Μηχανική Συμπεριφορά Εδαφών σε (υπο)κατηγορίες φορτίσεων

Ξεκινάμε από:

Μονοδιάστατη (1D) Συμπίεση

Περιεχόμενα παρουσίασης

- Συχνές κατηγορίες φορτίσεων & είδη εργαστηριακών δοκιμών ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΗ ΕΝΟΤΗΤΑ
- Μονοδιάστατη (1D) **συμπίεση** (πιο γενικά: παραμόρφωση) Προσοχή: εστιάζουμε μόνο στην τελική τιμή της παραμόρφωσης (η εξέλιξή της στον χρόνο όταν αργεί το νερό να φύγει είναι αντικείμενο της Εδαφομηχανικής ΙΙ)
  - 1D συμπίεση, σύνδεση με προηγούμενα ΕΝΟΤΗΤΑ 1
    - Πότε θα έχω στην πράξη 1D συμπίεση;
    - Ποιος ο πρακτικός σκοπός να εξετάζω παραμόρφωση γενικά (δηλ. και φόρτιση και αποφόρτιση);
    - Όταν συμπιέζεται το έδαφος, τι αλλάζει;
  - Εξοικείωση με αποτελέσματα δοκιμής **συμπιεσομέτρου** ΕΝΟΤΗΤΑ 2
  - Υπολογισμός καθίζησης με βάση (α) εργαστηριακές καμπύλες ή (β) προσαρμογή των εργαστηριακών καμπυλών ΕΝΟΤΗΤΑ 3
  - Παράδειγμα υπολογισμού

Πώς ξεκινάμε τη μελέτη της Εδαφομηχανικής

- Όπως και στη Μηχανική, στην αρχή εστιάζουμε σε επιλεγμένα επί μέρους επιλύσιμα προβλήματα (πχ, στη Μηχανική: κάμψη, στρέψη)
- Όπως είπαμε, το έδαφος συμπεριφέρεται γραμμικώς ελαστικά για μικρό μόνο εύρος παραμορφώσεων, γι' αυτό συχνά δεν μπορούμε να δουλέψουμε με τις γνωστές ελαστικές παραμέτρους (δηλ. Ε, ν)
- Ρωτάμε, λοιπόν, ποιες είναι οι παράμετροι που περιγράφουν τη συμπεριφορά του εδάφους στα επιλεγμένα προβλήματα και με ποιες εξειδικευμένες πειραματικές δοκιμές μπορώ να προσδιορίσω αυτές τις παραμέτρους;

Μελέτη εδάφους με εργαστηριακές δοκιμές

- Για να προσαρμόσουμε τη μελέτη μας καλύτερα στη συμπεριφορά του εδάφους, χρησιμοποιούμε δοκιμές που προσομοιάζουν διαφορετικούς τύπους εντατικών καταστάσεων συχνών σε γεωτεχνικά προβλήματα
- Αυτές είναι:
  - δοκιμή συμπιεσομέτρου: 1D συμπίεση, επιβάλλουμε σ_1 και αναπτύσσονται γνωστές $\sigma_2=\sigma_3$, $\sigma_3=\sigma_3(\sigma_1)$
  - δοκιμή ισότροπης συμπίεσης: $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$
  - δοκιμή απ’ ευθείας διάτμησης: επιβάλλουμε τ,σ σε επίπεδο, άγνωστες σ_1, $\sigma_{2,}$ σ_3
  - τριαξονική δοκιμή: επιβάλλουμε ολόπλευρη πίεση και στη συνέχεια αυξάνουμε την κατακόρυφη τάση, $\sigma_1 \neq \sigma_2 = \sigma_3$

