελεστή στερεοποίησης c_v από τη σχέση :

$$c_v = 0.197 * (\delta)^2 / t_{50}$$

όπου δ είναι το μήκος της υδατικής διαδρομής στράγγισης. Για συνθήκες διπλής στράγγισης (δοκίμιο μεταξύ δύο πορωδών δίσκων στο συμπιεσόμετρο) $\delta = h/2$ όπου h είναι το μέσο πάχος του δοκιμίου κατά τη διάρκεια της στερεοποίησης. Για στράγγιση στο ένα μόνο άκρο $\delta = h$.

Μέθοδος της Τετραγωνικής Ρίζας του Χρόνου



Η θεωρητική και η πειραματική καμπύλη σχεδιάζονται ως προς τετραγωνική ρίζα του χρόνου T_v και t αντίστοιχα. Η μετατόπιση δ_0 προσδιορίζεται από την τομή του ευθύγραμμου τμήματος της πειραματικής καμπύλης με τον άξονα των μετρήσεων του μηκυσιομέτρου. Στη συνέχεια προσδιορίζονται τα μεγέθη t_{90} και δ_{90} που αντιστοιχούν στο 90% του βαθμού στερεοποίησης $U(90)$.

$$\sqrt{\frac{t_2}{t_1}} = \sqrt{\frac{T_2^v}{T_1^v}} = \frac{2}{U\sqrt{\pi}} \sqrt{-0.085 - 0.933 \log_{10}(1-U)} = 1.15 \quad \text{για } U=0.90$$

Ο χρόνος που αντιστοιχεί σε $U=90\%$ βρίσκεται χαράζοντας μία ευθεία γραμμή έτσι ώστε $AG=1.15 \cdot AB$. Το σημείο τομής της ευθείας με την πειραματική καμπύλη προσδιορίζει τα U_{90} και t_{90} . Για την περίπτωση αυτή :

$$c_v = 0.848(\delta)^2 / t_{90}$$

όπου δ είναι το μήκος της υδατικής διαδρομής στράγγισης. Για συνθήκες διπλής στράγγισης όπως στη δοκιμή συμπιεσομέτρου και μέσο πάχος εδαφικού δοκιμίου ίσο με h το μήκος της υδατικής διαδρομής στράγγισης $\delta=h/2$.

Οι μετατοπίσεις που αντιστοιχούν σε διάφορους βαθμούς στερεοποίησης συνδέονται με τη σχέση:

$$\delta_{100} = \delta_0 + 10(\delta_{90} - \delta_0) / 9$$

ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΗΣ ΠΙΕΣΗΣ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ ΤΩΝ ΠΟΡΩΝ ΣΤΟ ΕΔΑΦΟΣ

ΠΙΕΖΟΜΕΤΡΟ

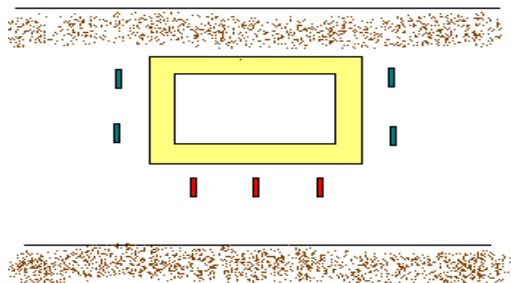
Η μέτρηση της πίεσης πόρων του νερού στο έδαφος γίνεται με το πιεζόμετρο. Το πιεζόμετρο είναι όργανο που τοποθετείται στο έδαφος σε συγκεκριμένο βάθος ούτως ώστε να μετρά την πίεση του νερού αποκλειστικά σε αυτό το βάθος. Τοποθετώντας ένα δίκτυο πιεζομέτρων σε διάφορα βάθη μπορούμε να προσδιορίσουμε αφενός την πίεση των πόρων στο έδαφος και αφετέρου τη στάθμη του νερού στο έδαφος. Με τη βοήθεια των πιεζομέτρων εκτιμούμε τη μεταβολή της ενεργού τάσης και συνεπώς της αντοχής του εδάφους και καταγράφουμε τις συνθήκες ροής των υπόγειων υδάτων. Τα πιεζόμετρα χρησιμοποιούνται σε γεωτεχνικές, περιβαλλοντικές και υδρολογικές εφαρμογές.

Γεωτεχνικές και Περιβαλλοντικές εφαρμογές

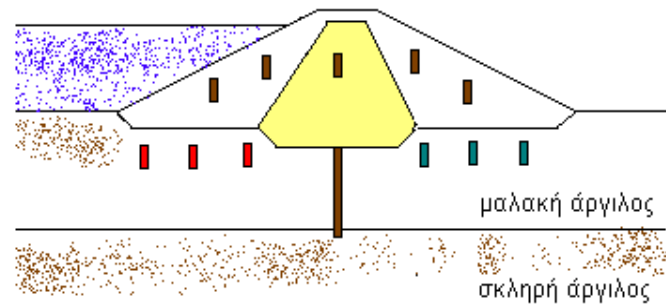
1. Καταγραφή συνθηκών ροής και έλεγχος προσομοιωμάτων υδατικής ροής.
2. Υπολογισμός πιέσεων λόγω άνωσης ή διόγκωσης του εδάφους στις κατασκευές.
3. Καταγραφή αυξομειώσεων πίεσης πόρων στα διάφορα στάδια κατασκευής επιχωμάτων.
4. Πρόβλεψη αστοχίας πρανών.
5. Υπολογισμός ωθήσεων γαιών.
6. Καταγραφή στάθμης νερού σε μολυσμένα εδάφη για τον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών μετακίνησης των αποβλήτων.

Υδρολογικές εφαρμογές

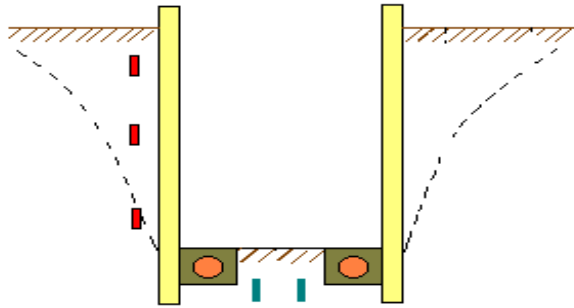
1. Χαρτογράφηση της ροής υπογείων υδάτων για την πρόβλεψη του όγκου νερού σε υδροφόρο στρώμα και του ρυθμού επαναπλήρωσής του.
2. Καταγραφή ρευμάτων για τη δασονομία, εταιρείες παραγωγής ενέργειας κ.λπ.
3. Καταγραφή στάθμης παλιρροιακών νερών σε παραθαλάσσια εδάφη.

Τυπικά παραδείγματα χρήσης πιεζομέτρου**Υπόγειες Κατασκευές**

- Καθορισμός πιέσεων στη βάση της κατασκευής (λόγω άνωσης).
- Μέτρηση της υδατικής πίεσης που δρα στους κατασκευαστικούς αρμούς.

**Χωμάτινα Φράγματα**

- Ελεγχόμενη τοποθέτηση υλικού επιχώματος.
- Καταγραφή πίεσης των πόρων για τον υπολογισμό της διατμητικής αντοχής του εδάφους.
- Καταγραφή υδατικής ροής διαμέσου του φράγματος και καταγραφή ανωτικών πιέσεων.
- Καταγραφή υδατικής ροής διαμέσου εδαφικού υλικού.

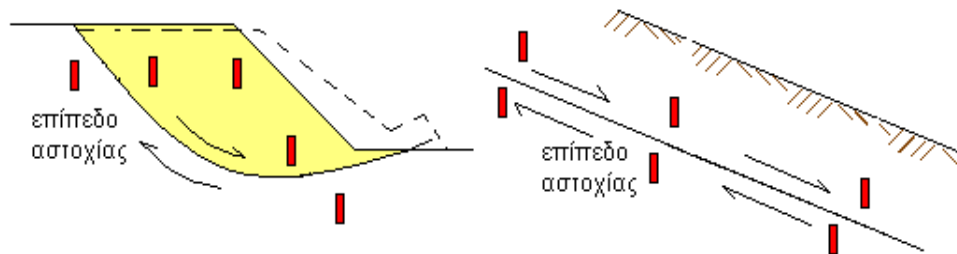


Διάφραγμα ή Πασσαλότοιχος

- Προσδιορισμός φορτίων και υδατικής πίεσης που δρουν στον τοίχο.
- Καταγραφή πτώσης του υδροφόρου ορίζοντα λόγω διήθησης ή άντλησης νερού

για τον προσδιορισμό κααθιζήσεων σε γειτονικές κατασκευές.

- Καθορισμός πιέσεων (λόγω άνωσης) για τον έλεγχο της ευστάθειας στη βάση της εκσκαφής.



Πιθανή Κατολίσθηση

- Καταγραφή πίεσης των πόρων για τον υπολογισμό της διατμητικής αντοχής εδάφους.
- Καταγραφή της στάθμης του υπόγειου νερού για τον υπολογισμό της εδαφικής μάζας.

ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΠΙΕΖΟΜΕΤΡΩΝ

Φίλτρο

Όλα τα πιεζόμετρα καταλήγουν σε μία κοιλότητα από πορώδες υλικό το οποίο επιτρέπει την επικοινωνία του νερού της κοιλότητας με το νερό των πόρων του εδαφικού υλικού της περιοχής εγκατάστασης του οργάνου. Η πίεση του νερού μετράται στο ακραίο τμήμα του οργάνου.

Χρόνος εξισορρόπησης

Όταν πρωτο-εγκαθίσταται το πιεζόμετρο στο έδαφος, η πίεση του νερού μεταβάλλεται. Χρόνος εξισορρόπησης της πίεσης είναι ο χρόνος που απαιτείται για την είσοδο ή την έξοδο του νερού από το πιεζόμετρο μέχρι την επίτευξη εξισορρόπησης των πιέσεων στο πιεζόμετρο και στο περιβάλλον έδαφος. Ο χρόνος αυτός εξαρτάται από τον τύπο του πιεζόμετρου και τη διαπερατότητα του εδάφους.

Ο χρόνος εξισορρόπησης είναι μία παράμετρος προσδιοριστική του τύπου του πιεζόμετρου. Τα πιεζόμετρα τύπου κατακόρυφου σωλήνα είναι βραδείας απόκρισης ενώ τα πιεζόμετρα τύπου διαφράγματος είναι ταχείας απόκρισης.

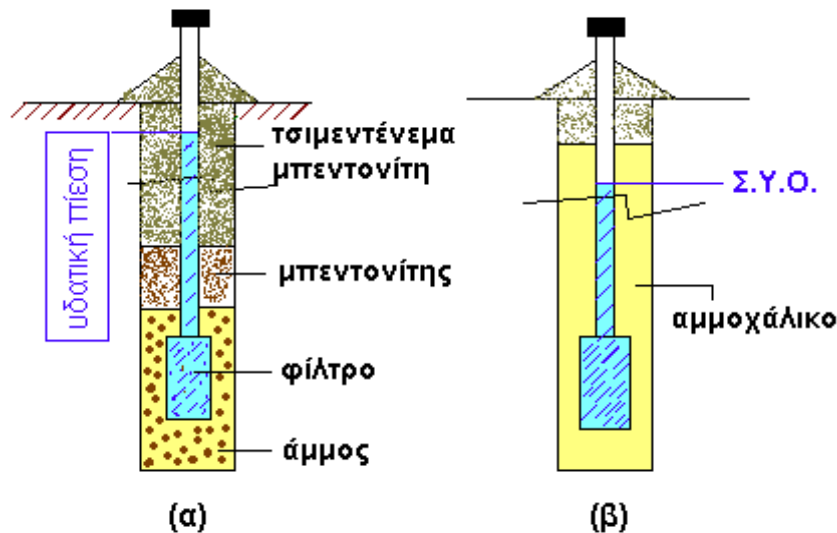
ΠΙΕΖΟΜΕΤΡΑ ΤΥΠΟΥ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΟΥ ΣΩΛΗΝΑ

Περιγραφή

Το πιεζόμετρο τύπου κατακόρυφου σωλήνα αποτελείται από μία κοιλότητα/φίλτρο συνδεδεμένη με σωλήνα που εξέρχει του εδάφους. Όταν η πίεση πόρων αυξάνεται ή μειώνεται, η στάθμη του νερού στο σωλήνα ανέρχεται ή κατέρχεται αντίστοιχα. Το ύψος του νερού πάνω από το ακραίο τμήμα του οργάνου αντιστοιχεί στην πίεση πόρων του νερού στο έδαφος.

Ο κατακόρυφος σωλήνας είναι πλαστικός (PVC ή ABC) ενώ το πορώδες υλικό είναι από υδρόφιλο πολυαιθυλαίνιο ή, τελευταία, εύθραυστο κεραμικό υλικό.

Για το πιεζόμετρο τύπου κατακόρυφου σωλήνα απαιτείται στεγάνωση του πορώδους στοιχείου έτσι ώστε το όργανο να αποκρίνεται σε μεταβολή πίεσης γύρω από το φίλτρο και όχι σε μεταβολές πίεσης σε άλλα βάθη.



Η στεγάνωση επιτυγχάνεται με την ακόλουθη διαδικασία:

Μία στρώση άμμου τοποθετείται γύρω από το πορώδες φίλτρο, διαστάσεων π.χ. 10cm * 60cm . Στεγανωτικό στρώμα μπεντονίτη επικάθεται της άμμου για να απομονώσει την πίεση πόρων στο ακραίο τμήμα του οργάνου, όπως φαίνεται στο τμήμα (α) του παραπάνω Σχήματος.

Ο χρόνος εξισορρόπησης πιεζομέτρου κατακόρυφου σωλήνα εκτιμάται σύμφωνα με τον τύπο που προτάθηκε από τον Penman (1960):

$$t = 3.3 * 10^{-6} * \frac{d^2 * \ln \left[L / D + \sqrt{1 + (L / D)^2} \right]}{k * L}$$

όπου t = χρόνος για βαθμό εξισορρόπησης 90% σε ημέρες

d = εσωτερική διάμετρος κατακόρυφου σωλήνα

L = μήκος φίλτρου ή ζώνης άμμου που περιβάλλει το φίλτρο, σε cm

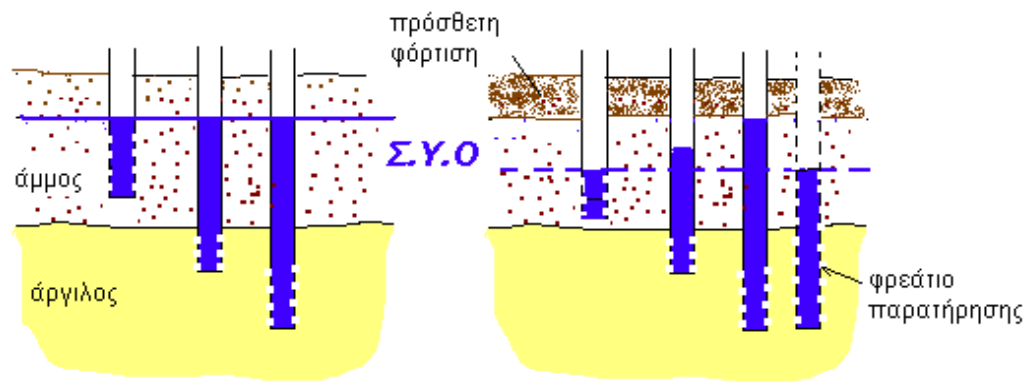
D = διάμετρος φίλτρου ή ζώνης άμμου που περιβάλλει το φίλτρο, σε cm

k = διαπερατότητα του εδάφους, σε cm/sec

Όπως φαίνεται από την έκφραση του Penman για να μειωθεί ο χρόνος εξισορρόπησης απαιτείται μείωση της διαμέτρου του κατακόρυφου σωλήνα, γεγονός που δύναται να

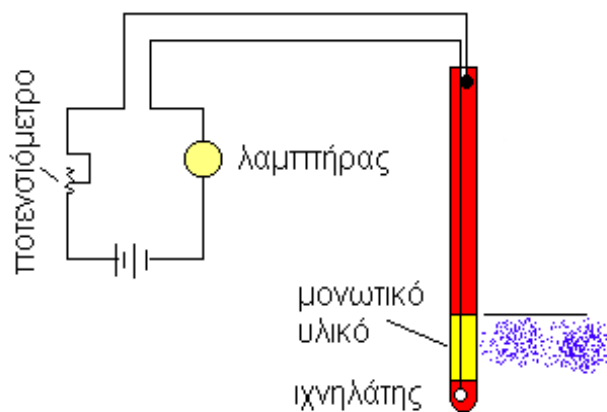
δημιουργήσει προβλήματα εξαέρωσης του πιεζομέτρου, ή αύξηση της διαμέτρου της ζώνης άμμου που όμως συνεπάγεται αύξηση του κόστους γεώτρησης.

Η διαδικασία μέτρησης της πίεσης των πόρων στα φρεάτια παρατήρησης είναι διαφορετική. Το ακραίο τμήμα δεν είναι στεγανό και η γεώτρηση πληρούται με άμμο ή χαλίκια (τμήμα (β) του σχήματος της προηγούμεν. σελίδας). Σε αντίθεση με τα πιεζόμετρα τύπου κατακόρυφου σωλήνα το νερό στα φρεάτια παρατήρησης εισέρχεται/εξέρχεται στο σωλήνα απο οποιαδήποτε θέση πάνω από το ακραίο τμήμα και η στάθμη του νερού στο σωλήνα ανέρχεται ή κατέρχεται ακολουθώντας τη στάθμη του νερού στο έδαφος.



Συνοπτική σύγκριση πιεζομέτρων και φρεατίων παρατήρησης γίνεται στο παραπάνω Σχήμα. Στην περίπτωση στατικών συνθηκών χωρίς υδατική ροή, το νερό βρίσκεται σε κατάσταση ηρεμίας και το ύψος του νερού μέσα στους σωλήνες καθορίζει τη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα Σ.Υ.Ο. Στην περίπτωση ανάπτυξης υπερπίεσης του νερού των πόρων, όπως κατά τη διάρκεια της στερεοποίησης λόγω πρόσθετης φόρτισης, προκαλείται ροή του νερού των πόρων από περιοχές μικρής διαπερατότητας προς περιοχές μεγαλύτερης διαπερατότητας (π.χ. από το αργιλικό στρώμα προς το στρώμα της άμμου). Η πίεση του νερού σε διάφορα σημεία του αργιλικού στρώματος, επομένως και το ύψος του νερού στους σωλήνες, μεγαλώνει ανάλογα με το μήκος της διαδρομής στράγγισης. Αντίθετα στο φρεάτιο παρατήρησης αποτυπώνεται η μεταβολή της πίεσης του νερού στα εδαφικά στρώματα κατά μήκος του οργάνου.

Η στάθμη του νερού στο σωλήνα μετράται με διάφορες μεθόδους. Η πλέον διαδεδομένη είναι το βαθύμετρο.



Το βαθύμετρο, όπως φαίνεται στο Σχήμα, αποτελείται από κυλινδρικό βάρος, ταινία μέτρησης, καλώδιο και απλό ηλεκτρονικό κύκλωμα. Το βάρος κατέρχεται στο σωλήνα και όταν έρχεται σε επαφή με το νερό το κύκλωμα κλείνει και ενεργοποιείται φωτεινή ή ηχητική πηγή. Εάν η

διάμετρος του σωλήνα είναι μεγάλη, η μετροταινία με το βάρος στην άκρη της μπορούν να χρησιμοποιηθούν για ακουστική αναγνώριση της επαφής με το νερό.

Πλεονεκτήματα / Μειονεκτήματα

Τα πιεζόμετρα τύπου κατακόρυφου σωλήνα θεωρούνται ο πλέον αξιόπιστος τύπος πιεζομέτρου. Πλεονεκτούν των άλλων οργάνων καταγραφής πίεσης πόρων στο ότι:

- Λειτουργούν αποτελεσματικά για μεγάλα χρονικά διαστήματα.
- Έχουν χαμηλό κόστος.
- Μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη μέτρηση της διαπερατότητας του εδάφους.

Υστερούν όμως στο ότι:

- Απαιτείται μεγάλος χρόνος εξισορρόπησης της πίεσης.
- Το πορώδες υλικό μπορεί να αποφραχθεί λόγω της ποσότητας εισερχόμενου/εξερχόμενου νερού.
- Το άνω τμήμα του σωλήνα μπορεί να υποστεί βλάβη κατά τη διάρκεια της κατασκευής του έργου.

- Σε ακόρεστα εδάφη μπορεί να εισέλθει αέρας στο σωλήνα και η παρουσία του να οδηγήσει σε εσφαλμένες μετρήσεις. Για εσωτερική διάμετρο του σωλήνα μικρότερη των 8mm, φυσαλίδες αέρα δύνανται να ανέλθουν στην επιφάνεια του σωλήνα..

Μέθοδοι και Στάδια Εγκατάστασης

Μέθοδοι εγκατάστασης

- Στεγάνωση μέσα στη γεώτρηση.
- Έμπηξη.

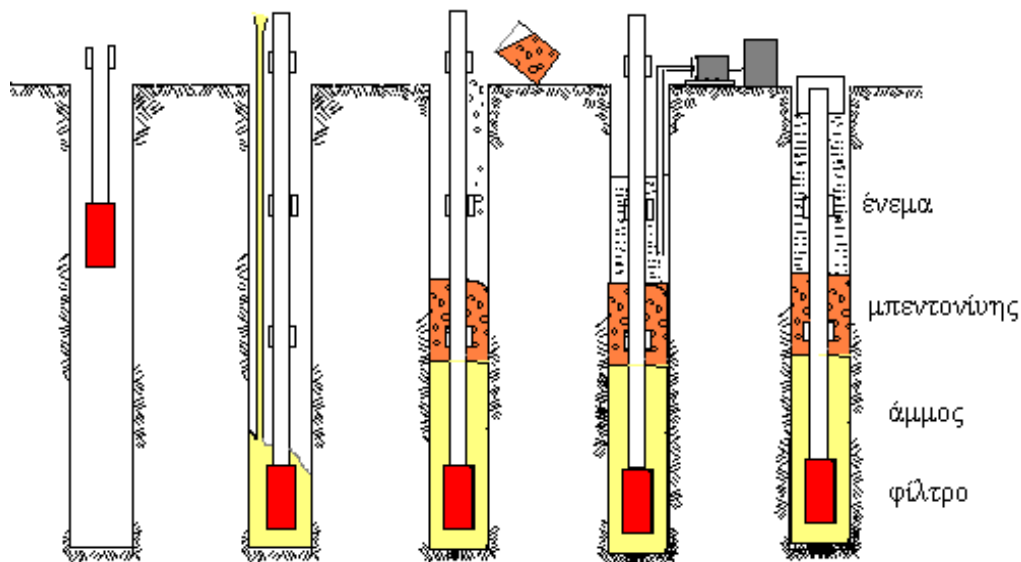
Στάδια Εγκατάστασης

1. Ετοιμασία της γεώτρησης και καθαρισμός της με καθαρό νερό για την απομάκρυνση υπολειμμάτων αργίλου από το εσωτερικό τοίχωμα. Διαφορετικά υπάρχει κίνδυνος τα υλικά πλήρωσης να κολλήσουν στο περίβλημα και να αποφράξουν το σωλήνα.
2. Τοποθέτηση φίλτρου στο ακραίο τμήμα του σωλήνα και υποβίβασή του στη βάση της γεώτρησης. Τοποθέτηση πρόσθετου μήκους σωλήνα έως ότου το ακραίο τμήμα του οργάνου προσεγγίσει το επιθυμητό βάθος. Οι συνδέσεις των επιμέρους σωλήνων πρέπει να είναι υδατοστεγείς.
3. Τοποθέτηση στρώσης άμμου γύρω από το ακραίο τμήμα του οργάνου. Η άμμος πρέπει να είναι υγρή και να έχει κόκκους με διαβάθμιση από 0.4 έως 0.9 mm. Ο περιορισμός ως προς την ελάχιστη διάσταση επιβάλλεται για να αποτίθεται η άμμος σχετικά γρήγορα και να μην αναμιγνύεται ακολούθως με το υλικό στεγάνωσης.
4. Τοποθέτηση στεγανωτικής στρώσης από μπεντονίτη. Αργή έγχυση σφαιριδίων μπεντονίτη (περίπου 3 ανά δευτερόλεπτο) για να αποφεύγεται η δημιουργία κενών και του φαινομένου του arching. Με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται μιά χαλαρή δομή η οποία πρέπει να διατηρηθεί. Στη συνέχεια προστίθεται νερό για την

ενυδάτωση του μπεντονίτη και την ολοκλήρωση της διόγκωσης. Όταν τα σφαιρίδια μπεντονίτη έρθουν σε επαφή με το νερό διογκώνονται και αποκτούν όγκο 10 έως 15 φορές μεγαλύτερο από τον αρχικό. Στην περίπτωση πυκνού σχηματισμού σφαιριδίων μπεντονίτη επιβάλλονται πιέσεις στα τοιχώματα της γεώτρησης και είναι δυνατή η δημιουργία εξαιρετικά υψηλών τιμών πίεσης πόρων για σημαντικό χρονικό διάστημα μετά την εγκατάσταση του οργάνου.

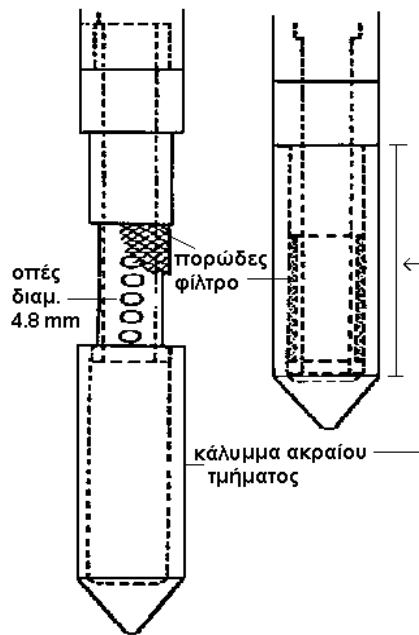
5. Μετρήσεις του βάθους πρέπει να γίνονται σε όλα τα στάδια εγκατάστασης για να ελέγχονται οι στάθμες των διαφόρων υλικών. Όταν έχει ολοκληρωθεί η διόγκωση προστίθεται ένεμα μπεντονίτη ή μίγματος μπεντονίτη/τσιμέντου. Έτσι αποφεύγεται η είσοδος νέου υλικού ανάμεσα στα σφαιρίδια (pallets) και η παρεμπόδιση της στεγάνωσης του ακραίου τμήματος του οργάνου.
6. Τέλος ο σωλήνας αποκόπτεται κοντά στην επιφάνεια του εδάφους, περιβάλλεται με ένεμα και καλύπτεται με ειδικό κάλυπτρο για προστασία. Η εισροή επιφανειακού νερού στο σωλήνα του πιεζομέτρου πρέπει να αποφεύγεται με κάθε τρόπο.

Τα ανωτέρω στάδια εγκατάστασης περιγράφονται αναλυτικά στο ακόλουθο Σχήμα.



Υπάρχουν και τύποι πιεζομέτρου κατακόρυφου σωλήνα που έχουν τη δυνατότητα να εισαχθούν στο έδαφος χωρίς τη δημιουργία γεώτρησης. Παράδειγμα είναι το εμπηγνυόμενο πιεζόμετρο του Cambridge (Parry, 1971). Σχεδιάστηκε για χρήση σε σκληρά εδάφη ή σε βραχώδη εδάφη με σκοπό την προστασία του φίλτρου κατά την

είσοδο στο έδαφος μέχρι το επιθυμητό βάθος. Όπως φαίνεται στο Σχήμα που έπεται, κατά την έμπηξη το πιεζόμετρο περιβάλλεται αρχικά απο χαλύβδινο σωλήνα. Όταν το όργανο προσεγγίσει το επιθυμητό βάθος, ένας σωλήνας μικρότερης διαμέτρου (mandrel) εισάγεται μέσα στον κατακόρυφο σωλήνα (standpipe) και μετακινεί το κάλυμμα του ακραίου τμήματος σε μεγαλύτερο βάθος (περίπου 90cm).



Το πιεζόμετρο Geonor M-206 σχεδιάστηκε για χρήση στις μαλακές αργίλους της Νορβηγίας. Το πιεζόμετρο εισέρχεται στο έδαφος με τη βοήθεια σωλήνων που παραμένουν στο έδαφος και απομακρύνονται μαζί με το όργανο μετά το πέρας των μετρήσεων. Ιδιαίτερη προσοχή απαιτείται για τη στεγάνωση της σύνδεσης του φίλτρου με το σύστημα σωλήνων διαμέτρου 33mm. Αυτός ο τύπος πιεζομέτρου χρησιμοποιήθηκε επιτυχώς για τη μέτρηση της πίεσης του νερού σε πολλά σημεία εδαφικού στρώματος μεγάλου πάχους με σταδιακή μετακίνηση του οργάνου (περίπου

0.5m) και μέτρηση της πίεσης στο κάθε στάδιο (Handfelt et al, 1987). Σε κάθε μετακίνηση κρατήθηκε ο απαραίτητος χρόνος αναμονής (περίπου 1 ημέρα) για σταθεροποίηση της στάθμης του νερού στο όργανο.

Σύγκριση Τρόπων Εγκατάστασης

Η εγκατάσταση εμπηγνόμενων πιεζομέτρων στο έδαφος είναι σημαντικά οικονομικότερη από την εγκατάσταση και στεγάνωση πιεζομέτρου μέσα στη γεώτρηση με αποτέλεσμα τη συνεχώς αυξανόμενη χρήση τους. Πρέπει όμως να τονισθούν τα ακόλουθα πιθανά προβλήματα στη χρήση εμπηγνόμενου πιεζομέτρου:

- ανεπαρκής στεγάνωση
- μερική ή ολική απόφραξη του φίλτρου

- συγκέντρωση φυσαλίδων αερίων για ορισμένες κατηγορίες εδαφών που μπορεί να οδηγήσουν σε λανθασμένες μετρήσεις.

Στεγάνωση

Για τη στεγάνωση απαιτείται κατάλληλη επαφή μεταξύ του εδάφους και των σωλήνων που περιβάλλουν το πιεζόμετρο. Επειδή το σύστημα σωλήνων έχει συνήθως εξωτερική διάμετρο μεγαλύτερη από τη διάμετρο του πιεζομέτρου, επιτυγχάνεται επαρκής επαφή σε αργιλικά και γενικώς λεπτόκοκκα υλικά. Προσοχή απαιτείται για κοκκώδη ή βραχώδη υλικά στα οποία είναι δυνατή η διαφυγή νερού κατά μήκος διαδρομών ανάμεσα στους κόκκους της άμμου και της διεπιφάνειας εδάφους / σωλήνων του οργάνου.

Μερική ή Ολική Απόφραξη

Κατά την εγκατάσταση του πιεζομέτρου στο έδαφος, το φίλτρο είναι δυνατόν να αποφραχθεί μερικώς ή ολικώς. Στο εμπηγνυόμενο πιεζόμετρο τύπου Cambridge το φίλτρο καλύπτεται κατά την είσοδο στο έδαφος.

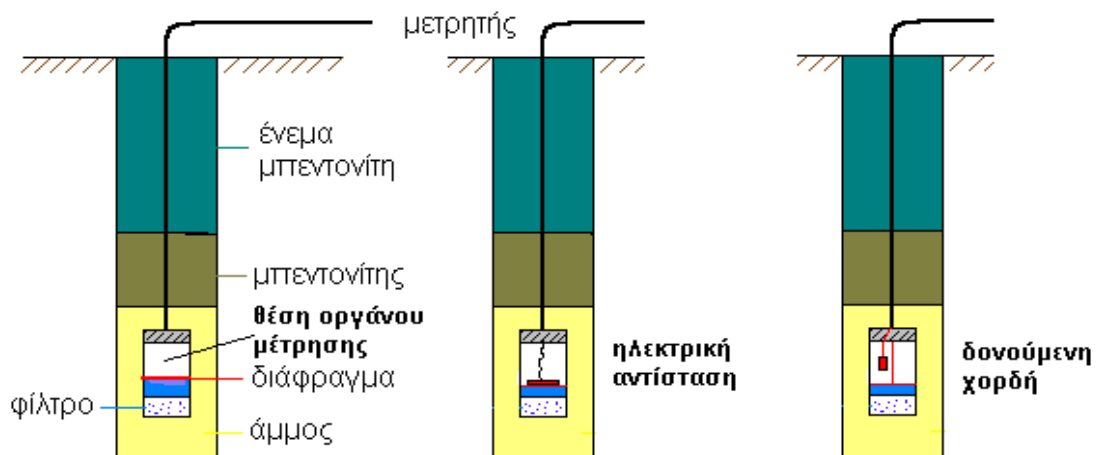
Στο πιεζόμετρο τύπου Geopig το φίλτρο είναι εκτεθειμένο και για να μειωθεί ο κίνδυνος απόφραξης η μέγιστη διάμετρος των πόρων του φίλτρου είναι 0.03mm. Επίσης κατά την έμπηξη στο έδαφος ο κατακόρυφος σωλήνας είναι γεμάτος με νερό που δεν δύναται να διαφύγει. Με αυτό τον τρόπο το έδαφος δεν εισέρχεται στους πόρους του φίλτρου. Ταυτόχρονα το νερό εξέρχεται υπό πίεση στα διάφορα ενδιάμεσα βόθρα εκτός των τελευταίων 3m όπου η έμπηξη γίνεται με τη βαλβίδα στην κορυφή του κατακόρυφου σωλήνα κλειστή. Η διαδικασία της αύξησης της πίεσης του νερού απαιτεί τη μετακίνηση του συστήματος επιβολής πίεσης κάθε φορά που προστίθεται μία ακόμα σωλήνωση. Ο κορεσμός των φίλτρων πριν τη χρήση του οργάνου είναι απαραίτητος.

Συγκέντρωση φυσαλίδων

Σε περίπτωση δημιουργίας φυσαλίδων αέρα απαιτείται κατακόρυφος σωλήνας με εσωτερική διάμετρο τουλάχιστον 8mm για τη διαφυγή των φυσαλίδων στην κορυφή του πιεζομέτρου.

ΠΙΕΖΟΜΕΤΡΑ ΤΥΠΟΥ ΔΙΑΦΡΑΓΜΑΤΟΣ

Η αρχή της λειτουργίας τους βασίζεται στην ύπαρξη ενός ευλύγιστου διαφράγματος το οποίο έρχεται σε επαφή με το νερό του εδάφους. Το διάφραγμα εγκαθίσταται στο έδαφος με τη βοήθεια φίλτρου. Όταν η πίεση που ασκεί το νερό στο διάφραγμα μεταβάλλεται το διάφραγμα μετακινείται. Διάφορα όργανα μέτρησης τοποθετούνται στην άλλη επιφάνεια του διαφράγματος. Αυτά μετρούν είτε άμεσα την πίεση του νερού είτε τη μετακίνηση του διαφράγματος την οποία μετατρέπουν σε πίεση με την κατάλληλη βαθμονόμηση. Πιεζόμετρα τύπου διαφράγματος απεικονίζονται στο ακόλουθο Σχήμα.



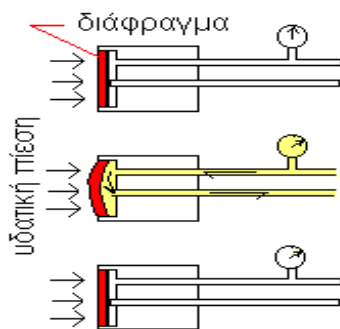
Ανάλογα με τον τρόπο μέτρησης της πίεσης του νερού στο διάφραγμα τα πιεζόμετρα διακρίνονται στους εξής τύπους:

- πεπιεσμένου αέρα
- δονούμενης χορδής

- ηλεκτρικής αντίστασης

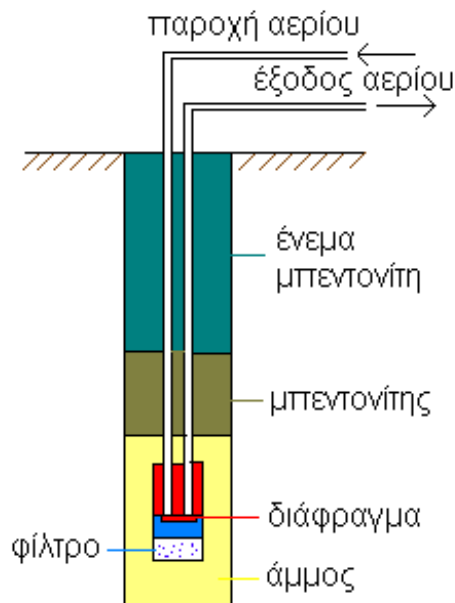
Πεπιεσμένου Αέρα

Νερό υπό πίεση και αέριο υπο πίεση εφαρμόζονται στην εξωτερική και εσωτερική πλευρά του διαφράγματος αντίστοιχα. Το διάφραγμα λειτουργεί σαν βαλβίδα. Όταν είναι 'κλειστή' εμποδίζεται η διαφυγή αερίου από το σωλήνα εξόδου.



Προκειμένου να καταγραφεί μία μέτρηση, αέριο υπό πίεση συνδέεται με το σωλήνα εισόδου όπως απεικονίζεται στο ακόλουθο Σχήμα. Η πίεση του αερίου στην εσωτερική πλευρά του διαφράγματος αυξάνεται και όταν γίνει μεγαλύτερη από την πίεση του νερού το

διάφραγμα απομακρύνεται από το σωλήνα διαφυγής του αέρα.



Στην επιφάνεια ο χειριστής παρατηρεί την επιστροφή του αερίου και κλείνει τη βαλβίδα παροχής. Η πίεση του αερίου μειώνεται και το διάφραγμα επανέρχεται στην αρχική του 'κλειστή' θέση οπότε και η διαφυγή αερίου διακόπτεται. Στο στάδιο αυτό η πίεση στο πιεζόμετρο και στο σωλήνα αερίου είναι η ίδια και ο χειριστής καταγράφει την ένδειξη του μετρητή.

Απώλειες στην πίεση παρατηρούνται καθώς το αέριο διαπερνά το σωλήνα. Οι μετρήσεις επηρεάζονται από το ρυθμό ροής αερίου γι' αυτό και ο ρυθμός αυτός πρέπει να διατηρείται αργός.

Εναλλακτικά στο σύστημα μπορεί να προστεθεί ένας τρίτος κλειστός σωλήνας και πάνω σε αυτόν να τοποθετηθεί ο μετρητής. Η προς μέτρηση πίεση δεν πρέπει να επηρεάζεται από τη μετακίνηση του διαφράγματος. Το πιθανό λάθος μειώνεται με τη χρήση διαφράγματος εκτόπισης μικρού όγκου (π.χ. μικρότερου από 0.01cm^3) και με τον έλεγχο της επιβαλλόμενης πίεσης αερίου.

Πλεονεκτήματα

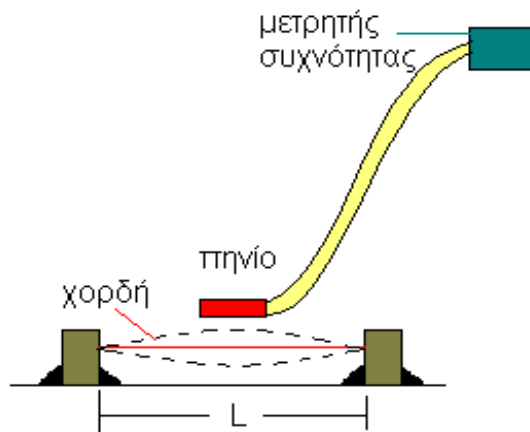
- απλός μηχανισμός, αξιοπιστία (μικρές παρεκκλίσεις)
- χαμηλό κόστος
- λειτουργία ακόμα και σε συνθήκες παγετού
- μικρός χρόνος απόκρισης ακόμη και για εδάφη μικρής διαπερατότητας.

Μειονεκτήματα

- ο απαιτούμενος χρόνος για μέτρηση της πίεσης αυξάνεται με το μήκος των σωληνώσεων
- η μετατροπή σε αυτοματοποιημένο σύστημα καταγραφών είναι δύσκολη και ακριβή λύση
- απαιτείται παροχή πεπιεσμένου αέρα.

Δονούμενης χορδής

Η διάταξη είναι παρόμοια με αυτή του πιεζόμετρου πεπιεσμένου αέρα, μόνον που ο μετρητής εδώ είναι δονούμενη χορδή. Ο μηχανισμός μέτρησης, όπως φαίνεται στο Σχήμα, είναι ένα τεντωμένο χαλύβδινο σύρμα ανάμεσα σε δυο σημεία έτσι ώστε να είναι δυνατή η ελεύθερη ταλάντωση της χορδής σε συνθήκες ιδιοσυχνότητας. Η συχνότητα της δόνησης μεταβάλλεται με το βαθμό έντασης της χορδής και επομένως λόγω μικρών σχετικών μετατοπίσεων ανάμεσα στα δύο άκρα. Άρα η διάταξη μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως μετρητής παραμορφώσεων με την καταγραφή της συχνότητας ταλάντωσης. Η συχνότητα μιάς χορδής υπό ταλάντωση δίνεται από τον τύπο:



$$f = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{\sigma g}{\rho}}$$

$$f = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{Eg\varepsilon}{\rho}}$$

συνεπώς

$$\varepsilon = \frac{4L^2 f^2 \rho}{Eg} = Kf^2$$

όπου:

L = μήκος χορδής

ρ = πυκνότητα σύρματος

E = μέτρο ελαστικότητας σύρματος

f = συχνότητα ταλάντωσης

σ = τάση χορδής

g = επιτάχυνση βαρύτητας

ε = παραμόρφωση σύρματος

Λόγω προβλημάτων διάβρωσης του σύρματος της χορδής τα πιεζόμετρα πρέπει να τοποθετούνται σε χώρο ξηρό και ερμητικά στεγανό. Το ένα άκρο της χορδής συνδέεται με το διάφραγμα όπως φαίνεται στο σχήμα. Η πίεση προκαλεί παραμόρφωση του διαφράγματος με αποτέλεσμα τη μείωση της έντασης στη χορδή. Το ηλεκτρομαγνητικό πηνίο προκαλεί ταλάντωση της χορδής. Η ταλάντωση προκαλεί σήμα της ίδιας συχνότητας το οποίο μεταφέρεται μέσω των ηλεκτρικών συνδέσεων στο μετρητή. Στη συνέχεια η συχνότητα μετατρέπεται σε μονάδες πίεσης.

Λόγω προβλημάτων διάβρωσης του σύρματος της χορδής τα πιεζόμετρα πρέπει να τοποθετούνται σε χώρο ξηρό και ερμητικά στεγανό.

Πλεονεκτήματα

- μετρήσεις μακριά από το χώρο των εργασιών
- μικρός χρόνος απόκρισης
- εύκολη αυτοματοποίηση.

Μειονεκτήματα

- έντονη απόκλιση από το μηδέν
- επιρροή των μετρήσεων από θερμοκρασιακές μεταβολές.

Ηλεκτρικής αντίστασης

Η λειτουργία τους βασίζεται στη χρήση μετρητών παραμόρφωσης ηλεκτρικής αντίστασης (strain gauges). Οι μετρήσεις γίνονται επιβάλλοντας διαφορά τάσης στα άκρα του συστήματος των μετρητών παραμόρφωσης. Η ηλεκτρική αντίσταση των μετρητών μεταβάλλεται με την πίεση που επιβάλλεται στο διάφραγμα με αποτέλεσμα τη μεταβολή της τάσης εξόδου της διάταξης των μετρητών. Η τάση εξόδου μετατρέπεται σε μονάδες πίεσης. Έχουν αναφερθεί πολλές περιπτώσεις όπου με την πάροδο του χρόνου οι μετρήσεις εμφανίζουν μεταβολές ενώ η επί τόπου πίεση των πόρων παραμένει σταθερή.

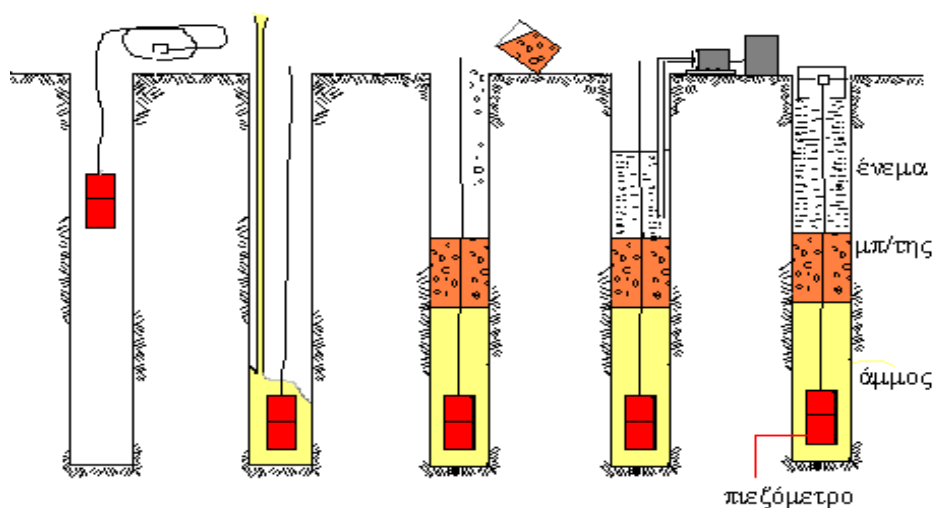
Εκτός από την εγκατάστασή τους σε γεώτρηση τα πιεζόμετρα ηλεκτρικής αντίστασης εγκαθίστανται με έμπηξη. Τα εμπεγνυόμενα πιεζόμετρα έχουν μικρό μέγεθος και χρησιμοποιούνται κυρίως για τον προσδιορισμό της μεταβολής της πίεσης του νερού με το βάθος. Απαιτείται σταδιακή έμπηξη και μέτρηση της πίεσης στο σημείο έμπηξης μετά τον απαιτούμενο χρόνο εξισορρόπησης. Η χρήση τους για μακροχρόνια καταγραφή πιέσεων συνιστάται μόνο όταν είναι δυνατός ο έλεγχος της βαθμονόμησής τους όπως για παράδειγμα όταν είναι δυνατή η απομάκρυνση και επανατοποθέτηση των οργάνων μέτρησης ηλεκτρικής αντίστασης στο άκρο του οργάνου.

Πλεονεκτήματα

- εύκολη αυτοματοποίηση
- κατάλληλο για μεταβολές πίεσης υπό δυναμικές συνθήκες
- μετρήσεις μακριά από το χώρο των εργασιών.

Μειονεκτήματα

- μη δυνατή πρόσβαση των μετρητών παραμόρφωσης
- μεγαλύτερο κόστος από άλλους τύπους πιεζομέτρων.

Μέθοδοι και στάδια εγκατάστασηςΣτεγάνωση σε γεώτρηση

1. Κορεσμός φίλτρου και καθαρισμός γεώτρησης με καθαρό νερό. Προσδιορισμός μηδενικής μέτρησης και τοποθέτηση πιεζομέτρου στο επιθυμητό βάθος.
2. Τοποθέτηση υγρής άμμου γύρω από το πιεζόμετρο και έλεγχος λειτουργίας του.
3. Τοποθέτηση στεγανωτικής στρώσης απο μπεντονίτη. Αργή έγχυση σφαιριδίων μπεντονίτη, προσθήκη νερού και ολοκλήρωση της διόγκωσης του μπεντονίτη.
4. Πλήρωση γεώτρησης με ένεμα μπεντονίτη ή μίγμα μπεντονίτη/τσιμέντου.
5. Τοποθέτηση προστατευτικού καλύπτρου για την απομάκρυνση του επιφανειακού νερού.

Τα ανωτέρω στάδια εγκατάστασης περιγράφονται στο παραπάνω Σχήμα.

Έμψηξη

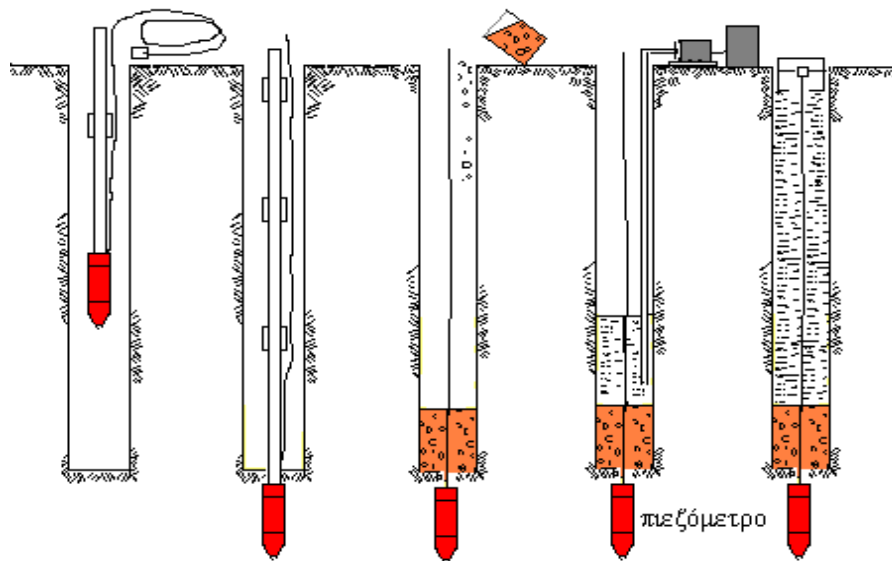
Όπως έχει προαναφερθεί τα πιεζόμετρα κατακόρυφου σωλήνα τύπου Geonor και Cambridge εγκαθίστανται με έμψηξη στο έδαφος στο επιθυμητό βάθος. Όλοι οι τύποι πιεζομέτρων διαφράγματος εκτός από τη δυνατότητα τοποθέτησης σε γεώτρηση, κατασκευάζονται και με ανθεκτικό περίβλημα μικρού μεγέθους και είναι κατάλληλοι για έμψηξη.

Παρά την οικονομικότερη εγκατάσταση, υπάρχουν προβλήματα συνυφασμένα με την έμψηξη. Τα προβλήματα αυτά είναι η ανεπαρκής στεγάνωση, η μερική ή ολική απόφραξη του φίλτρου και η ηλεκτροχημική αλληλεπίδραση εδάφους και υλικών κατασκευής πιεζομέτρου. Στην περίπτωση της ηλεκτροχημικής αλληλεπίδρασης τα διαφορετικά μέταλλα του περιβλήματος και των μεταλλικών σωλήνων έμψηξης πιεζομέτρων χορδής οξειδώνονται με το νερό εδάφους που περιέχει άλατα. Το πρόβλημα εμφανίζεται και στους υπόλοιπους τύπους πιεζομέτρων διαφράγματος όταν οι σωλήνες έμψηξης δεν απομακρύνονται μετά το πέρας της έμψηξης.

Κατά την έμψηξη η πίεση πόρων γύρω από το πιεζόμετρο μεταβάλλεται και η ταχύτητα έμψηξης πρέπει να ελέγχεται ώστε οι πιέσεις που αναπτύσσονται να μην υπερβούν το επιτρεπόμενο εύρος των μετρήσεων του πιεζομέτρου.

Έμψηξη στον πυθμένα γεώτρησης

Όταν τα ανωτέρω προβλήματα καθιστούν την έμψηξη από την επιφάνεια του εδάφους αδύνατη κατασκευάζεται πρώτα μία γεώτρηση και η έμψηξη γίνεται από τον πυθμένα της γεώτρησης όπως φαίνεται στο ακόλουθο Σχήμα.