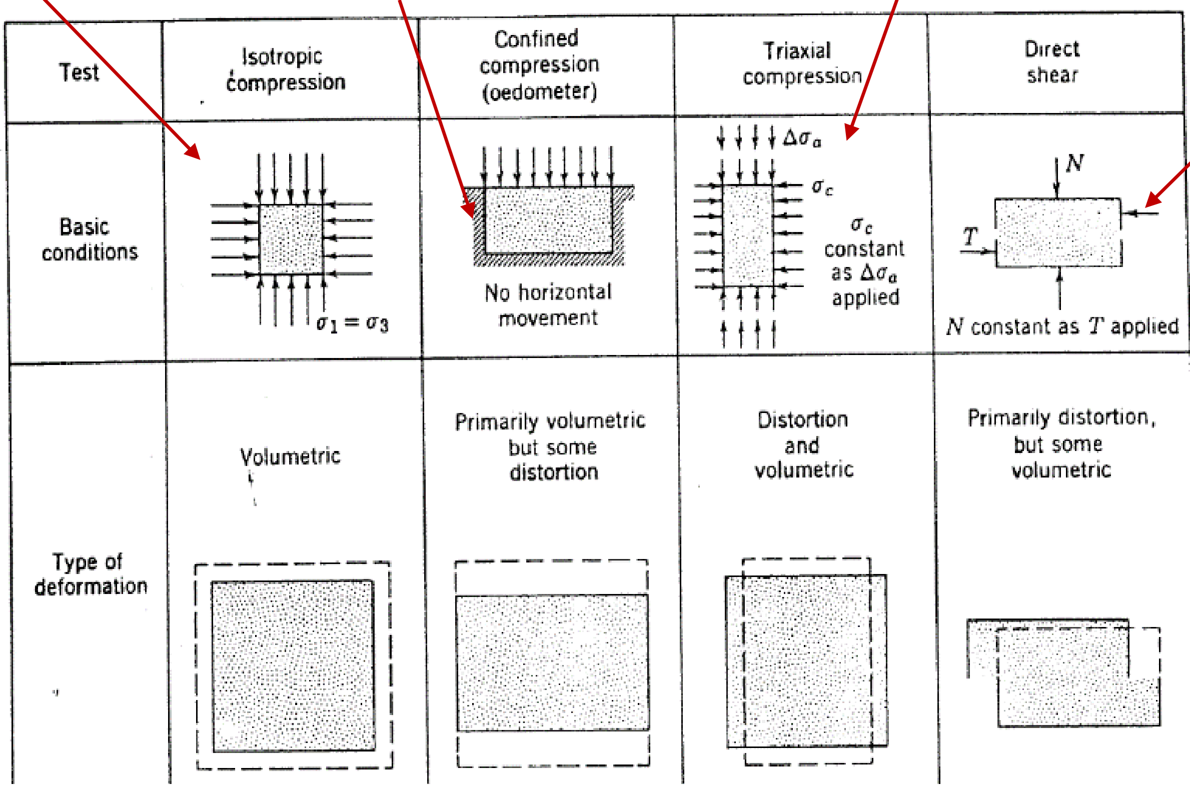
Συνήθεις εργαστηριακές δοκιμές της Γεωτεχνικής Μηχανικής: τάσεις & παραμορφώσεις

Ισότροπη συμπίεση

1D συμπίεση (μηδενική πλευρική παραμόρφωση*)