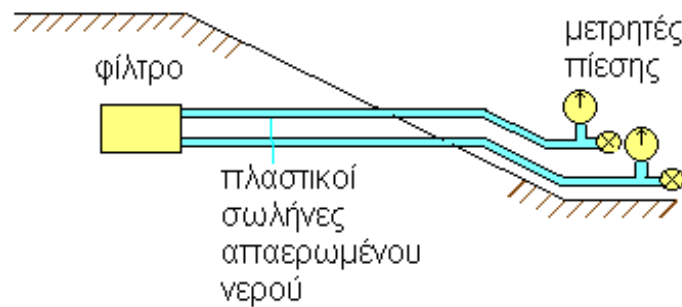


Η γεώτρηση φτάνει στο επιθυμητό βάθος. Η διαδικασία εγκατάστασης ακολουθεί τα βήματα στεγάνωσης σε γεώτρηση με εξαίρεση το στάδιο έμπτυξης του πιεζομέτρου με τη βοήθεια ράβδων έμπτυξης που στη συνέχεια απομακρύνονται. Κατά την έμπτυξη γίνεται έλεγχος της μέγιστης αναπτυσσόμενης τιμής της πίεσης των πόρων.

ΥΔΡΑΥΛΙΚΑ ΠΙΕΖΟΜΕΤΡΑ

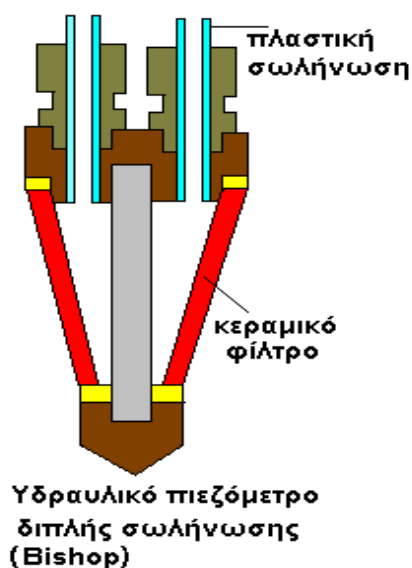
Περιγραφή

Τα υδραυλικά πιεζόμετρα είναι κατάλληλα για την καταγραφή μετρήσεων κατά τη διάρκεια κατασκευής αναχωμάτων σε χωμάτινα φράγματα. Αποτελούνται από φίλτρο, σύστημα δύο πλαστικών σωλήνων απαερωμένου νερού και μονάδα μετρήσεων όπως μανόμετρο ή άλλο μετρητή πίεσης.



Η πίεση του νερού στο σημείο μέτρησης εφαρμόζεται στο ακραίο τμήμα του οργάνου και με τη βοήθεια του υγρού των σωλήνων μεταφέρεται στη μονάδα μέτρησης.

Η πίεση είναι ίδια και στους δύο σωλήνες. Ο λόγος της παρουσίας και των δυο σωλήνων είναι η απομάκρυνση φυσαλίδων αέρα οι οποίες εισέρχονται στο σύστημα μέσω του ακραίου τμήματος και των ενώσεων των σωλήνων δια της μεθόδου της παροχέτευσης απαερωμένου νερού διαμέσου των σωλήνων. Φυσαλίδες αέρα στο σύστημα προκαλούν λάθη στις μετρήσεις και μεγάλο χρόνο απόκρισης.



Ακραίο τμήμα “χαμηλής τιμής εισόδου αέρα” (“low air entry value”), με πόρους διαμέτρου 60 μm και διαπερατότητα 3×10^{-4} m/s, χρησιμοποιείται συνήθως σε κορεσμένα εδάφη. Ακραίο τμήμα “υψηλής τιμής εισόδου αέρα”, με πόρους διαμέτρου 1 μm και διαπερατότητα 3×10^{-8} m/s, χρησιμοποιείται συνήθως σε ακόρεστα εδάφη ή εδάφη με αρνητικές πιέσεις πόρων.

Πλεονεκτήματα/Μειονεκτήματα

Τα υδραυλικά πιεζόμετρα εμφανίζουν τα εξής πλεονεκτήματα:

- απλός, αξιόπιστος μηχανισμός
- σχετικά μικρός χρόνος απόκρισης ακόμη και σε εδάφη μικρής διαπερατότητας
- δυνατότητα μέτρησης εδαφικής διαπερατότητας
- μετρήσεις μακριά από το χώρο των εργασιών
- δυνατή η μέτρηση αρνητικών πιέσεων.

Μειονεκτούν όμως στο ότι απαιτούν

- συχνή και ενδεδειγμένη απαέρωση του συστήματος
- χώρο στέγασης των οργάνων μέτρησης και απαέρωσης του συστήματος
- υψομετρική διαφορά μεταξύ των σωληνώσεων και της ελάχιστης πιεζομετρικής στάθμης η οποία δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 5 μέτρα
- καιρικές συνθήκες που αποκλείουν παγετό.

ΚΟΡΕΣΜΟΣ ΦΙΛΤΡΟΥ

Η χρήση κορεσμένων φίλτρων είναι απαραίτητη προϋπόθεση για τη μείωση του χρόνου απόκρισης του πιεζομέτρου, τη μέτρηση της εδαφικής διαπερατότητας με υδραυλικά πιεζόμετρα και πιεζόμετρα κατακόρυφου σωλήνα, την αποφυγή απόφραξης όταν οι πόροι του φίλτρου είναι κορεσμένοι με νερό και για τη μέτρηση της πίεσης του νερού και όχι του αέρα των πόρων σε μη κορεσμένα εδάφη.

Για όλους τους τύπους πιεζομέτρων απαιτείται κορεσμός του φίλτρου. Ιδιαίτερα στα πιεζόμετρα διαφράγματος εκτός του φίλτρου απαιτείται κορεσμός της κοιλότητας μεταξύ του φίλτρου και του διαφράγματος προς και από την οποία μετακινείται το νερό. Ας σημειωθεί ότι πολλά πιεζόμετρα παραδίδονται με το φίλτρο σε ξηρή κατάσταση.

Όταν το φίλτρο βρίσκεται σε μη κορεσμένα εδάφη η εξωτερική του επιφάνεια βρίσκεται σε επαφή με νερό και αέρα. Οι πόροι του φίλτρου που έρχονται σε επαφή με τον αέρα λειτουργούν σαν μηνίσκοι όπου στην καμπύλη επιφάνεια του νερού ενεργεί μία διαφορά πίεσης, με την πίεση του αέρα να είναι μεγαλύτερη εκείνης του νερού. Η διαφορά πίεσης νερού και αέρα είναι χαρακτηριστική για κάθε φίλτρο και καθορίζει την ελάχιστη τιμή της πίεσης του αέρα για την οποία φυσαλίδες αέρα διαπερνούν το φίλτρο προς την κοιλότητα του νερού. Η διαφορά πίεσης νερού και αέρα καλείται “τιμή εισόδου αέρα” (“air entry value”).

Η διαφορά πίεσης νερού και αέρα εκατέρωθεν του μηνίσκου αυξάνεται με τη μείωση της διαμέτρου των πόρων του φίλτρου. Υπάρχουν φίλτρα με πόρους μικρής διαμέτρου (20-80 μm) και συνεπώς μικρή διαπερατότητα που χαρακτηρίζονται απο “υψηλή τιμή εισόδου αέρα” (“high air entry value”) και φίλτρα με πόρους μεγαλύτερης διαμέτρου (1 μm), μεγαλύτερη διαπερατότητα και “χαμηλή τιμή εισόδου αέρα” (“low air entry value”).

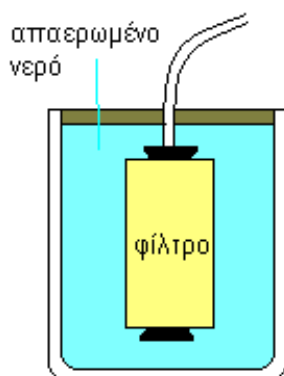
Ένα φίλτρο υψηλής τιμής εισόδου αέρα θα αναπτύξει μεγάλη διαφορά πίεσης νερού και αέρα πριν επιτρέψει τη διέλευση φυσαλίδων αέρα μέσα από τους πόρους του. Ενώ σε κορεσμένα εδάφη αρκεί η χρήση φίλτρων χαμηλής τιμής εισόδου αέρα, σε μη κορεσμένα εδάφη απαιτείται η χρήση φίλτρων υψηλής τιμής εισόδου αέρα.

Κατά τη διαδικασία του κορεσμού το φίλτρο ενός υδραυλικού πιεζομέτρου δύναται να τοποθετηθεί σε ένα δοχείο απαερωμένου νερού για 24 ώρες. Αρνητική πίεση (suction) μπορεί να εφαρμοσθεί στους πλαστικούς σωλήνες του πιεζομέτρου για να επιταχυνθεί η διαδικασία κορεσμού.

Στην περίπτωση πιεζομέτρου διαφράγματος το φίλτρο πρέπει να απομακρυνθεί απο το πιεζόμετρο και να τοποθετηθεί σε δοχείο υπό αρνητική πίεση. Στη συνέχεια απαερωμένο νερό εισάγεται στο δοχείο έτσι ώστε να διαπερνά το φίλτρο εισερχόμενο από τη χαμηλότερη παρειά του. Καθώς η στάθμη του νερού ανέρχεται εκτοπίζεται ο αέρας από τους πόρους. Η αρνητική πίεση σταδιακά μειώνεται και το φίλτρο διατηρείται μέσα στο νερό για τουλάχιστον μία ώρα.

Ο κορεσμός μπορεί να γίνει και στο χώρο παραγωγής του πιεζομέτρου με την προϋπόθεση ότι κατά την μεταφορά στο χώρο εγκατάστασής του το πιεζόμετρο παραμένει σε δοχείο καλυμμένο με νερό και δεν υπάρχει κίνδυνος καταστροφής του όπως για παράδειγμα στην περίπτωση παγετού.

Όταν δεν είναι δυνατή η απομάκρυνση του φίλτρου από το πιεζόμετρο, το όργανο υποβάλλεται σε επιτρεπτά επίπεδα αρνητικής πίεσης που δεν επηρεάζουν την κατασκευή του οργάνου. Στη συνέχεια το φίλτρο έρχεται σε επαφή με το νερό καθώς η αρνητική πίεση μειώνεται.



Για φίλτρα “χαμηλής τιμής εισόδου αέρα” η διαδικασία κορεσμού επιτυγχάνεται και με απλή κάλυψη με νερό με ή χωρίς την επιβολή αρνητικής πίεσης όπως φαίνεται στο Σχήμα. Στα υδραυλικά πιεζόμετρα το νερό μπορεί να διαπεράσει το φίλτρο εφαρμόζοντας πίεση μέσω του ενός από τους δύο πλαστικούς σωλήνες, ενώ αποκλείεται η έξοδος του νερού από τον άλλο.

ΕΠΙΛΟΓΗ ΤΥΠΟΥ ΠΙΕΖΟΜΕΤΡΟΥ

Για την επιλογή του κατάλληλου πιεζομέτρου ο πλέον σημαντικός παράγοντας είναι η εξασφάλιση της αξιοπιστίας και της ανθεκτικότητας του οργάνου και όχι η ακρίβεια και η ευαισθησία του. Και αυτό γιατί το κόστος αντικατάστασης του οργάνου υπερβαίνει κατά πολύ το κόστος αγοράς του και η αρχική τιμή της μέτρησης δεν ισχύει για το καινούργιο όργανο.

Για τη μέτρηση της πίεσης νερού των πόρων ή νερού σε μία ασυνέχεια της βραχομάζας, όπου οι μεταβολές αναμένεται να είναι μικρές συνιστάται η χρήση πιεζομέτρου κατακόρυφου σωλήνα. Για περιπτώσεις που αναμένεται συνεχής

μεταβολή της πίεσης του νερού όπως για παράδειγμα κατά την κατασκευή ενός επιχώματος σε μαλακό έδαφος, όπου τα πιεζόμετρα χρησιμοποιούνται για έλεγχο της αντοχής του εδάφους, ο χρόνος εξισορρόπησης πρέπει να είναι μικρός. Ομοίως σε περιπτώσεις ημερήσιας μεταβολής της πίεσης του νερού όπως σε πρηνή σε περιοχές άντλησης νερού σινιστάται η χρήση πιεζομέτρων μικρού χρόνου εξισορρόπησης όπως για παράδειγμα πιεζομέτρων διαφράγματος.

Ο χρόνος λειτουργίας είναι επίσης μία καθοριστική παράμετρος κατά την επιλογή του τύπου του πιεζομέτρου. Όταν τα πιεζόμετρα κατακόρυφου σωλήνα δεν είναι κατάλληλα η επιλογή περιορίζεται μεταξύ πιεζομέτρων πεπιεσμένου αέρα και δονούμενης χορδής. Στο κόστος αγοράς του οργάνου θα πρέπει να συνυπολογισθεί το κόστος βαθμονόμησης, συντήρησης, εγκατάστασης, καταγραφής και επεξεργασίας των μετρήσεων. Τα πιεζόμετρα ηλεκτρικής αντίστασης είναι κατάλληλα για μεταβολές πίεσης μεγάλης συχνότητας όπως κατά τη διάρκεια σεισμού ή εμπηξης πασσάλου και για μικρούς χρόνους λειτουργίας όπως κατά τη διάρκεια πειραμάτων άντλησης για τον προσδιορισμό της διαπερατότητας του εδάφους, οπότε είναι δυνατή η συχνή βαθμονόμησή τους. Αντίθετα όταν απαιτείται μεγάλος χρόνος λειτουργίας το πιεζόμετρο κατακόρυφου σωλήνα και τα υδραυλικά πιεζόμετρα είναι τα πλέον κατάλληλα όργανα.

Όλα τα πιεζόμετρα σε κορεσμένο έδαφος ή σε βράχο χρειάζονται φίλτρα χαμηλής τιμής εισόδου αέρα. Τα πιεζόμετρα κατακόρυφου σωλήνα και τα υδραυλικά πιεζόμετρα που στεγανώνονται μέσα σε γεώτρηση χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση της διαπερατότητας του εδάφους. Όμως κατά τη διάρκεια του πειράματος συνιστάται ο έλεγχος της αποτελεσματικότητας της στεγάνωσης. Η διαπερατότητα του φίλτρου πρέπει να είναι τουλάχιστον 10πλάσια από εκείνη του εδάφους συνεπώς απαιτείται η χρήση φίλτρων χαμηλής τιμής εισόδου αέρα.

Αντίθετα σε ακόρεστα εδάφη απαιτείται η χρήση φίλτρων υψηλής τιμής εισόδου αέρα για να εξασφαλίζεται η μέτρηση της πίεσης του νερού και όχι του αέρα των πόρων. Συνήθως το εδαφικό υλικό είναι ακόρεστο κατά τη συμπύκνωση υλικού κατασκευής φραγμάτων ή όταν πρόκειται για οργανικές αποθέσεις όπου δημιουργούνται αέρια κατά την αποσύνθεσή τους. Στην περίπτωση κατασκευής επιχώματος τα πιεζόμετρα

κατακόρυφου σωλήνα είναι ακατάλληλα λόγω παρεμπόδισης των εργασιών συμπίκνωσης γύρω από το πιεζόμετρο. Το υδραυλικό πιεζόμετρο είναι στην περίπτωση αυτή το πλέον κατάλληλο όργανο. Επιπλέον τα υδραυλικά πιεζόμετρα λόγω του συστήματος απαέρωσης των δύο σωλήνων υπερτερούν των πιεζομέτρων τύπου διαφράγματος στα οποία ακόμα και εάν το φίλτρο είναι αρχικά κορεσμένο, αέρας μπορεί να εισέλθει στην κοιλότητα κατά τη μακρόχρονη παραμονή τους στο έδαφος.

Σε οργανικά εδάφη είναι δυνατή η χρήση των πιεζομέτρων κατακόρυφου σωλήνα. Απαιτείται όμως σωλήνας με αρκετά μεγάλη διάμετρο που να επιτρέπει την απομάκρυνση των φυσαλίδων και φίλτρο υψηλής τιμής εισόδου αέρα. Για μικρούς χρόνους εξισορρόπησης και λειτουργίας, πιεζόμετρα διαφράγματος υψηλής τιμής εισόδου αέρα πρέπει να χρησιμοποιηθούν με την προϋπόθεση ότι είναι κορεσμένα. Για μεγάλους χρόνους λειτουργίας απαιτείται η απαέρωση του νερού της κοιλότητας του πιεζομέτρου.

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΕΔΑΦΟΜΗΧΑΝΙΚΗ

ΣΤΟΧΟΙ

Η εκτέλεση πειραμάτων σε εδαφικά δοκίμια στο εργαστήριο αποτελεί θεμελιακό στοιχείο κάθε γεωτεχνικής μελέτης. Με τη βοήθεια των πειραμάτων στο εργαστήριο Εδαφομηχανικής επιτυγχάνονται

- ο προσδιορισμός της μορφολογίας του εδάφους
 - * μελέτες εδαφικής υφής
 - * πειράματα υπολογισμού εδαφικών δεικτών
 - περιεκτικότητα σε νερό
 - όρια υδαρότητας και πλαστιμότητας
 - διαβάθμιση υλικών
 - * ειδικά πειράματα
 - χημική σύνθεση
 - παρουσία οργανικών στοιχείων
 - παρουσία μετάλλων
- ο προσδιορισμός εμπειρικών εδαφικών παραμέτρων, όπως
 - * CBR για έργα οδοποιίας
 - * S_u για πασσαλώσεις, E_u για καμπύλες τάσεων - παραμορφώσεων
- η διασφάλιση ποιοτικών κατασκευών
 - * έλεγχοι συμπύκνωσης και υδαρότητας
 - * υπολογισμός αστράγγιχτης αντοχής σε θλίψη κ.λ.π.
- η προσομοίωση του εδάφους με τη βοήθεια φυσικών μοντέλλων
 - * centrifuge
 - * σεισμική τράπεζα
 - * πειράματα σε θαλάμους βαθμονόμησης κ.λ.π

- ο προσδιορισμός παραμέτρων για αναλυτικές εφαρμογές π.χ.
 - * λ , κ , ν_0 , G , M για ανάλυση με το μοντέλλο Cam Clay
- η ενδεδεχόμενη μελέτη της πραγματικής μηχανικής συμπεριφοράς του εδαφικού στοιχείου
 - * τάσεις - παραμορφώσεις
 - * όριο διαρροής, αντοχή
 - * στερεοποίηση, ερπυσμός, υδατική ροή μέσω εδαφικού υλικού

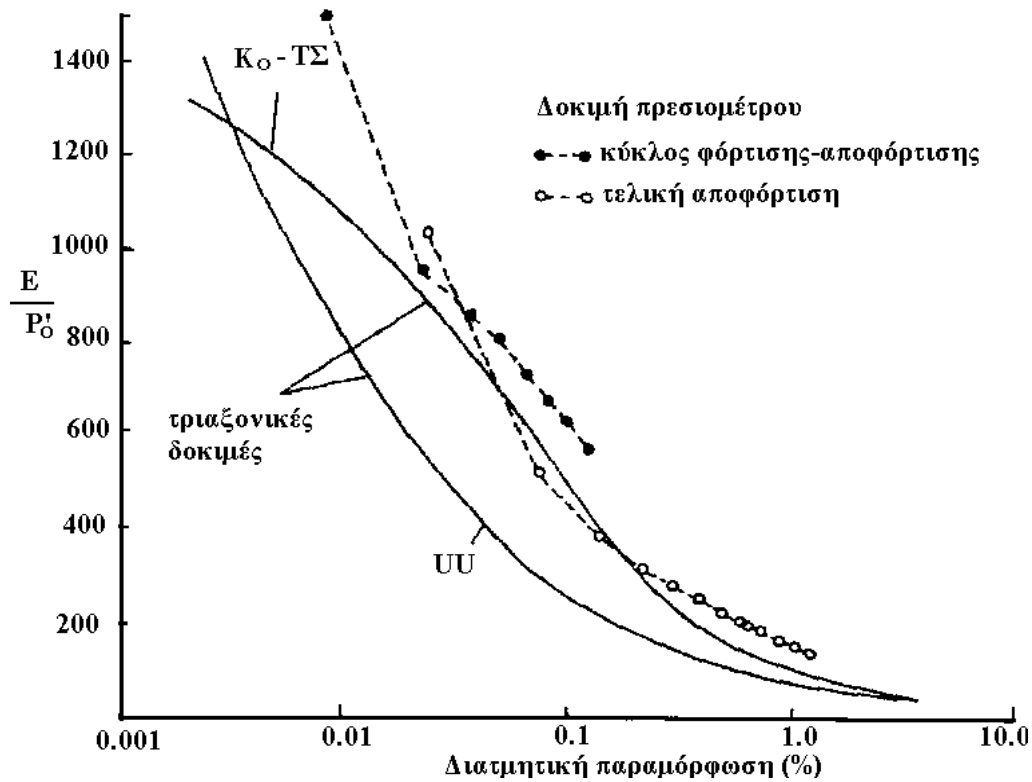
Η εκτέλεση πειραμάτων στο εργαστήριο έχει ως στόχο την ακριβή καταγραφή της απόκρισης του εδαφικού στοιχείου σε μεταβολές τάσεων, παραμορφώσεων και πίεσης πόρων. Σε αυτόν τον τομέα υπερτερεί των επί τόπου δοκιμών και μετρήσεων. Μια ολοκληρωμένη εδαφοτεχνική μελέτη για ένα έργο συνδυάζει τα πλεονεκτήματα των δύο προσεγγίσεων.

Στον Πίνακα που ακολουθεί αναφέρονται επιγραμματικά τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των εργαστηριακών και επί τόπου δοκιμών.

	ΠΕΙΡΑΜΑ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ	ΕΠΙ ΤΟΠΟΥ ΔΟΚΙΜΗ
Αρχική εντατική κατάσταση	+	-
Επιβαλλόμενο τασικό πεδίο	+	-
Επιβαλλόμενος ρυθμός παραμόρφωσης	+	-
Συνθήκες στράγγισης	+	-
Παρακολούθηση συμπεριφοράς	+	-
Ομοιογένεια τάσεων	+	-
Διαταραχή δοκιμών	-	+
Αντιπροσωπευτικότητα δοκιμών	-	+
Συχνότητα εκτέλεσης πειραμάτων	-	

Παρά τις διαφορές των δύο προσεγγίσεων τα αποτελέσματα των εργαστηριακών και επί τόπου δοκιμών είναι παρόμοια και εμπνέουν μεγάλο βαθμό εμπιστοσύνης στις πειραματικές μετρήσεις. Σύγκριση των αποτελεσμάτων των επί τόπου δοκιμών

πρεσιομέτρου και πειραμάτων στην τριαξονική συσκευή (κανονικά στερεοποιημένων και μη δοκιμίων) γίνεται στο Σχήμα.



Οι τριαξονικές δοκιμές σε ανισότροπα στερεοποιημένα δοκίμια και οι δοκιμές πρεσιομέτρου καταλήγουν σε παρόμοια καμπύλη μεταβολής της ακαμψίας του εδάφους ως προς τη διατμητική παραμόρφωση.

ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΕΔΑΦΙΚΟΥ ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ

Με την εκτέλεση πειραμάτων σε εδαφικά στοιχεία στο εργαστήριο επιτυγχάνεται:

- η λεπτομερής ανάλυση της συμπεριφοράς αντιπροσωπευτικών δοκιμίων
- η γενίκευση της αλήθειας των αποτελεσμάτων με την πρόσθετη εκτέλεση επί τόπου δοκιμών και πειραμάτων προσδιορισμού εδαφικών δεικτών
- η προσομοίωση στο εργαστήριο με κάθε δυνατή ακρίβεια των επί τόπου εδαφικών συνθηκών όπως:
 - * αρχική εντατική κατάσταση
 - * επιβαλλόμενες τασικές μεταβολές

- * στάδια και ρυθμός μεταβολής του τασικού πεδίου
- * συνθήκες στράγγισης

Οι δύο βασικές παραδοχές των εργαστηριακών πειραμάτων είναι :

- η χρησιμοποίηση αδιατάρακτων δειγμάτων
- η ομοιόμορφη κατανομή τάσεων και παραμορφώσεων κατά τη διάρκεια του πειράματος

Βασικές Αρχές Καταγραφής Εδαφικών Παραμέτρων

Το ιδανικό πείραμα σε εδαφικό δοκίμιο είναι το πείραμα κατά το οποίο υπάρχει απόλυτος έλεγχος και ομοιομορφία των εντατικών καταστάσεων τάσης και παραμόρφωσης στο δοκίμιο. Όμως καμμία πειραματική συσκευή δεν ικανοποιεί αυτή την παραδοχή κάτω από συνθήκες επιβολής γενικευμένου εντατικού πεδίου στο δοκίμιο. Επιπρόσθετα είναι παρά πολύ δύσκολη η ακριβής παρακολούθηση του πλήρους εντατικού πεδίου σε σειρά εδαφοτεχνικών προβλημάτων.

Οι πειραματικές συσκευές μπορούν να κατηγοριοποιηθούν με βάση τις συνοριακές συνθήκες που επιβάλλονται στα άκρα του δοκιμίου. Πρακτικά διακρίνουμε τις ακόλουθες κατηγορίες:

Εύκαμπτα ή Άκαμπτα Άκρα

Η παρουσία άκαμπτων άκρων επιβάλλει συνθήκες κοινής μετατόπισης στα άκρα κατά τη διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας. Με αυτό τον τρόπο βοηθιέται η δημιουργία ενός ομοιόμορφου πεδίου παραμορφώσεων. Όμως η κατανομή των τάσεων στα άκρα είναι πιθανότατα έντονα ανομοιόμορφη.

Ένα εύκαμπτο άκρο επιβάλλει σταθερό πεδίο αξονικών τάσεων, αλλά οδηγεί σε συνθήκες μεταβλητής μετατόπισης που είναι δύσκολο να ερευνηθούν.

Λεία ή Τραχέα Άκαμπτα Άκρα

Συνθήκες λείων άκαμπτων άκρων επιτυγχάνονται με τη χρήση υλικών όπως ανοξείδωτος χάλυβας με έντονα στιλπνές επιφάνειες, σύμμικτα υλικά με χαμηλό συντελεστή τριβής (π.χ. Lucite) ή με την τοποθέτηση στη διεπιφάνεια δοκιμίου - άκρου, φύλλων latex με γράσο σιλικόνης. Το γράσο σιλικόνης είναι το πιο συνηθισμένο και το πιο αποτελεσματικό υλικό στο εργαστήριο για επιβολή συνθηκών λείου άκαμπτου άκρου και είναι γνωστό διεθνώς με την επωνυμία lubricated ends. Με την απουσία διατμητικών τάσεων στα άκρα του δοκιμίου είναι δυνατός ο προσδιορισμός κύριων τάσεων και παραμορφώσεων. Όμως η παρουσία λείων άκρων δημιουργεί σοβαρά προβλήματα στην καταγραφή των αρχικών μικρών παραμορφώσεων και στη στράγγιση του δοκιμίου.

Τα τραχεία (rough ends) άκαμπτα άκρα μπορούν να επιβάλλουν διατμητικές τάσεις στα άκρα του δοκιμίου και κατ'έπекταση μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη στροφή του επιπέδου επιβολής κυρίων τάσεων κατά την πειραματική διαδικασία. Ταυτόχρονα δημιουργούν προβλήματα στην κατανομή των τάσεων και παραμορφώσεων καθώς δεν επιτρέπουν τη μετακίνηση του δοκιμίου παράλληλα προς τα άκρα.

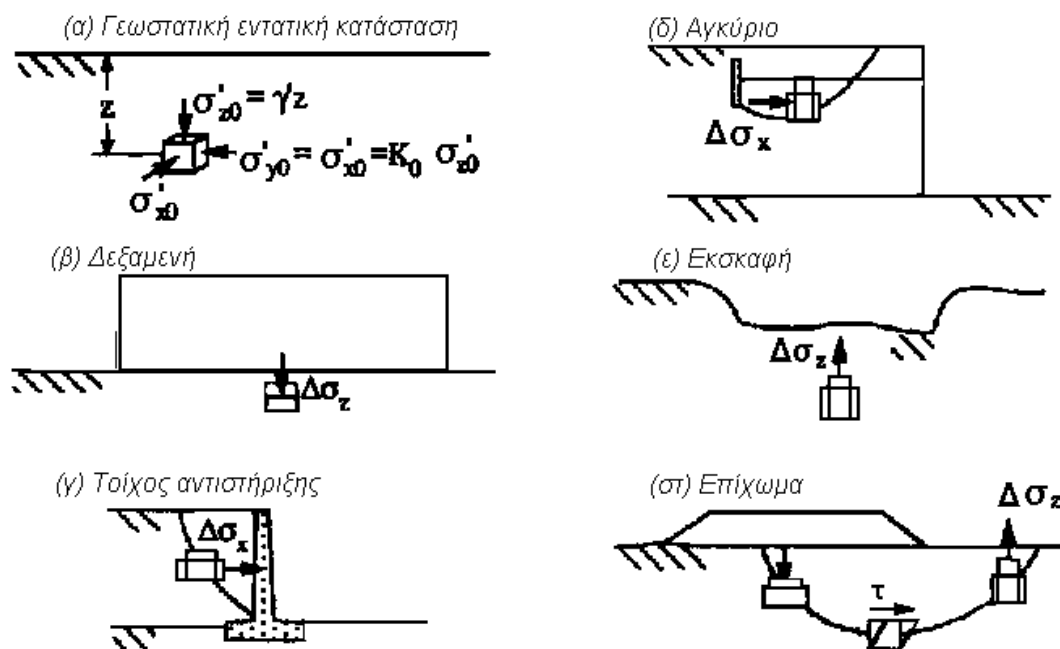
Όμως η χρήση δοκιμίων με λόγο ύψους προς διάμετρο 2 εξασφαλίζει αποδεκτές συνθήκες ομοιόμορφου πεδίου τάσεων-παραμορφώσεων στο κεντρικό τμήμα του δοκιμίου. Μικρότεροι λόγοι ύψους προς διάμετρο είναι αποδεκτοί μόνον όταν χρησιμοποιούνται λεία άκρα.

Η ελεγχόμενη στροφή του επιπέδου των κυρίων τάσεων απαιτεί μερικές φορές τη χρήση περιστρεφόμενων, λείων, άκαμπτων άκρων.

Τασικές Συνθήκες και Πρακτικές Εφαρμογές

Στην πλειοψηφία των κατασκευών τα πεδία τάσεων και παραμορφώσεων στην περιοχή του έργου είναι σύνθετα και περίπλοκα. Αρχικά πρέπει να προσδιορισθεί η επίδραση των διαφόρων κατασκευών στην εντατική κατάσταση του εδάφους. Στη

συνέχεια ο σχεδιασμός και η χρήση των πειραματικών διατάξεων στοχεύει στην προσομοίωση της εντατικής κατάστασης στο εργαστήριο. Στο Σχήμα περιγράφονται εντατικές καταστάσεις συνυφασμένες με διάφορα γεωτεχνικά έργα.

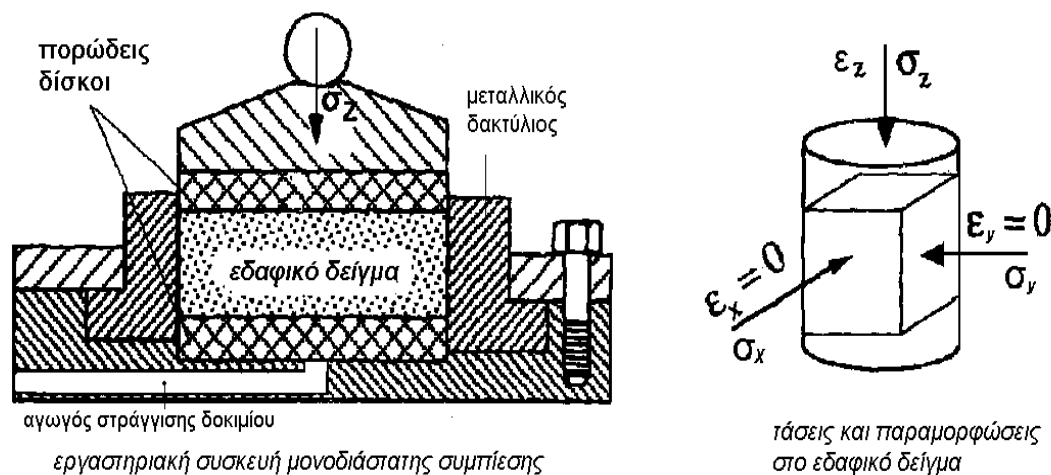


Στην περίπτωση δεξαμενής καυσίμων μεγάλων διαστάσεων αναμένεται αύξηση της κατακόρυφης τάσης σ_z με επακόλουθο τη μονοδιάστατη συμπίεση του υποκείμενου εδάφους. Στην περίπτωση τοίχου αντιστήριξης και αγκυρίου αναμένεται μείωση και αύξηση, αντίστοιχα, της οριζόντιας τάσης σ_x για περίπου σταθερή κατακόρυφη τάση σ_z . Στην περίπτωση εκσκαφής αναμένεται μείωση της κατακόρυφης τάσης σ_z για περίπου σταθερή οριζόντια τάση. Τέλος, σε πιθανή επιφάνεια ολίσθησης στο έδαφος θεμελίωσης επιχώματος αναμένονται διαφορετικές εντατικές καταστάσεις για διάφορες θέσεις της πιθανής επιφάνειας ολίσθησης.

Οι ακόλουθες πειραματικές διατάξεις αναπτύχθηκαν με σκοπό την προσομοίωση των εντατικών καταστάσεων που προαναφέρθηκαν. Η ανάλυση των πειραματικών αποτελεσμάτων χρησιμοποιείται για την πρόβλεψη της συμπεριφοράς του εδάφους κατά τη διάρκεια κατασκευής και λειτουργίας των γεωτεχνικών έργων.

ΔΟΚΙΜΗ ΣΥΜΠΙΕΣΟΜΕΤΡΟΥ

Η δοκιμή συμπίεσομέτρου προσομοιώνει τις συνθήκες μονοδιάστατης συμπίεσης. Η μονοδιάστατη συμπίεση/διόγκωση εδαφικού υλικού είναι το αποτέλεσμα φόρτισης/αποφόρτισης μεγάλης επιφάνειας εδαφικών στρώσεων π.χ. απόθεση εδαφικών υλικών στους πυθμένες των θαλασσών, απομάκρυνση παγετώνων, κατασκευή δεξαμενής υγρών καυσίμων μεγάλης διαμέτρου. Η φόρτιση προσομοιώνεται στη δοκιμή με την επιβολή ορθής παραμόρφωσης στον κατακόρυφο άξονα και ταυτόχρονη παρεμπόδιση ορθών παραμορφώσεων στο οριζόντιο επίπεδο και όλων των διατμητικών παραμορφώσεων. Η εργαστηριακή συσκευή μονοδιάστατης συμπίεσης και οι συνθήκες τάσεων και παραμορφώσεων του δοκιμίου φαίνονται στο Σχήμα.



- Το εδαφικό δείγμα τοποθετείται σε μεταλλικό άκαμπτο κατακόρυφο δακτύλιο που επιβάλλει συνθήκες μηδενικής ακτινικής παραμόρφωσης $\epsilon_r = 0$.
- Οι διαστάσεις του δοκιμίου επιλέγονται κατάλληλα για την αποφυγή πλευρικών τριβών.
- Τα άκρα της συσκευής είναι συνήθως σκληρά και άκαμπτα. Κατασκευάζονται από πορώδες υλικό που επιτρέπει τη διαφυγή νερού από το δοκίμιο σε ατμοσφαιρική πίεση.

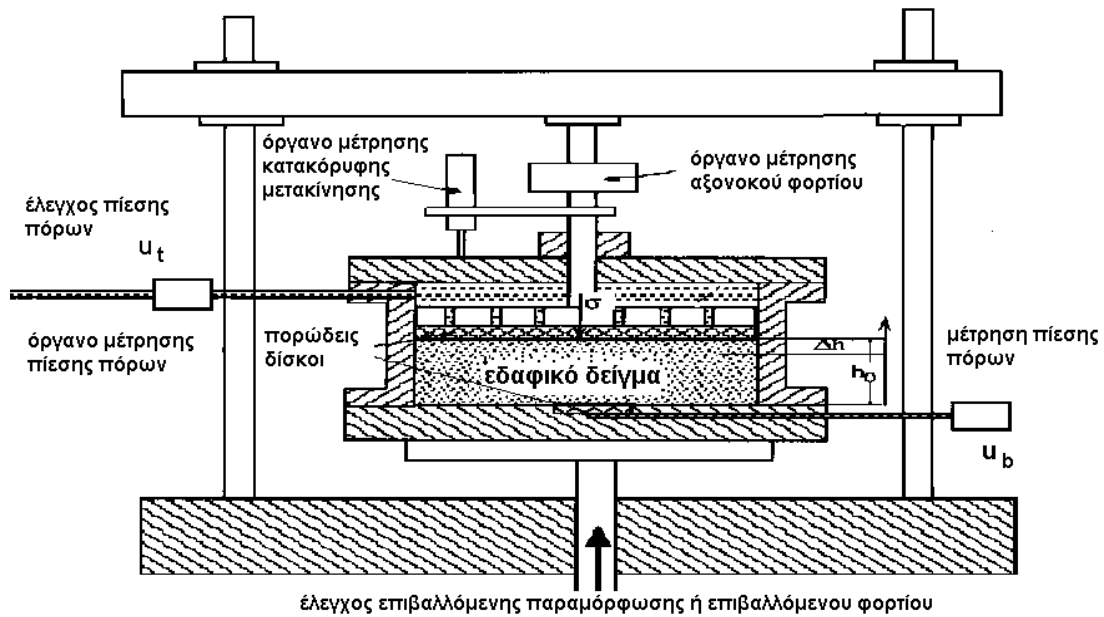
Σκοπός του πειράματος είναι να μελετηθεί η σχέση τάσεων παραμορφώσεων για υλικά με σχετικά μικρή διαπερατότητα όπως άργιλοι και ιλύες. Κατά τη διάρκεια της

κλασσικής δοκιμής συμπίεσομέτρου η κατακόρυφη τάση σ_z , που επιβάλλεται μέσω του ελάσματος φόρτισης, διατηρείται σταθερή κατά τη διάρκεια κάθε σταδίου φόρτισης. Η κατακόρυφη τάση έχει αρχικά χαμηλή τιμή που αυξάνεται λογαριθμικά μέχρι τη μέγιστη τιμή πριν μειωθεί με μικρά βήματα μέχρι το μηδέν. Το εύρος των τιμών της φόρτισης πρέπει να καλύπτει το μέγεθος των ενεργών τάσεων που αναμένεται στο υπό εξέταση γεωτεχνικό πρόβλημα υπολογισμού καθιζήσεων. π.χ. μέγιστη και ελάχιστη αναμενόμενη επί τόπου τάση. Η διάρκεια επιβολής της κάθε φόρτισης εξαρτάται από τον χρόνο στερεοποίησης. Στην πράξη η επιβολή του επόμενου φορτίου γίνεται όταν ο βαθμός στερεοποίησης ξεπερνά το 90%.

Κατά τη διάρκεια του πειράματος καταγράφεται η συμπίεση του δοκιμίου και ο αντίστοιχος χρόνος επιβολής του φορτίου. Η ακριβής διαδρομή ενεργών τάσεων του δοκιμίου δεν μπορεί να προσδιορισθεί καθώς δεν μετράται η ενεργός πλευρική τάση κατά τη διάρκεια του πειράματος. Θεωρείται όμως ότι έχουμε στο δοκίμιο συνθήκες ανισότροπης στερεοποίησης K_0 , όπου $K_0 = \sigma_r'/\sigma_z'$. Η κλασσική δοκιμή συμπίεσομέτρου έχει αναφερθεί στο Κεφάλαιο της στερεοποίησης εδαφικού υλικού.

Εκτός της κλασσικής δοκιμής τα χαρακτηριστικά μονοδιάστατης συμπίεσης του δείγματος μπορούν επίσης να προσδιορισθούν με τη βοήθεια διαφορετικών συνθηκών φόρτισης. Πειραματική διάταξη ικανή να επιβάλλει αυτές τις διαφορετικές συνθήκες περιγράφεται στο Σχήμα που ακολουθεί. Το δοκίμιο υπόκειται σε ολική τάση σ_z με την επιβολή παραμόρφωσης ή φορτίου με σταθερό ρυθμό. Το νερό του δοκιμίου διαφεύγει μέσω πορώδους δίσκου στην κορυφή του δοκιμίου υπό ελεγχόμενη σταθερή πίεση πόρων, u_t . Στη βάση του δοκιμίου δεν επιτρέπεται η στράγγιση αλλά καταγράφεται η πίεση των πόρων u_b με τη βοήθεια μετρητή. Η συμπίεση του δοκιμίου καταγράφεται από μετρητή μετακίνησης.

Κατά τη δοκιμή επιβολής σταθερού ρυθμού παραμόρφωσης (CRS), η κατακόρυφη συμπίεση / αποπίεση του δοκιμίου Δh επιβάλλεται με σταθερό ρυθμό και τα μεγέθη πίεση πόρων u_b και ολική τάση σ_z καταγράφονται ανά τακτά χρονικά διαστήματα. Με



την παραδοχή παραβολικής κατανομής της πίεσης των πόρων κατά μήκος του δοκιμίου πάχους h και για συνοριακές συνθήκες :

$$u(0,t) = u_b(t), \quad u(h,t) = u_t \quad \text{και} \quad \frac{\partial u}{\partial z}(0,t) = 0$$

η δοκιμή CSR επιτρέπει τον υπολογισμό της μεταβολής της ενεργού τάσης και του συντελεστή στερεοποίησης ως προς το δείκτη πόρων e με τη βοήθεια των ακόλουθων εξισώσεων :

$$\text{μέση ενεργός τάση} \quad \bar{\sigma}' = \bar{\sigma} - \frac{2}{3} \bar{u}_b$$

$$\text{δείκτης πόρων} \quad e = e_0 - \frac{\Delta h}{h_0} (1 + e_0)$$

$$\text{συντελεστής στερεοποίησης} \quad c_v \cong \frac{\bar{h}^2 \log\left(\frac{\sigma_2}{\sigma_1}\right)}{2(t_2 - t_1) \log\left(1 - \frac{\bar{u}_b}{\bar{\sigma}}\right)}$$

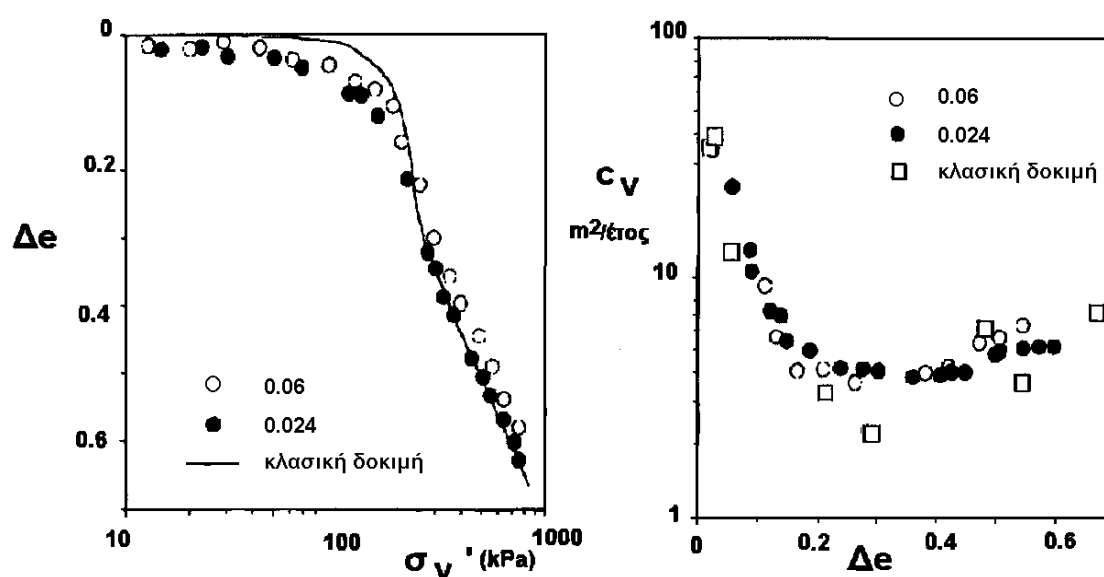
όπου $\sigma_1 =$ ολική τάση στο χρόνο t_1

$\sigma_2 =$ ολική τάση στο χρόνο t_2

$\bar{h} =$ μέσο ύψος δοκιμίου κατά τη χρονική περίοδο δt

$\bar{\sigma} =$ μέση ενεργός τάση στο δοκίμιο κατά τη χρονική περίοδο δt

Η δοκιμή CRS είναι πολύ μικρότερης διάρκειας από την κλασσική δοκιμή συμπίεσομέτρου. Σύγκριση των αποτελεσμάτων από τις δύο δοκιμές απεικονίζεται στο Σχήμα.



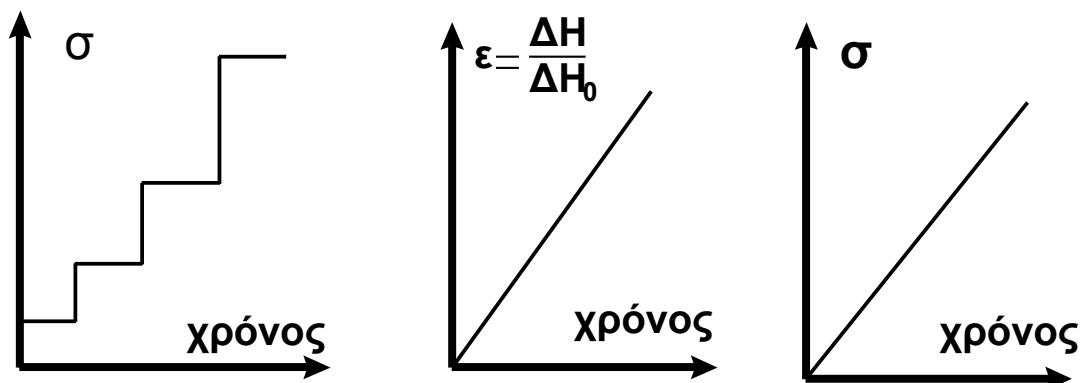
Καθώς δεν απαιτείται μηδενισμός της υπερπίεσης πόρων, ο ρυθμός της επιβαλλόμενης παραμόρφωσης μπορεί να αυξηθεί με την προϋπόθεση ότι η υπερπίεση πόρων δεν υπερβαίνει το 30% της επιβαλλόμενης ολικής τάσης κατά τη διάρκεια του πειράματος.

Άλλες διαδικασίες φόρτισης περιλαμβάνουν :

- Δοκιμή επιβολής φορτίου σταθερού ρυθμού (CRL): όπου το επιβαλλόμενο φορτίο αυξάνεται με σταθερό ρυθμό.
- Δοκιμή επιβολής σταθερής διαφοράς πίεσης πόρων: όπου η διαφορά στην πίεση πόρων $u_b - u_t$ μεταξύ της βάσης και της κορυφής του δοκιμίου διατηρείται σταθερή.

- Δοκιμή σταθερού λόγου πίεσης πόρων προς φορτίο: όπου η πίεση πόρων στη βάση του δοκιμίου u_b είναι σταθερό ποσοστό της ολικής επιβαλλόμενης τάσης.
- Δοκιμή ελεγχόμενης πίεσης πόρων, u_b : όπου η πίεση πόρων στράγγισης u_t είναι αρχικά ίση με την πίεση πόρων στη βάση του δοκιμίου u_b και μειώνεται σταδιακά έως μία τελική τιμή.

Τα διαγράμματα φόρτισης της κλασικής δοκιμής συμπιεσομέτρου, της δοκιμής CRS και CRL απεικονίζονται στο Σχήμα.



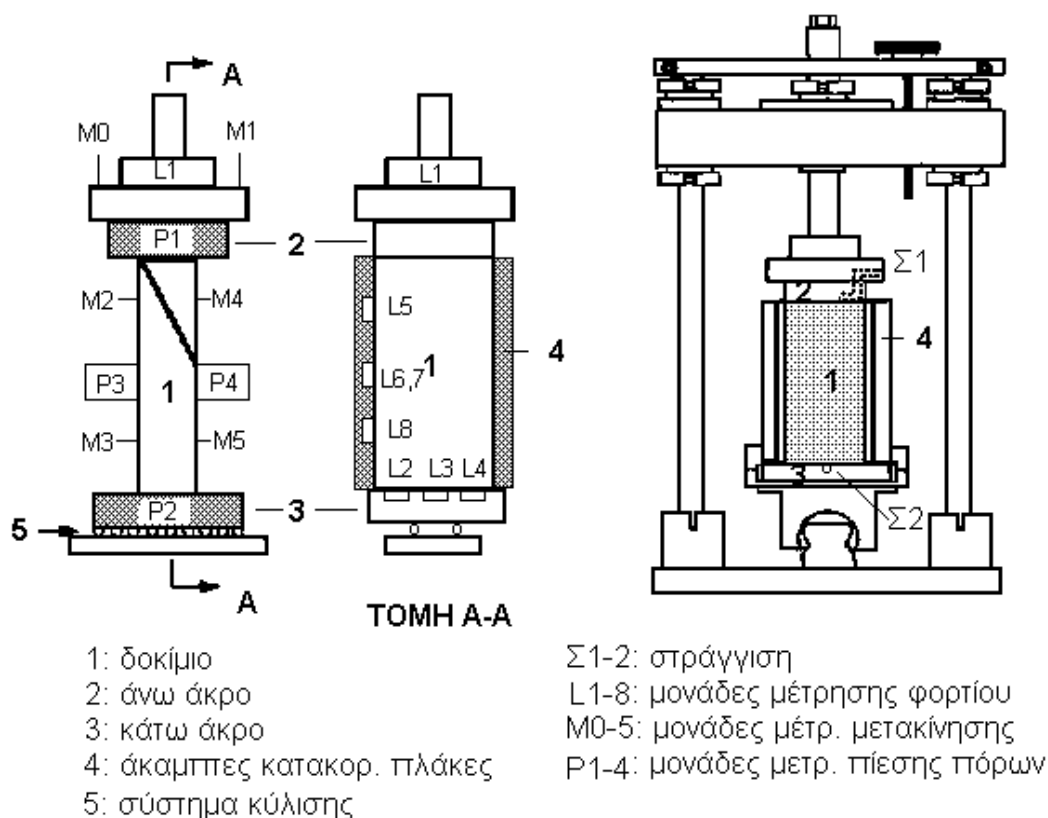
ΣΥΣΚΕΥΗ ΕΠΙΠΕΔΗΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ

Η συσκευή επίπεδης παραμόρφωσης προσομοιώνει τις εδαφικές ιδιότητες υπό συνθήκες μηδενικής παραμόρφωσης σε μία κύρια κατεύθυνση π.χ. $\varepsilon_y=0$. Η συσκευή χρησιμοποιείται για την ανάλυση εδαφικών χαρακτηριστικών στην περίπτωση επιμήκων κατασκευών.