Τριαξονική συμπίεση

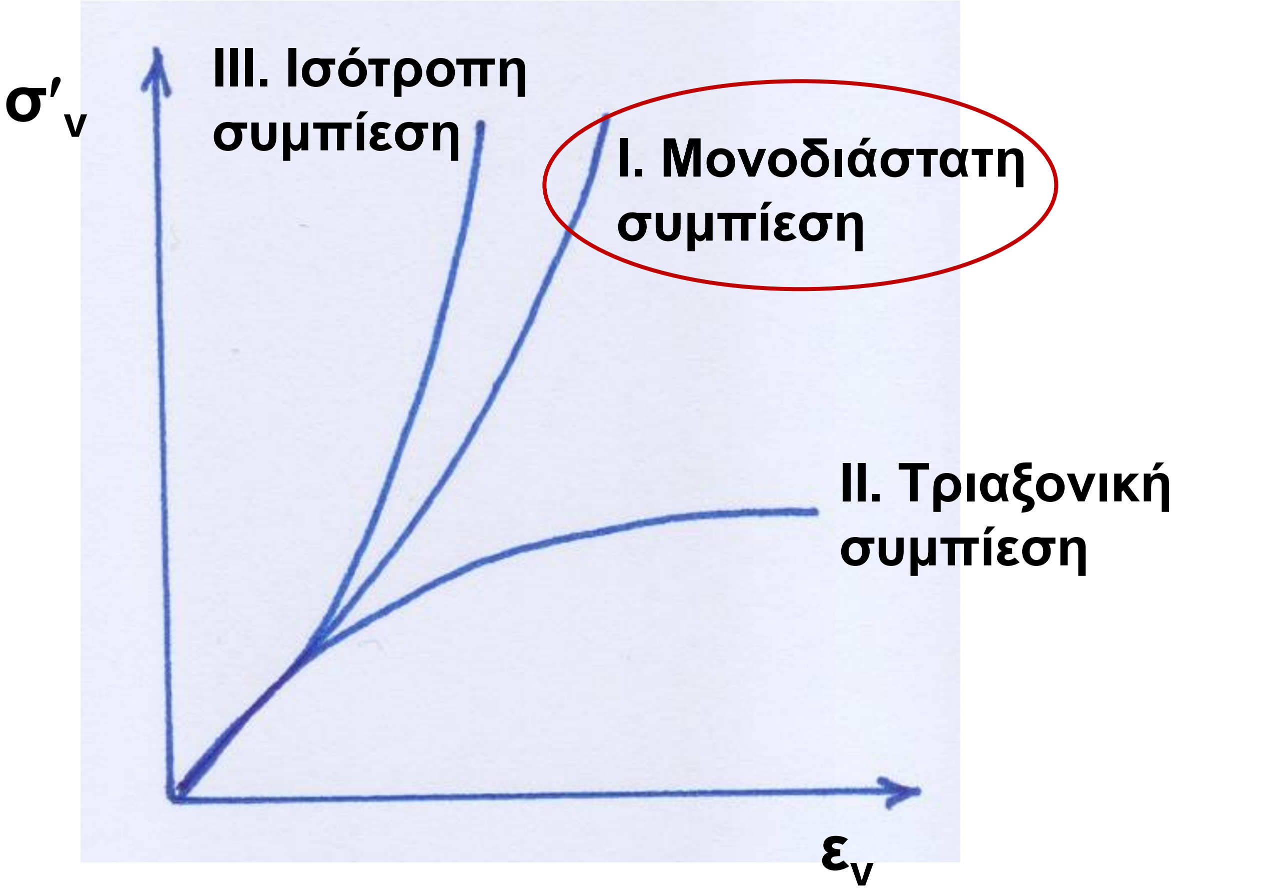
Απ΄ευθείας διάτμηση



Test	Isotropic compression	Confined compression (oedometer)	Triaxial compression	Direct shear
Basic conditions	$\sigma_1 = \sigma_3$	No horizontal movement	$\Delta\sigma_a$, σ_c; σ_c constant as $\Delta\sigma_a$ applied	N, T; N constant as T applied
Type of deformation	Volumetric	Primarily volumetric but some distortion	Distortion and volumetric	Primarily distortion, but some volumetric

*μηδενική πλευρική ώθηση γαιών = πλήρης πλευρική υποστήριξη (δηλ. ό,τι ισχύει και στην ουδέτερη ώθηση γαιών)