Συνήθως λείες άκαμπτες κατακόρυφες πλάκες τοποθετούνται παράλληλα προς τη επιμηκέστερη πλευρά ορθογωνικού δοκιμίου όπως φαίνεται στο Σχήμα. Οι περισσότερες συσκευές χρησιμοποιούν άκαμπτα άνω και κάτω άκρα και εύκαμπτη μεμβράνη στην τρίτη

διάσταση που επιτρέπει τον έλεγχο των τάσεων. Η συσκευή έχει χρησιμοποιηθεί για πειράματα σε εδαφικά και βραχώδη υλικά. Πειράματα επιβολής συνθηκών παθητικής επίπεδης παραμόρφωσης σε δοκίμια είναι σπάνια και περίπλοκα. Οι διαστάσεις του δοκιμίου είναι κατάλληλες ώστε να επιτρέπουν την ελεύθερη ανάπτυξη του επιπέδου αστοχίας στο δοκίμιο. Βελτιωμένος σχεδιασμός της συσκευής επιτρέπει τη δημιουργία του επιπέδου αστοχίας χωρίς κινηματικούς περιορισμούς με χρήση μηχανισμού στη βάση του δοκιμίου που είναι ελεύθερος να μετακινείται στην οριζόντια κατεύθυνση όπως φαίνεται στο Σχήμα.



Η μέτρηση της μετακίνησης της βάσης σε συνδιασμό με τις μετρήσεις των πλευρικών μετατοπίσεων σε διάφορες θέσεις (M0-M5) επί του δοκιμίου επιτρέπουν τον προσδιορισμό της χρονικής εξέλιξης του φαινομένου της αστοχίας του δοκιμίου. Το δοκίμιο τυπικών διαστάσεων 135mm ύψος, 81mm πλάτος και 40mm βάθος, περιβάλλεται από ελαστική μεμβράνη και τοποθετείται μεταξύ δύο λείων ακάμπτων πλακών που επιβάλουν συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης (4). Το αξονικό φορτίο επιβάλεται μέσω λείων άκαμπτων άκρων (2,3). Οι απομένουσες πλευρές του ορθογωνικού δοκιμίου υποβάλλονται σε πλευρική πίεση μέσω της ελαστικής

μεμβράνης. Εκτός των μετακινήσεων μονάδες μέτρησης φορτίου μετρούν τόσο το αξονικό φορτίο και την εκκεντρότητά του (L1-L4) όσο και τα πλευρικά φορτία (L5-L8). Τέλος η πίεση του νερού των πόρων του δοκιμίου καταγράφεται στα άκρα και περί το κέντρο επί του δοκιμίου.

ΚΥΛΙΝΔΡΙΚΗ ΤΡΙΑΞΟΝΙΚΗ ΣΥΣΚΕΥΗ

Η τριαξονική δοκιμή χρησιμοποιείται για τη μελέτη των χαρακτηριστικών τάσεων-παραμορφώσεων και αντοχής του εδάφους. Η συσκευή επιτρέπει τον έλεγχο των :

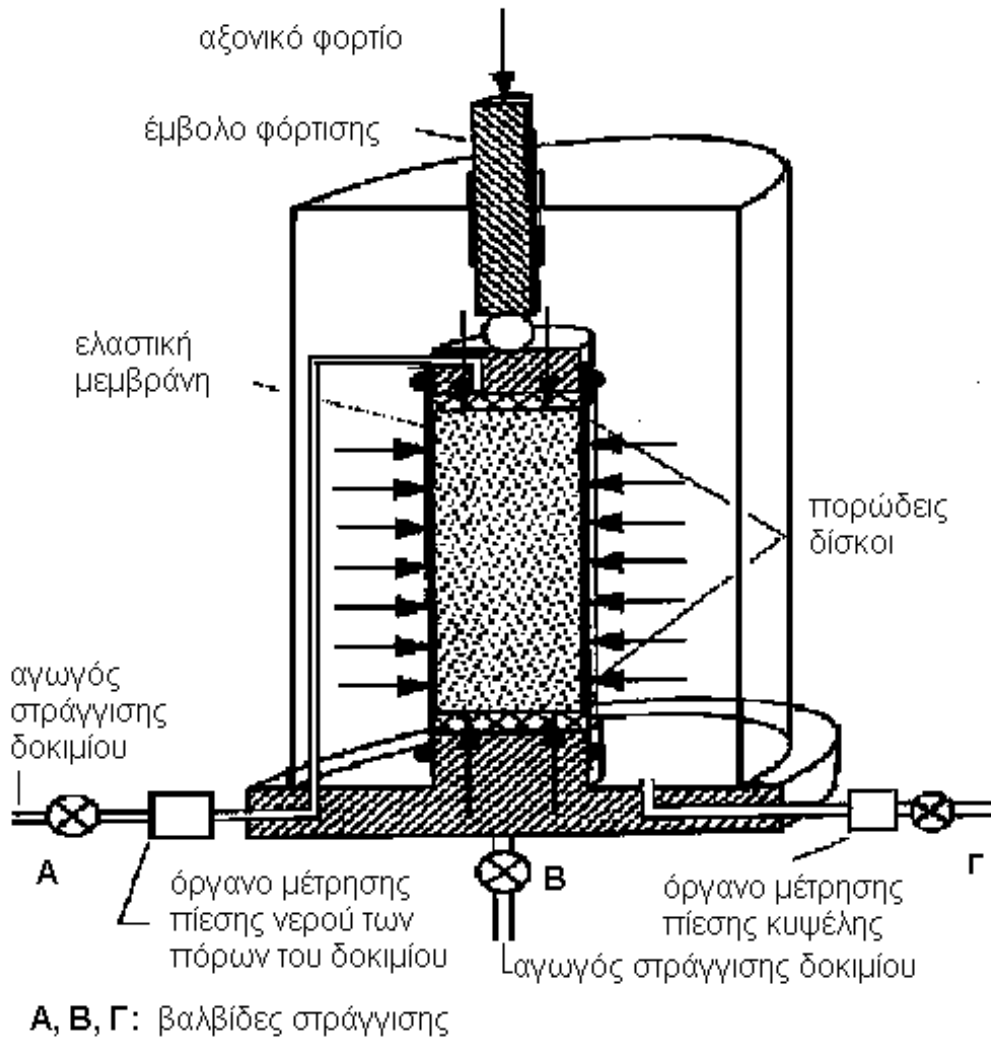
- κύριων τάσεων του δοκιμίου επιβάλλοντας αξονοσυμμετρική εντατική κατάσταση στο δοκίμιο
- συνθηκών στράγγισης και της πίεσης των πόρων στο εσωτερικό του δοκιμίου

Η συσκευή δύναται να προσομοιώσει διάφορες εντατικές καταστάσεις που επιβάλλονται στο εδαφικό στοιχείο π.χ. πίσω από τοίχο αντιστήριξης (ελάττωση πλευρικής πίεσης) ή μπροστά από πλάκα αγκύρωσης (αύξηση πλευρικής πίεσης). Επιπρόσθετα δίδει τη δυνατότητα επιλογής θλιπτικού (κύρια τάση κατακόρυφη) ή εφελκυστικού (κύρια τάση οριζόντια) πεδίου τάσεων. Οι τιμές των παραμέτρων ($\alpha=0^\circ$, $b=0$) και ($\alpha=90^\circ$, $b=1$) αντιστοιχούν σε συνθήκες τριαξονικής θλίψης και εφελκυσμού αντίστοιχα, χωρίς να είναι δυνατή η διερεύνηση ενδιάμεσων τιμών στην τριαξονική συσκευή. Οπου α είναι η γωνία της κύριας τάσης σ_1 ως προς την κατακόρυφο και b η παράμετρος που εκφράζει τη μεταβολή της ενδιάμεσης κύριας

$$\text{τάσης } \sigma_2, \quad b = \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3}.$$

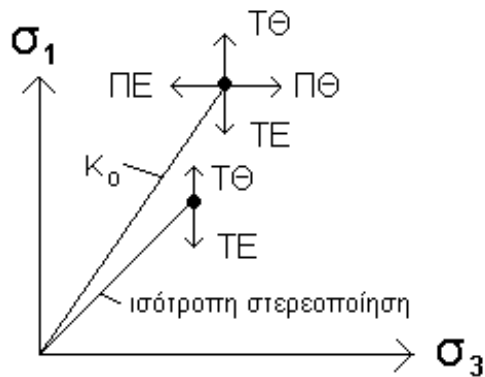
Όπως φαίνεται στο Σχήμα το κυλινδρικό δοκίμιο περιβάλλεται από ελαστική μεμβράνη. Σε αντίθεση με την εύκαμπτη πλευρική διεπιφάνεια μέσω της οποίας επιβάλλεται στο δοκίμιο η πλευρική τάση σ_3 , προσαρμόζοντας την πλευρική πίεση μέσα στην κυψέλη, η αξονική τάση επιβάλλεται στο δοκίμιο με το έμβολο φόρτισης μέσω ακάμπτων άκρων. Τα άκρα της συσκευής είναι εφοδιασμένα με πορώδεις δίσκους που συνδέονται με το σύστημα στράγγισης του δοκιμίου.

Η τριαξονική δοκιμή χαρακτηρίζεται ως αξονοσυμμετρική καθώς οι τάσεις στο οριζόντιο επίπεδο $\sigma_2 = \sigma_3$ είναι ίσες με την πίεση της κυψέλης η οποία μετράται με τον μετρητή πίεσης στη θέση Γ του Σχήματος.



Η τριαξονική δοκιμή δύναται να εκτελεστεί υπό στραγγιζόμενες συνθήκες όταν οι βαλβίδες A, B των αγωγών στράγγισης του Σχήματος είναι ανοικτές. Με αυτό τον τρόπο το νερό των πόρων του δοκιμίου δύναται να μετακινηθεί από το δοκίμιο στο σύστημα στράγγισης όπου υπάρχει και όργανο μέτρησης του διακινούμενου νερού και αντίστροφα. Κατά τη μετακίνησή του νερού από και προς το δοκίμιο η πίεση πόρων του δοκιμίου διατηρείται σταθερή σε προκαθορισμένη τιμή.

Κατά την αστράγγιστη δοκιμή οι βαλβίδες των αγωγών στράγγισης είναι κλειστές και δεν επιτρέπεται η μετακίνηση του νερού των πόρων του δοκιμίου με αποτέλεσμα την ανάπτυξη υπερπίεσης του νερού των πόρων. Στην περίπτωση αυτή οι ολικές και ενεργές τάσεις κατά τη διάρκεια του πειράματος είναι διαφορετικές.



Η αξονική τάση σ_1 ή η πλευρική τάση σ_3 δύνανται να αυξηθούν, να μειωθούν ή να παραμείνουν σταθερές. Η μεταβολή της αξονικής τάσης επιτυγχάνεται με επιβολή σχετικής μετακίνησης του εμβόλου φόρτισης με σταθερό ρυθμό.

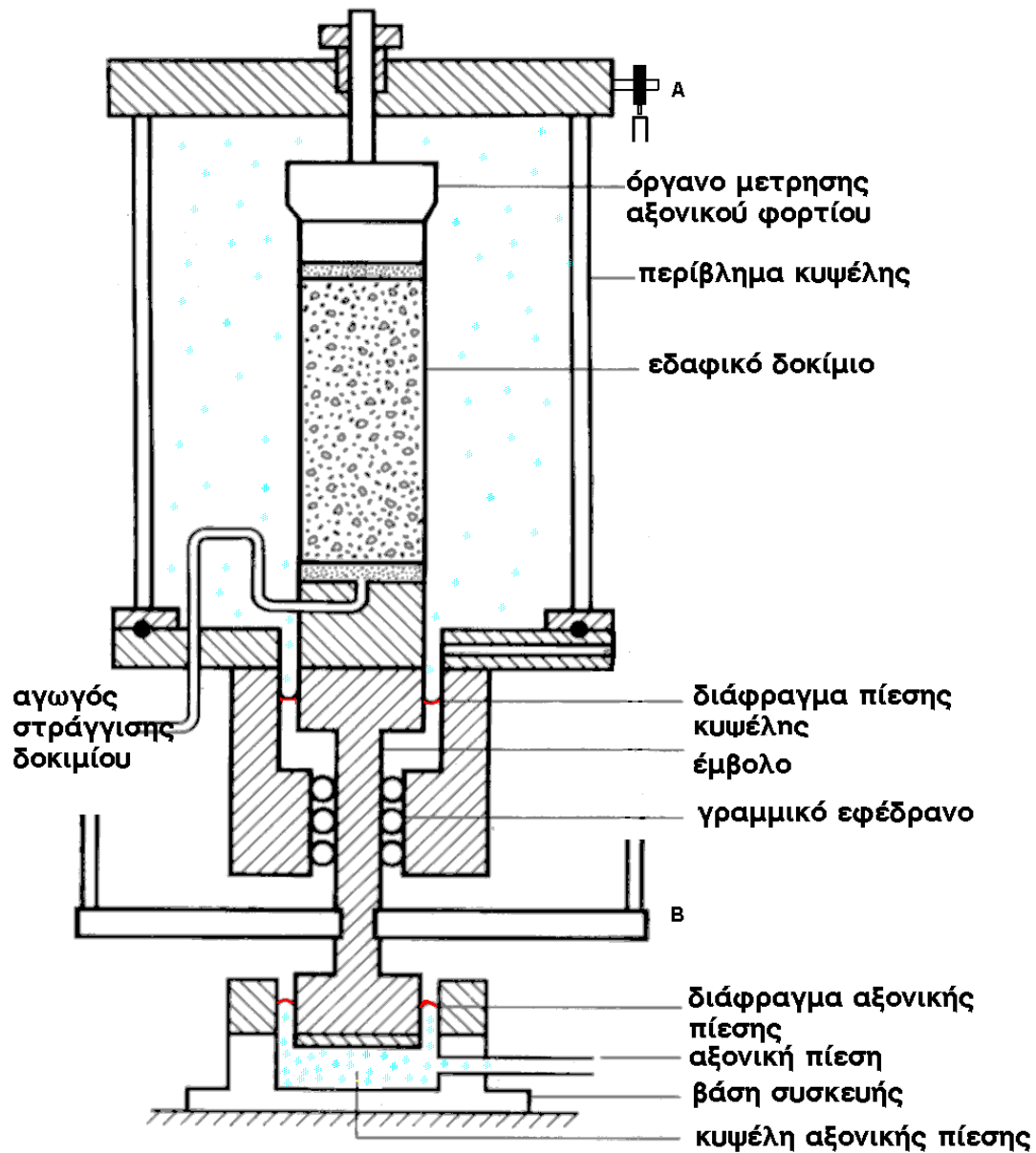
Οι διαδρομές ολικών τάσεων των δοκιμών τριαξονικής θλίψης και εφελκυσμού καθώς και πλευρικής θλίψης και εφελκυσμού περιγράφονται στο Σχήμα. Της δοκιμής θλίψης ή εφελκυσμού έχει προηγηθεί ισότροπη ($\sigma_1 = \sigma_3$) ή ανισότροπη (σε συνθήκες $K_0 = \sigma'_3 / \sigma'_1$) στερεοποίηση του δοκιμίου

Η τριαξονική συσκευή Bishop & Wesley δύναται να επιβάλλει πλήθος διαδρομών τάσεων. Το αξονικό φορτίο επιβάλλεται στο δοκίμιο είτε με μετακίνηση σταθερού ρυθμού του κάτω άκρου του δοκιμίου (δηλ. με έλεγχο της επιβαλλόμενης παραμόρφωσης του δοκιμίου και καταγραφή της αντίστοιχης σ_1) είτε με επιβολή σ_1 , επιθυμητής τιμής, και καταγραφή της αντίστοιχης παραμόρφωσης. Όπως φαίνεται στο Σχήμα που ακολουθεί εκτός από το διάφραγμα επιβολής πλευρικής πίεσης στην κυψέλη η συσκευή είναι εφοδιασμένη στη βάση της με διάφραγμα επιβολής αξονικής πίεσης και κυψέλη αξονικής πίεσης. Για παράδειγμα για την επιβολή θλιπτικής φόρτισης στο δοκίμιο, η πίεση της κυψέλης αξονικής πίεσης που εφαρμόζεται στη βάση του εμβόλου πρέπει να είναι μεγαλύτερη της πίεσης της κυψέλης που εφαρμόζεται στην κορυφή του εμβόλου πλέον του βάρους του εμβόλου. Η διαφορά πίεσης των δύο κυψελών καθορίζει την αξονική τάση σ_1 .

Για τον προσδιορισμό των παραμορφώσεων του δοκιμίου, μετράται η μεταβολή του μήκους του δοκιμίου είτε ως σχετική μετακίνηση των άκαμπτων άκρων του δοκιμίου

είτε με ειδικά όργανα τα οποία προσαρτώνται στο δοκίμιο για την αποφυγή λαθών.

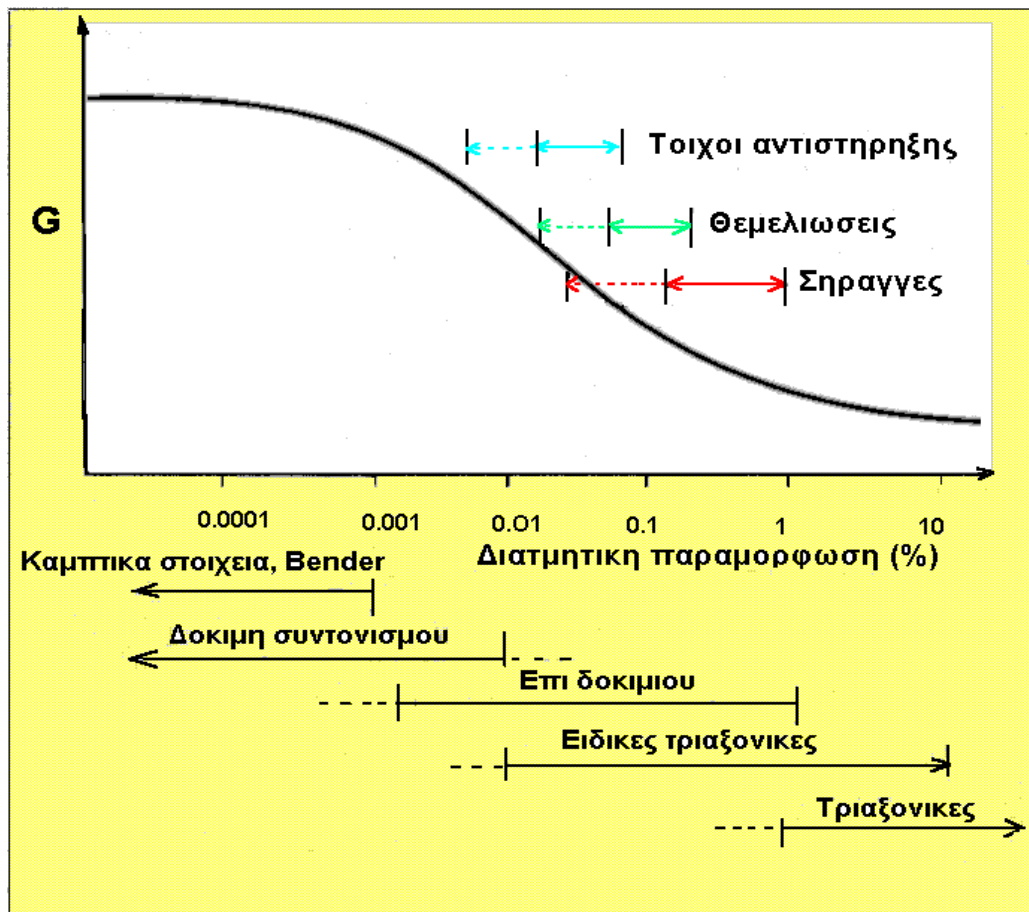
Τα



λάθη οφείλονται είτε στην ευθυγράμμιση και το βαθμού επαφής των άκρων είτε στη συμπίεση του υλικού των άκρων, του μετρητού φορτίου και γενικά των τμημάτων της συσκευής που παρεμβάλλονται στη γραμμή μέτρησης της σχετικής μετακίνησης π.χ. γραμμή AB στο Σχήμα.

Τα λάθη αυτά είναι σημαντικά για μικρές τιμές παραμορφώσεων, οι οποίες αναμένονται στα συνήθη γεωτεχνικά έργα, και δύνανται να οδηγήσουν σε υποεκτίμηση της μετρούμενης ακαμψίας του εδαφικού υλικού της τάξης του 50%.

Στο Σχήμα φαίνεται το εύρος των παραμορφώσεων που μετρώνται στις διάφορες δοκιμές. Με τη χρήση ειδικών τριαξονικών συσκευών (π.χ. δυνατότητα επιβολής συνθηκών K_0) και μέτρηση παραμορφώσεων επί του δοκιμίου είναι δυνατόν η καμπύλη ακαμψίας-παραμορφώσεων τριαξονικών δοκιμών να συμπέσει με την αντίστοιχη καμπύλη δυναμικών δοκιμών.

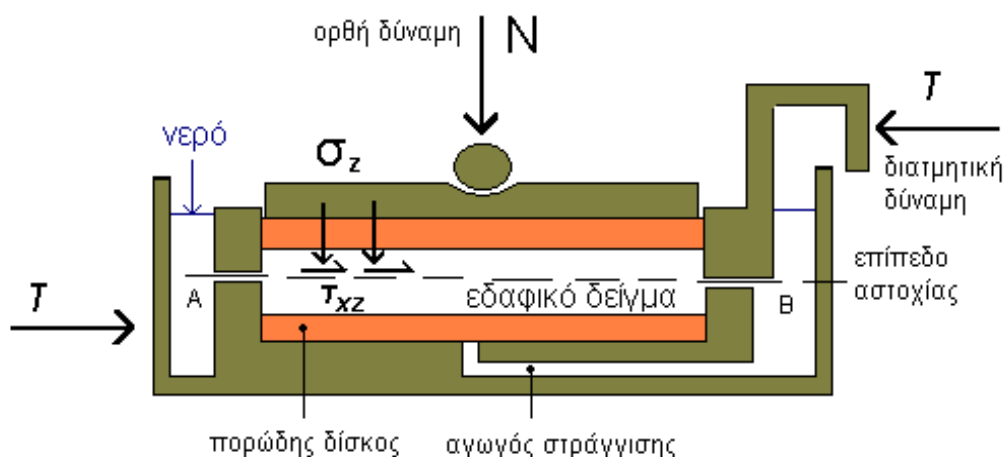


ΣΥΣΚΕΥΗ ΑΠ' ΕΥΘΕΙΑΣ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ

Κατά τη δοκιμή απ' ευθείας διάτμησης προσδιορίζεται η γωνία εσωτερικής τριβής ϕ' , η συνοχή c' και η διατμητική αντοχή τ εδαφών για την ανάλυση της ευστάθειας θεμελιώσεων, πρανών και τοίχων αντιστήριξης. Η συσκευή αποτελείται από σκληρές πλάκες στα άκρα, λείες πλευρικές επιφάνειες και κενό.

Η δοκιμή απ' ευθείας διάτμησης προσομοιώνει την εντατική κατάσταση διατμητικής φόρτισης σε προκαθορισμένη επιφάνεια ολίσθησης π.χ. κυκλική επιφάνεια ολίσθησης

στη βάση του επιχώματος. Όπως φαίνεται στο Σχήμα το δοκίμιο τοποθετείται στο κενό μεταξύ του άνω και του κάτω τμήματος της συσκευής που έχει σχήμα κυλίνδρου ή κύβου. Το δοκίμιο υποβάλλεται σε διάτμηση με την εφαρμογή πλευρικού φορτίου T υπό σταθερό αξονικό φορτίο N που επιβάλλεται στο δοκίμιο μέσω μεταλλικού ελάσματος στην κορυφή του δοκιμίου.



Το δοκίμιο φέρει στην κορυφή και τη βάση του δύο πορώδεις δίσκους τραχειάς επιφάνειας που αφ' ενός επιτρέπουν τη στράγγιση του νερού των πόρων του δοκιμίου και αφ' ετέρου εμποδίζουν την ολίσθηση του εδαφικού υλικού στην επιφάνεια επαφής του με τη συσκευή. Πριν την έναρξη του πειράματος τα δύο τμήματα της συσκευής αποχωρίζονται κατά μία προκαθορισμένη απόσταση (της τάξης του 0.5mm). Με την αύξηση της διατμητικής τάσης το υλικό υποχρεωτικά αστοχεί κατα μήκος του επιπέδου αστοχίας (AB). Η διατμητική και η ορθή τάση (τ_{xz}, σ_z) προσδιορίζονται μόνο στο οριζόντιο επίπεδο αστοχίας με υπολογισμό της επιφάνειας επαφής του άνω και κάτω τμήματος που μεταβάλλεται συνεχώς κατά τη διάρκεια του πειράματος. Με γνώση του ζεύγους τ_{xz} και σ_z σε ένα και μόνο επίπεδο είναι αδύνατος ο προσδιορισμός της διαδρομής ενεργών τάσεων με τη βοήθεια του κύκλου του Mohr. Κατά την αστοχία, και με την παραδοχή ότι το επίπεδο αστοχίας είναι οριζόντιο και η εντατική κατάσταση ομοιόμορφη, οι τιμές των τ και σ_n είναι γνωστές και η δοκιμή δύναται να επαναληφθεί για διάφορες τιμές της σ_n με αποτέλεσμα τη δυνατότητα προσδιορισμού της περιβάλλουσας αστοχίας. Δεδομένης της περιβάλλουσας αστοχίας είναι δυνατή η κατασκευή του κύκλου του Mohr μόνο για την κατάσταση αστοχίας

και συνεπώς ο προσδιορισμός των ορθών τάσεων σ_x και σ_y στις κατακόρυφες και οριζόντιες επιφάνειες του δοκιμίου κατά την αστοχία.

Στη δοκιμή απευθείας διάτμησης η συμπεριφορά του υλικού περιγράφεται ως προς τη μετακίνηση και όχι τη διατμητική παραμόρφωση καθώς είναι αδύνατος ο υπολογισμός της παραμόρφωσης αφού το πάχος της διατμητικής ζώνης είναι άγνωστο. Επιπρόσθετα η κατανομή των παραμορφώσεων είναι ανομοιομορφή. Μελέτες στο μικροσκόπιο επιβεβαιώνουν την ανομοιομορφία των παραμορφώσεων και δείχνουν ότι οι παραμορφώσεις συγκεντρώνονται σε μικρές ή μεγάλες ζώνες ανάμεσα στα δύο τμήματα της συσκευής. Η ανομοιομορφία στην κατανομή των παραμορφώσεων συνοδεύεται από ανομοιομορφες τάσεις και συνεπώς είναι δύσκολη η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων. Υπάρχουν διάφορες θεωρίες για την ερμηνεία της αστοχίας του δοκιμίου που όμως είναι δύσκολο να επαληθευθούν πειραματικά.

Είναι προφανές ότι λόγω της ανομοιομορφίας στην κατανομή των τάσεων και των παραμορφώσεων το μέγεθος του δοκιμίου επηρεάζει τη μετρούμενη αντοχή. Τα συνήθη δοκίμια έχουν διαστάσεις 60mm x 60mm x 20mm ή διάμετρο 60mm για συσκευή μεταλλικών κυλίνδρων. Υπάρχουν επίσης συσκευές τετραγωνικής διατομής πλευράς π.χ. 100mm ή 200mm ή και μεγαλύτερης διάστασης για την περίπτωση πειραμάτων σε χονδρόκοκκα υλικά και βράχους.

Συνήθως επιβάλλεται μετακίνηση με σταθερό ρυθμό στο κάτω τμήμα της συσκευής και καταγράφεται από μετρητή φορτίου η διατμητική δύναμη που αναπτύσσεται μεταξύ των δύο τμημάτων του δοκιμίου. Η πλευρική και η κατακόρυφη μετατόπιση του δοκιμίου καταγράφονται από μετρητές μετακίνησης. Ο ρυθμός της πλευρικής μετακίνησης κυμαίνεται από 0.0005 έως 5 mm/min. Η συσκευή αδυνατεί να επιβάλλει έλεγχο των συνθηκών στράγγισης, η οποία γίνεται σε ατμοσφαιρική πίεση. Η επιλογή του επιβαλλόμενου ρυθμού μετατόπισης βασίζεται στη διαπερατότητα του εδαφικού υλικού έτσι ώστε να εξασφαλίζονται στραγγιζόμενες συνθήκες.

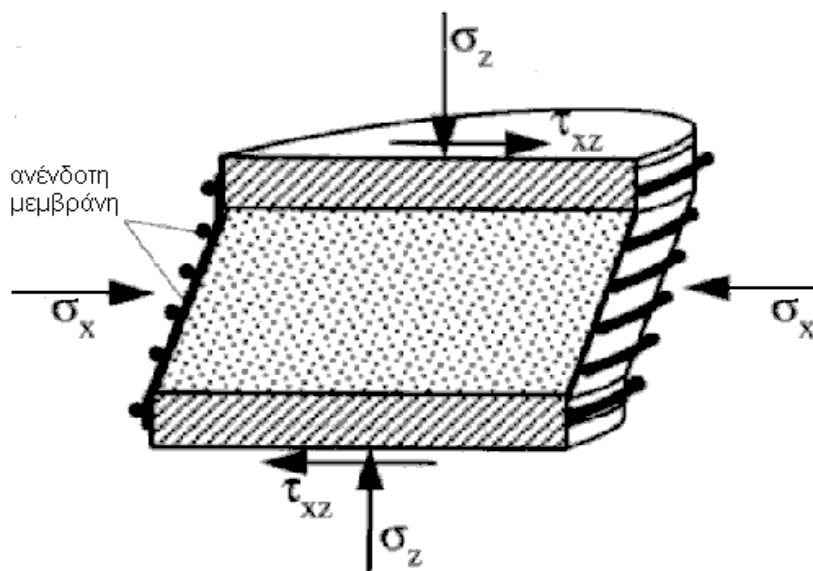
ΣΥΣΚΕΥΗ ΑΠΛΗΣ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ

Πλήθος πειραματικών διατάξεων έχουν σχεδιαστεί για την βελτίωση των χαρακτηριστικών της συσκευής απευθείας διάτμησης.(π.χ. ομοιόμορφη κατανομή τάσεων και παραμορφώσεων. Περιλαμβάνουν:

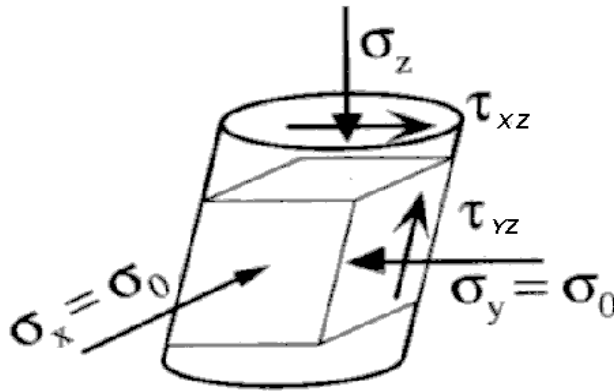
- τη συσκευή επίπεδης παραμόρφωσης του Cambridge

Η συσκευή χρησιμοποιεί άκαμπτες πλάκες και όργανα μέτρησης φορτίου για τον υπολογισμό των τάσεων στον πυρήνα του δοκιμίου

- τη συσκευή Geonor



Οι αρχές λειτουργίας της συσκευής απεικονίζονται στο Σχήμα. Η συσκευή χρησιμοποιεί σκληρές, άκαμπτες άνω και κάτω πλάκες και κυλινδρική μεμβράνη ενισχυμένη με σύρμα. Η παρουσία του σπυροειδούς σύρματος αποσκοπεί στην παρεμπόδιση των πλευρικών παραμορφώσεων και την ελεύθερη καθ' ύψος ή οριζόντια μετατόπιση του δοκιμίου σύμφωνα με τις απαιτήσεις της ομοιόμορφης διατμητικής παραμόρφωσης. Η πλευρική παραμόρφωση παρεμποδίζονταν στις προηγούμενες συσκευές από την παρουσία μεταλλικών δακτυλίων.



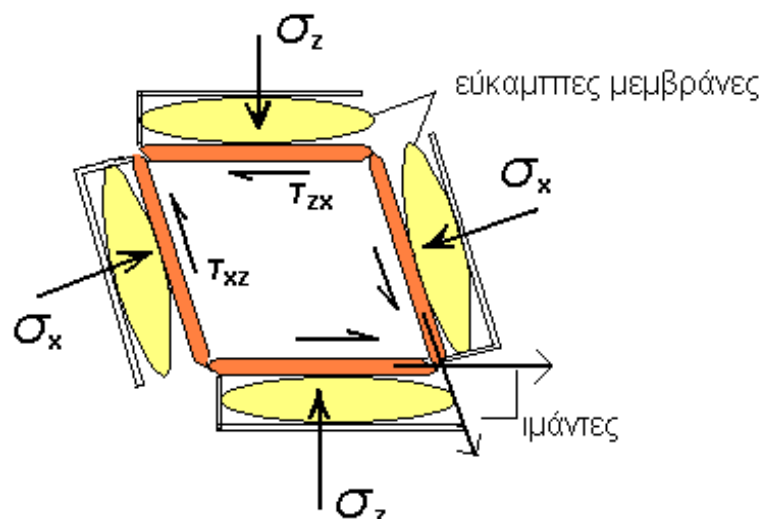
Εντατική κατάσταση δοκιμίου στη συσκευή απλής διάτμησης

Η συσκευή παρουσιάζει αδυναμία στον υπολογισμό των παραμέτρων K , a και b , ενώ απαιτούνται παραδοχές για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων. Δεν είναι δυνατή η επιβολή πραγματικών συνθηκών επίπεδης παραμόρφωσης. Κατά τη διάρκεια του πειράματος οι ορθές τάσεις διατηρούνται σταθερές ενώ αυξάνεται η διατμητική τάση. Πειράματα υποαστράγγιχτες συνθήκες μπορούν να εκτελεστούν μόνο με τη διατήρηση σταθερού ύψους δοκιμίου κατά τη διάτμηση.

Λόγω των μεγάλων ανομοιομορφων τάσεων η συσκευή δεν ενδείκνυται για την εκτέλεση πειραμάτων σε άμμους.

ΣΥΣΚΕΥΗ ΑΜΕΣΗΣ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ (Direction Shear Cell)

Στη συσκευή άμεσης διάτμησης του Σχήματος το κυβικό δοκίμιο περιβάλλεται από δύο άκαμπτες πλάκες και τέσσερις εύκαμπτες ελαστικές λωρίδες. Οι ορθές τάσεις σ_x και σ_z επιβάλλονται στο δοκίμιο μέσω εύκαμπτων μεμβρανών. Η διατμητική τάση επιβάλλεται στο δοκίμιο με έλξη των ελαστικών λωρίδων με τη βοήθεια ειδικών μάντων. Η ορθή παραμόρφωση στην κατεύθυνση y είναι μηδενική.



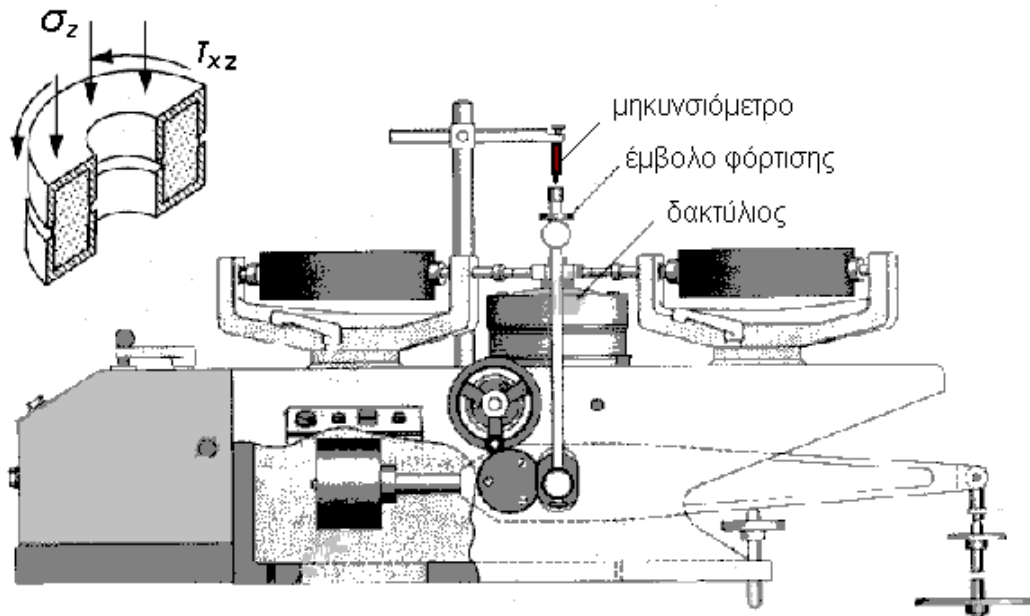
Η δυνατότητα ελέγχου των ορθών και των διατμητικών παραμορφώσεων επιτρέπει τον καθορισμό της διεύθυνσης των κυρίων τάσεων (δηλ. των παραμέτρων α = γωνία της μέγιστης κύριας τάσης με την κατακόρυφο, και b όπως περιγράφονται στη σελίδα 76). Στις προηγούμενες συσκευές διάτμησης ήταν αδύνατος ο υπολογισμός των παραμέτρων α και b αν και τα επίπεδα επιβολής τάσεων μεταβάλλονταν κατά τη διάρκεια των πειραμάτων.

Στη συσκευή αυτή δύνανται να καταγραφούν οι παραμορφώσεις με τη βοήθεια ακτίνων -x. Βέβαια η διακρίσιμότητα του μεγέθους στην κλίματα των μικρών παραμορφώσεων είναι σχετικά φτωχή. Όμως το φάσμα επιβολής τάσεων και ελέγχου και καταγραφής πίεσης πόρων της συσκευής είναι περιορισμένο.

ΣΥΣΚΕΥΕΣ ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΟΥ ΔΑΚΤΥΛΙΟΥ (Ring Shear)

Η ανάλυση πολλών περιπτώσεων αστοχίας πρανών υποδεικνύει ότι η γωνία αστοχίας είναι πολύ μικρότερη από τη γωνία που υπολογίζεται από πειράματα στη συσκευή απευθείας διάτμησης. Για την προσομοίωση μετατοπίσεων μεγάλου μεγέθους στην επιφάνεια αστοχίας, που συνήθως είναι της τάξης μέτρων και όχι χιλιοστών όπως οι μετατοπίσεις τις οποίες δύναται να επιβάλλει η συσκευή απευθείας διάτμησης, σχεδιάστηκε η συσκευή του Σχήματος που ακολουθεί.

Προσπάθειες επιβολής μεγάλων μετατοπίσεων με χρήση της συσκευής απευθείας διάτμησης επιβάλλοντας πολλαπλές διαδρομές (reversal shear tests) δεν οδηγούν συνήθως στον προσδιορισμό της παραμένουσας διατμητικής αντοχής των δοκιμίων.



Αντιθέτως, η συσκευή διατμητικού δακτυλίου επιτρέπει τη μέτρηση της παραμένουσας διατμητικής αντοχής σε διατμητική επιφάνεια που δημιουργείται στο εδαφικό δοκίμιο μακριά από τα άκαμπτα άκρα του. Στις συσκευές διατμητικού δακτυλίου μειώνεται η ανομοιομορφία των τάσεων με τη χρήση πολύ επιμήκων δοκιμίων. Συνήθεις διαστάσεις δοκιμίου είναι: εξωτερική διάμετρος 152mm, εσωτερική διάμετρος 102mm και ύψος 19mm.

Οι τάσεις και παραμορφώσεις που αναπτύσσονται στο δοκίμιο είναι ανομοιόμορφες τουλάχιστον μέχρι την ενεργοποίηση της παραμένουσας διατμητικής αντοχής αφενός διότι οι μετατοπίσεις είναι μεγαλύτερες στην εξωτερική από την εσωτερική επιφάνεια του δοκιμίου για την ίδια επιβαλλόμενη περιστροφή και αφετέρου στα άκρα του δοκιμίου υπάρχουν κατακόρυφες προεξοχές ύψους 2mm οι οποίες εισέρχονται στο δοκίμιο με σκοπό να απομακρύνουν την επιφάνεια αστοχίας από τα άκαμπτα άκρα.

Η ροπή που επιβάλλει τη διάτμηση στη συσκευή διατμητικού δακτυλίου μετράται με τη βοήθεια μετρητών φορτίου διατεταγμένων στο οριζόντιο επίπεδο. Το δοκίμιο συγκρατείται από ένα δακτύλιο ο οποίος αποτελείται από δύο τμήματα. Το μεταξύ τους κενό διασφαλίζει την απομάκρυνση του κινδύνου επαφής των μεταλλικών τμημάτων του δακτυλίου και συνεπώς τη διάτμηση μόνο του εδαφικού υλικού.

Τα άνω και κάτω άκρα είναι άκαμπτες πλάκες μέσω των οποίων επιβάλλεται το κατακόρυφο φορτίο στο δοκίμιο με σύστημα παρόμοιο αυτού της συσκευής απευθείας διάτμησης μέσω του εμβόλου φόρτισης πάνω στο οποίο τοποθετείται ο μετρητής της κατακόρυφης μετακίνησης του δοκιμίου.

Με τη βοήθεια της συσκευής διατμητικού δακτυλίου καταλήγουμε σε πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα όσον αφορά στον υπολογισμό μεγάλων μετατοπίσεων και παραμένουσας (residual) αντοχής δοκιμίων

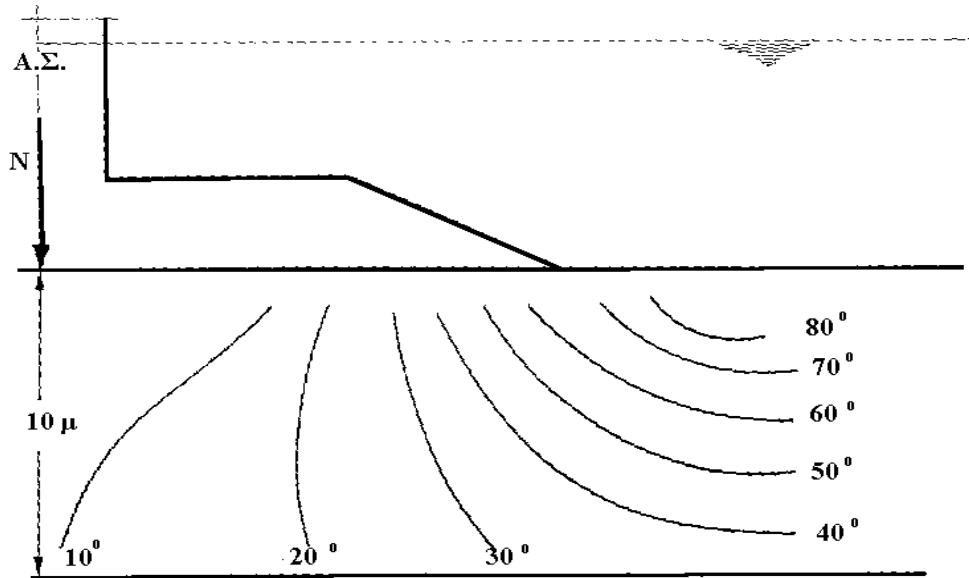
ΠΡΟΣΦΑΤΕΣ ΕΞΕΛΙΞΕΙΣ ΣΤΙΣ ΤΡΙΑΞΟΝΙΚΕΣ ΣΥΣΚΕΥΕΣ

Ανισότροπη Εδαφική Συμπεριφορά

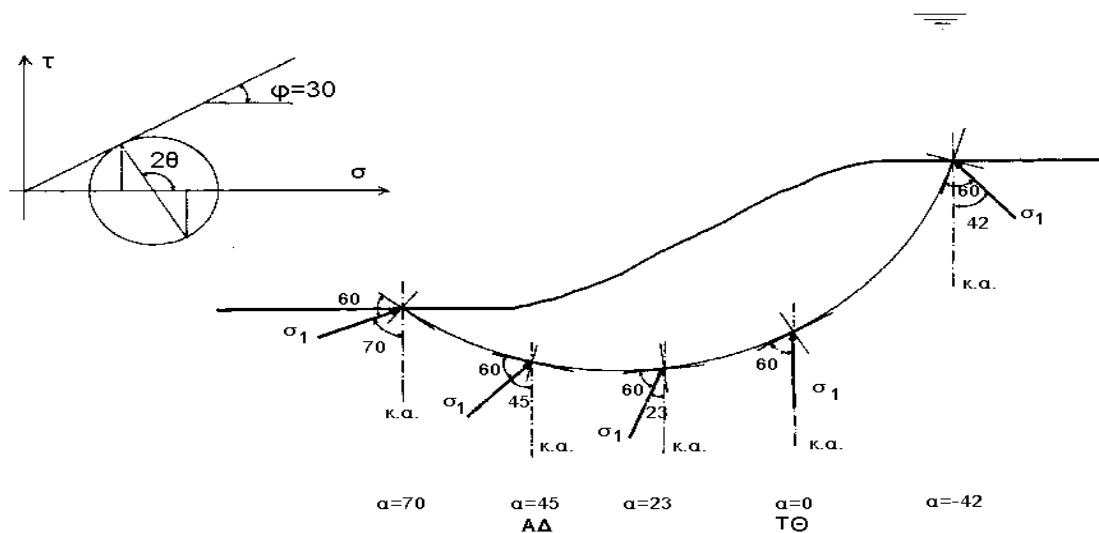
Σειρές πειραμάτων σε άμμους, ιλύες και ιλυώδεις άμμους έχουν δείξει ότι οι καμπύλες τάσεων-παραμορφώσεων και τα χαρακτηριστικά αντοχής των υλικών αυτών υποδηλώνουν έντονα ανισότροπη συμπεριφορά. Για παράδειγμα παρατηρείται σημαντική μείωση της αντοχής με αλλαγή της διεύθυνσης των κυρίων τάσεων. Ανισότροπη μεταβολή παρουσιάζει και η ακαμψία των υλικών αυτών με τη στροφή της διεύθυνσης των κύριων τάσεων. Ανισότροπη είναι και η συμπεριφορά των αργιλικών υλικών, σε μικρότερο όμως βαθμό από τα αμμώδη υλικά.

Η ανισότροπη συμπεριφορά του εδάφους αναγνωρίστηκε αρχικά από τις έρευνες του Νορβηγικού Γεωτεχνικού Ινστιτούτου (NGI) στις οποίες παρατηρήθηκε ότι η ευστάθεια πρανών εξαρτάται από διαφορετικές τιμές αντοχής κατά μήκος της επιφάνειας αστοχίας. Αρχικά θεωρήθηκε ότι η εντατική κατάσταση μεταβάλλεται από αξονική θλίψη κάτω από την επιφάνεια φόρτισης σε εφελκυσμό έξω από τη θεμελίωση και σε απλή διάτμηση στην ενδιάμεση περιοχή.

Όπως δείχνουν τα αποτελέσματα αριθμητικών αναλύσεων που περιλαμβάνονται στο ακόλουθο Σχήμα η γωνία της κύριας τάσης σ_1 προς την κατακόρυφο, α , μεταβάλλεται από 0° έως 90° κατά μήκος πιθανής επιφάνειας ολίσθησης κάτω από επιμήκη θεμελίωση. Μεταβολές της παραμέτρου της τάσης σ_2 και της παραμέτρου b είναι επίσης πιθανόν να αναπτυχθούν στο έδαφος θεμελίωσης.



Ο σχηματισμός φυσικών υποθαλάσσιων πρανών λόγω εναπόθεσης ή διάβρωσης οδηγεί σε στροφή των διευθύνσεων των κυρίων τάσεων. Η γωνία στροφής μεταβάλλεται κατά την αστοχία λόγω εξωτερικών διαταράξεων. Εκτίμηση της μεταβολής της γωνίας α για γωνία εσωτερικής τριβής $\phi'=30^\circ$ απεικονίζεται στο Σχήμα. Είναι φανερό ότι η ανισότροπη συμπεριφορά του εδάφους επηρεάζει σημαντικά την ευστάθεια του πρανούς.



Συσκευές Επιβολής Πραγματικών Τριαξονικών Συνθηκών

Ο ρόλος της στροφής των διευθύνσεων των κυρίων τάσεων είναι σημαντικός σε πολλές γεωτεχνικές εφαρμογές. Για την προσομοίωση αυτών των εντατικών καταστάσεων απαιτείται η χρήση συσκευών που επιτρέπουν την ανεξάρτητη μεταβολή των τριών κύριων τάσεων. Η ορολογία πραγματικών τριαξονικών συνθηκών αναφέρεται στην ανεξάρτητη μεταβολή των τριών κυρίων τάσεων σε αντιδιαστολή με την αξονοσυμμετρική μεταβολή των τριαξονικών συνθηκών κατά την οποία δύο από τις κύριες τάσεις είναι ίσες. Υπό πραγματικές τριαξονικές συνθήκες η τιμή της παραμέτρου α μεταβάλλεται μεταξύ 0° και 90° και η τιμή της παραμέτρου b μεταξύ 0 και 1.

Στις πλέον συνήθεις συσκευές επιβολής πραγματικών τριαξονικών συνθηκών περιλαμβάνονται :

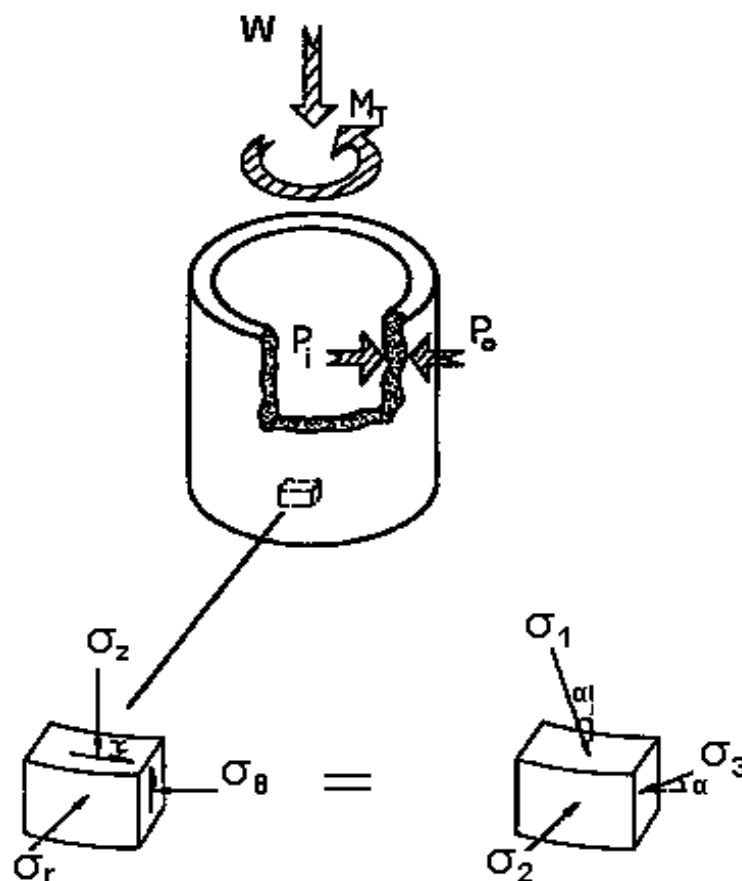
- διάταξη κυβικών δοκιμίων με έξι λείες άκαμπτες πλευρές
- διάταξη συνδυασμού άκαμπτων και εύκαμπτων άκρων ικανή να επιβάλλει στρεπτική διάτμηση σε κοίλο δοκίμιο
- διάταξη συνδυασμού άκαμπτων και εύκαμπτων άκρων ικανή να επιβάλλει διάτμηση σε κυβικό δοκίμιο υπό συνθήκες εμποδιζόμενης παραμόρφωσης στη μία διεύθυνση (συσκευή άμεσης διάτμησης)

ΔΟΚΙΜΗ ΣΤΡΕΠΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ ΚΟΙΛΟΥ ΔΟΚΙΜΙΟΥ

Η δοκιμή στρεπτικής διάτμησης σε κοίλο δοκίμιο προσομοιώνει τη στροφή των διευθύνσεων των κυρίων τάσεων με έλεγχο της παραμέτρου α μεταξύ των τιμών 0° και 90° . Επιπρόσθετα είναι δυνατή η ανεξάρτητη μεταβολή των τριών κύριων τάσεων και συνεπώς των τιμών της παραμέτρου b από 0 έως 1.

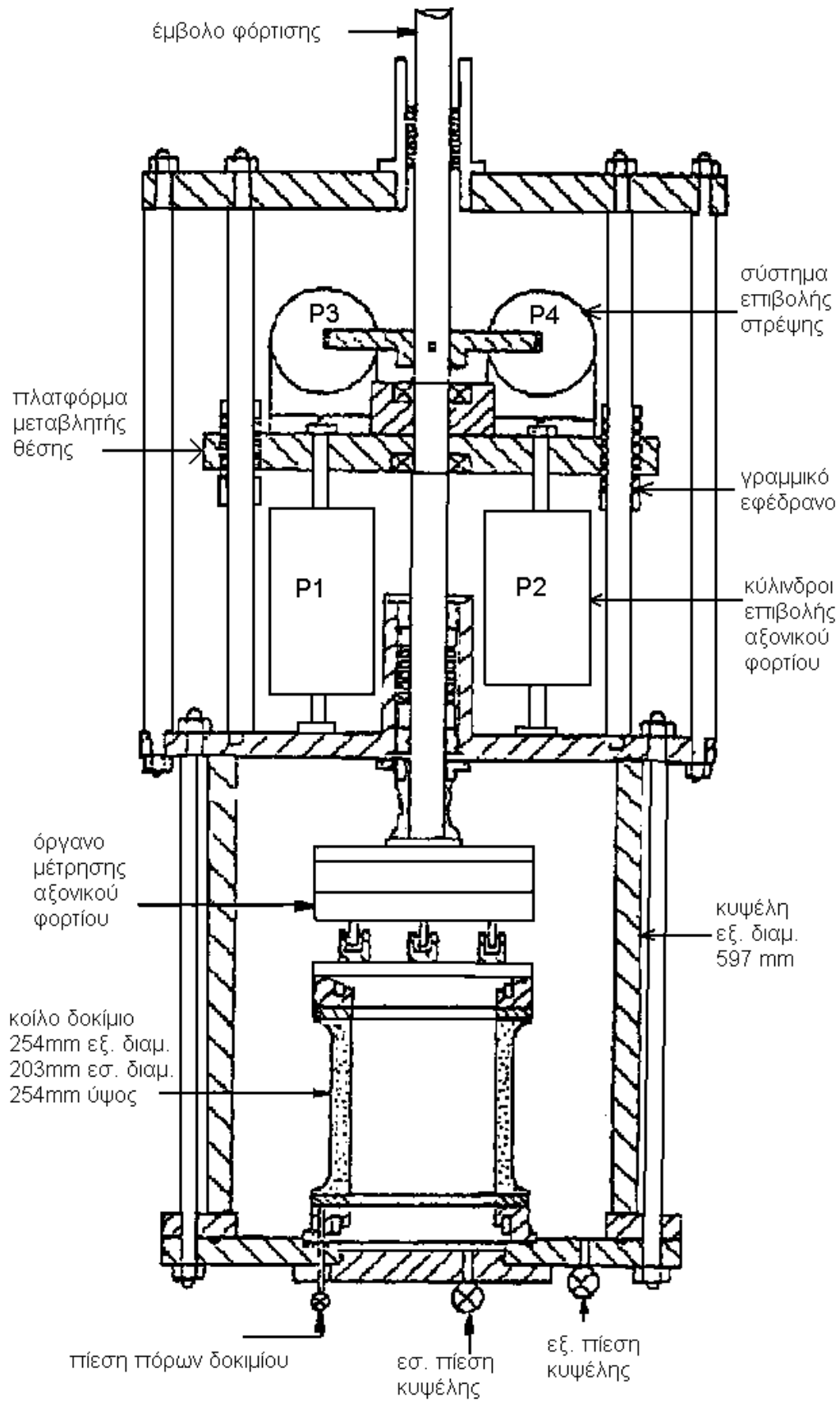
Ο έλεγχος των τάσεων πραγματοποιείται με τη μεταβολή του αξονικού φορτίου (W), της ροπής (M_T) και της εξωτερικής και εσωτερικής πίεσης (p_o , p_i) που επιβάλλονται

στο δοκίμιο, όπως φαίνεται στο Σχήμα. Αποτέλεσμα της παραπάνω φόρτισης είναι οι μέσες τιμές των τάσεων σ_z , σ_r , σ_θ , $\tau_{z\theta}$ να είναι ισοδύναμες με το σύστημα κύριων τάσεων του Σχήματος. Η επιβολή της φόρτισης σε κοίλα δοκίμια επιτυγχάνεται μέσω άκαμπτων άκρων (τ_{yz} , σ_z) και εύκαμπτων μεμβρανών (σ_r , σ_θ) όπως φαίνεται στο Σχήμα.



Ο έλεγχος της τάσης σ_2 είναι δυνατός με την ανεξάρτητη μεταβολή της επιβαλλόμενης εσωτερικής και εξωτερικής πίεσης. Με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται η ανομοιομορφία των τάσεων και η επιβολή πραγματικών τριαξονικών συνθηκών. Η ανομοιομορφία των τάσεων είναι δυνατόν να ελαχιστοποιηθεί με την επιλογή δοκιμίου κατάλληλης γεωμετρίας και με το σχεδιασμό κατάλληλων συνοριακών συνθηκών. Η καταγραφή παραμορφώσεων είναι δύσκολη.

Γενική διάταξη της συσκευής κοίλου δοκιμίου περιλαμβάνεται στο ακόλουθο Σχήμα.



Πρέπει να τονιστεί ότι η συσκευή δεν είναι κατάλληλη για πειράματα όπου αναμένονται μεγάλες παραμορφώσεις.

Η ιδανική πειραματική συσκευή δύναται να ελέγχει την επιρροή έξι ανεξάρτητων μεγεθών στο δοκίμιο π.χ. έξι συνιστωσών τάσης σε τρία ορθόγωνα μεταξύ τους επίπεδα. Όμως μέχρι σήμερα καμμία πειραματική συσκευή δεν δύναται να επιβάλλει παρόμοια τασική κατάσταση στο δοκίμιο. Η δοκιμή στρεπτικής διάτμησης σε κοίλο δοκίμιο επιτρέπει την επιβολή στο δοκίμιο ενός εκ των πλέον γενικευμένων τασικών πεδίων. Μέσω της δοκιμής δύναται να ελεγχθούν μέχρι και τέσσερις ανεξάρτητες παράμετροι, με μειονέκτημα την δημιουργία ακτινικών παρεκκλίσεων της διατμητικής παραμόρφωσης. Η δοκιμή χρησιμοποιεί μικτές συνοριακές συνθήκες με αποτέλεσμα την αβεβαιότητα στην ομοιομορφία των παραμορφώσεων κάθετα στην μεμβράνη και την ομοιομορφία των τάσεων κάθετα στις πλάκες. Επομένως είναι απαραίτητη η χρήση οργάνων καταγραφής παραμορφώσεων τοπικά σε τμήματα του δοκιμίου όπου οι συνθήκες είναι όσο το δυνατόν ομοιόμορφες.

ΜΕΤΡΗΣΗ ΕΛΑΦΙΚΗΣ ΑΚΑΜΨΙΑΣ (ΔΥΣΤΜΗΣΙΑΣ)

Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι για τον υπολογισμό των μετακινήσεων που παρατηρούνται κατά τη διάρκεια έργων εκσκαφής ή θεμελίωσης. Συχνά το έδαφος θεωρείται ως ένα γραμμικό και ελαστικό μέσο και έχουν προταθεί διάφορες μέθοδοι για την επίλυση τυπικών γεωτεχνικών προβλημάτων (Poulos & Davis, 1974) με βάση αυτήν την παραδοχή. Οι ανωτέρω μέθοδοι προϋποθέτουν την χρήση της αρχής της επαλληλίας και συνεπώς εφαρμόζονται μόνο σε γραμμικά ελαστικά μέσα. Βέβαια για την επίλυση γεωτεχνικών προβλημάτων μπορεί να γίνει χρήση και αριθμητικών μεθόδων με γνωστότερη τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.

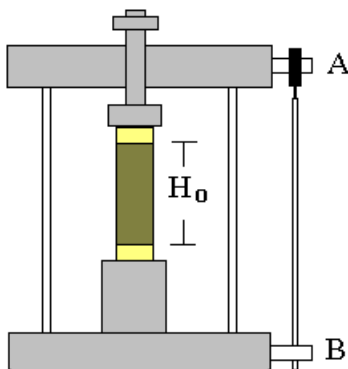
Στις αριθμητικές μεθόδους το έδαφος δεν θεωρείται απαραίτητα ως γραμμικό και ελαστικό μέσο και χρησιμοποιούνται διάφορα προσομοιώματα για την περιγραφή των σχέσεων τάσεων-παραμορφώσεων εδαφικών και βραχωδών υλικών. Στα προσομοιώματα αυτά, η μηχανική συμπεριφορά των εδαφικών υλικών χαρακτηρίζεται από τη φάση της διαρροής και τη φάση πλαστικής ή ψαθυρής αστοχίας, αλλά συνήθως το έδαφος θεωρείται γραμμικό ελαστικό για το φάσμα των μικρών παραμορφώσεων που αναπτύσσονται κατά τη διάρκεια των κατασκευών. Σε μερικές αναλύσεις (Duncan & Chang, 1970, Jardine et al, 1986) η συμπεριφορά του εδάφους θεωρείται μη-γραμμική ελαστική.

Όμως τα αποτελέσματα πειραματικών δοκιμών στο εργαστήριο δείχνουν σαφώς ότι οι σχέσεις τάσεων-παραμορφώσεων είναι έντονα μη-γραμμικές για ευρύ φάσμα εδαφικών υλικών που περιλαμβάνει σκληρά προφορτισμένα εδάφη και μαλακούς

βράχους. Οι εργαστηριακές δοκιμές δείχνουν ότι η ακαμψία αυτών των εδαφικών υλικών μειώνεται σημαντικά (τουλάχιστον κατά 10 φορές) στην περιοχή των παραμορφώσεων που αναπτύσσονται στις πρακτικές εφαρμογές. Η αναγνώριση της έντονα μη-γραμμικής ακαμψίας του εδάφους έχει σημαντικές επιπτώσεις στην επιλογή των επιτόπου και εργαστηριακών δοκιμών που απαιτούνται για τον προσδιορισμό των παραμέτρων ακαμψίας.

Κατά την εκτέλεση όλων των επιτόπου δοκιμών εφαρμόζονται ανομοιογενείς τάσεις στο έδαφος. Για παράδειγμα στη δοκιμή πρεσσιομέτρου οι τάσεις στο δοκίμιο μειώνονται με την απομάκρυνση από το όργανο. Καθώς η στιγμιαία ακαμψία του εδάφους είναι επίσης ανομοιόμορφη είναι δύσκολο να εξαχθεί η βασική μη-γραμμική σχέση τάσεων-παραμορφώσεων από επιτόπου δοκιμές χωρίς πρόσθετα στοιχεία. Οι μόνες δοκιμές που μπορούν να εξασφαλίσουν τις αναγκαίες πληροφορίες για τον προσδιορισμό των μη-γραμμικών χαρακτηριστικών των εδαφικών υλικών είναι τα πειράματα στο εργαστήριο όπου οι τάσεις και οι παραμορφώσεις κατανέμονται ομοιόμορφα στο εδαφικό δοκίμιο.

Η συνηθέστερη εργαστηριακή δοκιμή είναι η τριαξονική δοκιμή θλίψης ή εφελκυσμού σε κυλινδρικό δοκίμιο. Οι εξελιγμένες τριαξονικές συσκευές επιτρέπουν τον αυτόματο ανεξάρτητο έλεγχο των αξονικών και πλευρικών τάσεων ή και παραμορφώσεων με αποτέλεσμα τη δυνατότητα επιβολής πλήθους διαδρομών τάσεων κατά τη διάρκεια του πειράματος. Οι διαδρομές τάσεων με τη σειρά τους προσομοιώνουν τις συνθήκες φόρτισης και αποφόρτισης στο έδαφος κατά τη διάρκεια των διαφόρων φάσεων της κατασκευής του έργου .



ΣΧΗΜΑ 1 : Μέτρηση αξονικής παραμόρφωσης έξω από την τριαξονική κυψέλη.

Η ανάγκη για εξακρίβωση και προσδιορισμό της μη-γραμμικής εδαφικής συμπεριφοράς έχει σημαντική επίπτωση στην επιλογή των κατάλληλων οργάνων για τη μέτρηση των παραμορφώσεων κατά τη διάρκεια των εργαστηριακών δοκιμών. Συνήθως για τον προσδιορισμό των παραμορφώσεων του δοκιμίου, μετράται η μεταβολή του μήκους του δοκιμίου, έξω από την τριαξονική κυψέλη, με τη χρήση μετρητού της σχετικής μετακίνησης των άκαμπτων άκρων του δοκιμίου όπως φαίνεται στο Σχήμα 1. Η ακρίβεια αυτών των μετρήσεων είναι περιορισμένη λόγω των ακόλουθων εγγενών προβλημάτων:

- Μεταβολή της απόστασης AB λόγω παραμορφωσιμότητας της συσκευής π.χ. συμπίεση της μονάδας μέτρησης φορτίου, της κυψέλης, του υλικού των άκρων του δοκιμίου, του εμβόλου κ.λπ.
- κλίση του δοκιμίου
- ατελής επαφή δοκιμίου και άκρων
- ανομοιόμορφη κατανομή παραμορφώσεων λόγω των συνοριακών συνθηκών που επιβάλλουν τα άκαμπτα και τραχέα άκρα
- δημιουργία επιφάνειας αστοχίας στο δοκίμιο.

Τα προβλήματα αυτά δύνανται να περιορισθούν, όμως ο αποκλεισμός τους δεν είναι δυνατός. Για παράδειγμα η χρήση λείων άκαμπτων άκρων υποβοηθά την ομοιόμορφη κατανομή των παραμορφώσεων αλλά αυξάνει τα σφάλματα στις μετρήσεις των μετακινήσεων λόγω κακής επαφής δοκιμίου-άκρων (παρουσία λιπαντικού).

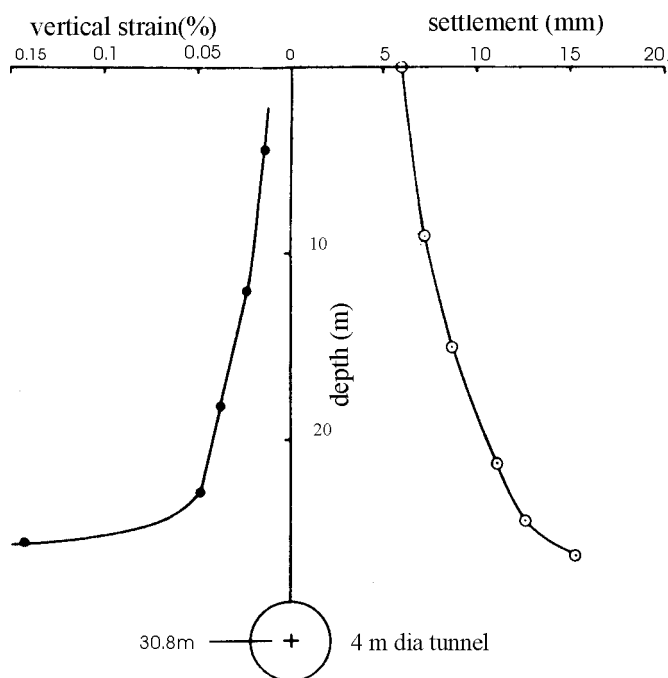
Επίσης, η δημιουργία στα άκρα του δοκιμίου ζωνών που υπόκεινται σε αλλοίωση, όπως για παράδειγμα κατά την τοποθέτηση δοκιμίων στιφρών αργιλικών υλικών στην πειραματική συσκευή, μπορεί να οδηγήσει σε υποεκτίμηση της ακαμψίας τους.

Για τους ανωτέρω λόγους είναι βασικό να μετράται η παραμόρφωση μέσα στην κυψέλη, επί του δοκιμίου και στο κεντρικό τμήμα του το οποίο είναι σχετικά απαλλαγμένο από την επιρροή των άκρων. Ο όρος επί του δοκιμίου εξ' ορισμού αναφέρεται στην τοποθέτηση των οργάνων μέτρησης σε ένα συγκεκριμένο μήκος του δοκιμίου με στόχο τον περιορισμό των ανωτέρω λαθών κατά τη μέτρηση της

παραμόρφωσής του. Όπως έχει παρατηρηθεί (Jardine et al, 1984, και Burland, 1989), η μέτρηση της ακαμψίας (δυστησιότητας) διαφόρων στιφρών εδαφικών υλικών έξω από την κυνέλη υποεκτιμά σημαντικά τη μετρούμενη ακαμψία των υλικών για παραμορφώσεις μικρότερες του 0.1%.

Εκτίμηση εδαφικών παραμορφώσεων σε γεωτεχνικές κατασκευές

Ήδη από τη δεκαετία του 1970 τα αποτελέσματα επιτόπου δοκιμών υποδεικνύουν πολύ μικρές τιμές εδαφικών παραμορφώσεων για διάφορες κατασκευές. Ο προσδιορισμός της παραμόρφωσης στο έδαφος προϋποθέτει τη μέτρηση της σχετικής μετακίνησης π.χ. κατά μήκος μηκυνσιομέτρου γεώτρησης (borehole extensometer).



ΣΧΗΜΑ 2: Τιμές καθιζήσεων και παραμορφώσεων πάνω από τον άξονα σήραγγας (Attewell & Farmer, 1974).

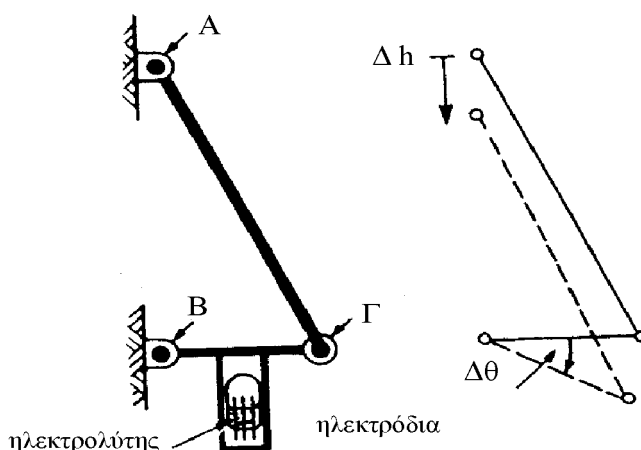
Στο Σχήμα 2 φαίνονται οι τιμές καθιζήσεων που μετρήθηκαν σε διαφορετικά βάθη πάνω από τον άξονα σήραγγας. Οι καθιζήσεις έχουν μετατραπεί σε μέσες τιμές παραμορφώσεων. Όπως φαίνεται στο σχήμα μόνο στη στέψη της σήραγγας και για απόσταση περίπου ίση με τη διάμετρό της πάνω από τη στέψη οι κατακόρυφες

παραμορφώσεις ξεπερνούν το 0.1%. Στο μεγαλύτερο τμήμα του εδάφους αναπτύσσονται παραμορφώσεις της τάξης του 0.05% ή και μικρότερες. Στην περίπτωση θεμελιώσεων κατασκευών που επιβάλλουν μεγάλες τάσεις στο έδαφος μόνον τοπικά οι παραμορφώσεις ξεπερνούν το 0.1%.

Φαίνεται λοιπόν ότι τα υποκείμενα και παράπλευρα εδάφη μίας κατασκευής, λόγω της θεμελίωσης ή εκσκαφής υπό συνήθεις συνθήκες φόρτισης, υποβάλλονται σε παραμορφώσεις μικρότερες του 0.1% και μόνον τοπικά οι παραμορφώσεις είναι αυξημένες. Η πρόβλεψη των καθιζήσεων και της κατανομής των τάσεων στο έδαφος που υποβάλλεται σε φόρτιση ή αποφόρτιση απαιτεί τον προσδιορισμό της εδαφικής δυστησίας για μεγάλο εύρος παραμορφώσεων. Πρέπει όμως να διασφαλίζεται η δυνατότητα καταγραφής παραμορφώσεων μικρότερων του 0.01%. Ο ρόλος των μικρών παραμορφώσεων είναι σημαντικός και για τη μελέτη της συμπεριφοράς του εδάφους σε δυναμικές καταπονήσεις (Γκαζέτας, 1997).

Εργαστηριακή μέτρηση της εδαφικής δυστησίας

Κατά την τελευταία δεκαετία η ακριβής μέτρηση της εδαφικής δυστησίας στην

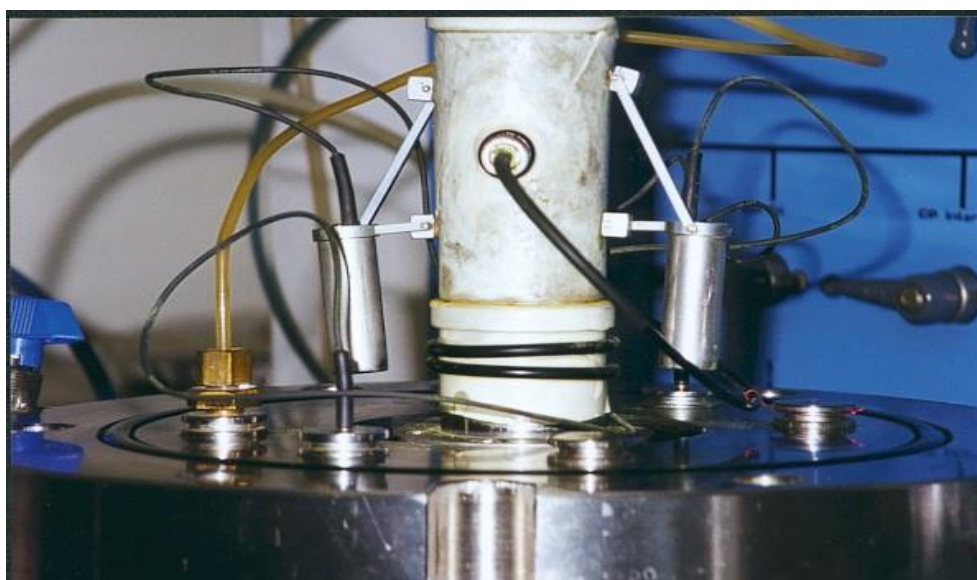


ΣΧΗΜΑ 3: Αρχή λειτουργίας ηλεκτρολυτικού αισθητήρα (Burland & Symes, 1982).

περιοχή των μικρών παραμορφώσεων απετέλεσε θέμα έρευνας στα εργαστήρια εδαφομηχανικής. Αρχικά μικροσκοπικοί μετρητές μετακίνησης χρησιμοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό της σχετικής μετακίνησης μεταξύ δύο σημείων αναφοράς επί του δοκιμίου (Costa Filho & Vaughan, 1980).

Οι Burland & Symes, 1982, και Jardine et al, 1984, πέτυχαν τη μέτρηση αξονικής παραμόρφωσης δοκιμίων για εύρος μεταξύ 10^{-3} % και 10%. Οι μετρητές χρησιμοποιούν ηλεκτρολυτικό αισθητήρα .

Ο ηλεκτρολυτικός αισθητήρας αποτελείται από γυάλινη κάψα που περιέχει ηλεκτρολυτικό υγρό. Η κάψα κατασκευάζεται με ειδική τεχνική σε κενό αέρος. Τρία ανεξάρτητα ηλεκτρόδια τοποθετούνται μέσα στην κάψα και καλύπτονται μερικώς από ηλεκτρολυτικό υγρό. Η αντίσταση μεταξύ του μεσαίου και των ακραίων ηλεκτροδίων είναι ανάλογη με την κλίση της κάψας. Η αρχή λειτουργίας του οργάνου βασίζεται στη μετατροπή της μεταβολής του ύψους Δh σε μεταβολή κλίσης $\Delta \theta$ όπως φαίνεται στο Σχήμα 3. Με τα όργανα αυτά επιτυγχάνεται διακριτότητα της τάξης του $1\mu\text{m}$ για μετακίνηση έως και 15 mm. Στην Εικόνα 1 φαίνονται τα ανωτέρω όργανα επί του δοκιμίου στο τέλος του



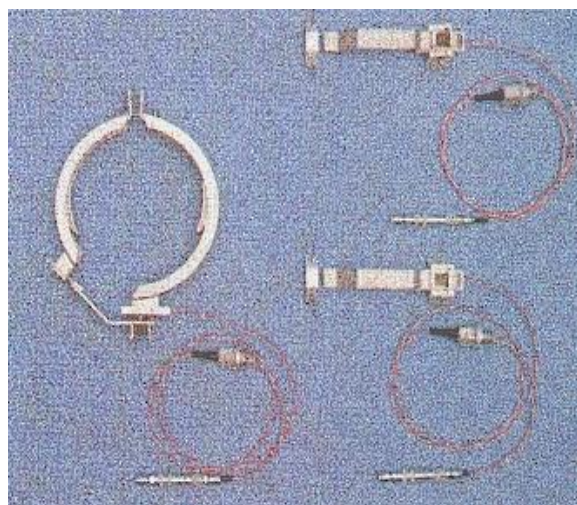
ΕΙΚΟΝΑ 1: Όργανα ηλεκτρολυτικού αισθητήρα για την μέτρηση της αξονικής παραμόρφωσης επί του δοκιμίου.

πειράματος όπως υποδεικνύει η επιφάνεια αστοχίας του δοκιμίου.

Ένα νέο όργανο που βασίζει τη λειτουργία του στη χρήση ημιαγωγών και μαγνητικού πεδίου (Hall effect local strain device) κατασκευάστηκε στα τέλη της



EIKONA 2: Μέτρησις επί του δικιμίου.



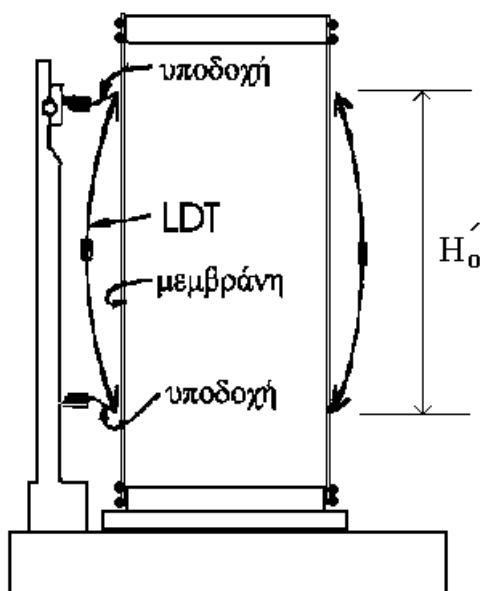
EIKONA 3: Μετρητές παραμόρφωσης.

δεκαετίας του 90 (Clayton et al, 1989). Όπως φαίνεται στις Εικόνες 2 και 3 ένας ταλαντωτής ανηρημένος απο ελατήριο συγκρατεί ένα μαγνήτη και εδράζεται στο πάνω τμήμα του δοκιμίου. Το κάτω τμήμα του οργάνου αποτελείται από μεταλλικό υποδοχέα που περικλείει τον ημιαγωγό κατάλληλα προστατευμένο σε εποξειδική ρητίνη.

Όταν ο ημιαγωγός, τον οποίο διαπερνά ηλεκτρικό ρεύμα, τοποθετηθεί σε μαγνητικό πεδίο δημιουργείται διαφορά δυναμικού η οποία μεταβάλλεται γραμμικά με την ένταση του μαγνητικού πεδίου. Στην ίδια σειρά φωτογραφιών παρουσιάζεται ένας δακτύλιος παρόμοιος με εκείνον που σχεδιάστηκε απο τους Bishop & Henkel το 1962, για τη μέτρηση της ακτινικής παραμόρφωσης του δοκιμίου. Ο δακτύλιος στηρίζεται σε δύο αντιδιαμετρικά σημεία και αποτελείται από δύο τμήματα με κοινή

άρθρωση που αφήνουν ένα άνοιγμα. Ένας μετρητής τύπου Hall effect μετράει την απόσταση των δύο άκρων του ανοίγματος.

Πρόσφατα αναπτύχθηκε στην Ιαπωνία (Goto et al, 1991) μετρητής τοπικών παραμορφώσεων (LDT) ο οποίος καλύπτει εύρος παραμορφώσεων από 10^{-4} (%) έως 1(%). Η λειτουργία του βασίζεται στη χρήση τεσσάρων μετρητών παραμόρφωσης (strain gauges) δύο σε κάθε πλευρά του δοκιμίου οι οποίοι επικολλώνται στο κέντρο μίας μεταλλικής λωρίδας όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 4. Το μήκος της λωρίδας είναι τέτοιο ώστε όταν η λωρίδα τοποθετείται στις μόνιμες υποδοχές ισορροπεί υπό την επίδραση του δικού της ελαστικού φορτίου.



ΣΧΗΜΑ 4: Μετρητής παραμόρφωσης επί του δοκιμίου (Goto et al,1991).

Η αρχή λειτουργίας του μετρητή βασίζεται στη μεταβολή της απόστασης μεταξύ των υποδοχών, όταν το δοκίμιο παραμορφώνεται. Η μεταβολή της απόστασης δημιουργεί καμπτική παραμόρφωση τόσο της μεταλλικής λωρίδας όσο και των μετρητών που εδράζονται στο μέσον της. Η παραμόρφωση αυτή συνδέεται με τη σχετική μετατόπιση των υποδοχών.

Η σχετική μετατόπιση ανηγμένη στο αρχικό μήκος του μετρητή προσδιορίζει την τοπική αξονική παραμόρφωση. Η αξονική παραμόρφωση του δοκιμίου είναι ο μέσος όρος των μετρήσεων των δύο αντιδιαμετρικά τοποθετημένων LDTs. Οι Goto et al, 1991, αναφέρουν ότι με τους ανωτέρω μετρητές καταγράφηκε δυστησία στιφρών αργίλων τουλάχιστον διπλάσια της δυστησίας που μετρήθηκε με συμβατικά εξωτερικά όργανα μέτρησης παραμορφώσεων.

Ας σημειωθεί ότι, ενώ συμβατικά η παραμόρφωση του δοκιμίου ορίζεται σαν $\varepsilon_z = \Delta H/H_0$ όπου ΔH είναι η μετακίνηση που μετράται με το μετρητή έξω από την κυψέλη (Σχήμα 1) και H_0 είναι το αρχικό ύψος του δοκιμίου, η επί του δοκιμίου μετρούμενη παραμόρφωση ορίζεται σαν $\varepsilon_z' = \Delta H'/H_0'$ όπου $\Delta H'$ είναι η τοπικά μετρούμενη μετακίνηση και H_0' είναι το αρχικό μήκος του οργάνου που τοποθετείται στο δοκίμιο (Σχήμα 4).

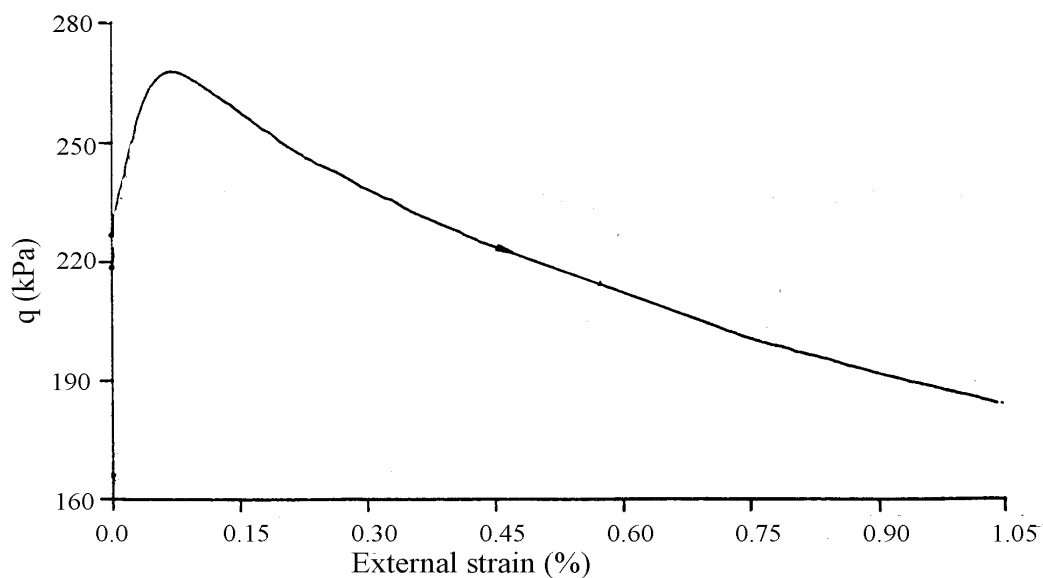
Εκτός των ανωτέρω οργάνων η μέτρηση της δυστησίας σε πολύ μικρές παραμορφώσεις μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση δυναμικών τεχνικών όπου η διατμητική παραμόρφωση σχετίζεται με την ταχύτητα των διατμητικών κυμάτων (Richart et al, 1970).

Η ΦΥΣΗ ΤΗΣ ΕΔΑΦΙΚΗΣ ΔΥΣΤΗΣΙΑΣ

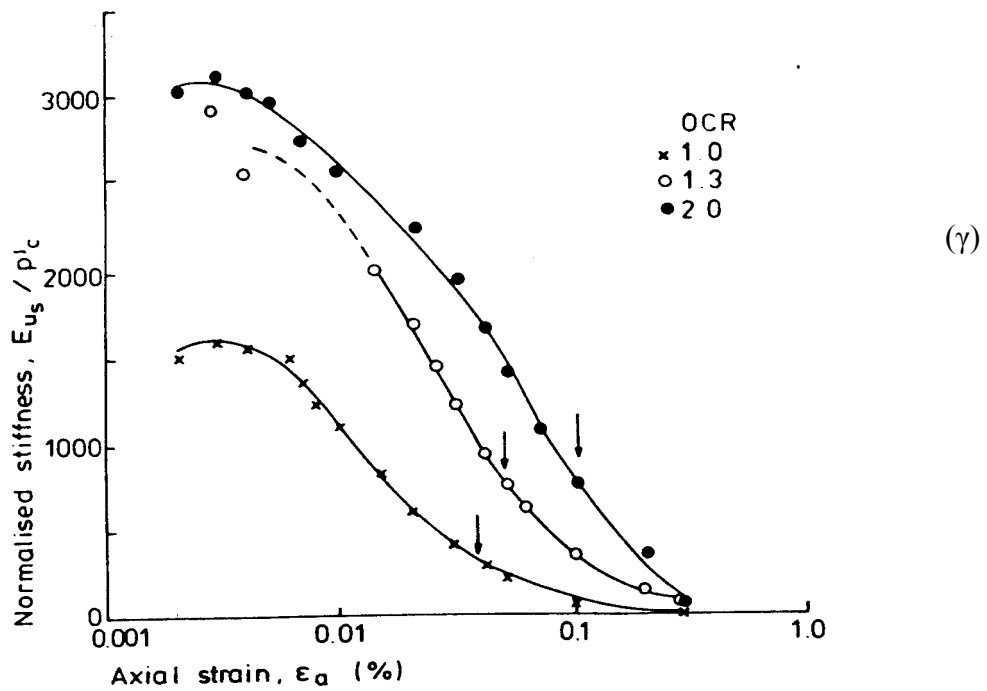
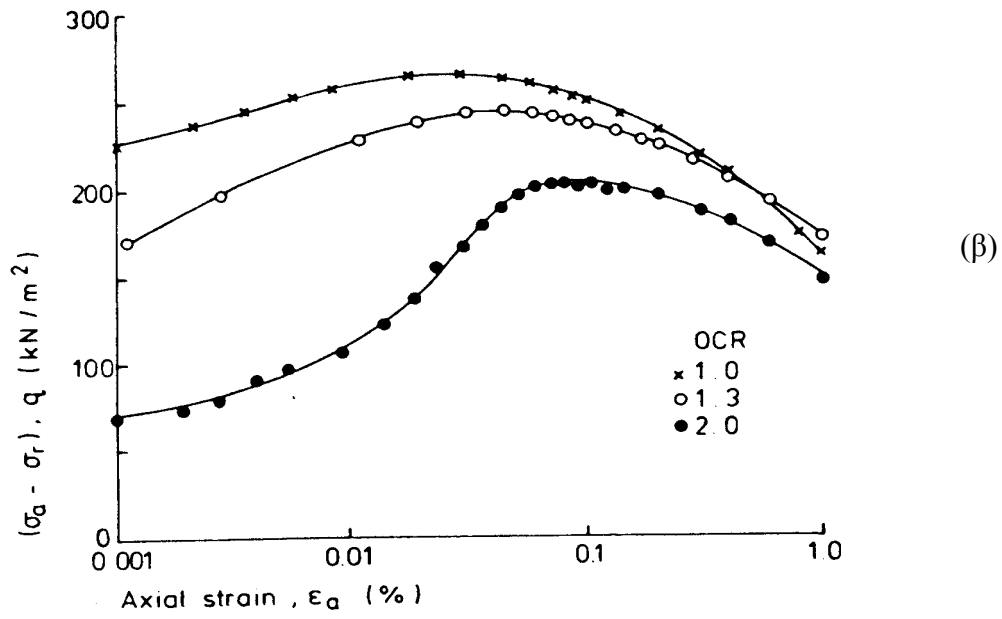
Η δυστησία του εδάφους ή του βράχου, όπως και η αντοχή του, επηρεάζεται από την παρούσα εντατική κατάσταση που περιγράφεται από το τασικό πεδίο και τη φυσική υγρασία του υλικού, την ιστορία των τάσεων που έχουν επιβληθεί στο υλικό στο παρελθόν που περιγράφεται από το λόγο προφόρτισης, OCR, τη γεωλογική προϊστορία που περιλαμβάνει σιμέντωση και αποσάθρωση και τέλος από τη διαδρομή τάσεων που ακολουθείται.

Σύγχρονες ερευνητικές μελέτες έχουν δείξει ότι η δυστημσία του εδαφικού υλικού εξαρτάται σε σημαντικό βαθμό από την πρόσφατη ιστορία φόρτισης όπως περιγράφεται από τις πρόσφατες και την παρούσα διαδρομή τάσεων και από το χρόνο ηρεμίας πριν την εφαρμογή μίας νέας διαδρομής τάσεων. Τέλος σημαντικός είναι ο ρόλος του ρυθμού μεταβολής της τάσης ή της παραμόρφωσης που επιβάλλεται μετά μία περίοδο ηρεμίας και είναι αυτό ακριβώς το μέγεθος το οποίο επηρεάζει το βαθμό μη-γραμμικής συμπεριφοράς του υλικού.

Τυπικές καμπύλες τάσεων-παραμορφώσεων για αμμώδη υλικά περιλαμβάνονται στο Σχήμα 5(α). Το δοκίμιο στερεοποιήθηκε ανισότροπα υπό συνθήκες K_0 , υπό τη δράση μέσης ενεργού τάσης $p' = (\sigma_a' + 2\sigma_r')/3$ στην τριαξονική συσκευή και στη συνέχεια



(α)



ΣΧΗΜΑ 5: Χαρακτηριστικά δυστημσίας αμμωδών υλικών: (α) τυπική καμπύλη τάσεων-παραμορφώσεων, (β) επίδραση OCR στις καμπύλες τάσεων-παραμορφώσεων και (γ) μεταβολή εδαφικής δυστημσίας με την παραμόρφωση.

φορτίστηκε σε θλίψη $\Delta\sigma_r=0$, $\Delta\sigma_a>0$, υπό αστράγγιστες συνθήκες. Η δοκιμή εκτελέστηκε σε τριαξονική συσκευή Bishop & Wesley, 1975. Οι αξονικές παραμορφώσεις μετρήθηκαν επί του δοκιμίου με μετρητές ηλεκτρολυτικού αισθητήρα του Imperial College, (Burland & Symes, 1982). Η ακρίβεια των μετρήσεων των αξονικών παραμορφώσεων στο πείραμα ήταν 0.002%. Στο Σχήμα 5(α) η μεταβολή της διαφοράς των κυρίων τάσεων, $q=\sigma_a-\sigma_r$, ως προς την παραμόρφωση, ε_a , είναι μη-γραμμική. Είναι όμως δύσκολο να εκτιμηθεί η αλλαγή συμπεριφοράς στις μικρές παραμορφώσεις.

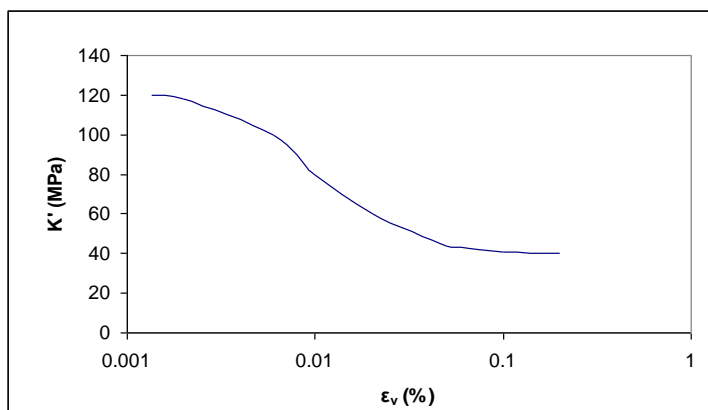
Τα μη-γραμμικά χαρακτηριστικά των εδαφικών υλικών μπορούν να εξετασθούν ευκολότερα σχεδιάζοντας την καμπύλη τάσεων-παραμορφώσεων χρησιμοποιώντας για τις παραμορφώσεις λογαριθμική κλίμακα όπως φαίνεται στο Σχήμα 5(β). Η δυστημήςία υπό αστράγγιστες συνθήκες ορίζεται ως ο λόγος $E_u=\Delta q/\Delta\varepsilon_a$ θεωρώντας ότι η διαφορά των κυρίων τάσεων, q , μεταβάλλεται γραμμικά από την αρχή των αξόνων έως την αντίστοιχη τιμή παραμόρφωσης (τέμνον μέτρο δυσκαμψίας).

Στο Σχήμα 5(γ) η δυστημήςία έχει κανονικοποιηθεί ως προς τη μέση ενεργό τάση στο τέλος της στερεοποίησης για να απαλειφθεί η επιρροή της μέσης ενεργού τάσης. Η συμπεριφορά του υλικού είναι έντονα μη-γραμμική όπως δηλώνεται από τις μεγάλες μεταβολές του μέτρου δυστημήςίας E_u/p'_c για μικρές μεταβολές της παραμόρφωσης π.χ. $E_u/p'_c=1100$ για $\varepsilon_a=0.01\%$ και $E_u/p'_c=400$ για $\varepsilon_a=0.05\%$ και για το κανονικώς φορτισμένο υλικό.

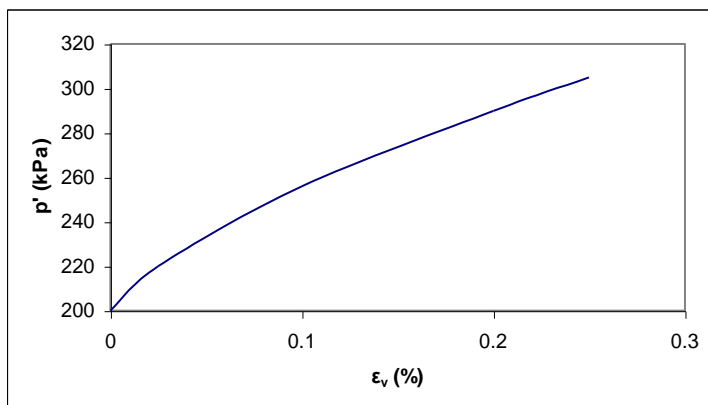
Ο λόγος των τιμών δυστημήςίας για δύο χαρακτηριστικές τιμές παραμόρφωσης είναι μία έκφραση του βαθμού μη γραμμικότητας των εδαφικών υλικών π.χ. $L=E_u(0.1\%)/E_u(0.01\%)$. Στο ίδιο σχήμα φαίνεται και ο ρόλος της ιστορίας φόρτισης του υλικού και συγκεκριμένα του λόγου προφόρτισης. Για $OCR = 2$ η κανονικοποιημένη δυστημήςία είναι περίπου διπλάσια από την δυστημήςία του κανονικώς φορτισμένου δοκιμίου. Για κάθε τιμή του OCR παρατηρείται μείωση της δυστημήςίας με την αύξηση της παραμόρφωσης.

Η δυστημσία μπορεί να ορισθεί και ως η εφαπτομένη στην αρχή της καμπύλης τάσεων παραμορφώσεων $E_s=dq/de_a$ και η τιμή αυτή αποτελεί το εφαπτομενικό μέτρο δυστημσίας.

Μη-γραμμική συμπεριφορά παρατηρείται και κατά τη διάρκεια της επιβολής διαφορετικών διαδρομών τάσεων στο δοκίμιο όπως η κλασσική τριαξονική δοκιμή θλίψης $\Delta\sigma_r' = 0, \Delta\sigma_a' > 0$ υπό στραγγιζόμενες συνθήκες, ή η φόρτιση σε θλίψη στην τριαξονική δοκιμή με διατήρηση της μέσης ενεργού τάσης p' σταθερής. Η μέση ενεργός τάση διατηρείται σταθερή με συνεχή μείωση της πίεσης της κυψέλης σ_r'



(α)



(β)

ΣΧΗΜΑ 6: Δυστημσία φυσικής αργίλου London Clay (α) καμπύλη τάσεων παραμορφώσεων, (β) μεταβολή του μέτρου K ως προς το λογάριθμο της ογκομετρικής παραμόρφωσης ε_v .

καθώς η αξονική τάση σ_a' αυξάνεται. Από τα αποτελέσματα φόρτισης σε θλίψη με διατήρηση σταθερής p' είναι δυνατός ο προσδιορισμός της διατμητικής ακαμψίας G' . Η καμπύλη τάσεων παραμορφώσεων σχεδιάζεται σε άξονες $q=\sigma_a-\sigma_r$ και $\varepsilon_s=2/3 (\varepsilon_a-\varepsilon_r)$ ενώ η διατμητική ακαμψία υπολογίζεται από την εξίσωση $3G'=\Delta q / \Delta \varepsilon_s$.

Στο Σχήμα 6 φαίνονται τα αποτελέσματα της επιβολής μίας ειδικής διαδρομής τάσεων, της στερεοποίησης. Η στερεοποίηση έγινε ισότροπα δηλαδή με $\Delta \sigma_a'=\Delta \sigma_r'$ κατ' αντιδιαστολή με την ανισότροπη στερεοποίηση όπου $\Delta \sigma_r' / \Delta \sigma_a' = K_0$ η οποία είναι αντιπροσωπευτική του τρόπου στερεοποίησης στη φύση. Το διάγραμμα δείκτη πόρων προς το λογάριθμο της κατακόρυφης ενεργού τάσης σ_v' αντιστοιχεί σε προφορτισμένο υλικό. Τα αποτελέσματα που περιλαμβάνονται στο Σχήμα 6(α) απεικονίζουν τη μεταβολή της μέσης ενεργού τάσης, p' , ως προς την ογκομετρική παραμόρφωση ε_v' σε αντιστοιχία με την καμπύλη τάσεων παραμορφώσεων των προηγούμενων δοκιμών (Σχήμα 5(β)).

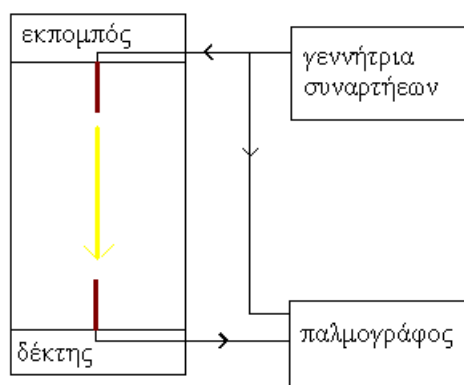
Για τη μελέτη της μεταβολής της εδαφικής δυστημσίας με την παραμόρφωση θα θεωρήσουμε το μέτρο ισότροπης συμπίεσης, K , που ορίζεται ως ο λόγος της ισότροπης τάσης που προκαλεί ορισμένη ογκομετρική παραμόρφωση προς την τιμή της αντίστοιχης παραμόρφωσης. Κατά τη διάρκεια της ισότροπης στερεοποίησης $q=\sigma_a-\sigma_r=0$ και το μέτρο ισότροπης συμπίεσης δίνεται από τη σχέση $K' = \Delta p' / \Delta \varepsilon_v$. Το Σχήμα 6(β) δείχνει τη μεταβολή του K' ως προς το λογάριθμο της παραμόρφωσης ε_v . Η μη-γραμμική συμπεριφορά που παρατηρήθηκε κατά τη διάρκεια διατμητικών δοκιμών ισχύει και κατά τη διάρκεια δοκιμής συμπίεσης. Η τιμή του μέτρου συμπίεσης μειώνεται από 120MPa για $\varepsilon_v=0.002\%$ στα 60 MPa για $\varepsilon_v=0.02\%$.

Πρέπει να σημειωθεί ότι η ακρίβεια των μετρήσεων των μέτρων δυστημσίας E_u , G' και συμπίεσης K' εξαρτάται από την ακρίβεια των οργάνων μέτρησης της μεταβολής τάσης και παραμόρφωσης. Η μεταβολή τάσης μετράται με ακρίβεια $\pm 0.3\text{kPa}$ με τη χρήση ηλεκτρικών μετρητών φορτίου και πίεσης. Εφόσον η δυστημσία αυξάνει για μικρές παραμορφώσεις, η μέτρηση της παραμόρφωσης είναι ο κρίσιμος παράγοντας για τον προσδιορισμό της ακαμψίας. Με τη σύγχρονη γενιά οργάνων μέτρησης των παραμορφώσεων η ακρίβεια στη μέτρηση των αξονικών παραμορφώσεων αυξήθηκε

σημαντικά και κυμαίνεται σήμερα σε τιμές μικρότερες του 0.0005% έναντι των προηγούμενων μετρήσεων της τάξης του 0.01%.

Η δυστησία εδαφικού υλικού στην περιοχή των μικρών παραμορφώσεων μπορεί να προσδιορισθεί από μετρήσεις της ταχύτητας κυμάτων. Η διατμητική ακαμψία συνδέεται με την ταχύτητα διατμητικών κυμάτων, V_s , με τη σχέση $G' = \rho * V_s^2$; όπου ρ είναι η πυκνότητα του υλικού. Το μέτρο μονοδιάστατης συμπίεσης D συνδέεται με την ταχύτητα p-κύματος με τη σχέση $D = \rho * V_p^2$. Η δυναμική φόρτιση κορεσμένων εδαφικών υλικών με p-κύματα γίνεται συνήθως υπό αστράγγιστες συνθήκες. Συνεπώς το μέτρο συμπίεσης είναι παρόμοιο της τιμής του μέτρου ακαμψίας του νερού.