Σχέσεις τάσης-παραμόρφωσης στο έδαφος για συνήθεις <u>κατηγορίες</u> φορτίσεων



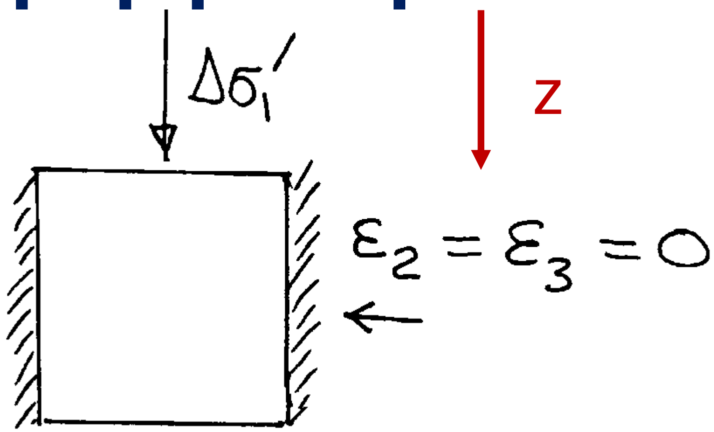
Γιατί η ισότροπη συμπίεση είναι «καλύτερη» από τη μονοδιάστατη;

Μονοδιάστατη παραμόρφωση & ειδική περίπτωση: μονοδιάστατη συμπίεση

- Πότε έχω στην πράξη μονοδιάστατη συμπίεση;

- Τι άλλου είδους παραμόρφωση μπορεί να έχω;
  - Ανύψωση σε περίπτωση αποφόρτισης
- Για ποιες πρακτικές εφαρμογές ενδιαφέρει τι κάνει το έδαφος αν αποφορτιστεί;
  - αποφόρτιση σε γεωλογικό χρόνο (πχ λιώσιμο παγετώνων) – επαναφόρτιση στο χρονικό πλαίσιο του έργου
  - φόρτιση, αποφόρτιση και επαναφόρτιση στο χρονικό πλαίσιο του έργου

Μονοδιάστατη παραμόρφωση



- Όπως έχουμε δει

$$\Delta\varepsilon_x = \Delta\varepsilon_y = \Delta\gamma_{xy} = \Delta\gamma_{yz} = \Delta\gamma_{xz} = 0$$

$$\Delta\varepsilon_z = \frac{1}{D}\Delta\sigma'_z \quad \text{όπου} \quad D = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)}$$

μέτρο μονοδιάστατης παραμόρφωσης (συμπίεσης)

$$\Delta\sigma'_x = \Delta\sigma'_y = \frac{\nu}{1-\nu}\Delta\sigma'_z$$

Συντελεστής ουδέτερης ώθησης γαιών ή λόγος τάσεων σε μονοδιάστατη παραμόρφωση

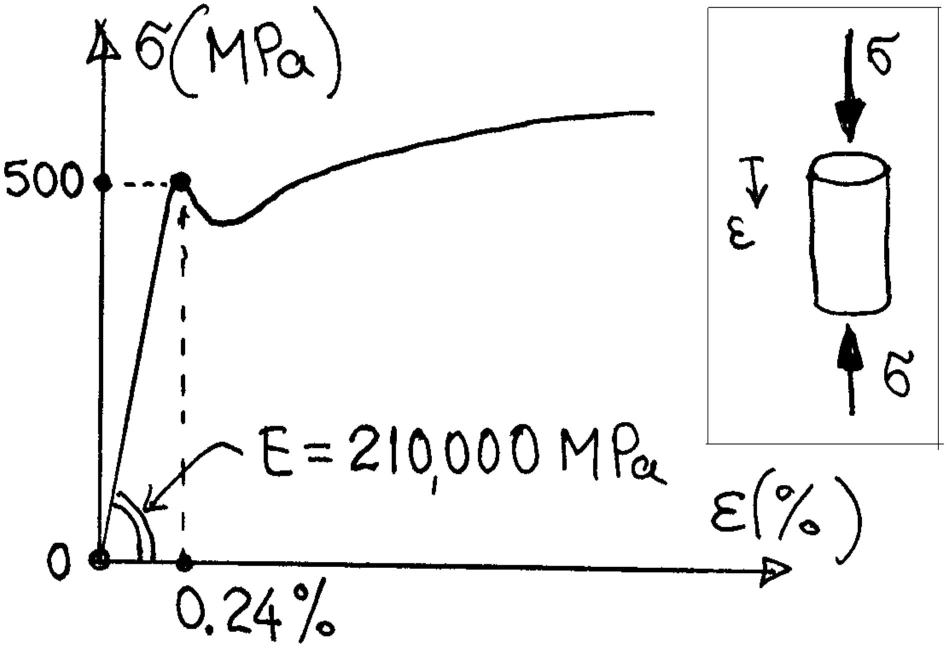
$$K_o \equiv \frac{\Delta\sigma'_h}{\Delta\sigma'_v} = \frac{\Delta\sigma'_x}{\Delta\sigma'_z}$$