Οι ταχύτητες των διατμητικών και p-κυμάτων μπορούν να μετρηθούν απευθείας στο εργαστήριο με τη χρήση πιεζοηλεκτρικών στοιχείων (Schulteiss,1981). Τα πιεζοηλεκτρικά στοιχεία τοποθετούνται στο άνω και κάτω άκρο του δοκιμίου και έχουν τη δυνατότητα να μεταδίδουν και να δέχονται διατμητικά και p-κύματα μέσω του δοκιμίου. Οι ταχύτητες των κυμάτων προσδιορίζονται με τη μέτρηση του χρόνου που απαιτείται για τη διάδοσή τους από το ένα άκρο του δοκιμίου στο άλλο όπως φαίνεται στο Σχήμα 7. Με τις τεχνικές αυτές είναι δυνατή η εφαρμογή μόνο μικρών παραμορφώσεων με ανώτατο όριο περίπου 0.001% ενώ είναι δύσκολο να προσδιορισθεί με ακρίβεια το μέγεθος της επιβαλλόμενης παραμόρφωσης.



ΣΧΗΜΑ 7: Διάταξη πιεζοηλεκτρικών στοιχείων στην τριαξονική συσκευή.

Μία άλλη δυναμική μέθοδος προσδιορισμού ακαμψίας είναι η δοκιμή συντονισμού (Richart et al, 1970). Στη δοκιμή αυτή ένα κυλινδρικό δοκίμιο (παρόμοιο σε διαστάσεις με το δοκίμιο της τριαξονικής δοκιμής) υποβάλλεται σε δυναμική καταπόνηση για μεγάλο εύρος συχνοτήτων έως ότου παρατηρηθεί το φαινόμενο του συντονισμού. Η διατμητική ακαμψία προσδιορίζεται με σύγκριση της συχνότητας συντονισμού του δοκίμιου με τη συχνότητα ισοδύναμου ελαστικού υλικού. Συγκρινόμενη με τα πιεζοηλεκτρικά στοιχεία το βασικό πλεονέκτημα της δοκιμής αυτής είναι η δυνατότητα επιβολής παραμορφώσεων σχετικά μεγάλου εύρους (έως και 0.01%) και προσδιορισμού του μεγέθους των παραμορφώσεων. Όμως για την ανάλυση των αποτελεσμάτων απαιτείται η βασική παραδοχή ελαστικής συμπεριφοράς του εδαφικού υλικού. Η παραδοχή ελαστικής συμπεριφοράς δεν είναι πάντα δικαιολογημένη ιδιαίτερα για το ανώτερο όριο των τιμών των παραμορφώσεων.

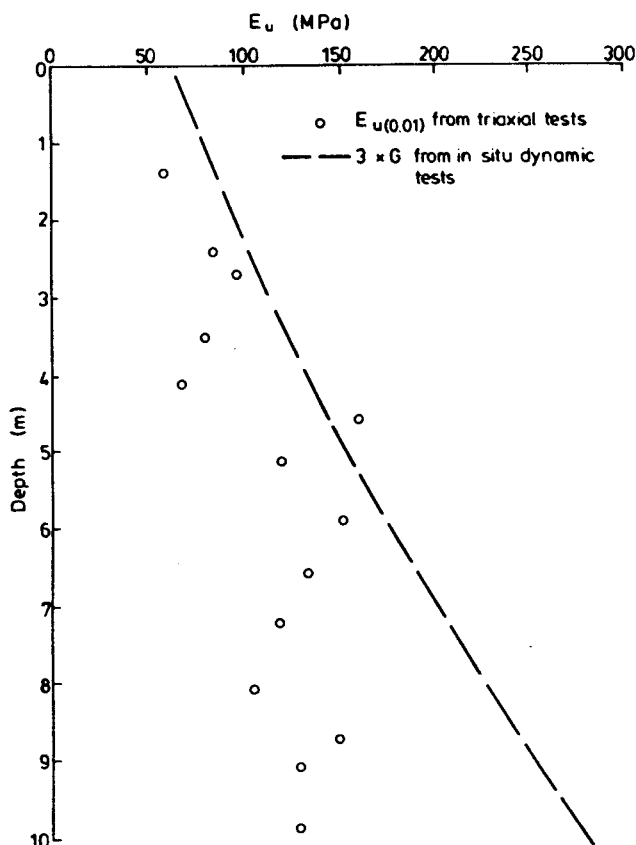
Κατά τη διάρκεια των δυναμικών δοκιμών η μεταβολή του τέμνοντος μέτρου ακαμψίας, G , με την επιβαλλόμενη παραμόρφωση, γ , εμφανίζει μία αρχική τιμή που συνήθως αναφέρεται ως G_{\max} η οποία συνήθως μειώνεται όταν η παραμόρφωση γ ξεπερνά το 0.001%.

ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΣΤΑΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΔΥΝΑΜΙΚΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

Η ανάπτυξη των εργαστηριακών τεχνικών για την ακριβή μέτρηση των παραμορφώσεων έχει οδηγήσει στη σύγκλιση των αποτελεσμάτων των μετρήσεων της εδαφικής δυστημψίας με βάση στατικές και δυναμικές μετρήσεις. Στο παρελθόν οι δυναμικές μετρήσεις του μέτρου ελαστικότητας και του μέτρου διάτμησης κατέληγαν σε μεγαλύτερες τιμές από τις στατικές μετρήσεις, με αποτέλεσμα τον αποκλεισμό τους ως μη συντηρητικών.

Σήμερα όμως με τον ακριβέστερο προσδιορισμό των μικρών παραμορφώσεων στις στατικές δοκιμές, οι μετρήσεις παραμορφώσεων συγκλίνουν με τις τιμές των δυναμικών δοκιμών.

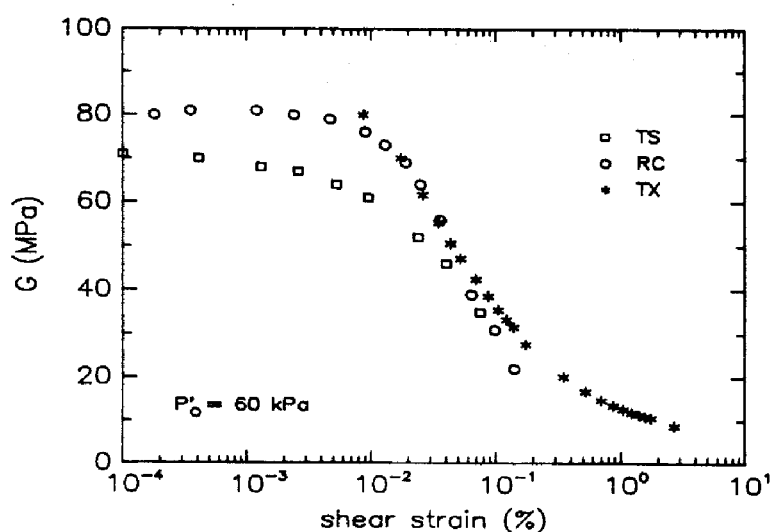
Στο Σχήμα 8 απεικονίζεται η σύγκριση (Burland, 1989) των τιμών δυστημσίας E_u για παραμόρφωση 0.01%, από τριαξονικές δοκιμές υπό αστράγγιστες συνθήκες σε δοκίμια σκληρής αργίλου με τα αποτελέσματα επιτόπου δυναμικών μετρήσεων της ακαμψίας $E_u=3 \cdot G$ που περιγράφονται από τον Abbiss, 1981. Τα αποτελέσματα αυτά



ΣΧΗΜΑ 8: Σύγκριση στατικών και δυναμικών μετρήσεων ακαμψίας (Burland, 1989).

μπορούν να οδηγήσουν σε συνδιασμό των στατικών και δυναμικών μεθόδων για τη μελέτη των χαρακτηριστικών παραμορφωσιμότητας του εδάφους με μία ευρύτερη εφαρμογή των γεωφυσικών μετρήσεων για τον προσδιορισμό της επιτόπου δυστημσίας εδαφικών υλικών .

Στο Σχήμα 9 τα εργαστηριακά αποτελέσματα στατικών (τριαξονικές δοκιμές) και δυναμικών μετρήσεων (δοκιμή συντονισμού με δυνατότητα στρεπτικής διάτμησης κυλινδρικού δοκιμίου) συγκρίνονται για τέσσερα διαφορετικά υλικά (Georgiannou et al, 1991). Η μέτρηση της εδαφικής δυστημσίας με τη βοήθεια διαφόρων οργάνων και τεχνικών έχει σαν αποτέλεσμα τον υπολογισμό παραμορφώσεων για ένα ευρύ φάσμα τιμών ενώ ταυτόχρονα οδηγεί στη σχεδίαση μίας ενοποιημένης καμπύλης για τις διάφορες τεχνικές. Της σύγκρισης των τιμών δυστημσίας οι οποίες προσδιορίζονται από τριαξονικές δοκιμές (TX) και δοκιμές συντονισμού και στρέψης (RC-TS) ΣΧΗΜΑ

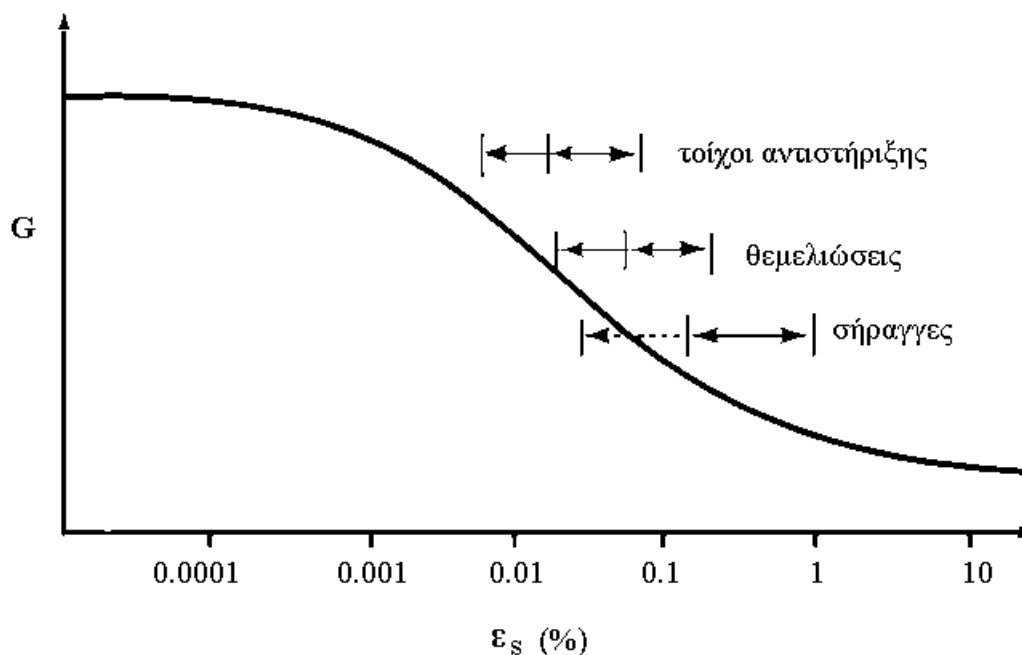


9: Σύγκριση στατικών και δυναμικών μετρήσεων ακαμψίας (Georgiannou et al, 1991)

προηγείται ο καθορισμός μίας αντιστοιχίας μεταξύ δυστημσίας και παραμορφώσεων για τις διαφορετικές δοκιμές. Οι σχέσεις τάσεων παραμορφώσεων q - ϵ_a των TX δοκιμών μετατρέπονται σε σχέσεις G - γ όπως προσδιορίζονται στη δοκιμή συντονισμού. Για παράδειγμα με την παραδοχή ισότροπου ελαστικού υλικού υπό αστράγγιστες συνθήκες ($\nu_u=0.5$) έχουμε: $G = E_{us} / 2 * (1 + \nu_u) = E_{us} / 3$. Για τα ανωτέρω υλικά το μέτρο διατμητικής ακαμψίας είναι περίπου σταθερό για

παραμορφώσεις μικρότερες του 0.001% ενώ στη συνέχεια εμφανίζει έντονα μη-γραμμική απόκριση με την αύξηση των παραμορφώσεων.

Οι τιμές παραμόρφωσης που είναι συνυφασμένες με τις διάφορες γεωτεχνικές κατασκευές απεικονίζονται στη χαρακτηριστική καμπύλη που περιλαμβάνεται στο Σχήμα 10. Οι παραμορφώσεις κυμαίνονται μεταξύ 0.2% και 0.5% και μηδενίζονται μακριά από την κατασκευή. Λόγω της εγγενούς μη-γραμμικής συμπεριφοράς των



ΣΧΗΜΑ 10: Συνήθεις παραμορφώσεις γεωτεχνικών κατασκευών.

εδαφικών υλικών, η ακαμψία μεταβάλλεται για το εύρος των ανωτέρω παραμορφώσεων τουλάχιστον μέχρι 10 φορές.

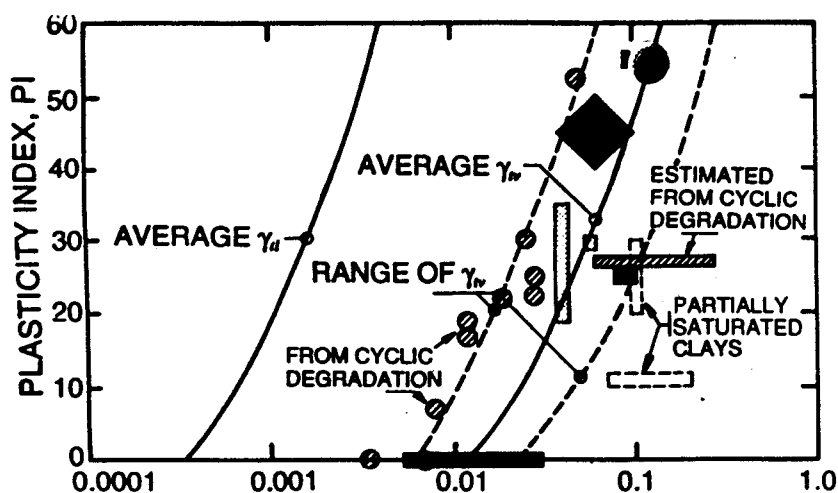
ΑΝΑΚΥΚΛΙΚΗ ΦΟΡΤΙΣΗ

Η αναγνώριση του τμήματος της καμπύλης ακαμψίας - παραμόρφωσης που αντιστοιχεί σε γραμμική συμπεριφορά του υλικού είναι πολύ σημαντική. Τα συμπεράσματα από τη διερεύνηση της δυναμικής συμπεριφοράς του εδάφους

δείχνουν ότι για πολύ μικρές διατμητικές παραμορφώσεις ($\gamma < 10^{-5}$) το έδαφος συμπεριφέρεται ως “ημιελαστικό” γραμμικό υλικό. Η υστερητική απόσβεση του υλικού είναι της τάξης 0.03 και η συμπεριφορά του υλικού είναι ανεξάρτητη από τη συχνότητα και τον αριθμό των κύκλων φόρτισης, Γκαζέτας, 1997.

Όριο ελαστοπλαστικής συμπεριφοράς

Ο προσδιορισμός του σημείου μετάβασης του υλικού από την ελαστική περιοχή στη ελαστοπλαστική περιοχή επιτυγχάνεται με την υποβολή του υλικού σε κύκλους φόρτισης - αποφόρτισης. Όταν ένα κορεσμένο υλικό υποβάλλεται σε ανακυκλική φόρτιση υπό αστράγγιστες συνθήκες το μέτρο διάτμησης G μειώνεται και η πίεση πόρων του υλικού μεταβάλλεται. Τα πειραματικά αποτελέσματα δείχνουν ότι οι μεταβολές αυτές παρατηρούνται μόνον όταν η ανακυκλική διατμητική



ΣΧΗΜΑ 11: Όριο ελαστοπλαστικής συμπεριφοράς.

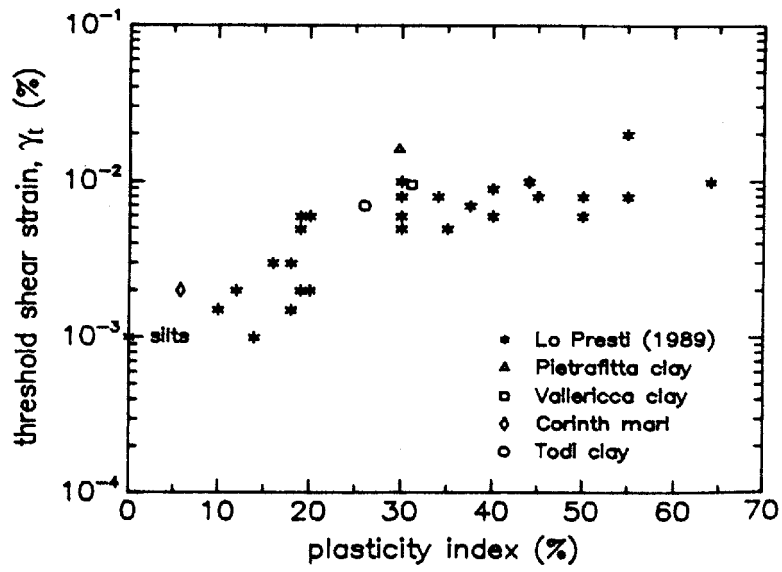
παραμόρφωση, γ_c , ξεπεράσει ένα “ελάχιστο” όριο, γ_{tv} , διαφορετικό για κάθε υλικό. Δηλαδή όταν το μέγεθος των παραμορφώσεων ξεπερνά αυτό το όριο, ο εδαφικός ιστός μεταβάλλεται ανελαστικά με αποτέλεσμα τη μεταβολή της πίεσης πόρων, Δu , του όγκου, ΔV , και της ακαμψίας του εδάφους. Για τιμές παραμορφώσεων χαμηλότερες του ορίου αυτού ο εδαφικός ιστός και κατ’ επέκταση τα χαρακτηριστικά του εδαφικού υλικού παραμένουν πρακτικά αμετάβλητα.

Έχει παρατηρηθεί πειραματικά ότι στην περίπτωση κορεσμένων άμμων και αμμοχάλικων που υποβάλλονται σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση υπό αστράγγιστες συνθήκες το όριο γ_{IV} είναι περίπου 10^{-2} (%) ανεξαρτήτως της αρχικής ενεργού τάσης και του δείκτη πόρων (Vusetic, 1994).

Τα κορεσμένα αργιλικά υλικά όταν υποβάλλονται σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση αναπτύσσουν θετική παραμένουσα πίεση πόρων, στην περίπτωση που είναι κανονικώς φορτισμένα και αρνητική παραμένουσα πίεση πόρων στην περίπτωση αργίλων υψηλής πλασιμότητας και υψηλού δείκτη προστεροποίησης (OCR). Πειραματικές μετρήσεις υποδεικνύουν ότι παραμένουσα πίεση πόρων εμφανίζεται σε αργίλους όπως και σε άμμους μετά από το όριο γ_{IV} . Το όριο γ_{IV} αυξάνεται με το δείκτη πλασιμότητας PI της αργίλου όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 11. Σε αντίθεση με τη συμπεριφορά των άμμων το όριο αυτό στις αργίλους φαίνεται να επηρεάζεται από την ενεργό τάση στην αρχή του πειράματος.

Όριο ελαστικής συμπεριφοράς

Με ανάλογη διαδικασία μπορεί να ορισθεί το ελάχιστο όριο, γ_e , που σηματοδοτεί τη μετάβαση από την ελαστική γραμμική σε μη-γραμμική συμπεριφορά. Ανάλογα με το υλικό, μία ζώνη γραμμικής περίπου συμπεριφοράς μπορεί να αναγνωρισθεί στις καμπύλες ακαμψίας για τιμές πολύ μικρών παραμορφώσεων ($\gamma < 10^{-3}$ (%)). Αν και ο προσδιορισμός αυτός είναι αυθαίρετος, τιμές του λόγου G/G_0 , 0.95-0.99 έχουν χρησιμοποιηθεί στη βιβλιογραφία για την αναγνώριση του ορίου γ_e , όπου G_0 είναι η αρχική τιμή ακαμψίας. Το όριο γ_e φαίνεται να είναι ανεξάρτητο της αρχικής ενεργού τάσης, p_0' , και η μεταβολή του με το PI απεικονίζεται στο Σχήμα 12.



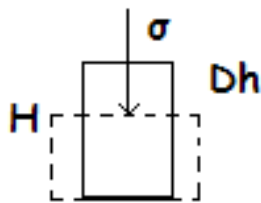
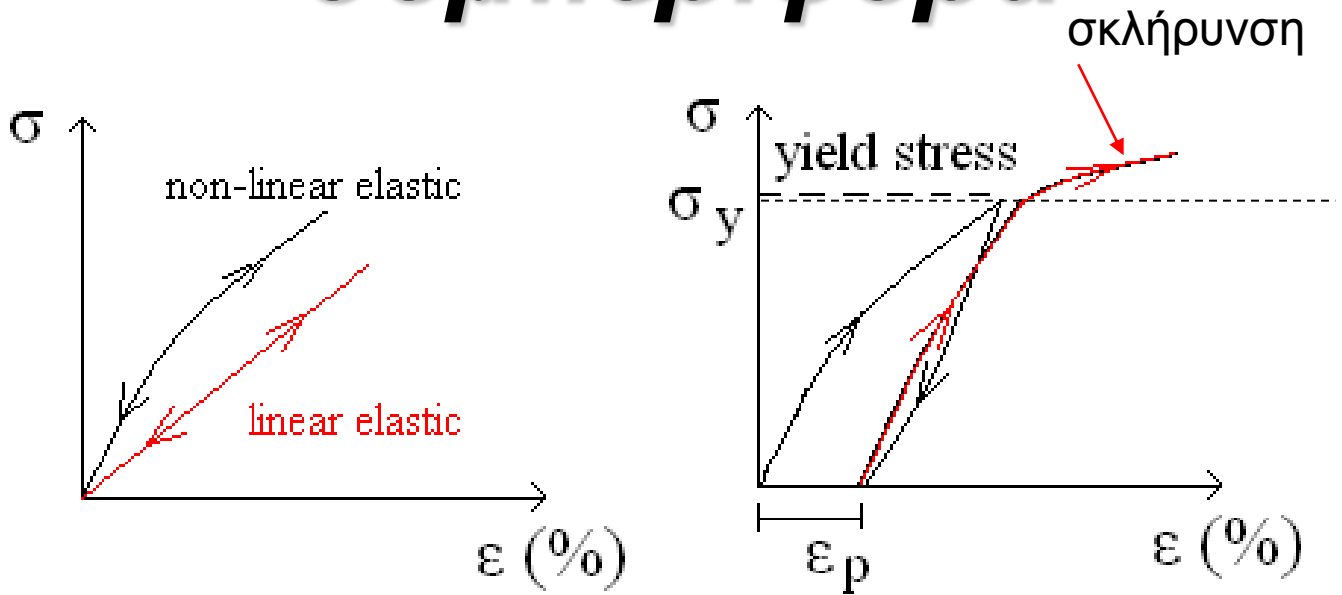
ΣΧΗΜΑ 12: Όριο ελαστικής συμπεριφοράς.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Abbiss, C.P., 1981. Shear wave measurements of the elasticity of the ground. *Geotechnique*, Vol.31, No. 1 pp. 91-104.
- Attewell, P.B. and Farmer, I.W., 1974. Ground deformations resulting from shield tunnelling in London Clay. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 11, pp 380-395.
- Bishop, A.W. and Henkel, D.J., 1962. The measurement of soil properties in the triaxial test. Edward Arnold, London, 2nd Edition, 228p.
- Bishop, A.W. and Wesley, L.D., 1975. A hydraulic triaxial apparatus for controlled stress path testing. *Geotechnique*, Vol.25, No.4, pp. 657-670.
- Burland, J.B., 1989. Ninth Laurits Bjerrum Memorial Lecture: Small is beautiful-the stiffness of soils at small strains. *Can. Geotech. J.*, Vol26, pp. 499-516.
- Burland, J.B., Rampello, S., Georgiannou, V. N. and Calabresi, G., 1996. A laboratory study of the strength of four stiff clays. *Geotechnique*, Vol. 46, pp. 491-514.
- Burland, J.B. and Symes, M.J.R.P., 1982. A simple displacement gauge for use in the triaxial apparatus. *Geotechnique*, Vol.32, No.1, pp. 62-64.
- Γκαζέτας, Γ., 1997. Σημειώσεις εδαφοδυναμικής, Ε.Μ.Π., σελ. 344.
- Clayton, C.R.I., Kathrush, S.A., Bica, A.V.D. and Siddique, A., 1989. The use of the Hall effect semiconductors in geotechnical instrumentation. *Geotechnical Testing Journal*, American Society for Testing Materials, Vol. 12, No.1, pp. 69-76.
- Costa-Filho, L.M. and Vaughan, P.R., 1980. Discussion on: A computer model for the analysis of ground movements in London clay. *Geotechnique*, Vol.30, No.3, pp.336-339.
- Duncan, J.M. and Chang, C.Y., 1970. Non linear analysis of stress and strain in soils. *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Engineering Division*, American Society of Civil Engineers, Vol.96, SM5, pp.1629-1653.
- Georgiannou, V.N., 1988. The behaviour of clayey sands under monotonic and cyclic loading. PhD thesis, University of London.

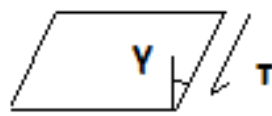
- Georgiannou, V.N., Burland, J.B. and Hight D.W., 1990. The undrained behaviour of clayey sands in triaxial compression and extension. *Geotechnique*, Vol. 40, pp. 431-449.
- Georgiannou, V.N., Rampello, S. and Silvestri, F., 1991. Static and dynamic measurements of undrained stiffness of natural overconsolidated clays. Proc. 10th European Conf. On Soil Mech. And Found. Engng., A.A. Balkema, Florence, Italy, Vol.1, pp. 91-95.
- Goto, S., Tatsuoka, F., Shibuya, S., Kim, Y.S. and Sato, T., 1991. A simple gauge for local small strain measurements in the laboratory. *Soils and Foundations*, Vol.31, No.1, pp.169-180.
- Jardine, R.J., Potts, D.M., Fourie, A.B. and Burland, J.B., 1986. Studies of the influence of non-linear stress-strain characteristics in soil-structure interaction. *Geotechnique*, Vol.36, No.3, pp.377-396.
- Jardine, R.J., Symes, M.J. and Burland, J.B., 1984. The measurement of soil stiffness in the triaxial apparatus. *Geotechnique*, Vol.34, pp.323-340.
- Poulos, H.G. and Davis, E.H., 1974. *Elastic solutions for soil and rock mechanics*. Wiley, New York.
- Richart, F.E., Hall, J.R. and Woods, R.D., 1970. *Vibration of soils and foundations*. Prentice-Hall Inc., New Jersey.
- Schulteiss, P.J., 1981. Simultaneous measurements of P and S wave velocities during conventional laboratory soil testing procedures. *Marine Geotechnology*, Vol.4, No.4, pp.343-367.
- Vucetic, M. , 1994. Cyclic threshold shear strains in soils. *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 120, No. 12, pp. 2208-2228.

Ελαστοπλαστική συμπεριφορά

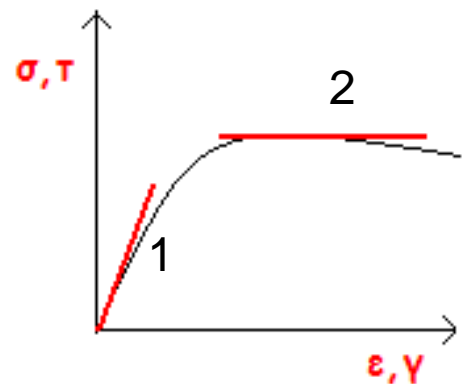


$$E = \sigma / \epsilon,$$

$$\epsilon = Dh / H$$

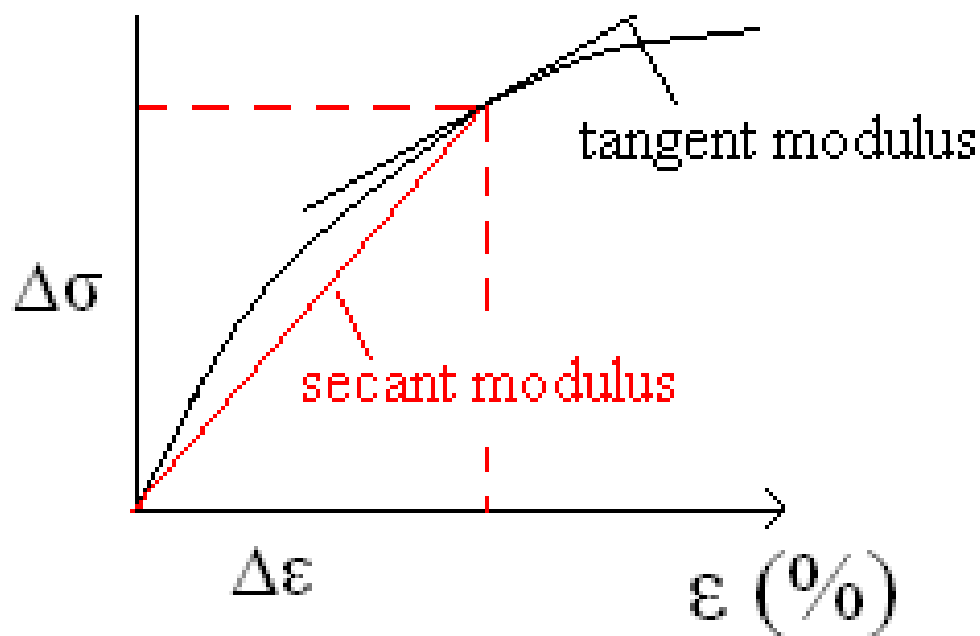
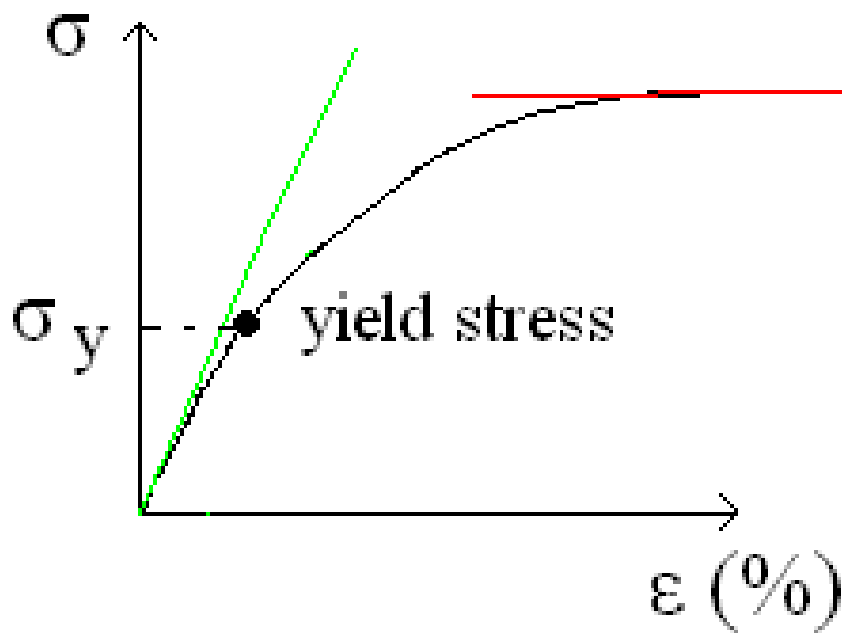


$$G = \tau / \gamma$$

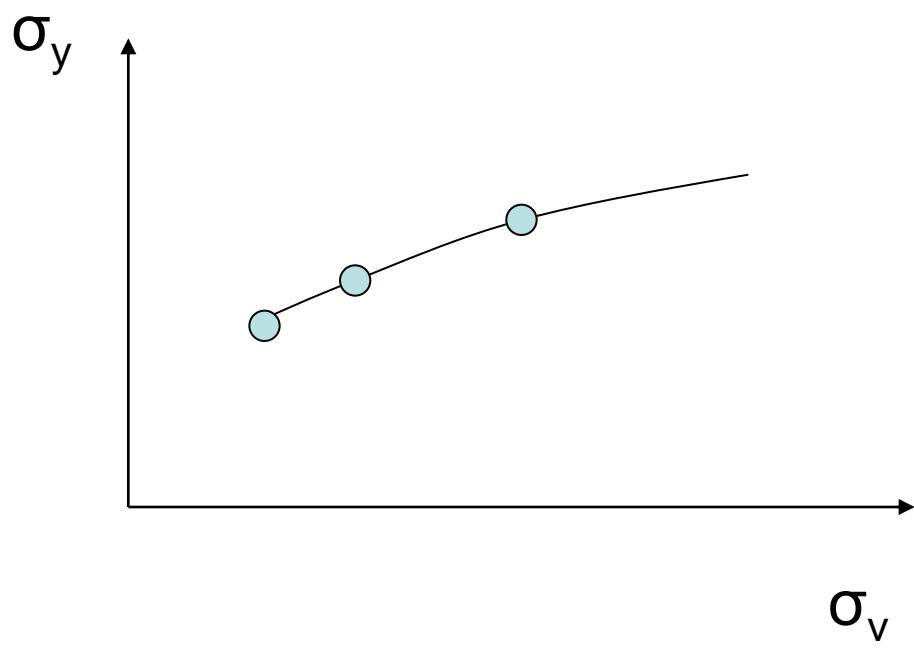
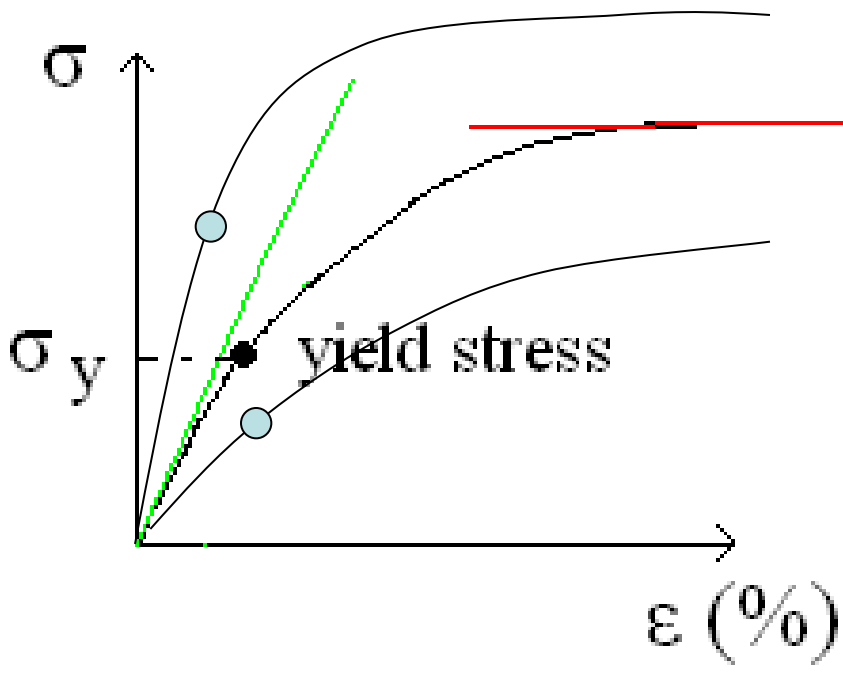


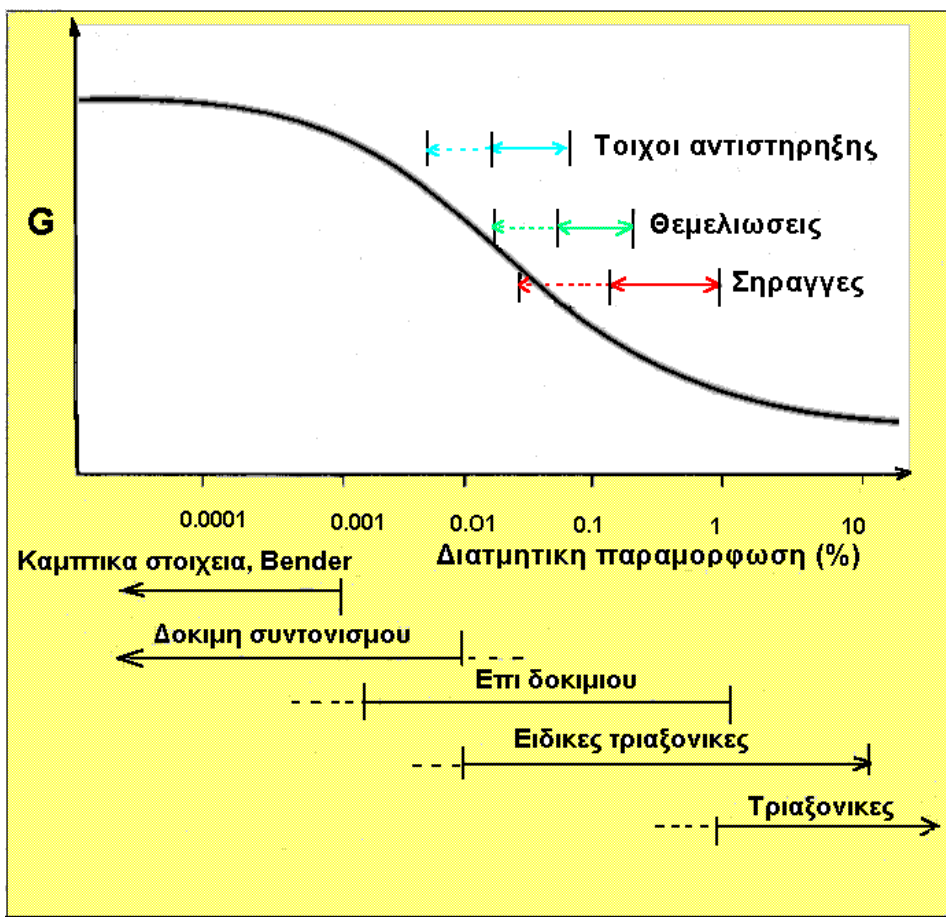
- (1) ελαστική
- (2) πλαστική

Ελαστοπλαστική συμπεριφορά



Ορια και καμπύλη διαρροής



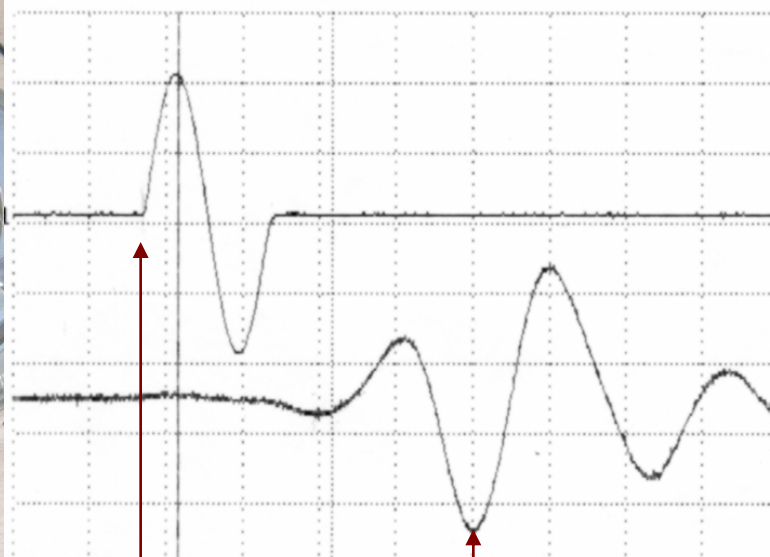
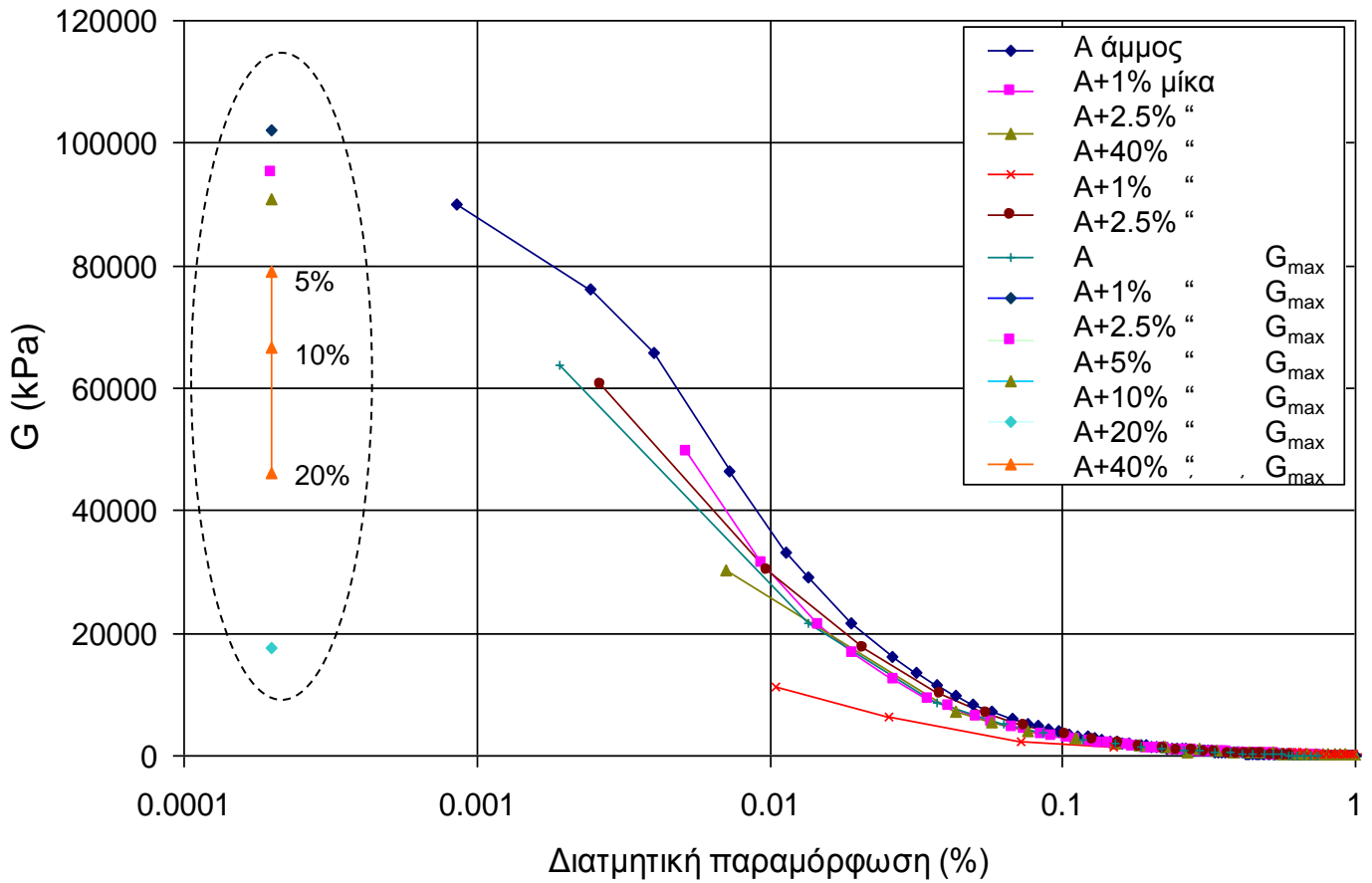


□ η ελαστική προσέγγιση μπορεί να δικαιολογηθεί σε υπερστερεοποιημένα εδαφικά υλικά τα οποία κάτω από το όριο διαρροής δείχνουν περίπου ελαστική συμπεριφορά

□ τα κανονικώς στερεοποιημένα υλικά (χαλαρές άμμοι ή πρόσφατες αργιλικές αποθέσεις) που δεν έχουν υποστεί αποφόρτιση κατά το παρελθόν εμφανίζουν πολύ χαμηλό όριο διαρροής.

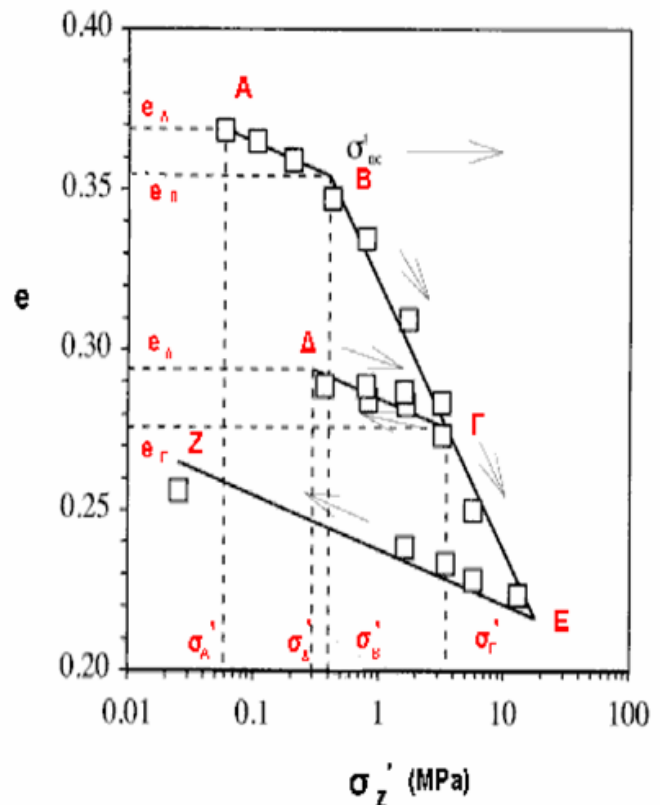
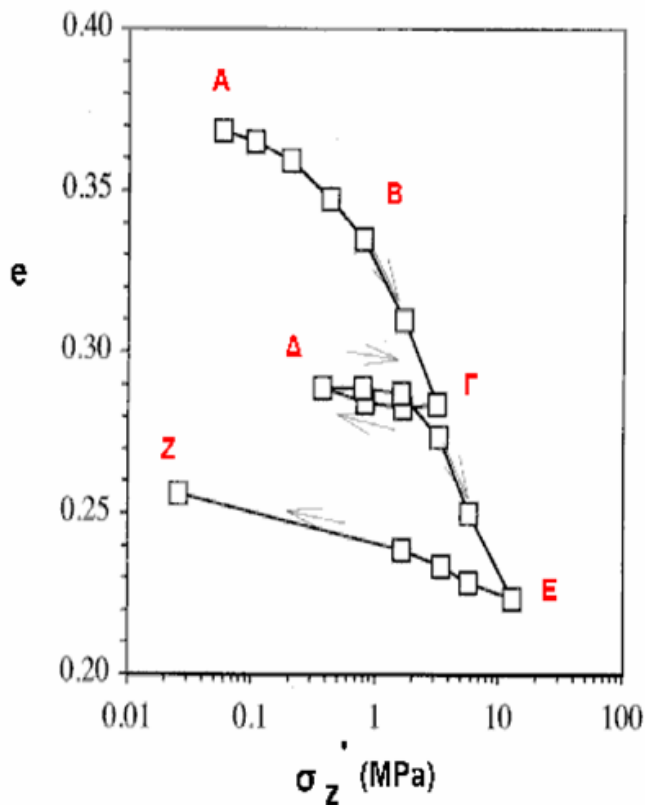
- Κάτω από αυτές τις συνθήκες απαιτείται η χρήση αριθμητικών μεθόδων με γενικευμένες ελαστοπλαστικές καταστατικές σχέσεις για το εδαφικό υλικό.
- από πρακτική άποψη η ασφάλεια και το κόστος μιας μελέτης εξαρτάται από το πόσο ρεαλιστικές είναι οι μαθηματικές σχέσεις μεταξύ τάσεων και παραμορφώσεων

ΜΕΤΡΗΣΗ ΕΔΑΦΙΚΗΣ ΔΥΣΤΗΜΗΣΙΑΣ



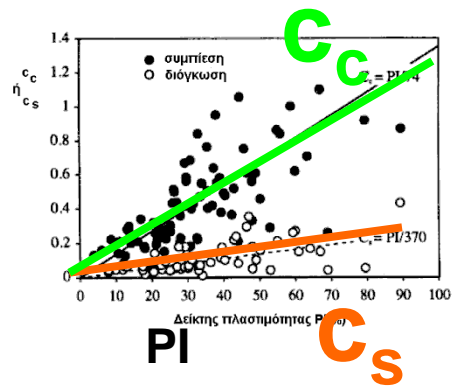
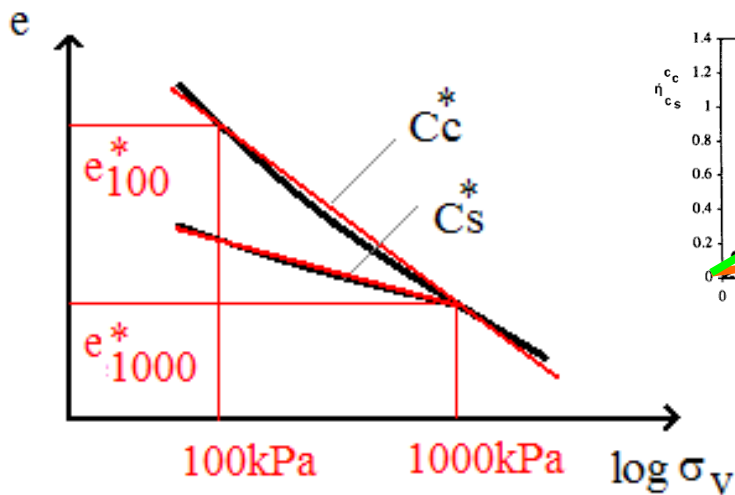
χρόνος εκπομπής και άφιξης κύματος

Συμπίεση- Στερεοποίηση



για υπερστερεοποιημένα υλικά (κλάδοι $\Delta\Gamma$, AB, ZE) συμπεριφορά οιονεί
ελαστική
για κανονικώς στερεοποιημένα υλικά (κλάδος BGE) συμπεριφορά
πλαστική

Συμπίεση- Στερεοποίηση

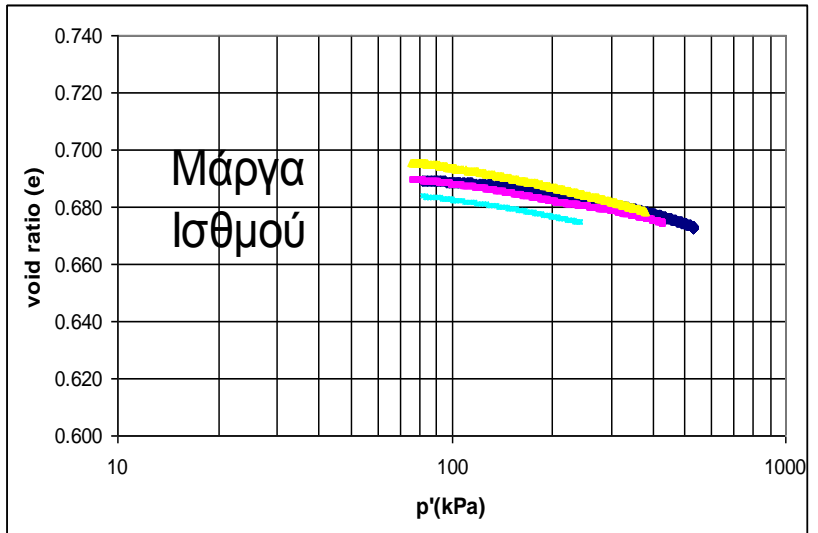


- για κανονικώς στερεοποιημένα υλικά οι καθιζήσεις χαρακτηρίζονται από τον δείκτη συμπίεσης C_c
- για υπερστερεοποιημένα υλικά οι καθιζήσεις χαρακτηρίζονται από τον δείκτη διόγκωσης C_s που ορίζεται από την κλίση ενός κλάδου αποφόρτισης-επαναφόρτισης

ΤΡΙΑΞΟΝΙΚΗ

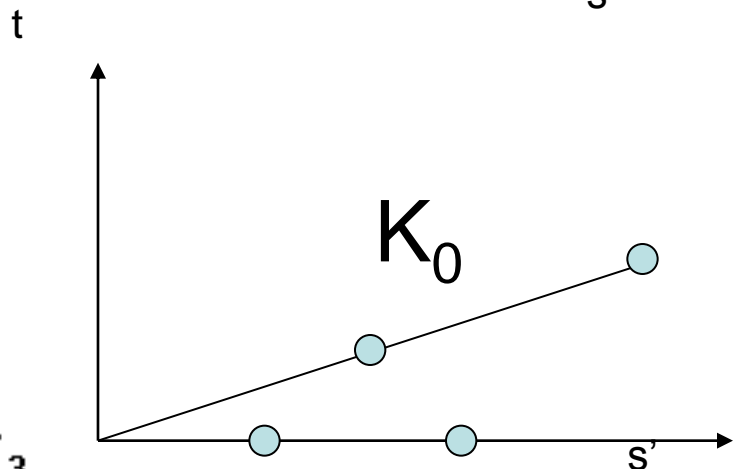
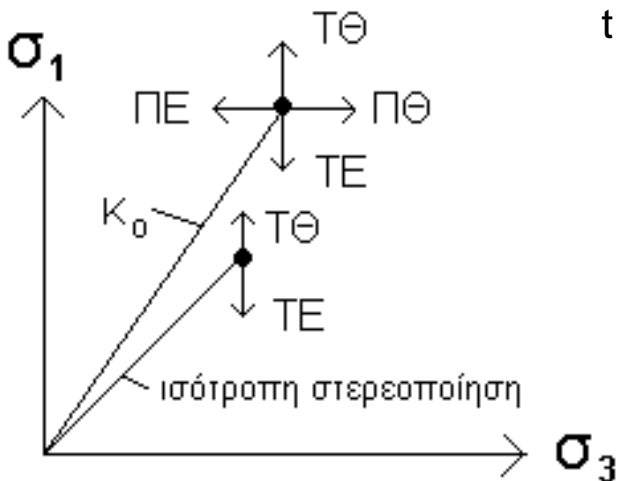
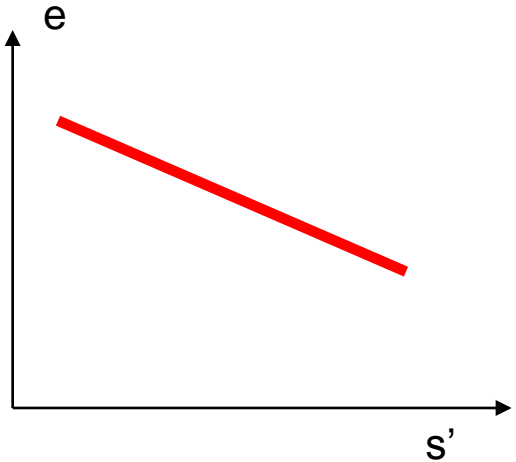
1. δοκίμιο

Ενεργός
τάση ?



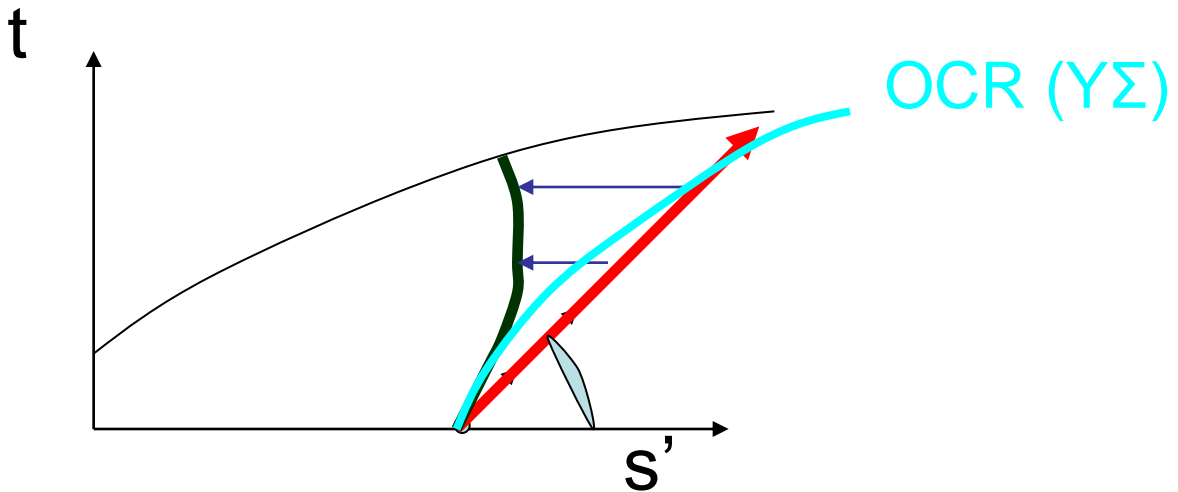
2. στερεοποίηση

- ισότροπη
- ανισότροπη

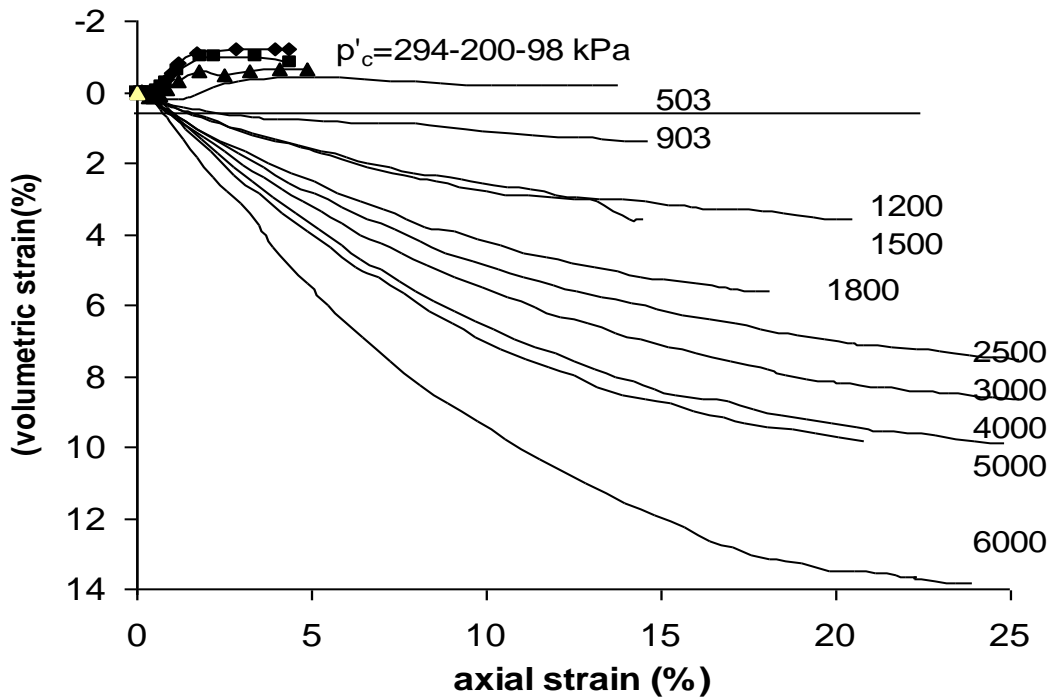
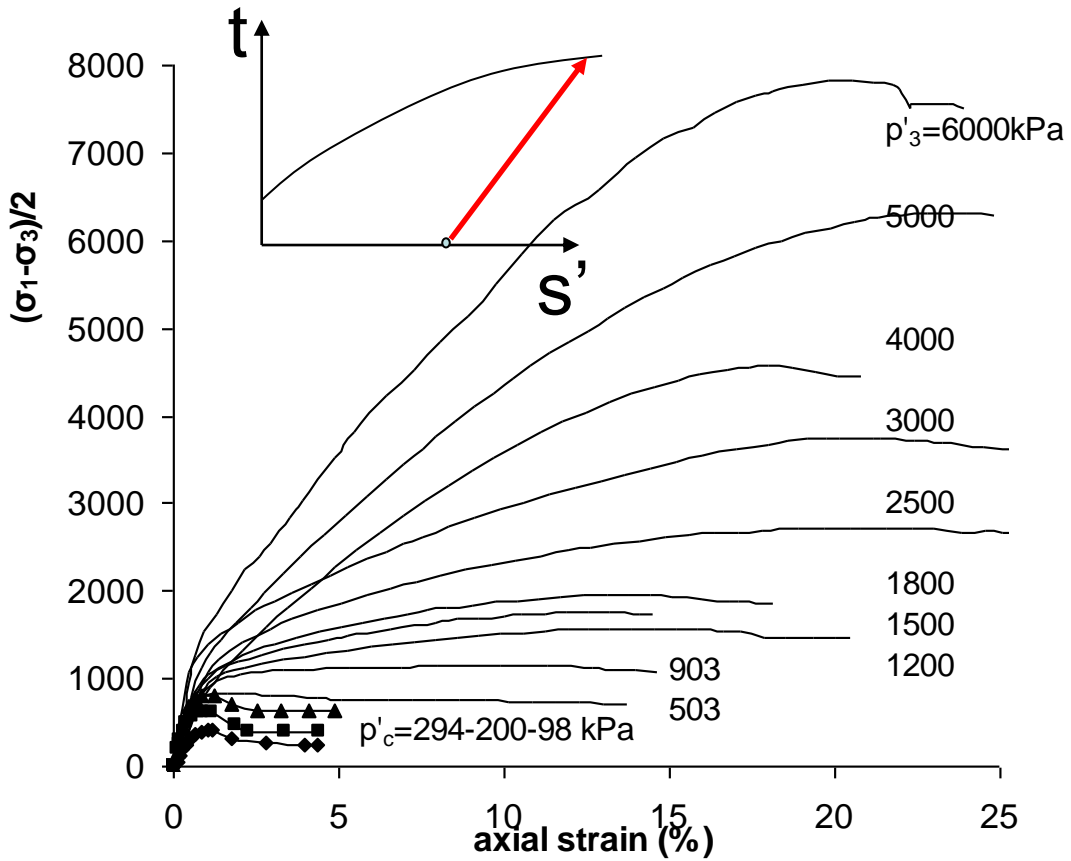


ΤΡΙΑΞΟΝΙΚΗ

3. διάτμηση



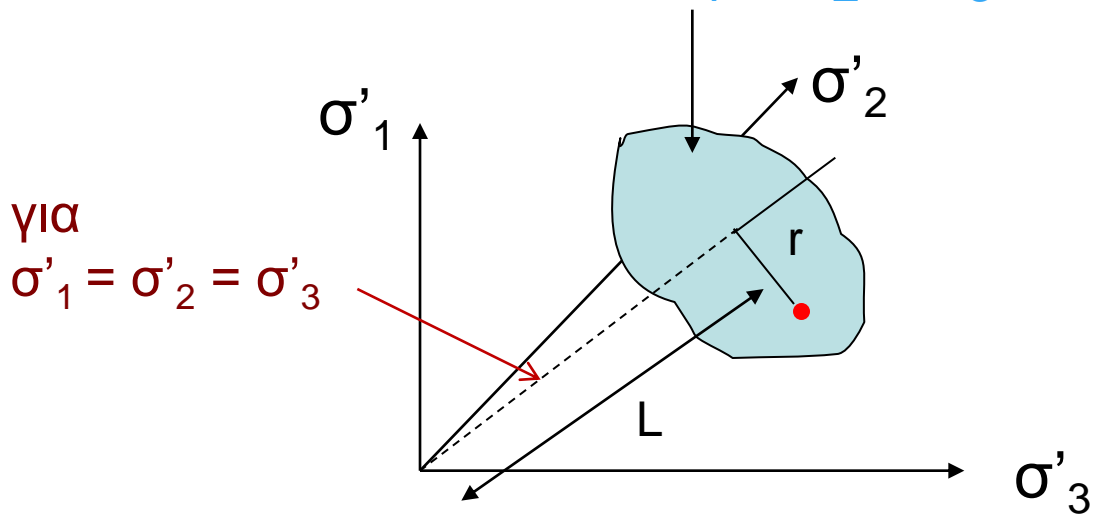
- αρχική εντατική κατάσταση
- επιβαλλόμενες τασικές μεταβολές
- στάδια και ρυθμός μεταβολής του τασικού πεδίου
- συνθήκες στράγγισης



Κλασσικές δοκιμές ελεύθερης στράγγισης
 σ_1 αυξάνεται με σ_3 σταθερό

Άξονες: q & p'

επίπεδο σταθερής
 $p' = (\sigma'_1 + \sigma'_2 + \sigma'_3)/3$



$$L = 1/\sqrt{3} (\sigma'_1 + \sigma'_2 + \sigma'_3) \rightarrow L/\sqrt{3} = (\sigma'_1 + \sigma'_2 + \sigma'_3)/3 = p'$$

$$r = 1/\sqrt{3} \{(\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2\}^{1/2}$$

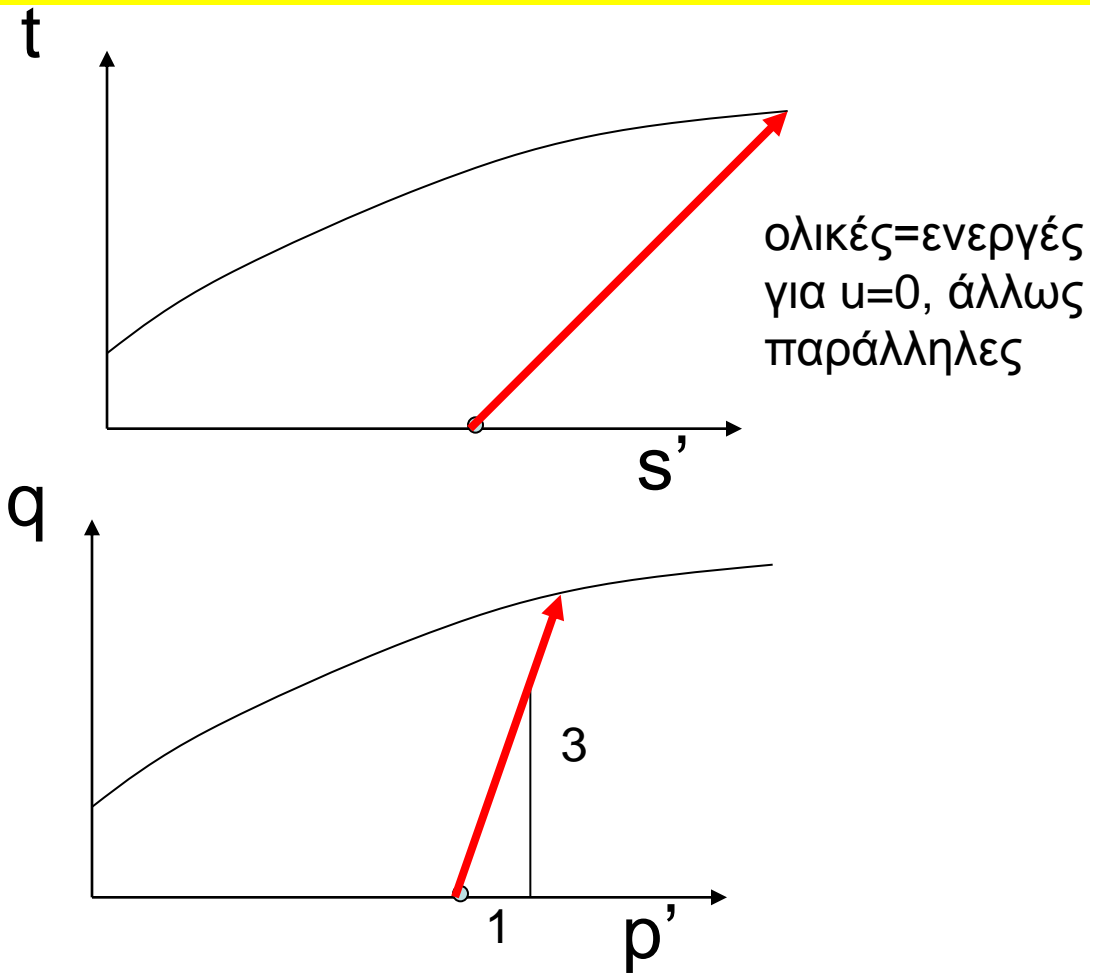
$$\sqrt{3}/2 * r = 1/\sqrt{2} \{(\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2\}^{1/2} = q$$

ΤΡΙΑΞΟΝΙΚΟ ΕΠΙΠΕΔΟ

$$q = \sigma_1 - \sigma_3$$

$$p' = (\sigma'_1 + 2\sigma'_3)/3$$

Διαδρομές τάσεων για συνθήκες ελεύθερης στράγγισης

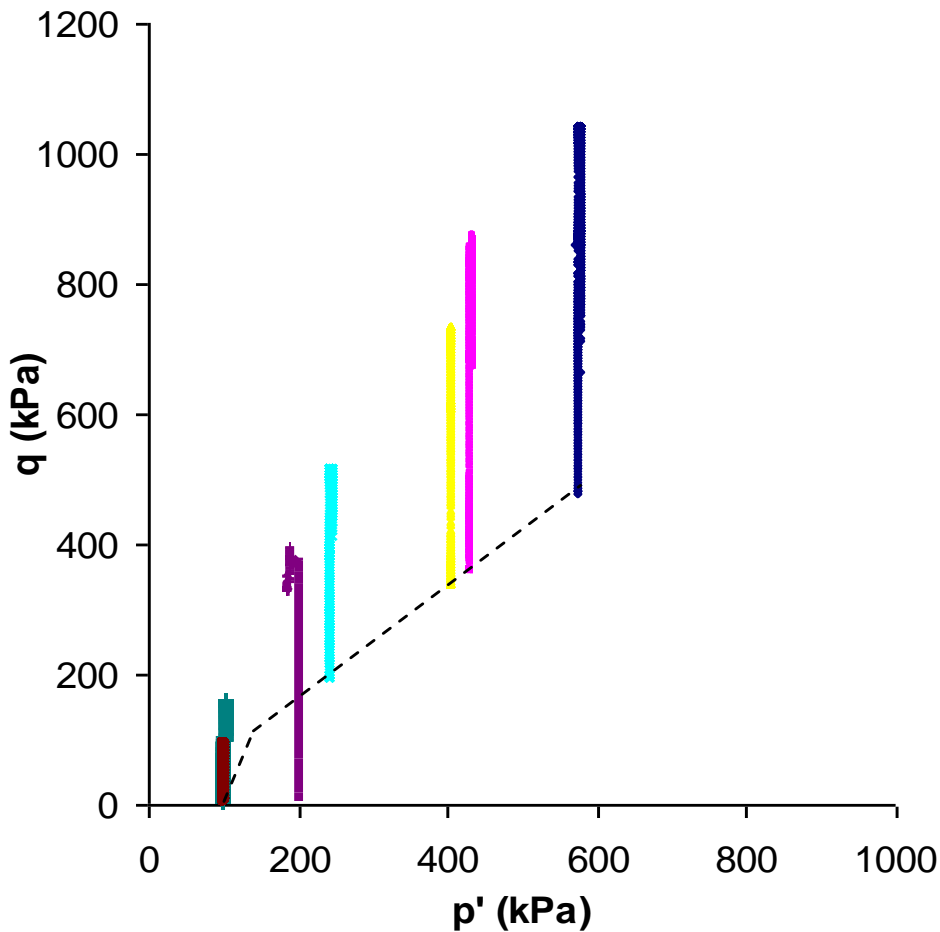


$$\Delta q / \Delta p' = 3 =$$

$$(\Delta \sigma_1 - \Delta \sigma_3) / (\Delta \sigma'_1 + 2\Delta \sigma'_3) / 3$$

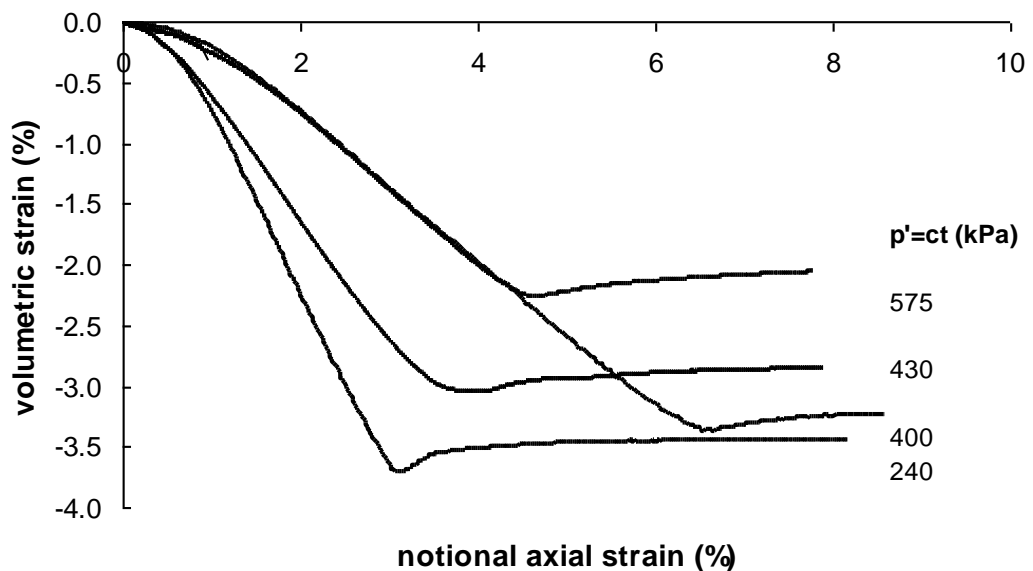
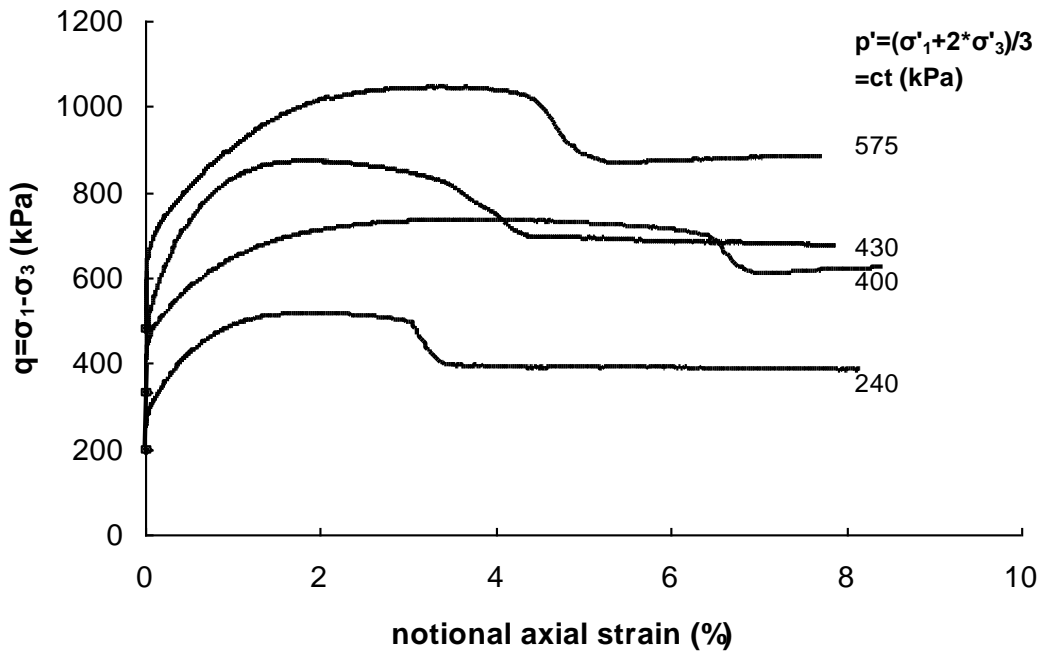
$$\text{για } \Delta \sigma'_3 = 0$$

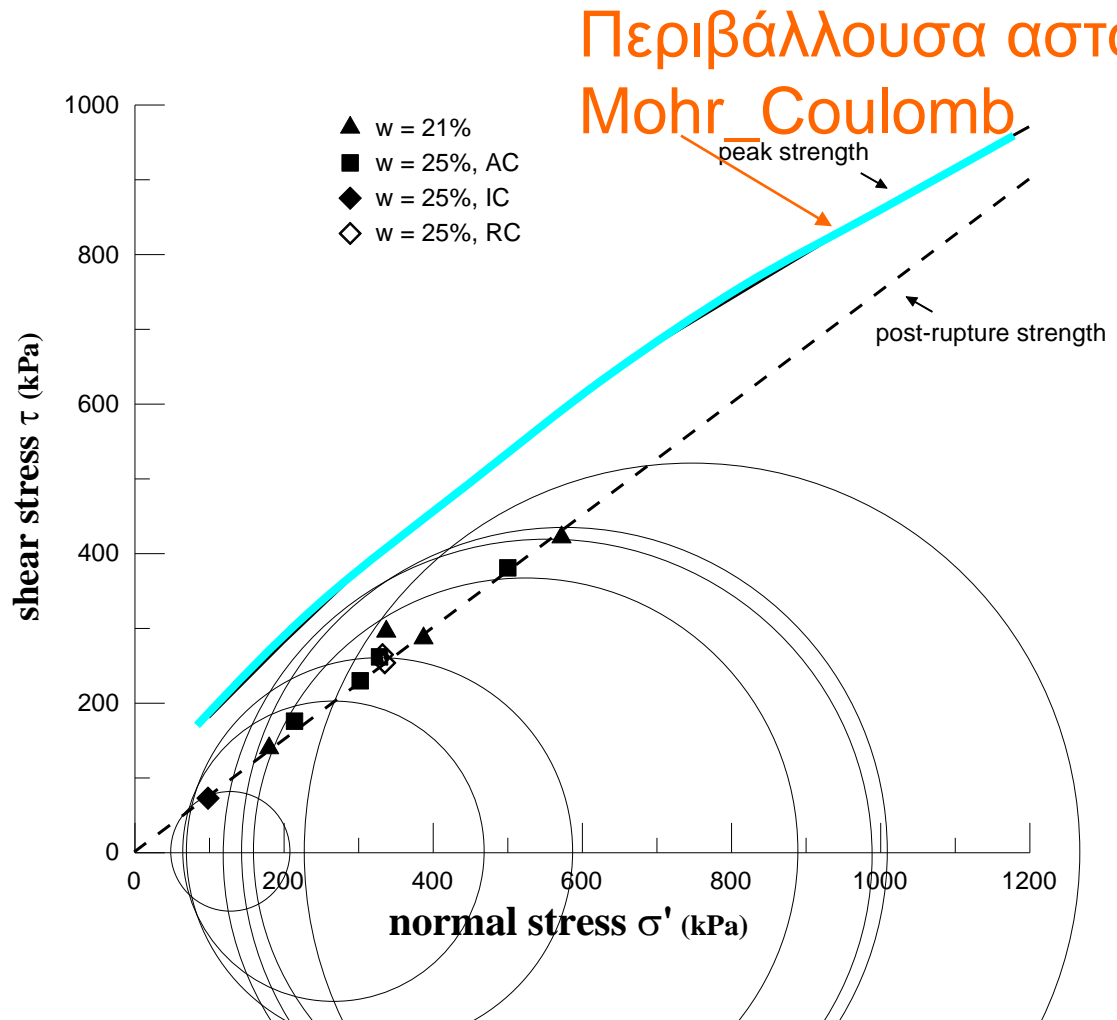
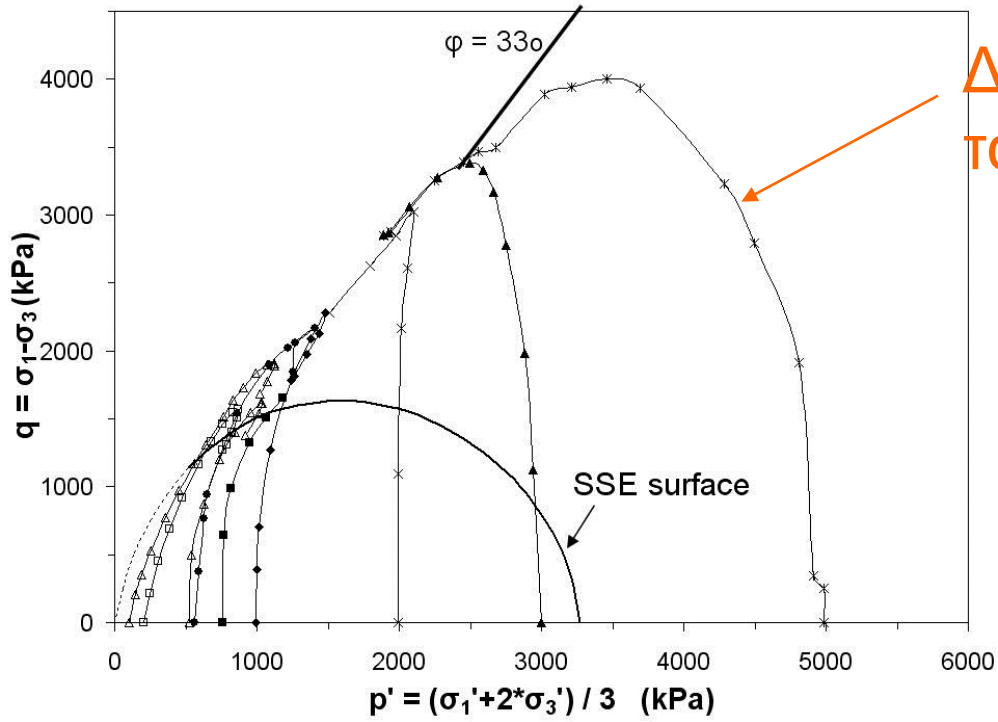
Διαδρομές τάσεων για συνθήκες ελεύθερης στράγγισης



$(\Delta\sigma'_1 + 2\Delta\sigma'_3)/3 = \text{σταθερή}$
 $\Delta\sigma'_1$ αυξάνεται, $\Delta\sigma'_3$ μειώνεται

Διαδρομές τάσεων για $p' = \text{σταθερό}$





Σχέσεις παραμορφώσεων

- $\sigma_1, \sigma_3 \rightarrow \varepsilon_1, \varepsilon_3$

1. $t = (\sigma_1 - \sigma_3)/2, s' = (\sigma'_1 + \sigma'_3)/2 \rightarrow$

- $(\varepsilon_s), (\varepsilon_v = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3)$ Ογκομετρική παραμόρφωση

2. $q = (\sigma_1 - \sigma_3), p' = (\sigma_1 + 2\sigma_3)/3 \rightarrow$

- $\varepsilon_s, \varepsilon_v$ **ΌΠΟΥ** • $\varepsilon_v = \varepsilon_1 + 2\varepsilon_3$

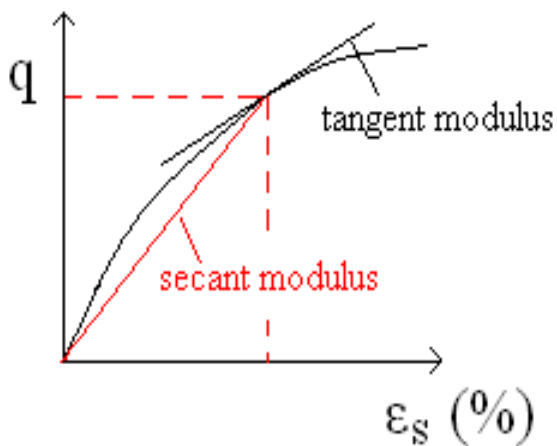
- ε_s

Αρχή διατήρησης έργου

1. $\varepsilon_s = (\varepsilon_1 - \varepsilon_3)$

2. $\varepsilon_s = 2/3(\varepsilon_1 - \varepsilon_3)$

Μέτρα ελαστικότητας



- $E = \Delta q / \Delta \varepsilon_s$

- $E_u = \Delta q / \Delta \varepsilon_s$

$$\varepsilon_s = \varepsilon_1$$

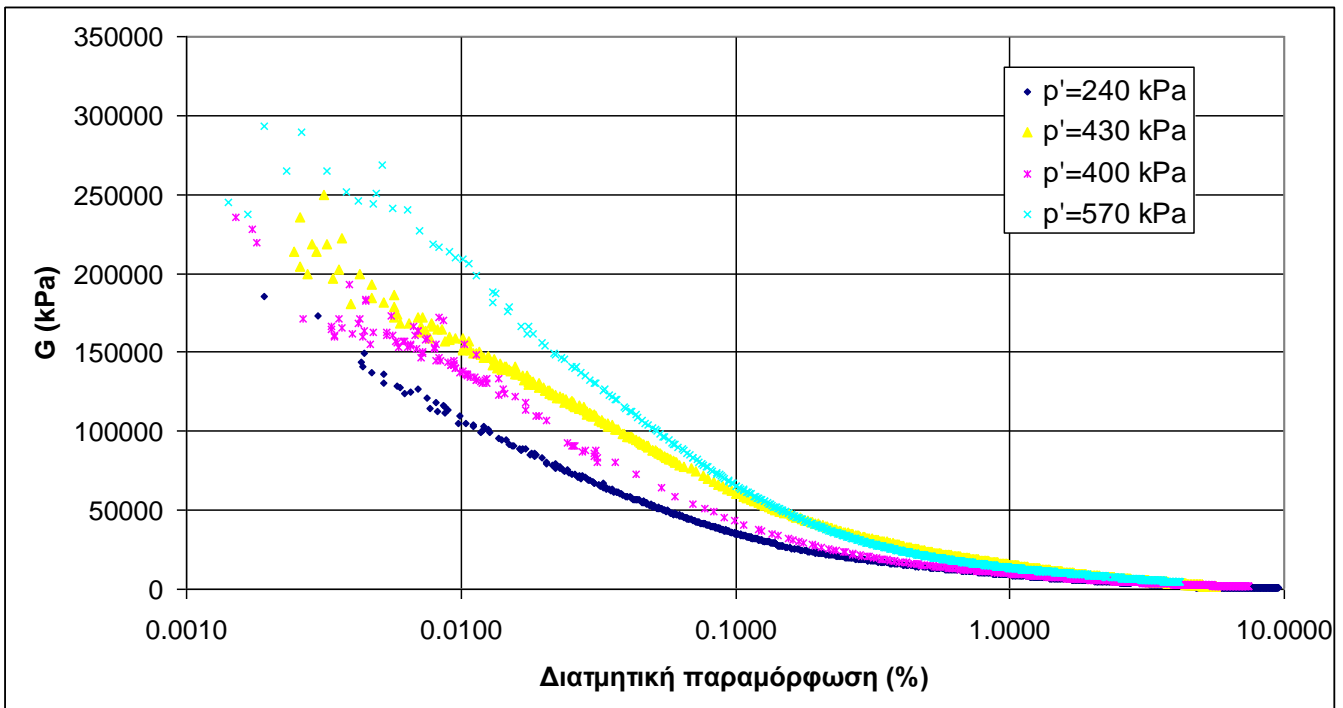
- $E_u = \Delta q / \Delta \varepsilon_1$

- $E' = \Delta q / \Delta \varepsilon_s$, όπου $\varepsilon_s = 2/3(\varepsilon_1 - \varepsilon_3)$

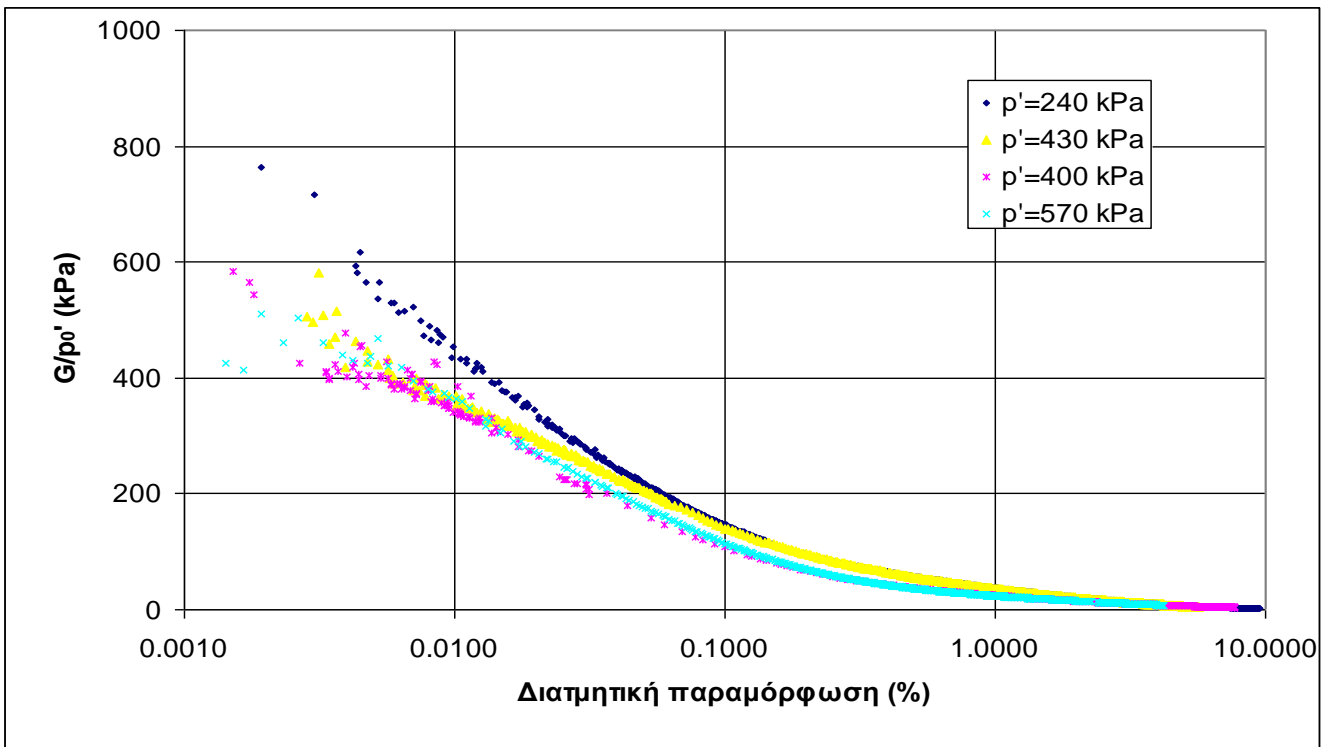
- $G = E_u / 2(1 + \nu_u) \rightarrow G = E_u / 3$

- G' για ελεύθερη στράγγιση π.χ. $p' = ct$





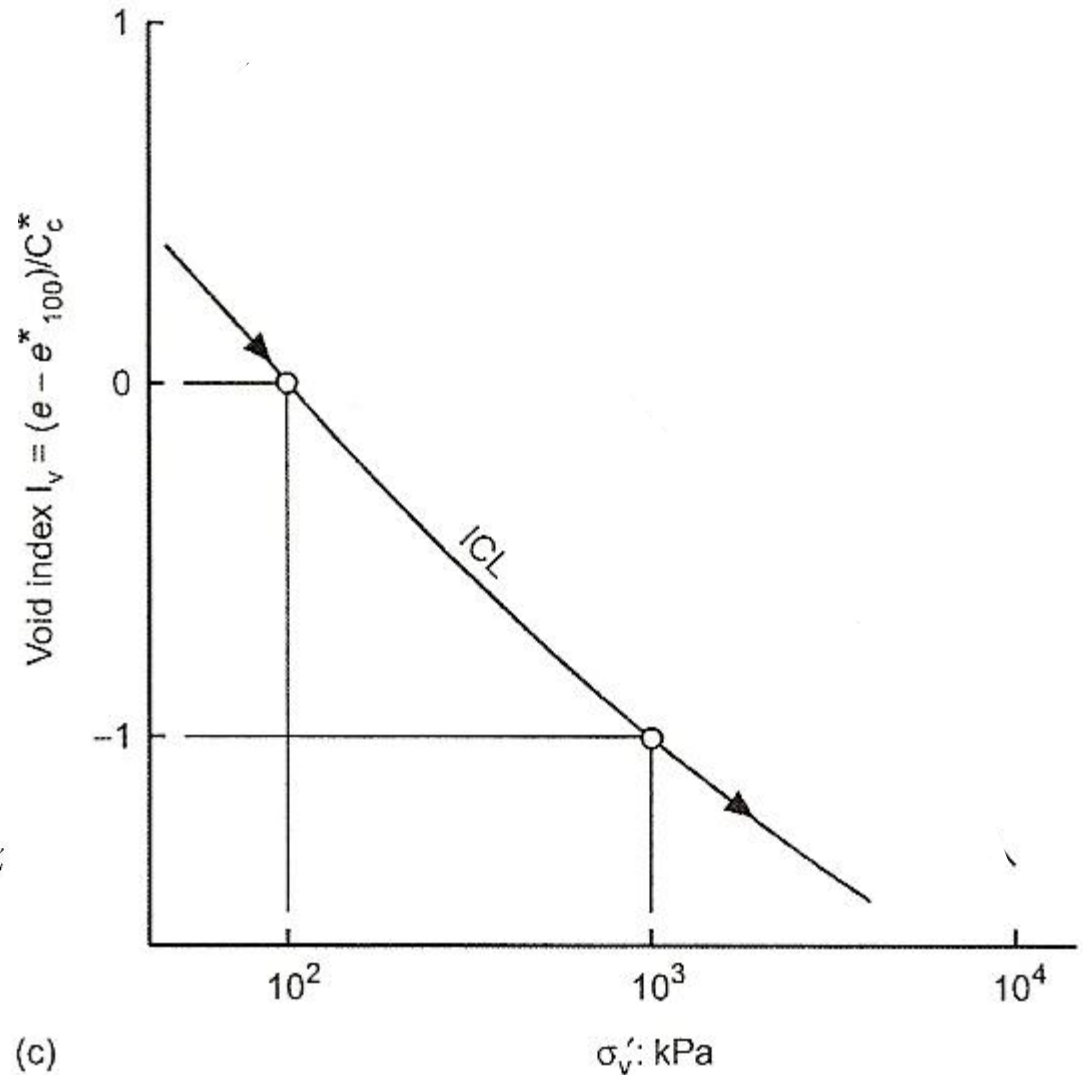
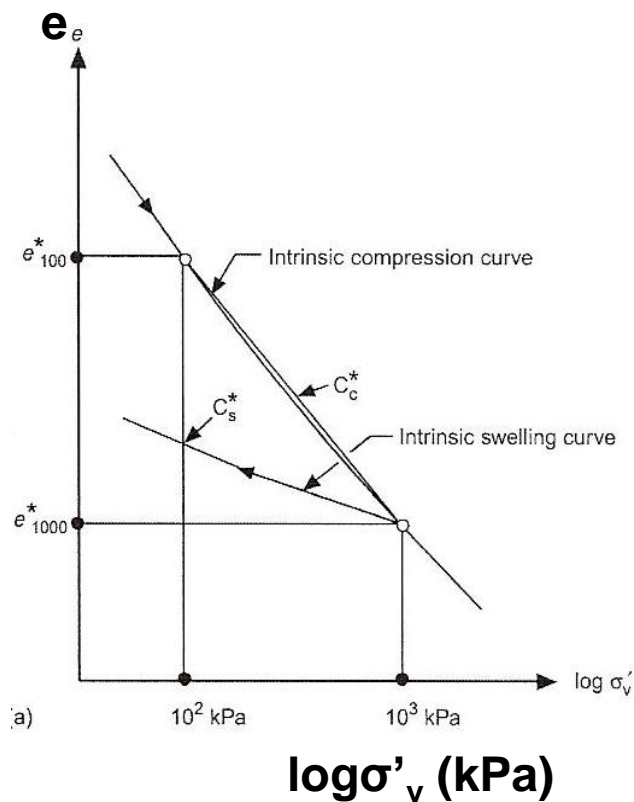
• **Μάργα Ισθμού Κορίνθου $p' = ct$**



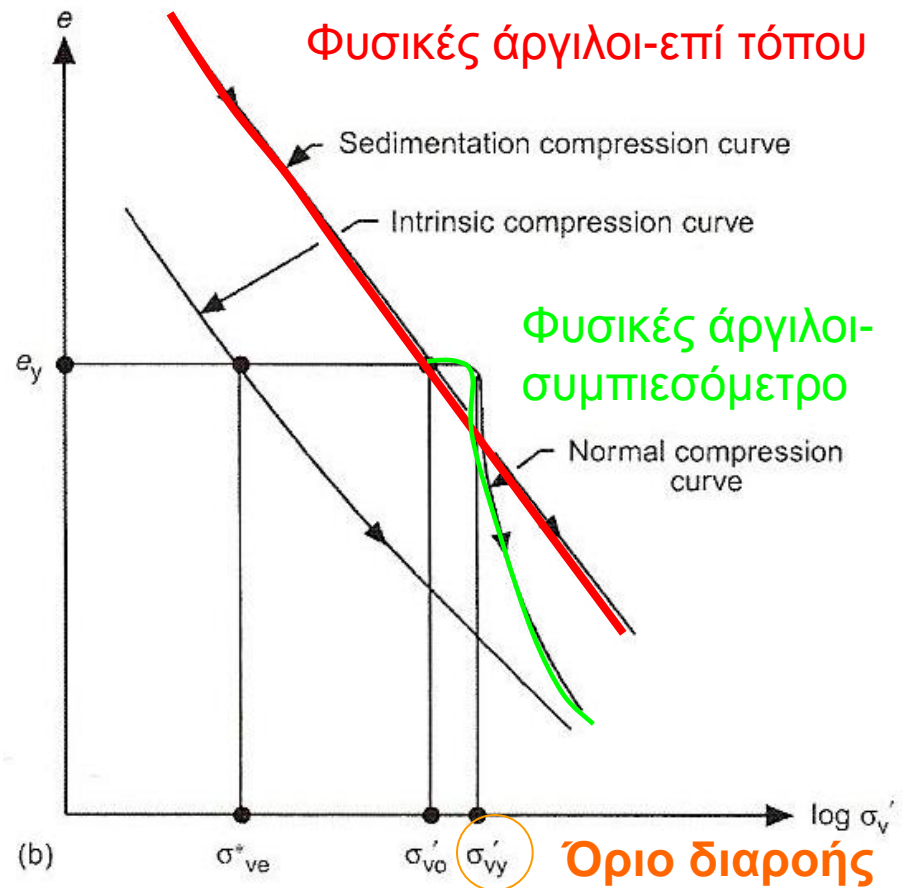
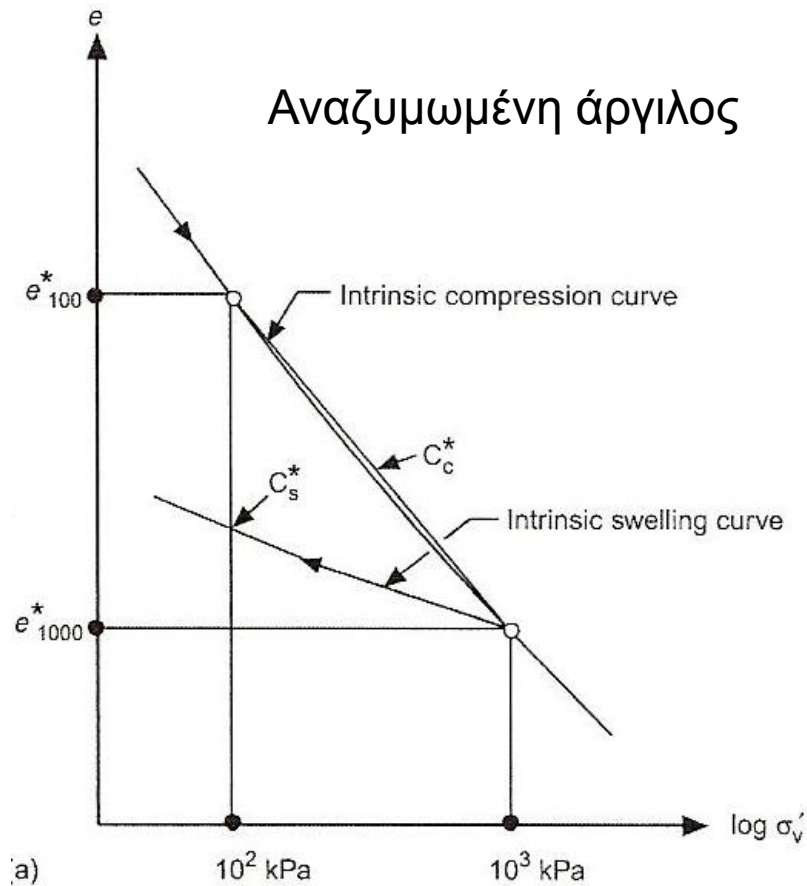
Συμπεριφορά φυσικών αργίλων

$$I_v = (e - e^*_{100}) / (e^*_{100} - e^*_{1000}) = (e - e^*_{100}) / C_c^*$$

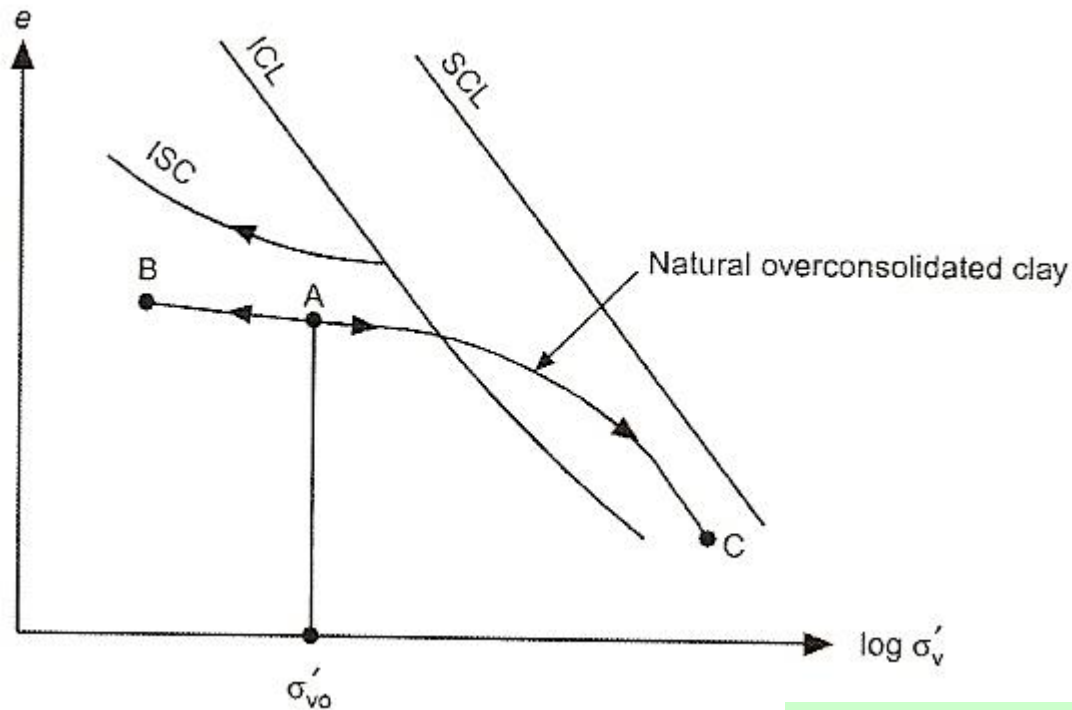
- Κανονικοποίηση



ΣΤΕΡΕΟΠΟΙΗΣΗ



φυσική προστερεοποιημένη άργιλος

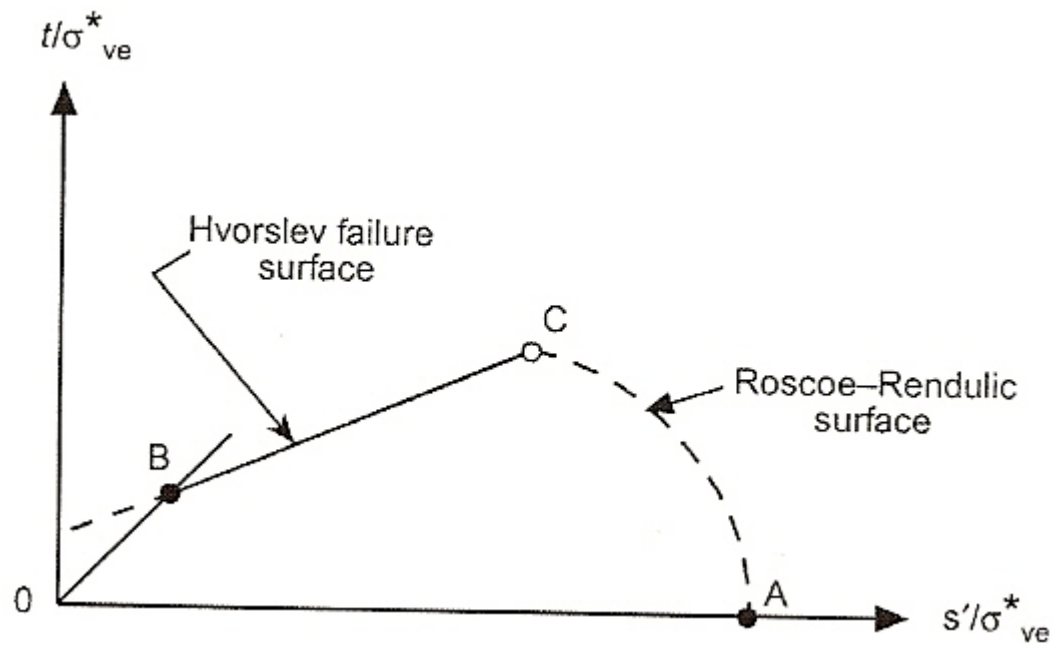


AC: καταστροφή δομής,
δυσκολος προσδιορισμός
ορίου διαρροής

$\sigma_{vy} > \sigma_{vc}$
Παρουσία
εδαφικών
δεσμών

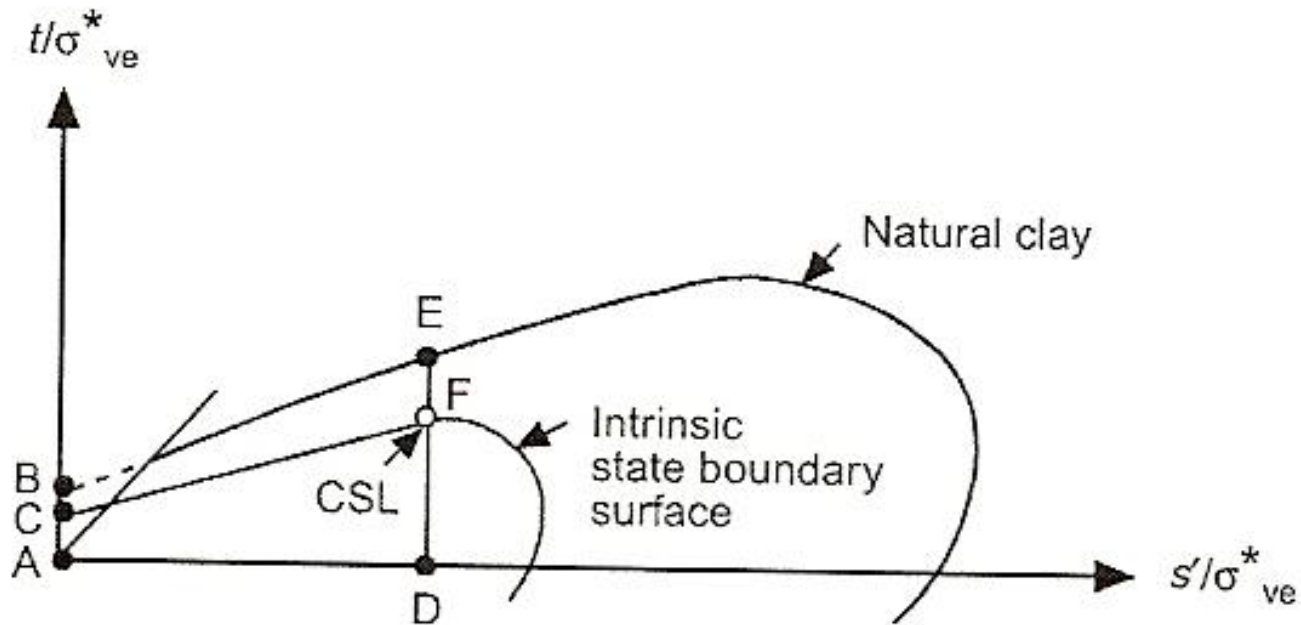
ΚΡΙΣΙΜΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ

- Αναζυμωμένα υλικά

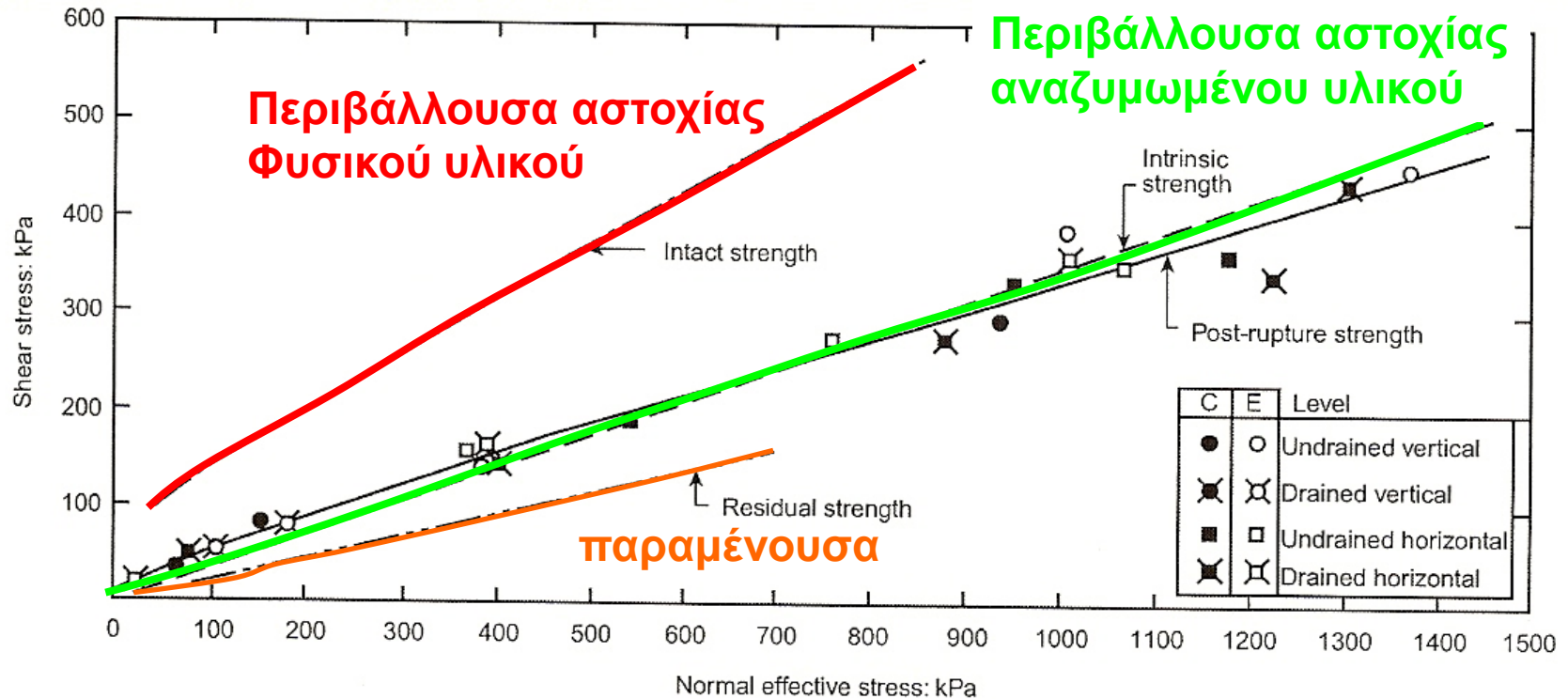


ΚΡΙΣΙΜΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ

- Σύγκριση φυσικών & αναζυμωμένων υλικών

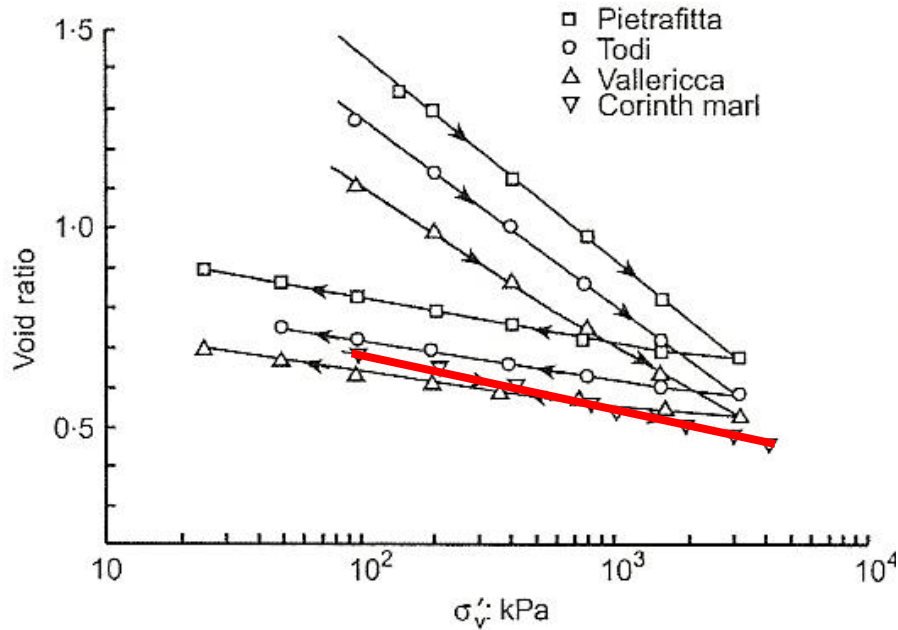


περιβάλλουσες- London clay

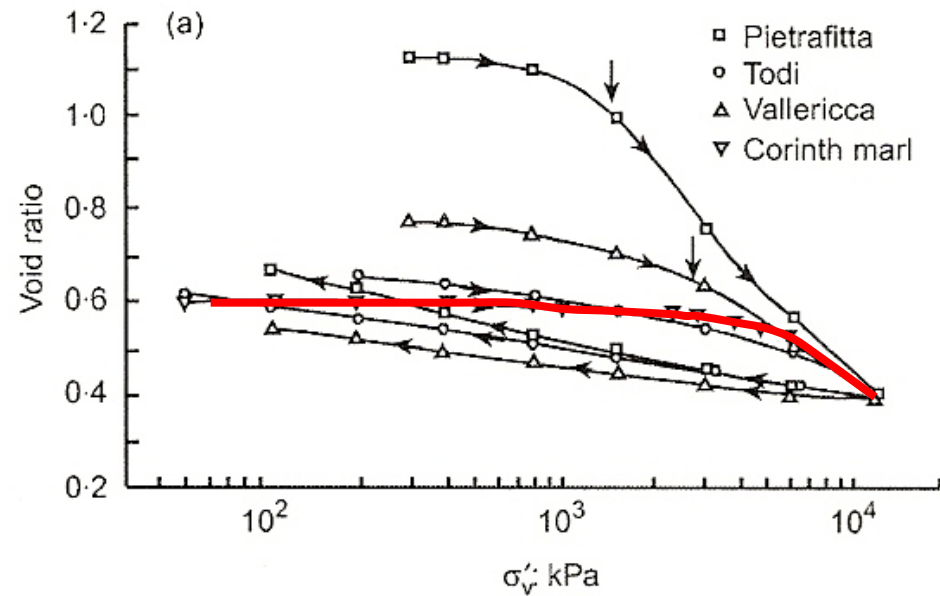


στερεοποίηση φυσικών αργίλων

- αναζυμωμένες



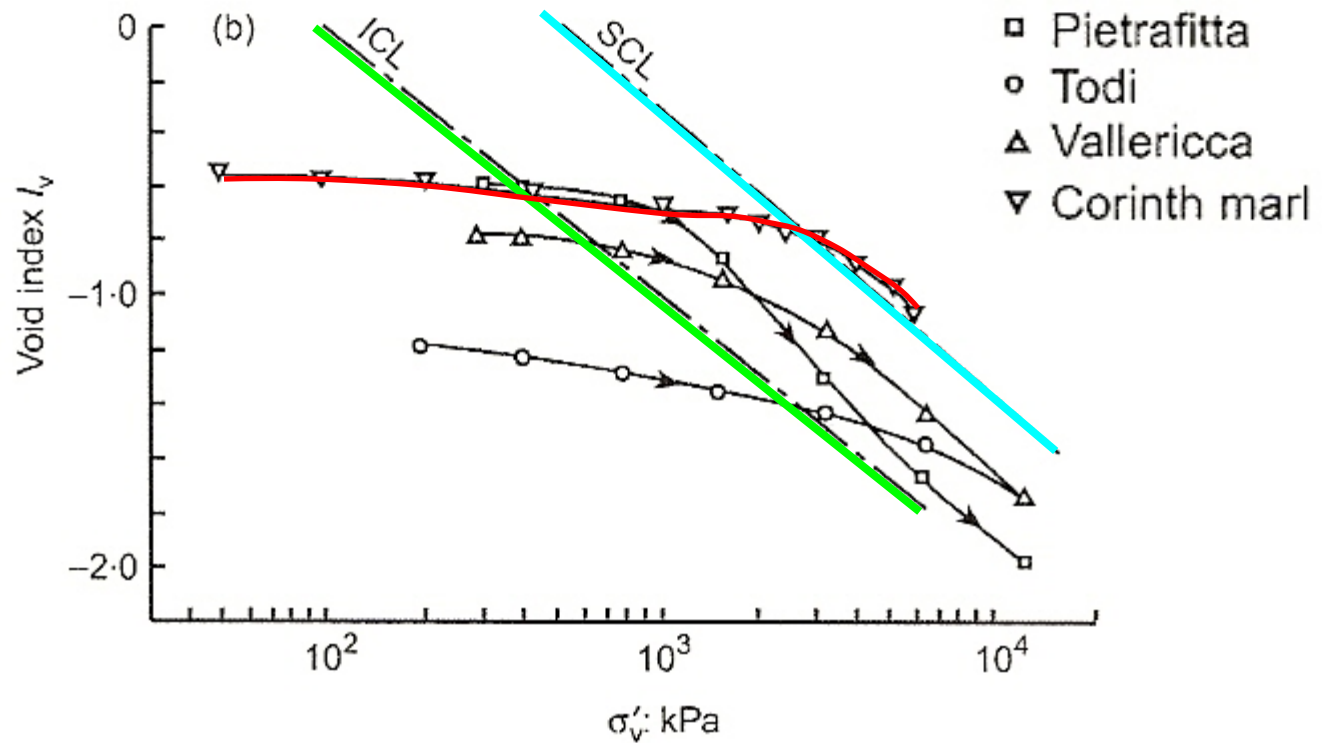
- φυσικές άργιλοι



	pietrafitta	Todi	Vallericca	Corinth Marl
$W_0(\%)$	41.9%	17.5	28.6	21.1
$W_L(\%)$	87%	67.2	60.2	27.5

στερεοποίηση φυσικών αργίλων

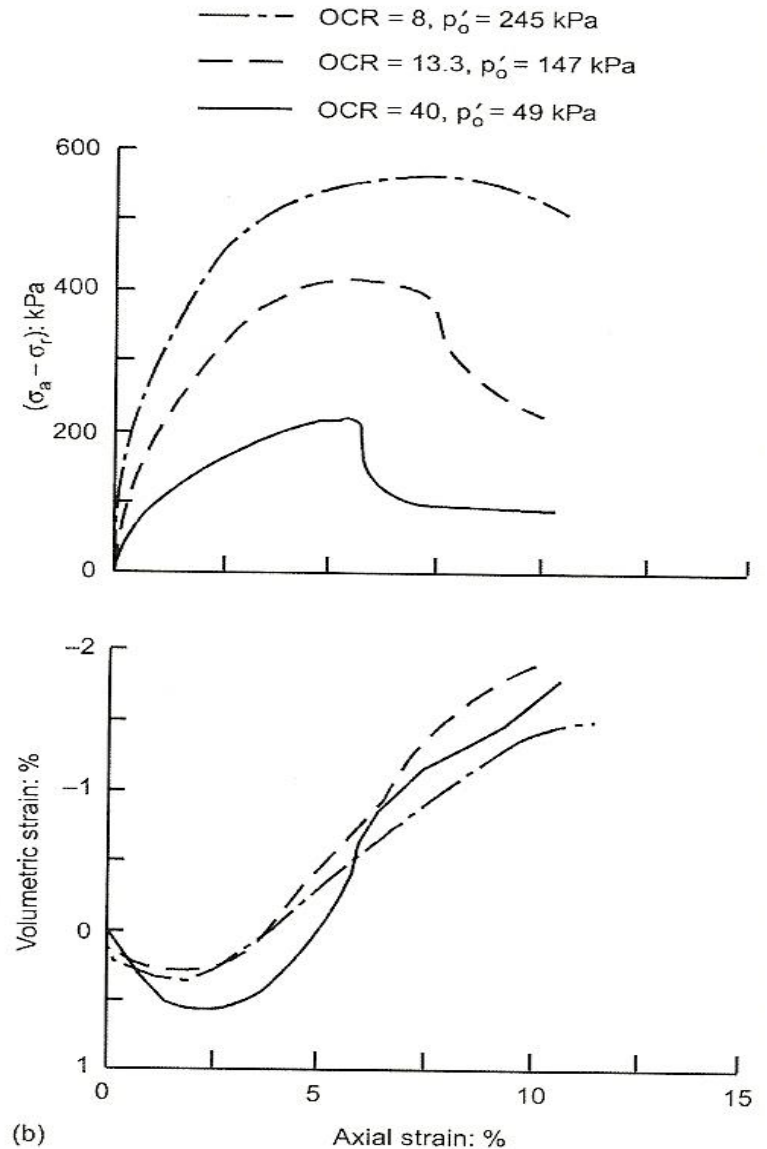
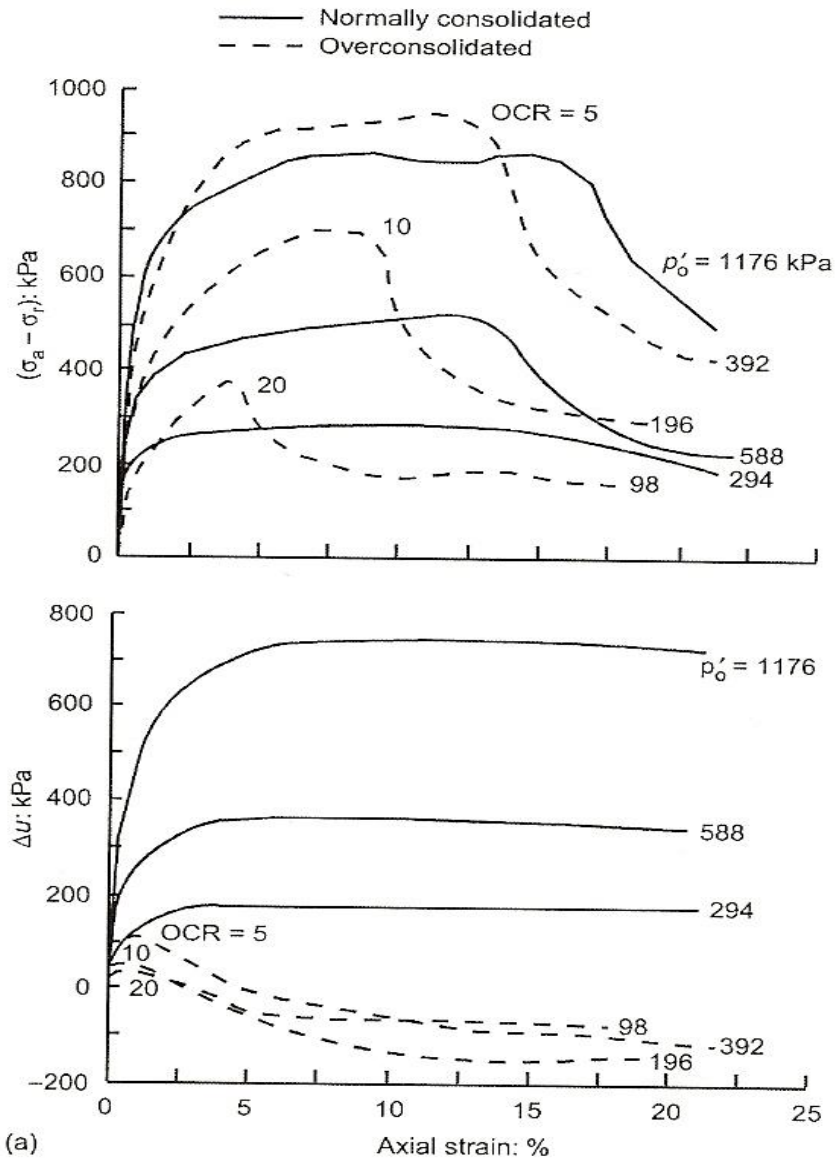
- κανονικοποίηση



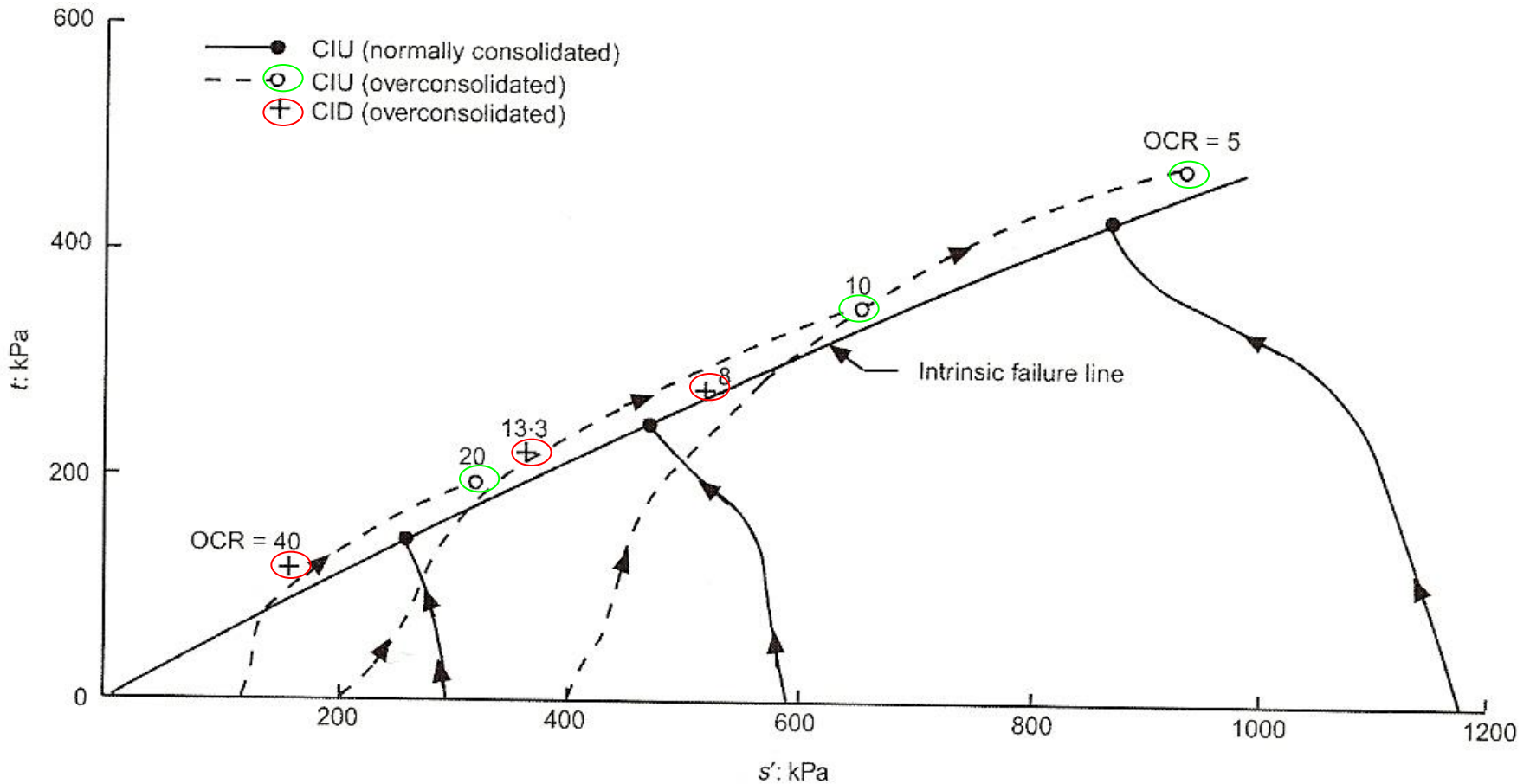
pietrafitta clay-αναζυμωμένη

εμποδιζόμενη στράγγιση

ελεύθερη στράγγιση

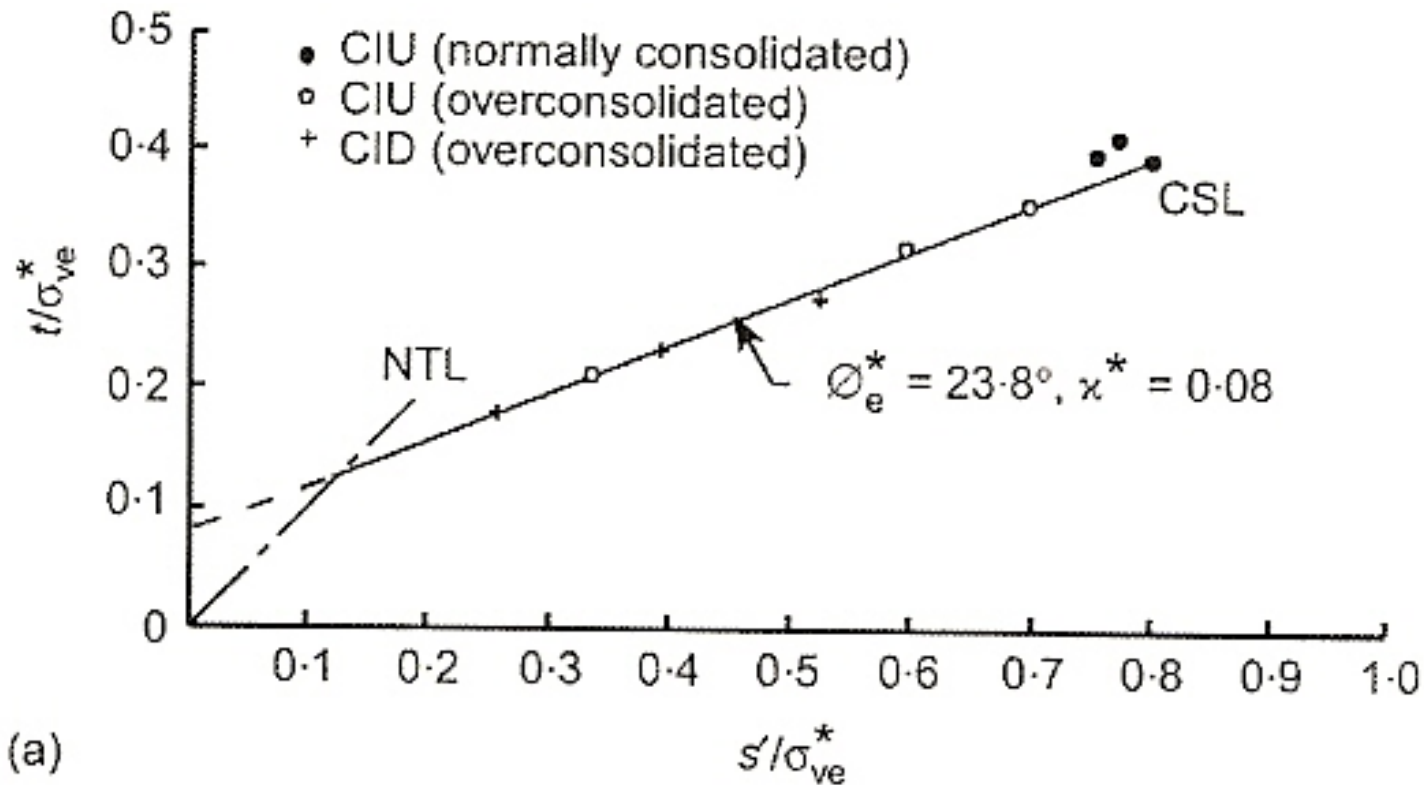


pietrafitta clay-αναζυμωμένη διαδρομές τάσεων

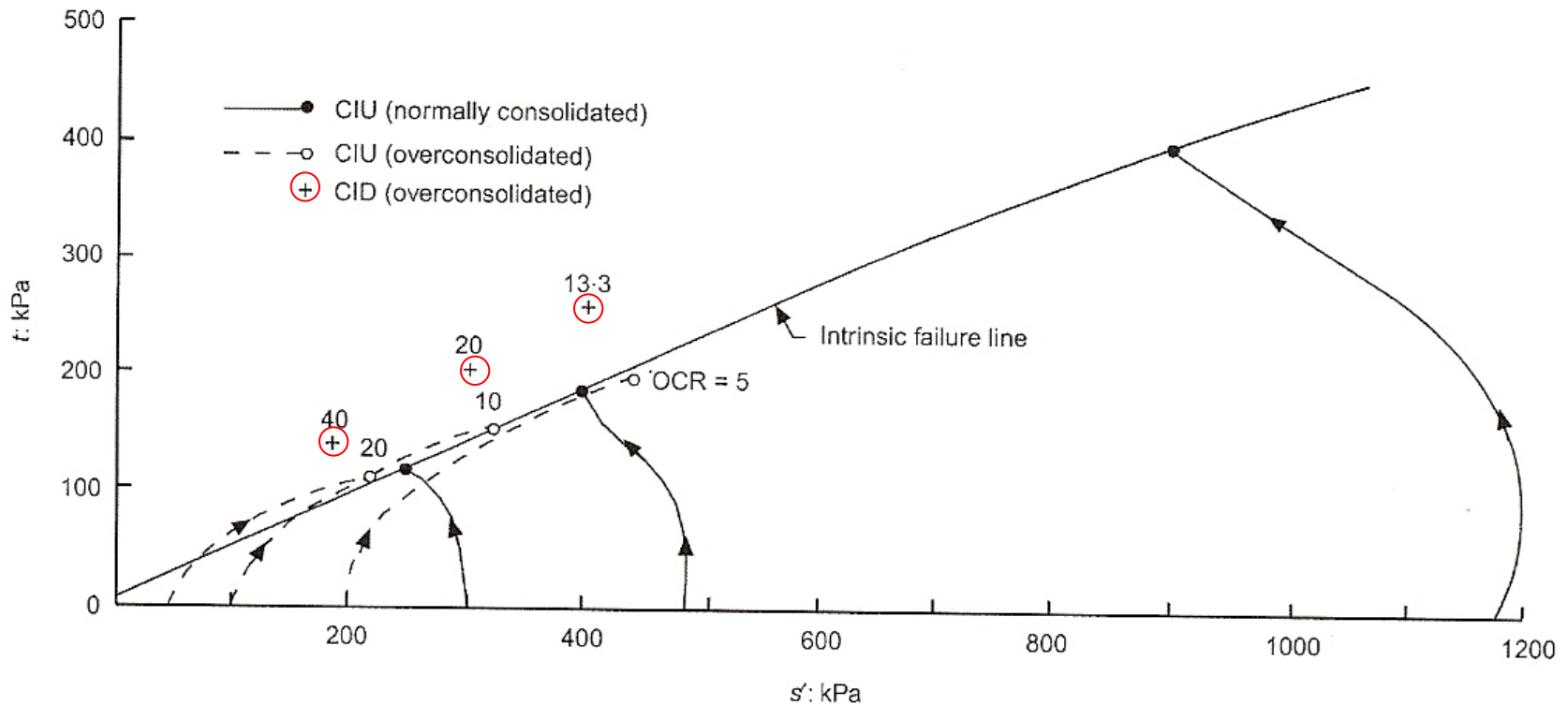


pietrafitta clay-αναζυμωμένη διαδρομές τάσεων

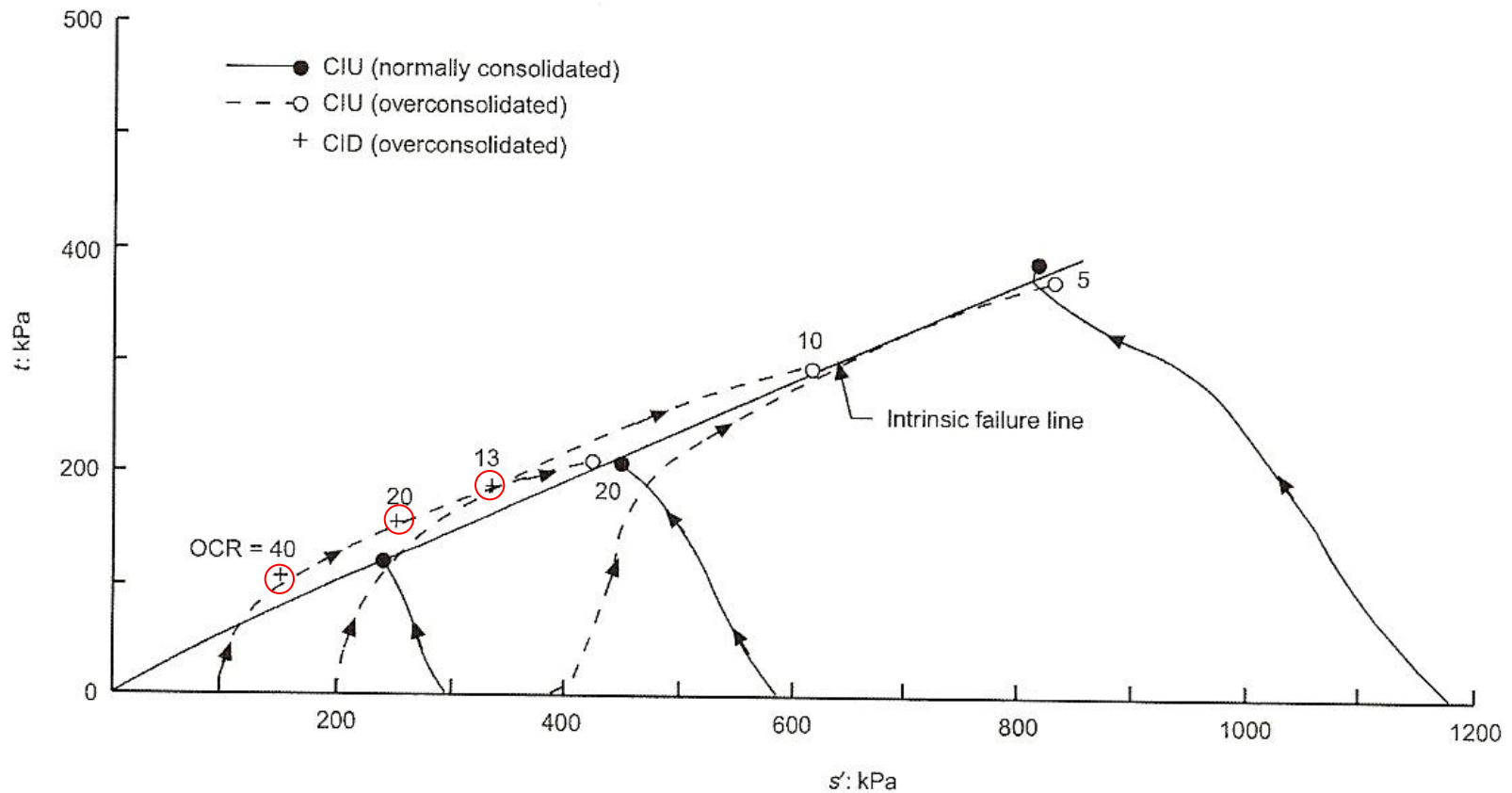
- κανονικοποίηση



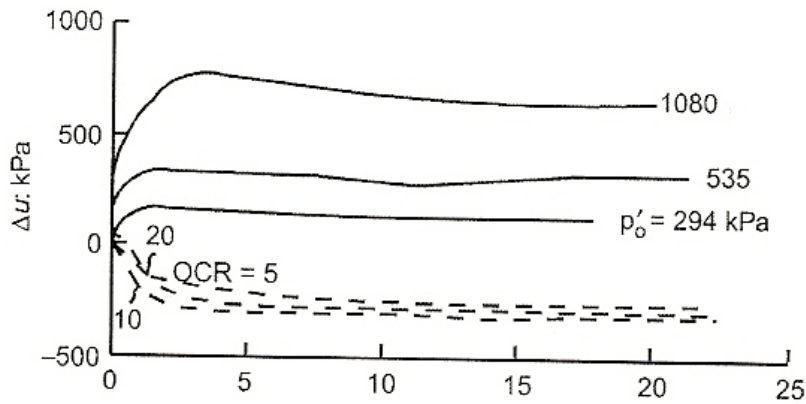
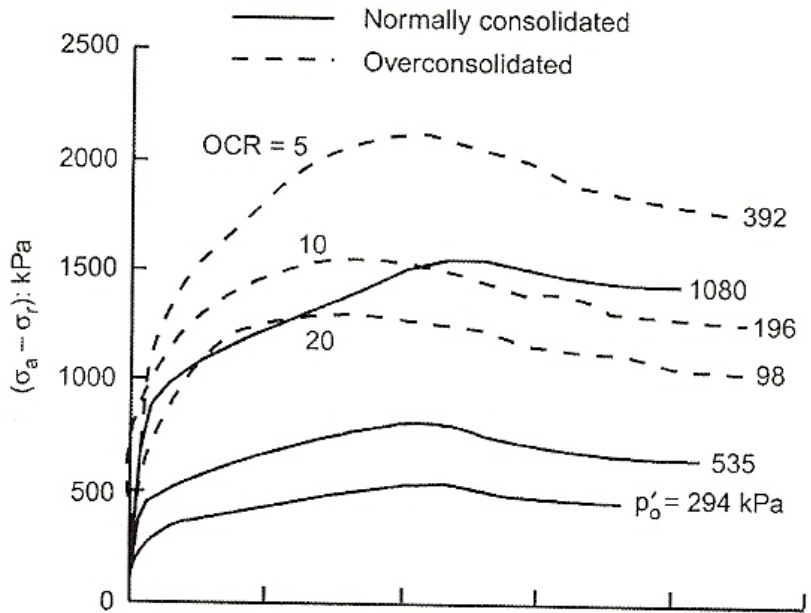
Todi clay-αναζυμωμένη διαδρομές τάσεων



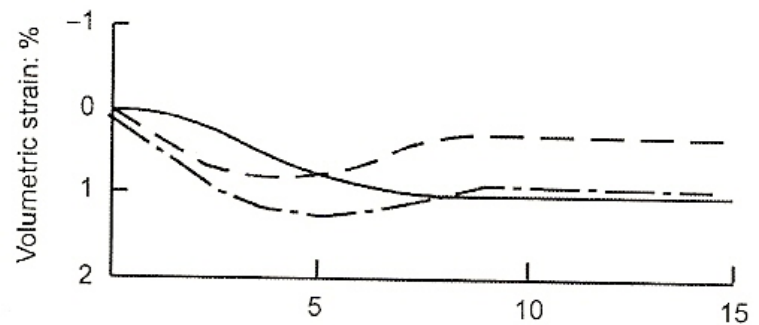
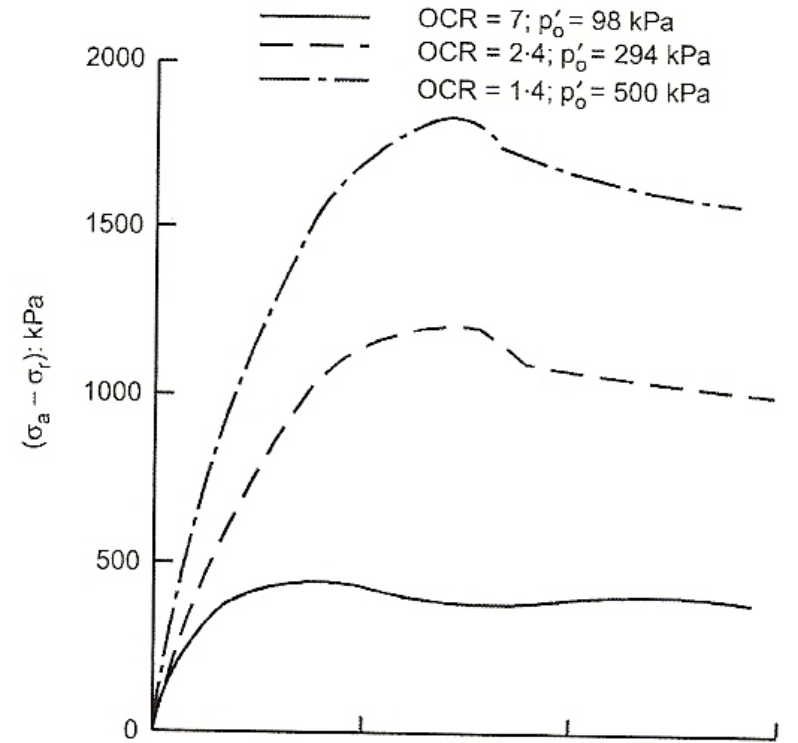
Vallericca clay-αναζυμωμένη διαδρομές τάσεων



μαργα Ισθμού Κορίνθου



(a)



(b)