Για γραμμική ισότροπη ελαστικότητα:

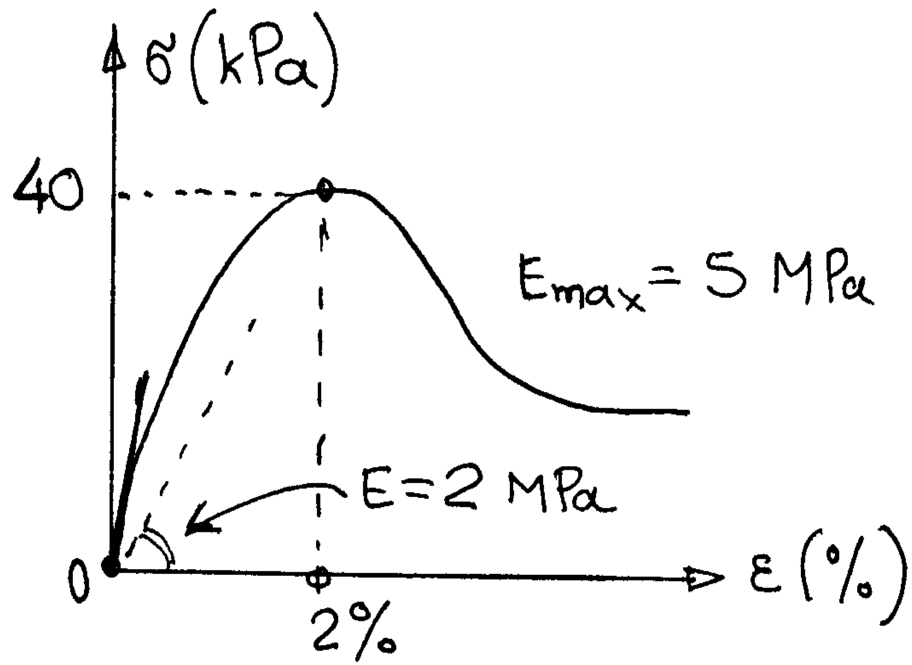
$$K_o = \frac{\nu}{1-\nu}$$

Φλας μπακ 14/2/2023: συγκρίναμε χάλυβα - έδαφος

Χάλυβας St IV



Άργιλος μέσης αντοχής



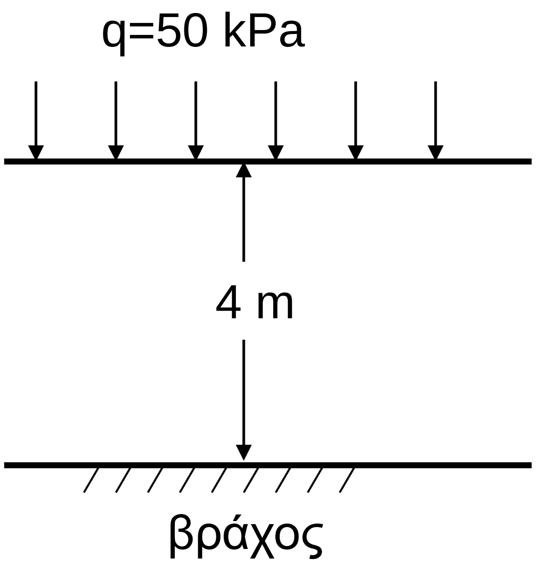
Χάλυβας: πρακτικώς γραμμική συμπεριφορά έως το όριο διαρροής

(Πηγή: Διαφάνειες Μ. Καββαδά)

Μονοδιάστατη παραμόρφωση, εφαρμογή

- Ας κάνουμε μια απόπειρα να βρούμε την καθίζηση s στρώματος πάχους H=4m, για τις δύο τιμές του μέτρου ελαστικότητας E που είδαμε στο εισαγωγικό μάθημα, αρχικό E = 5MPa, τέμνον E = 2MPa, και ν=1/3

$$D = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)}$$



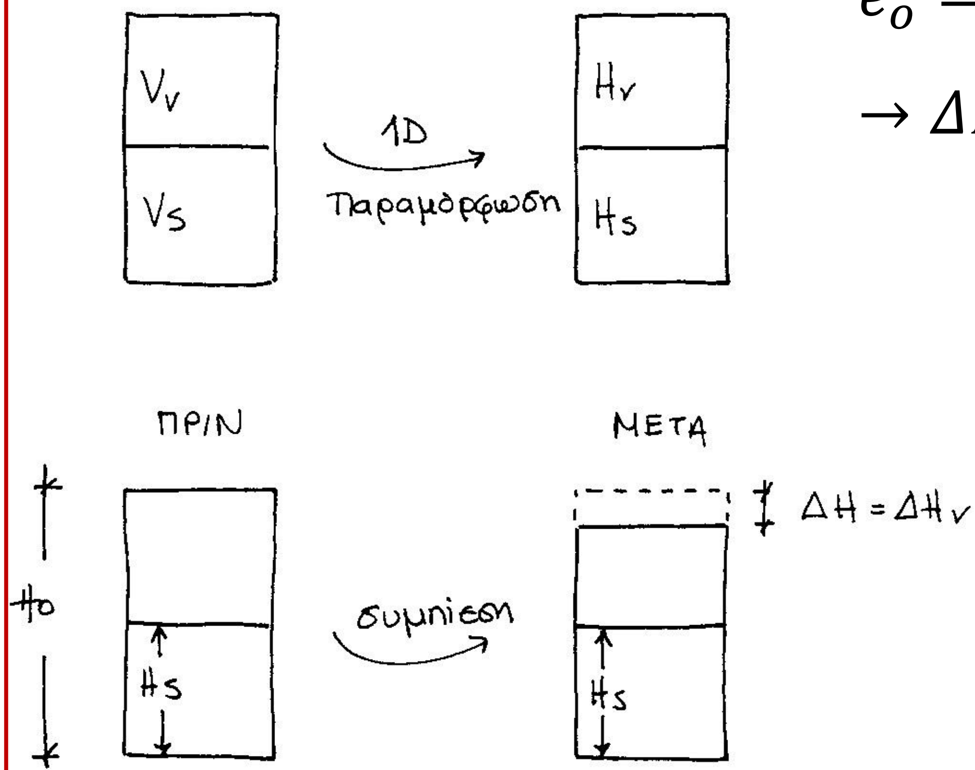
- Βρίσκω D = 7.5MPa και D = 3MPa
- Βρίσκω καθίζηση $s=\Delta\varepsilon_z H$, για $\Delta\sigma'_z$=50KPa

$$\Delta\varepsilon_z = \frac{1}{D}\Delta\sigma'_z$$

- $s=\Delta\varepsilon_z H \rightarrow s=\Delta\sigma'_z H/D \rightarrow$ για D = 7500kPa, s= 50x4/7500=0.027m και για D = 3000kPa, s= 50x4/3000=0.067m
- Ποια τιμή από τις δύο θα διαλέξω; Καλύτερα καμία (γιατί;). Θα πρέπει να έχω αποτελέσματα από δοκιμές συμπιεσομέτρου (διαφάνεια 14) και από αυτά να βρω την καθίζηση.