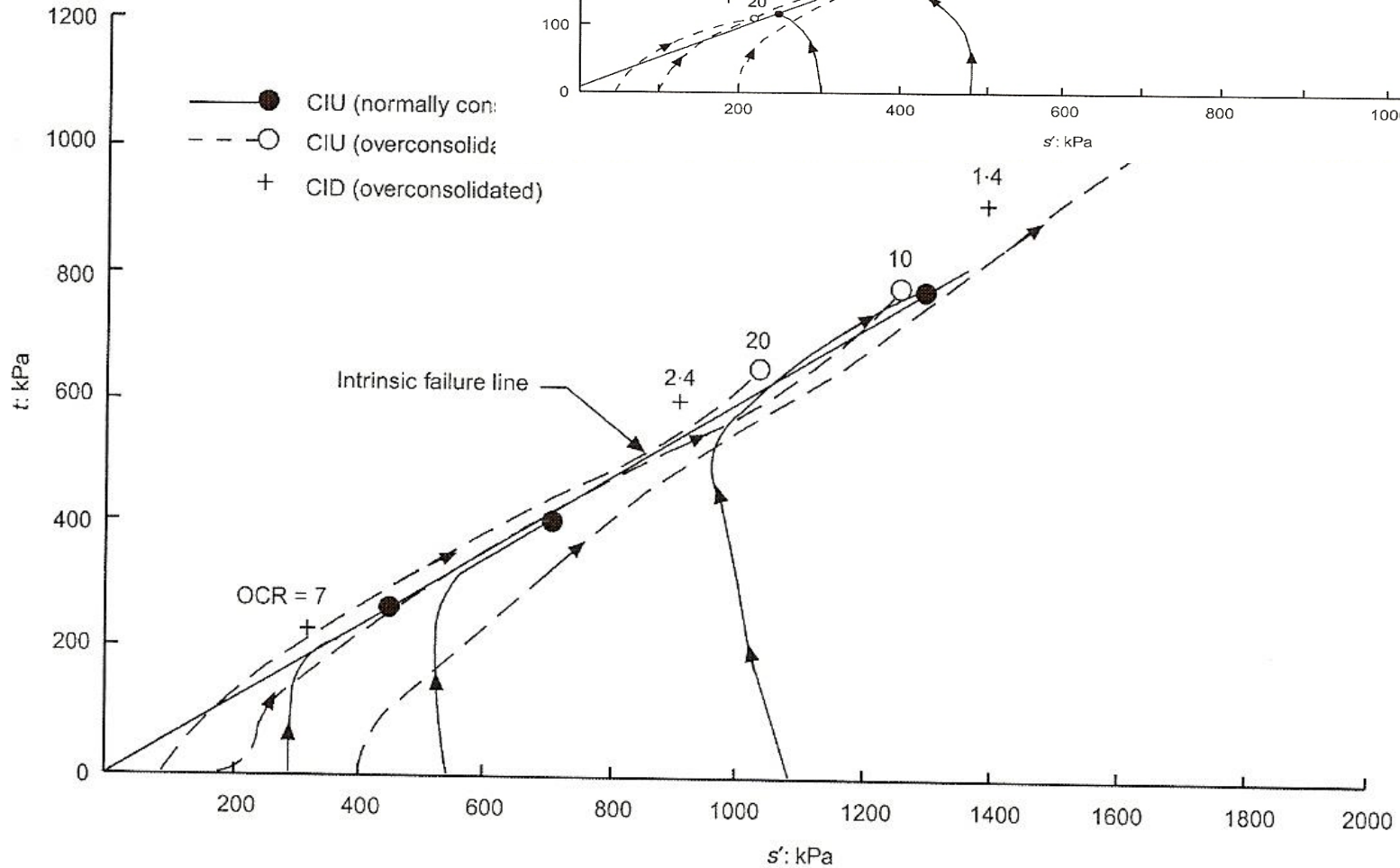
Εμποδιζόμενη

&

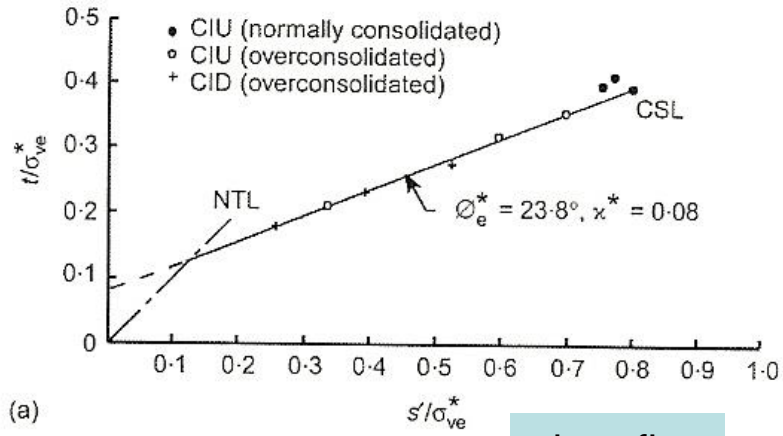
Ελεύθερη στράγγιση

ΔΙΑΔΡΟΜΕΣ

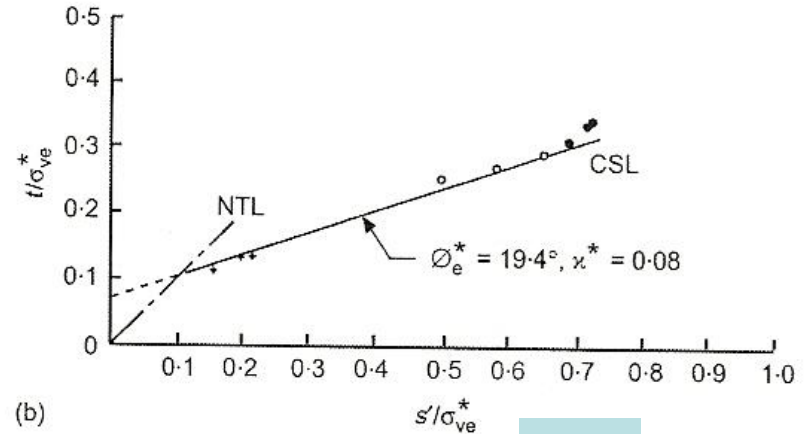
• Μάργα



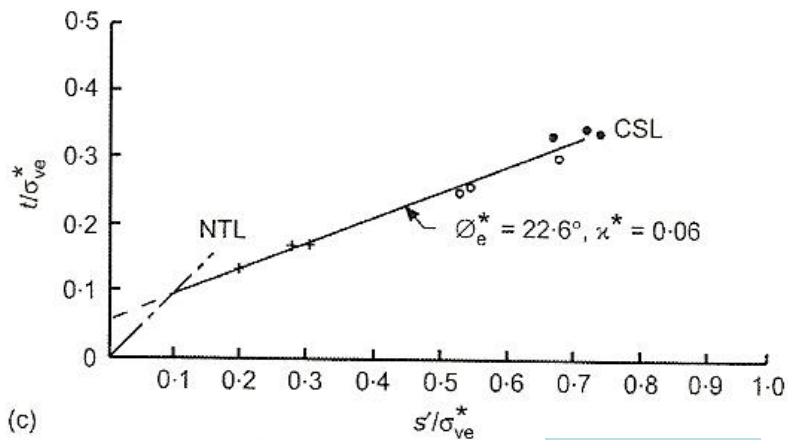
ΣΥΝΟΨΗ



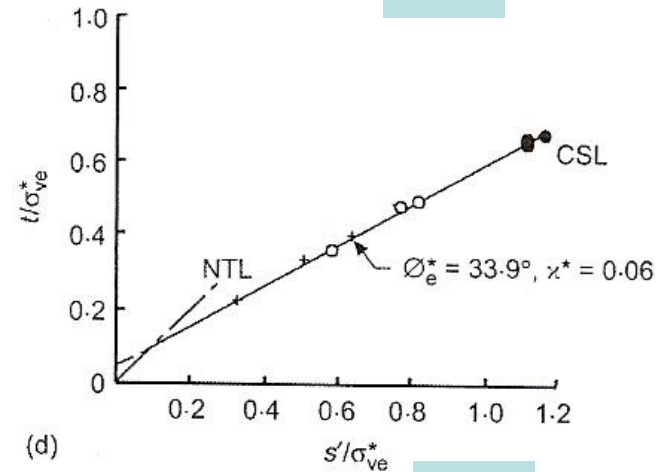
pietrafitta



Todi

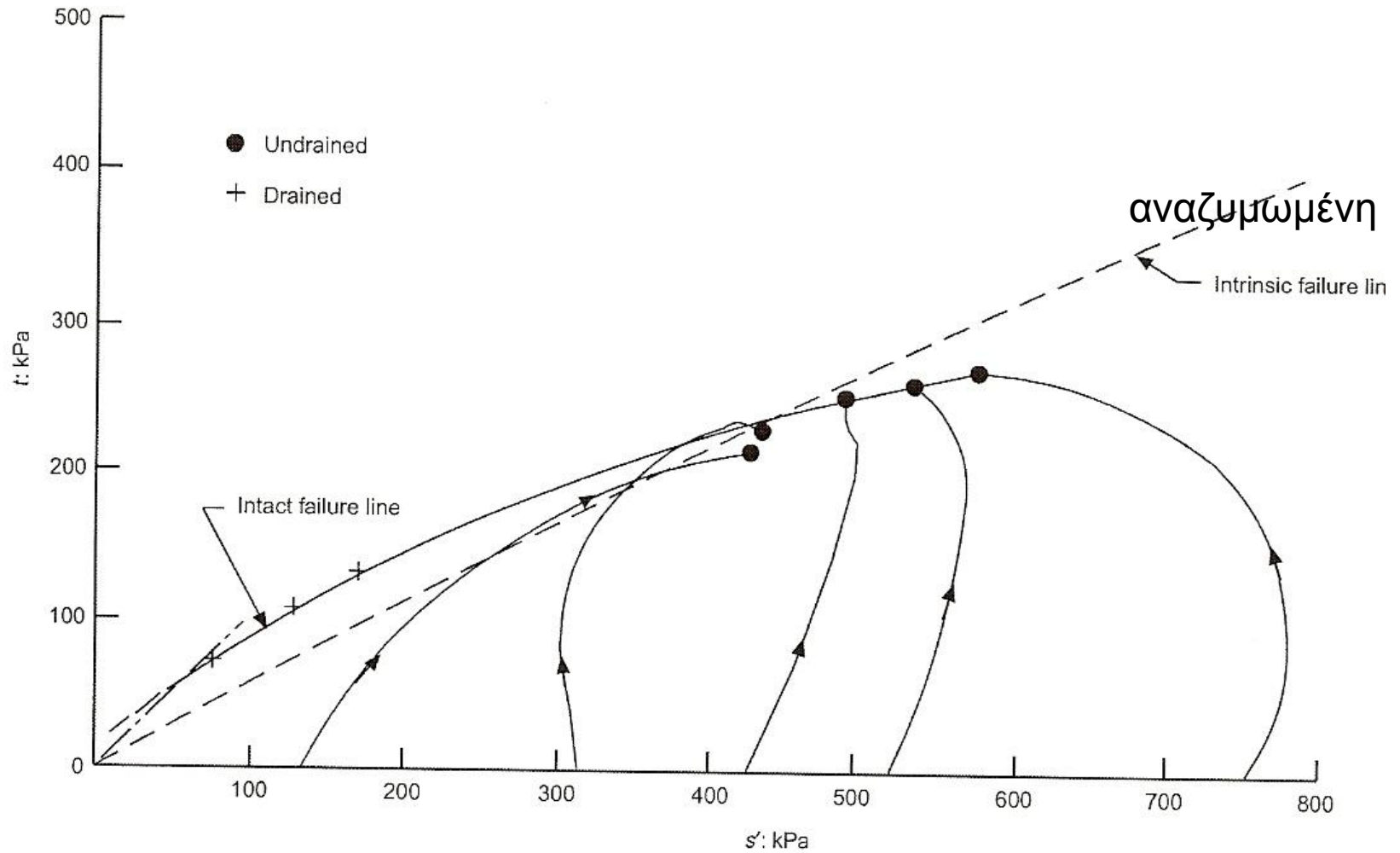


vallericca

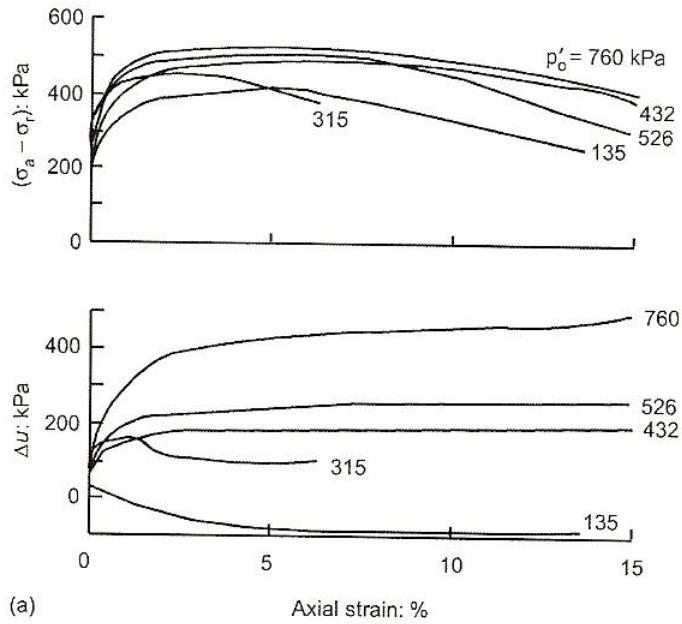


marl

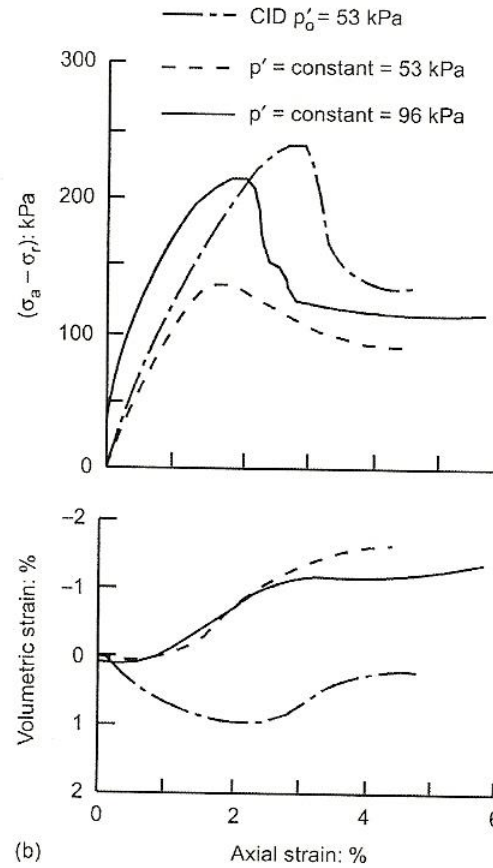
intact pietrafitta clay



intact pietrafitta clay

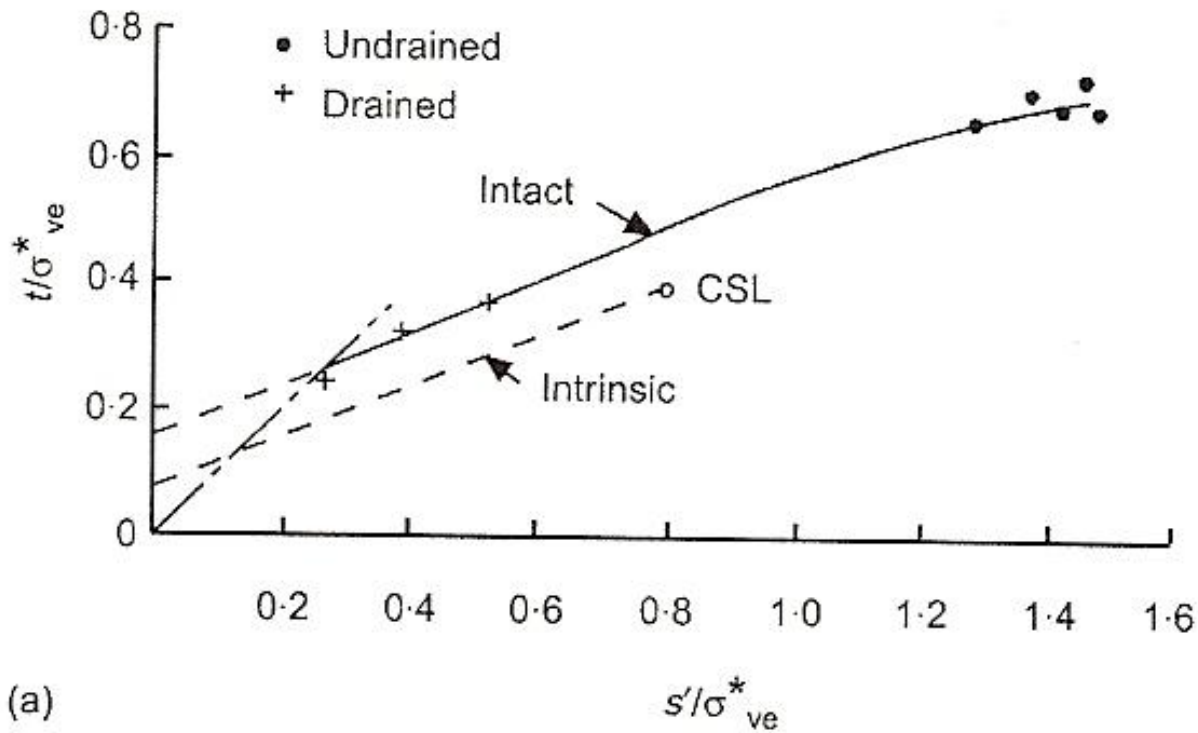
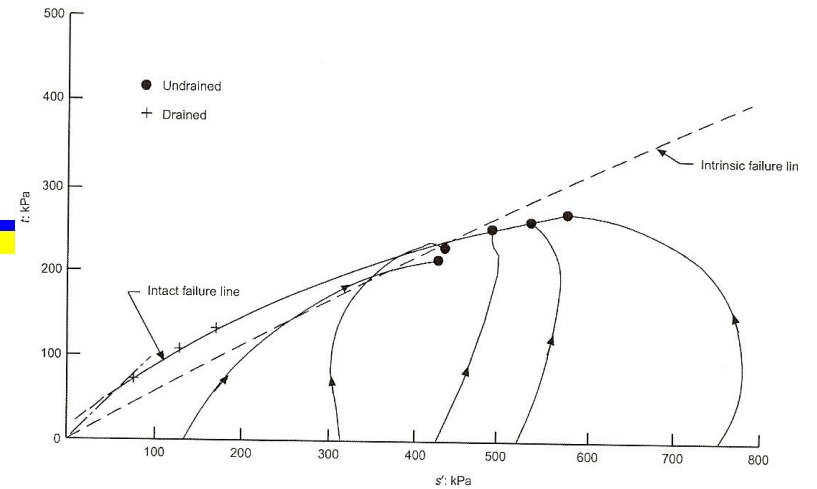


(a)



(b)

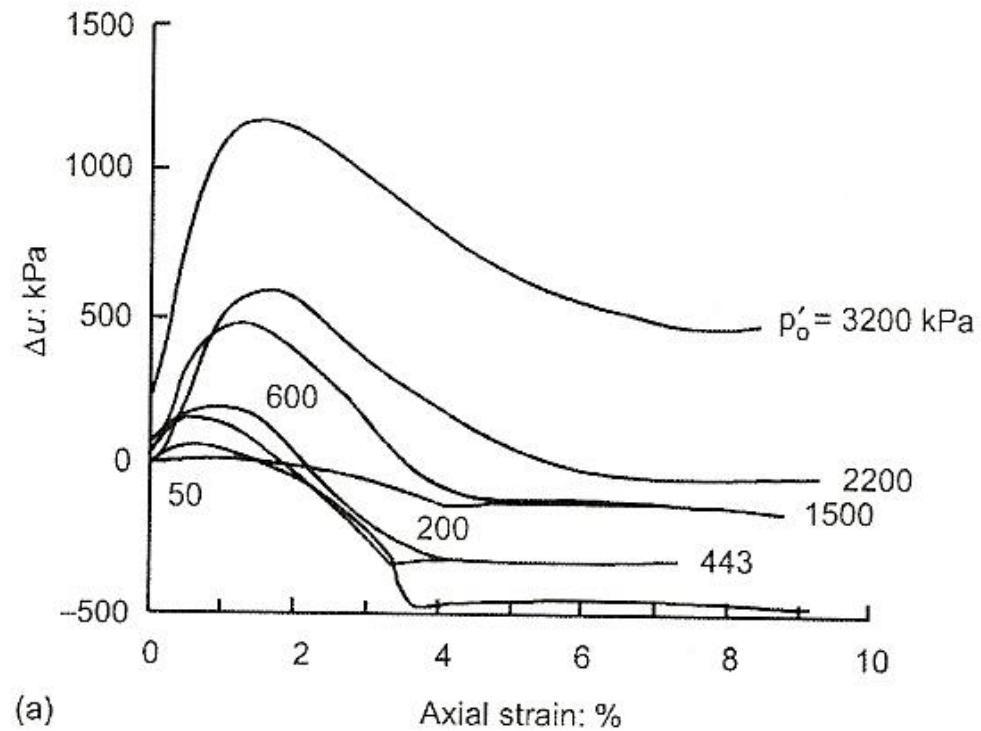
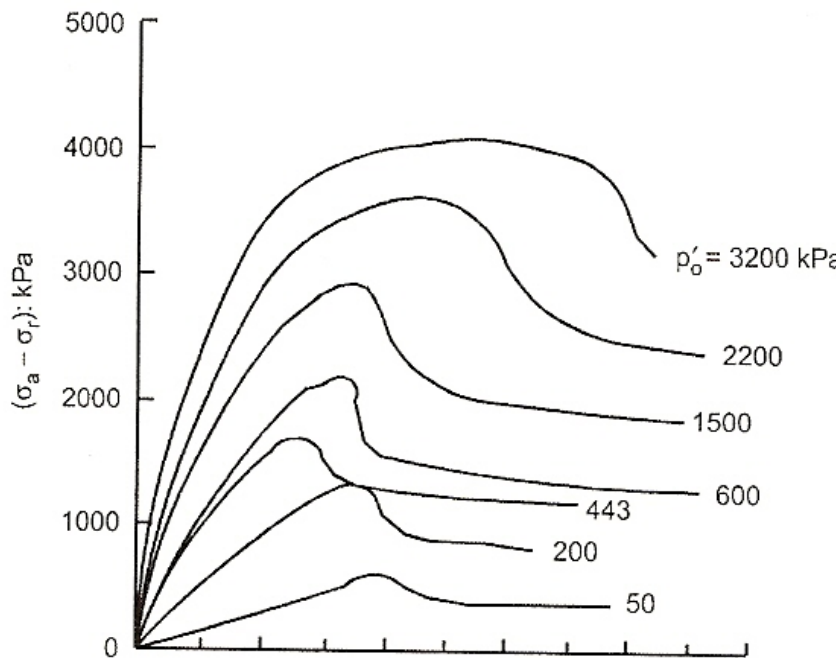
ΚΑΝΟΝΙΚΟΤΟΙΗΣΗ



(a)

intact todi clay

- Εμποδιζόμενη στράγγιση

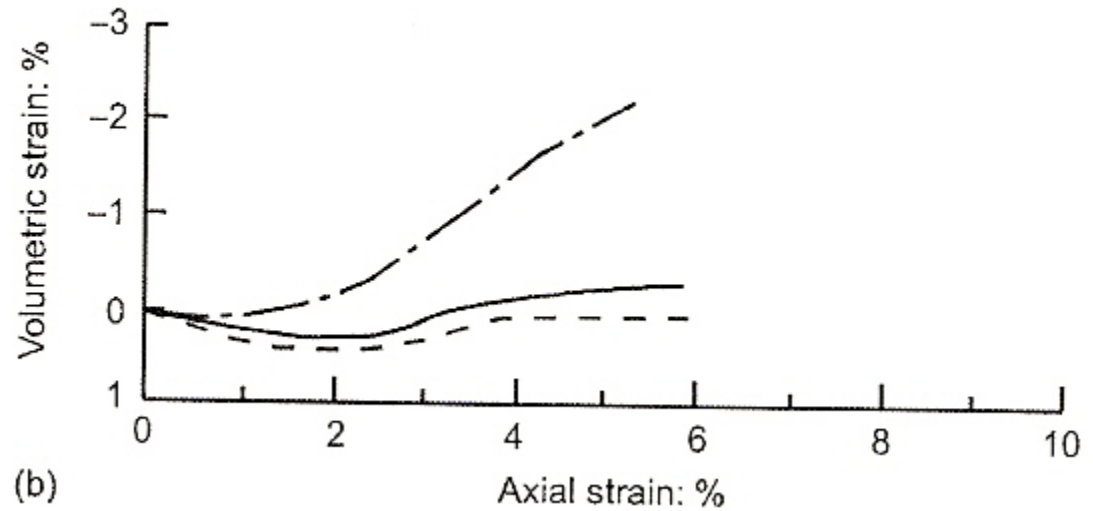
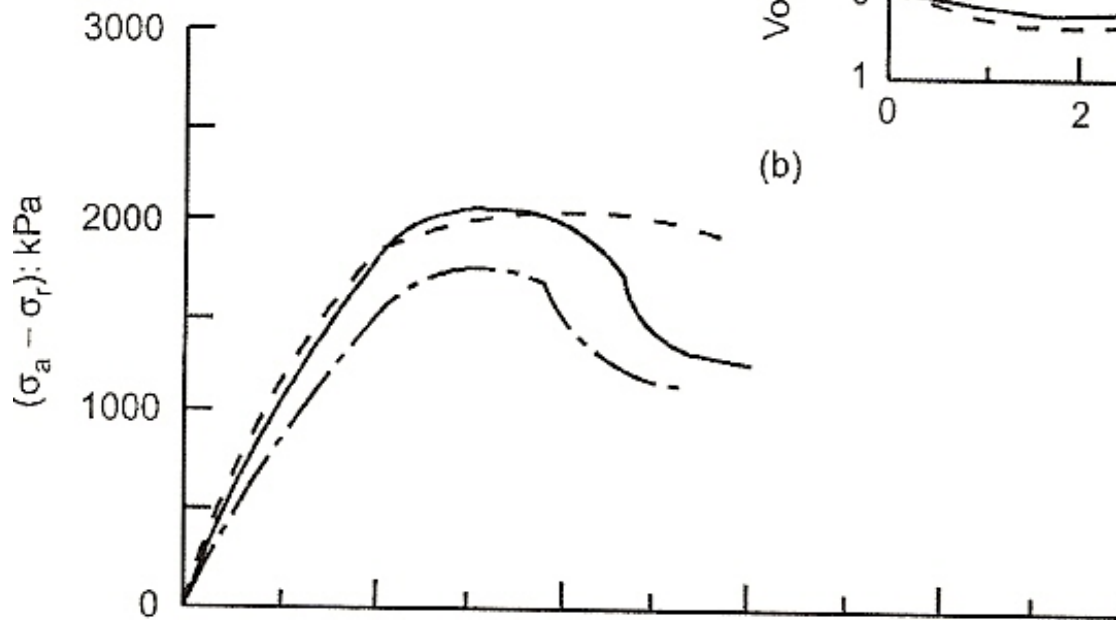


intact todi clay-ελεύθερη στράγγιση

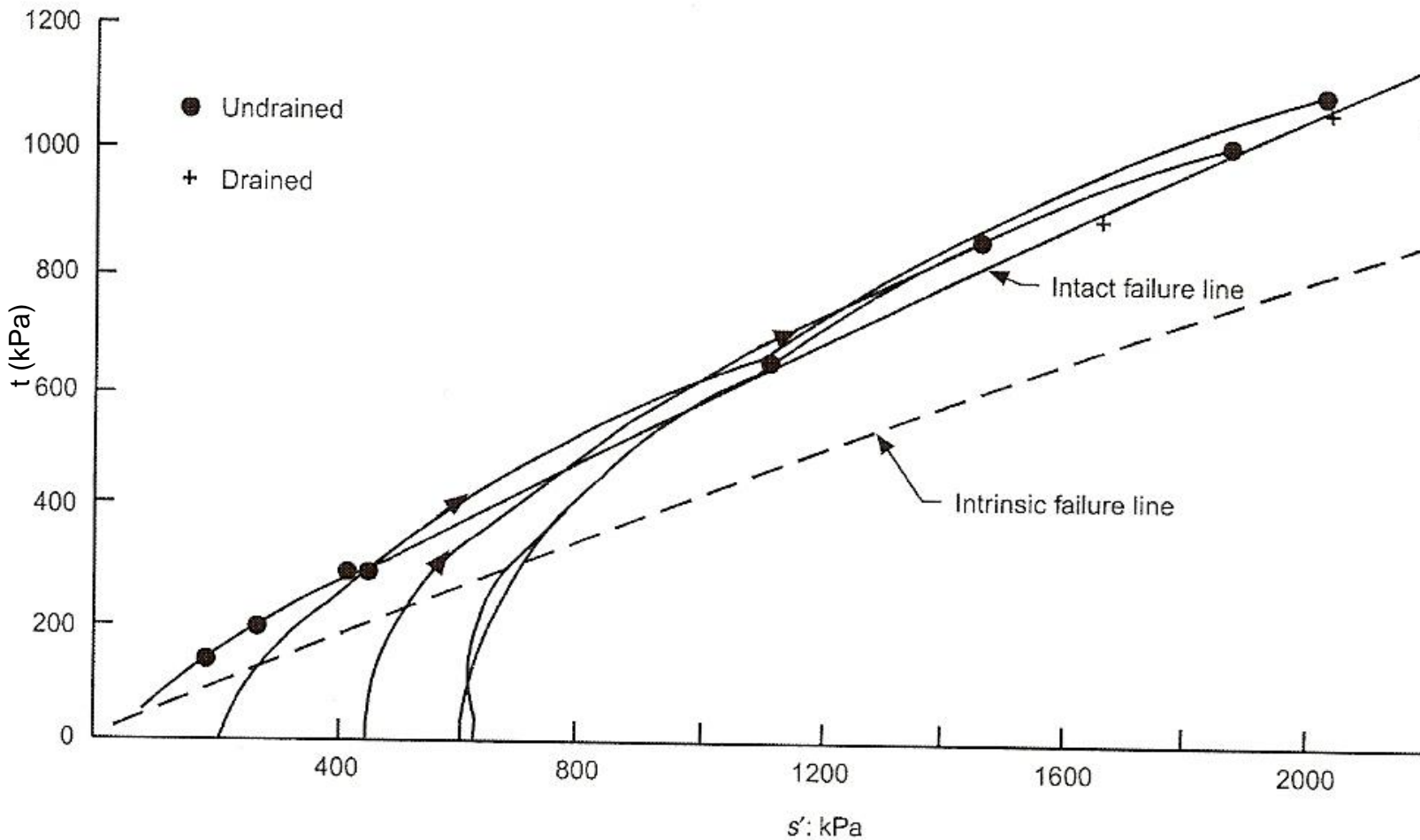
--- $p'_o = 784$ kPa

— $p'_o = 980$ kPa

- - - $p'_o = 1176$ k

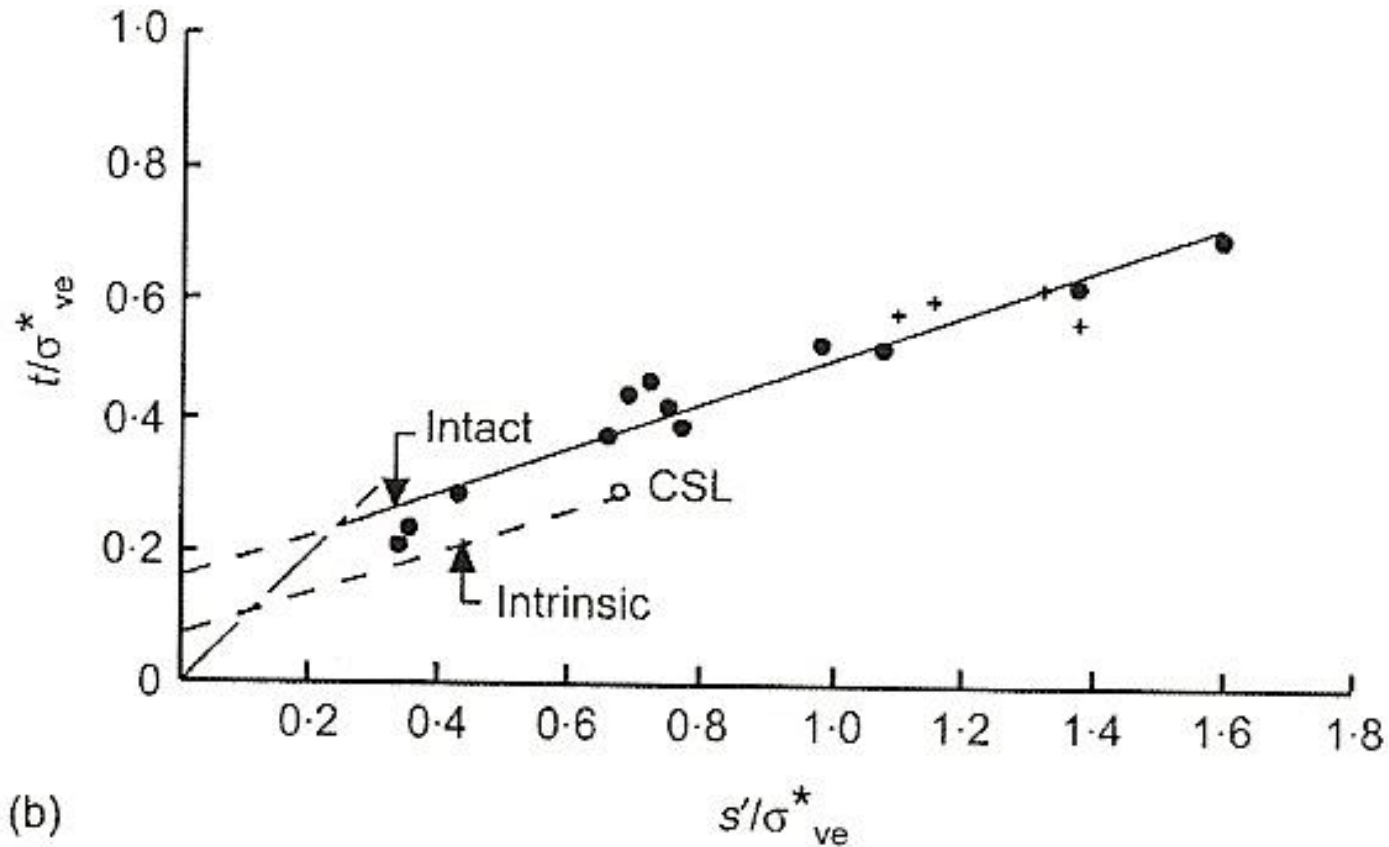


intact todi clay



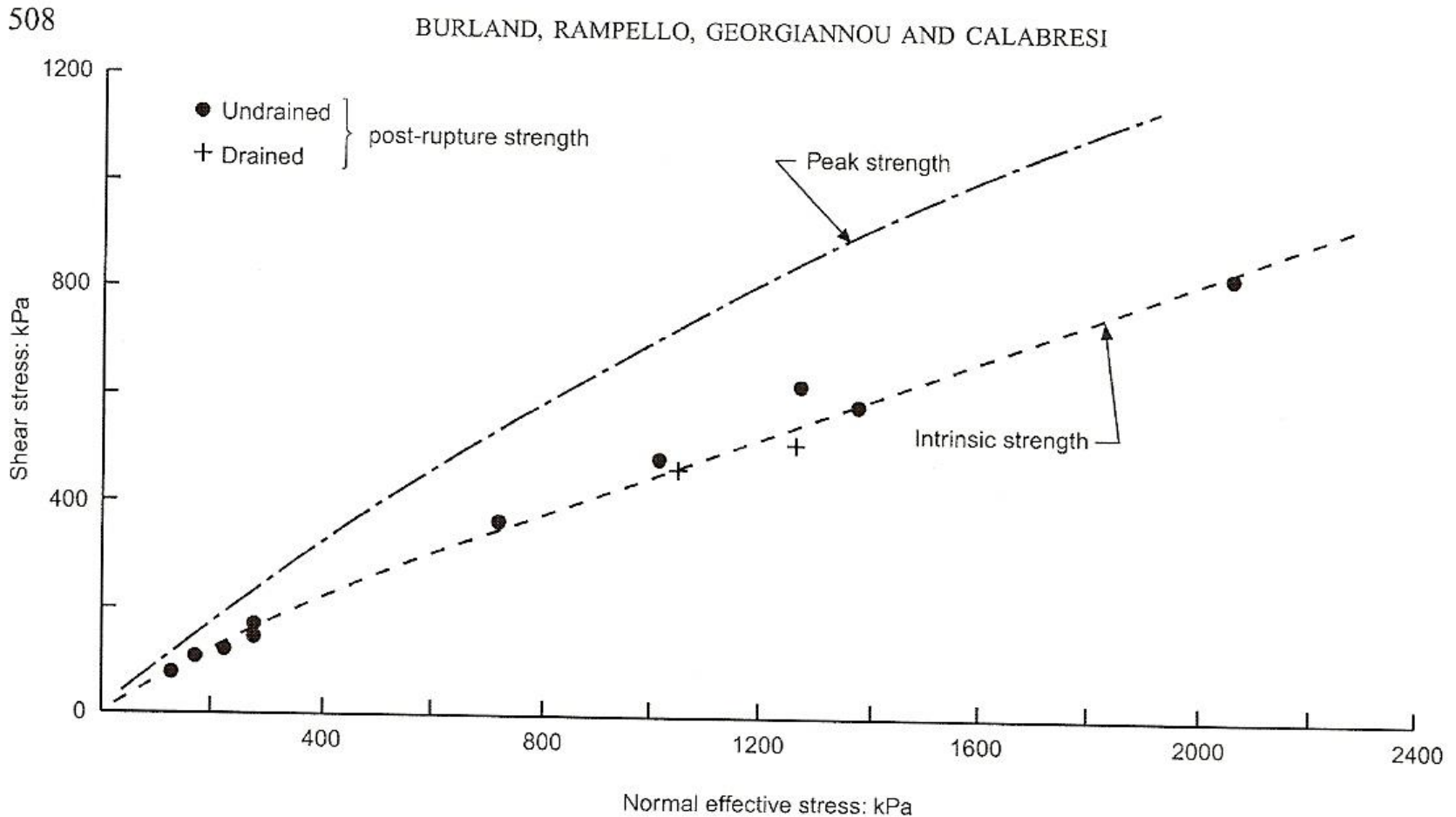
ΚΑΝΟΝΙΚΟΠΟΙΗΣΗ

- ΤΟΔΙ CLAY



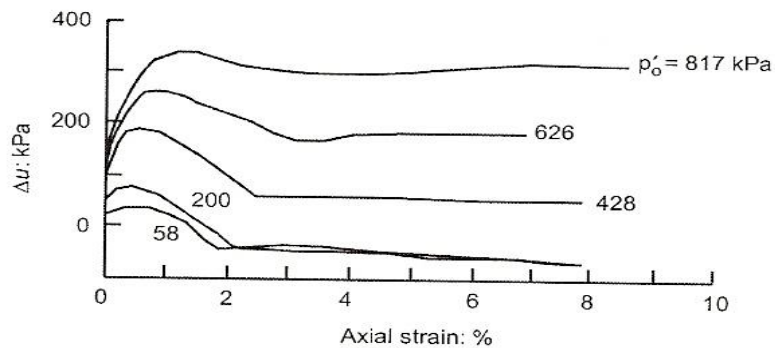
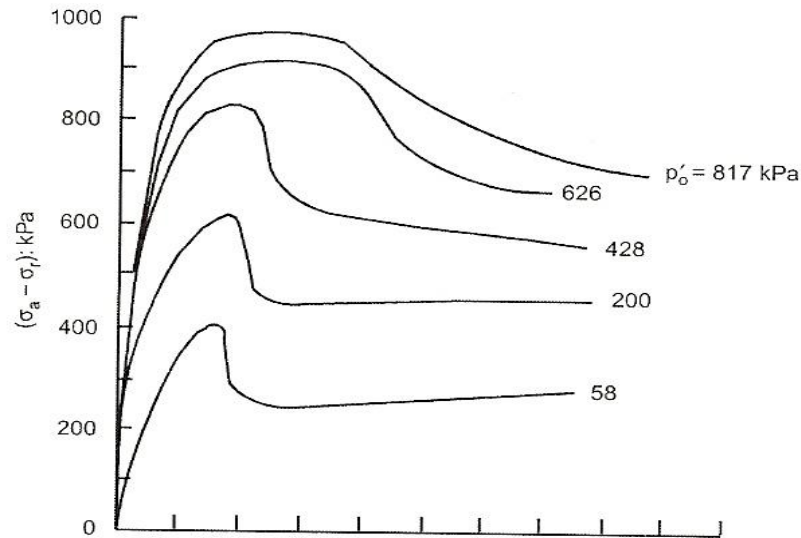
(b)

αντοχή μετά τη θραύση-Todi clay

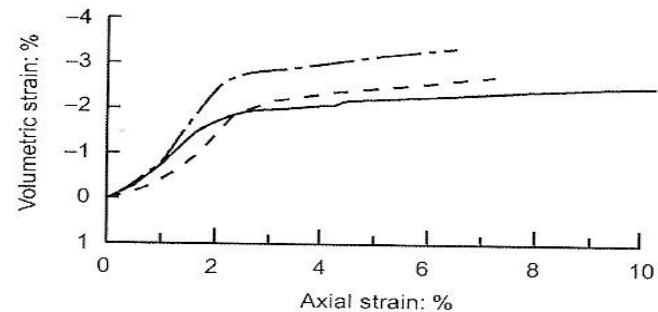
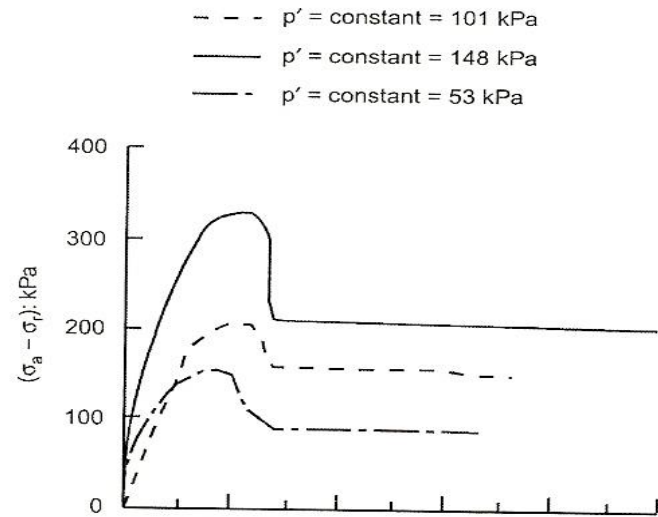


intact Vallericca clay

εμποδιζόμενη & ελεύθερη στράγγιση

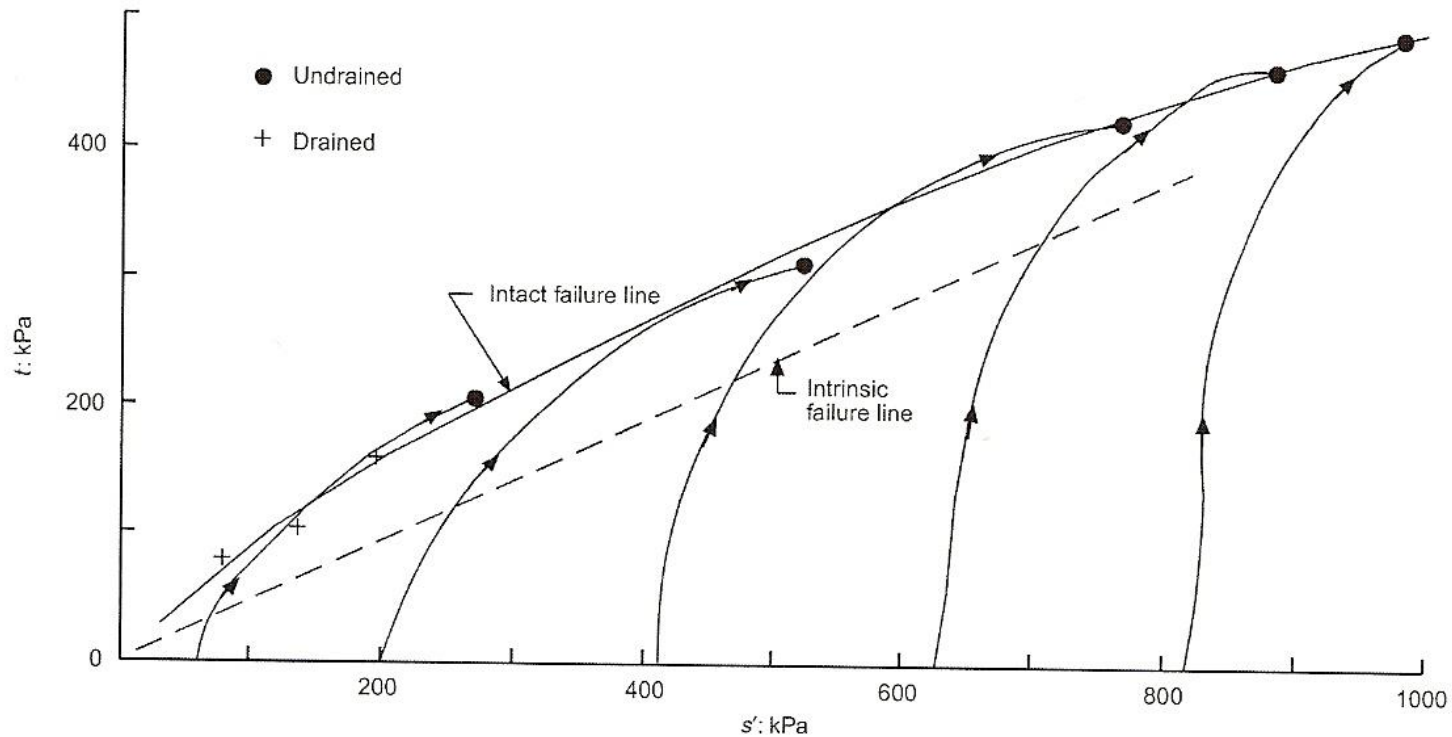


(a)



(b)

Vallericca clay



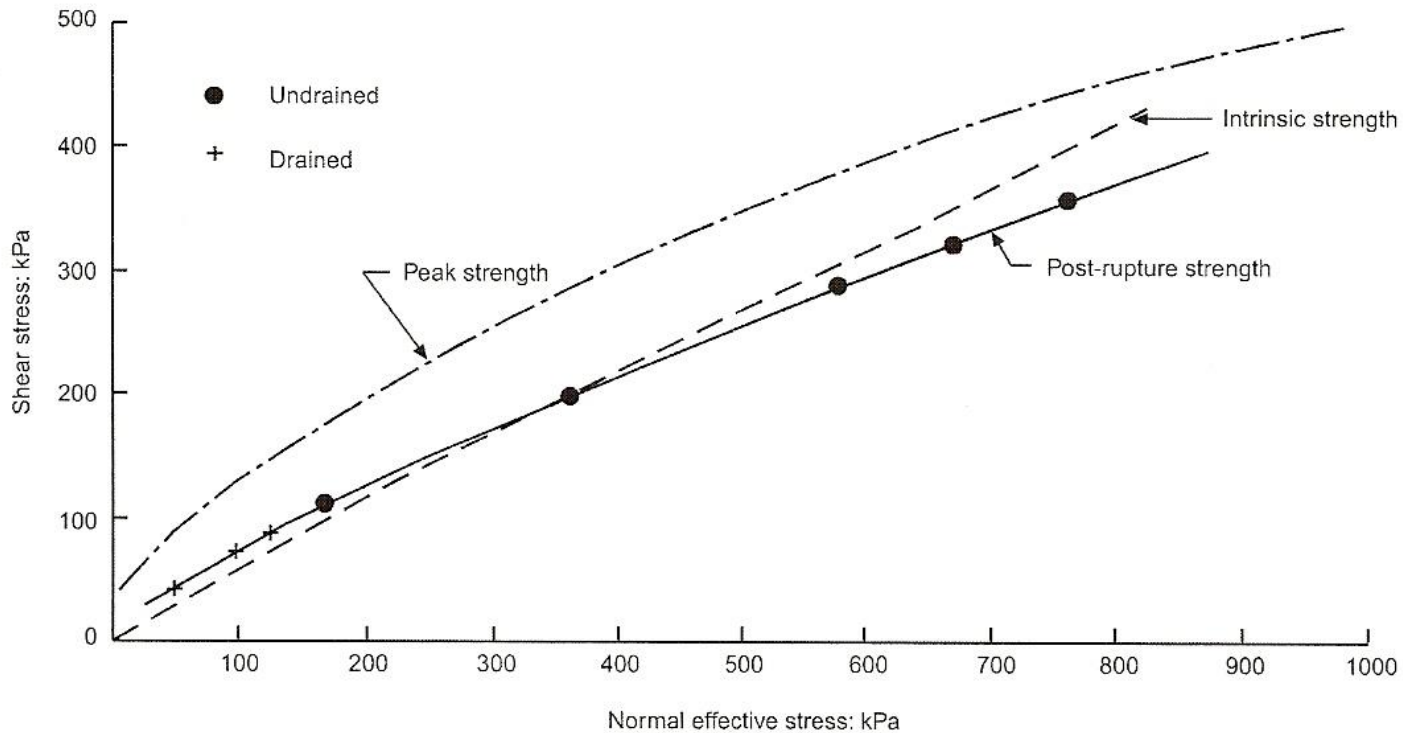
- Αντοχή και διαδρομές τάσεων

αντοχή μετά τη θραύση

- Vallericca clay

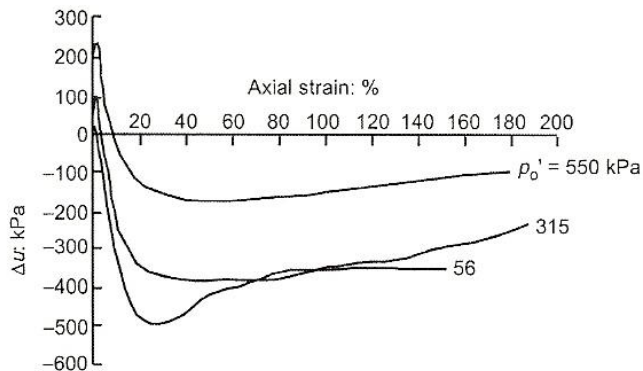
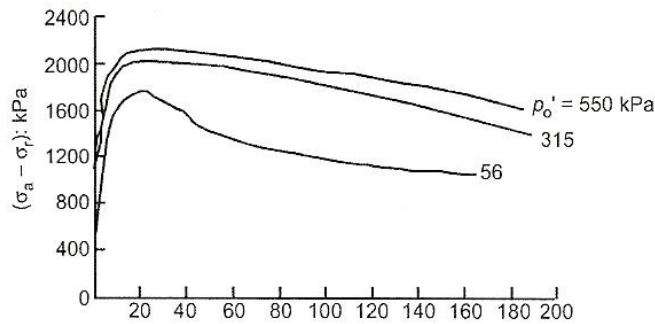
510

BURLAND, RAMPOLLO, GEORGIANNOU AND CALABRESI

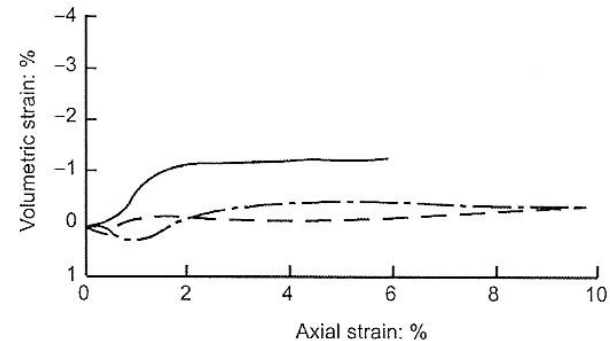
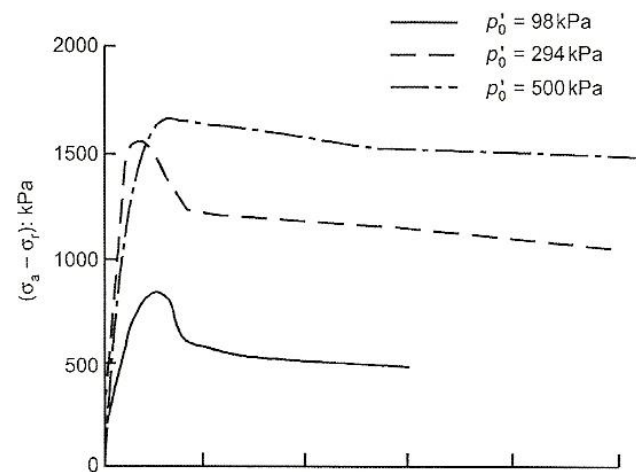


φυσική Μάργα εμποδιζόμενη & ελεύθερη στράγγιση

- Μάργα

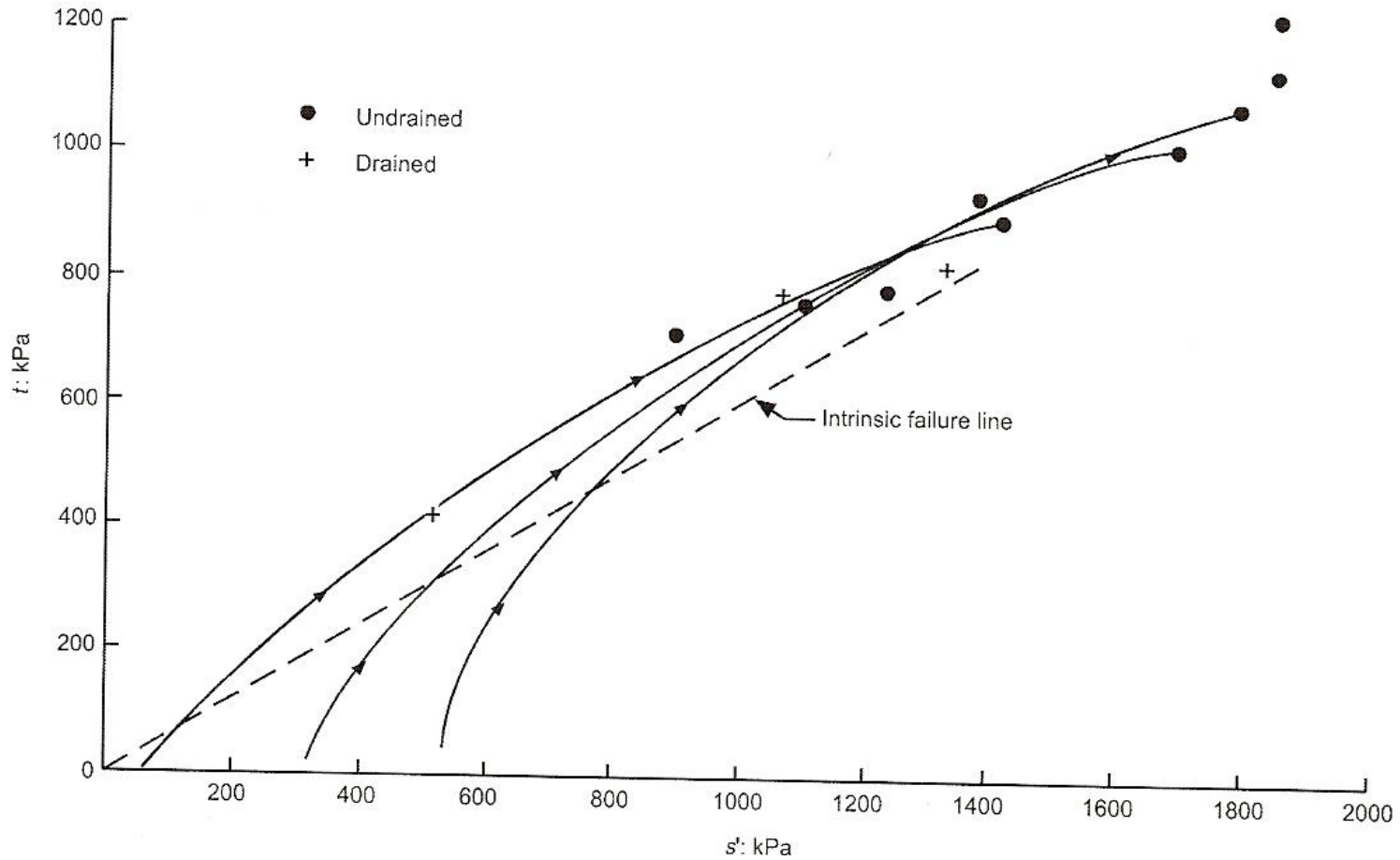


(a)



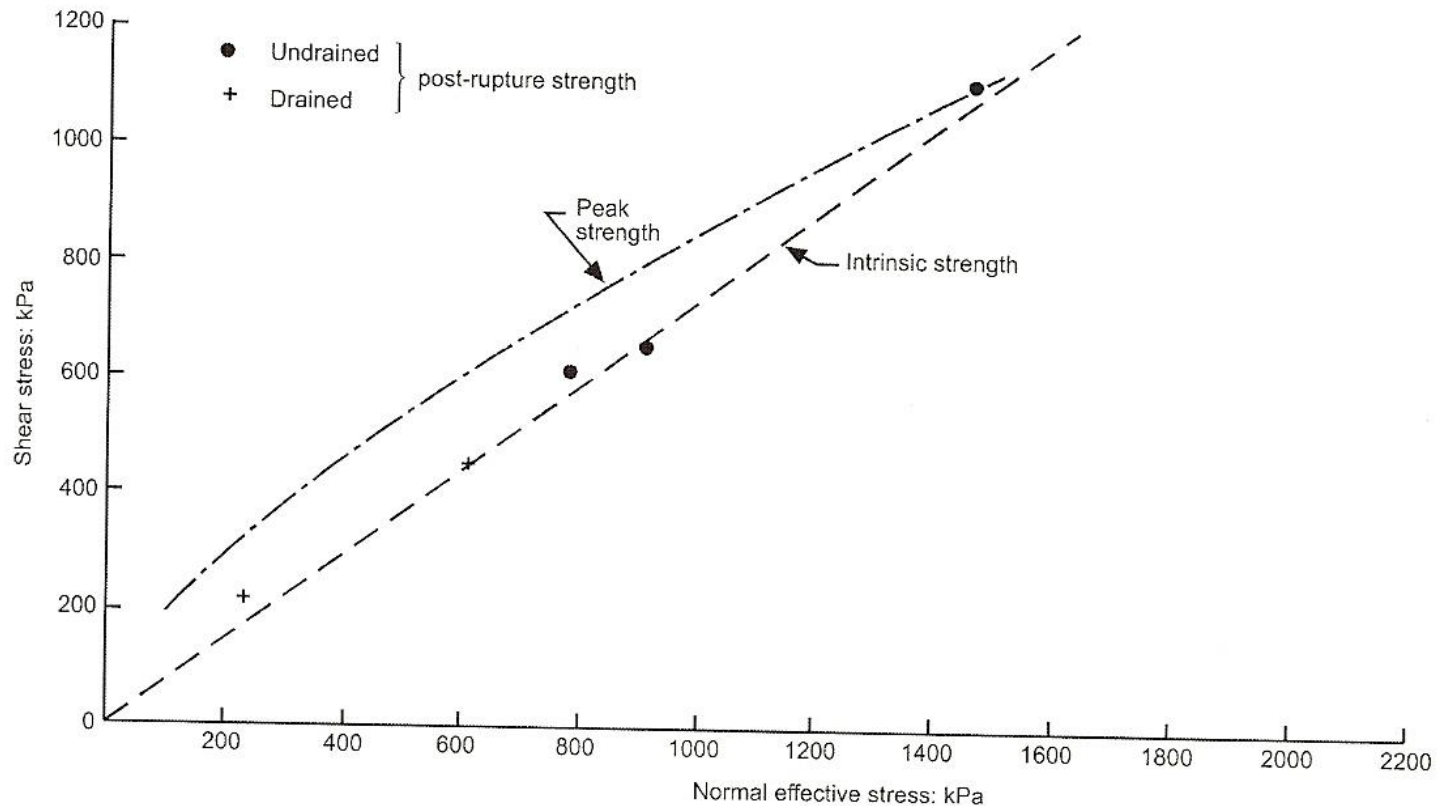
(b)

φυσική Μάργα – διαδρομές τάσεων



αντοχή μετά τη θραύση

- Μάργα



ΣΥΝΟΨΗ