Όταν συμπιέζεται το έδαφος, τι αλλάζει; Ο όγκος των πόρων

Σε 1D συμπίεση...



$$e_o = \frac{V_v}{V_s} = \frac{H_v}{H_s} \rightarrow H_v = e \cdot H_s$$

$$\rightarrow \Delta H_v = \Delta e \cdot H_s \rightarrow \Delta H = \Delta e \cdot H_s$$

$$e_o = \frac{H_v}{H_s} = \frac{H_o - H_s}{H_s}$$

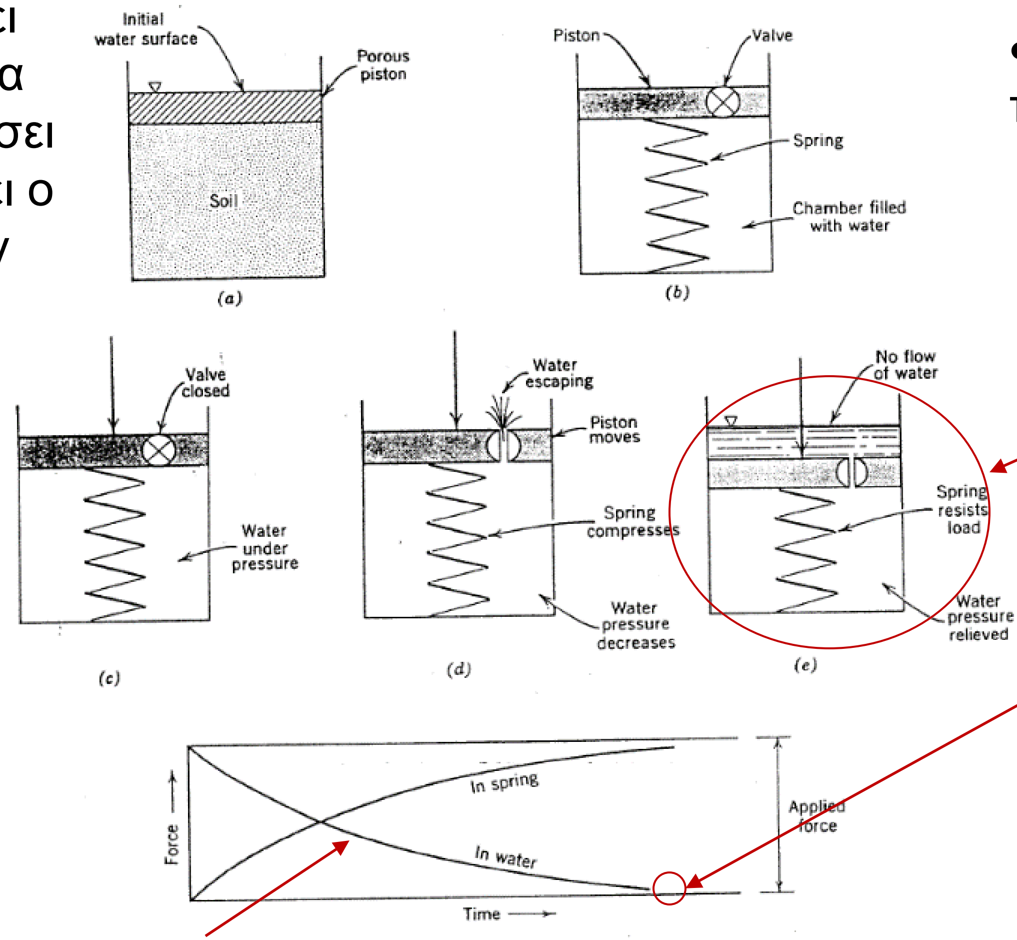
$$\rightarrow H_o = H_s \cdot (1 + e_o)$$

$$\varepsilon_z = -\frac{\Delta H}{H_o} = -\frac{\Delta e}{1 + e_o}$$

...η κατακόρυφη παραμόρφωση ε_z εκφράζεται ως συνάρτηση της αλλαγής του δείκτη πόρων, Δe

Να μην ξεχάσω την αναλογία κορεσμένου εδάφους– ελατηρίου+πιστονιού

- τι πρέπει να γίνει για να μπορέσει να αλλάξει ο όγκος των πόρων;
- Να φύγει το νερό



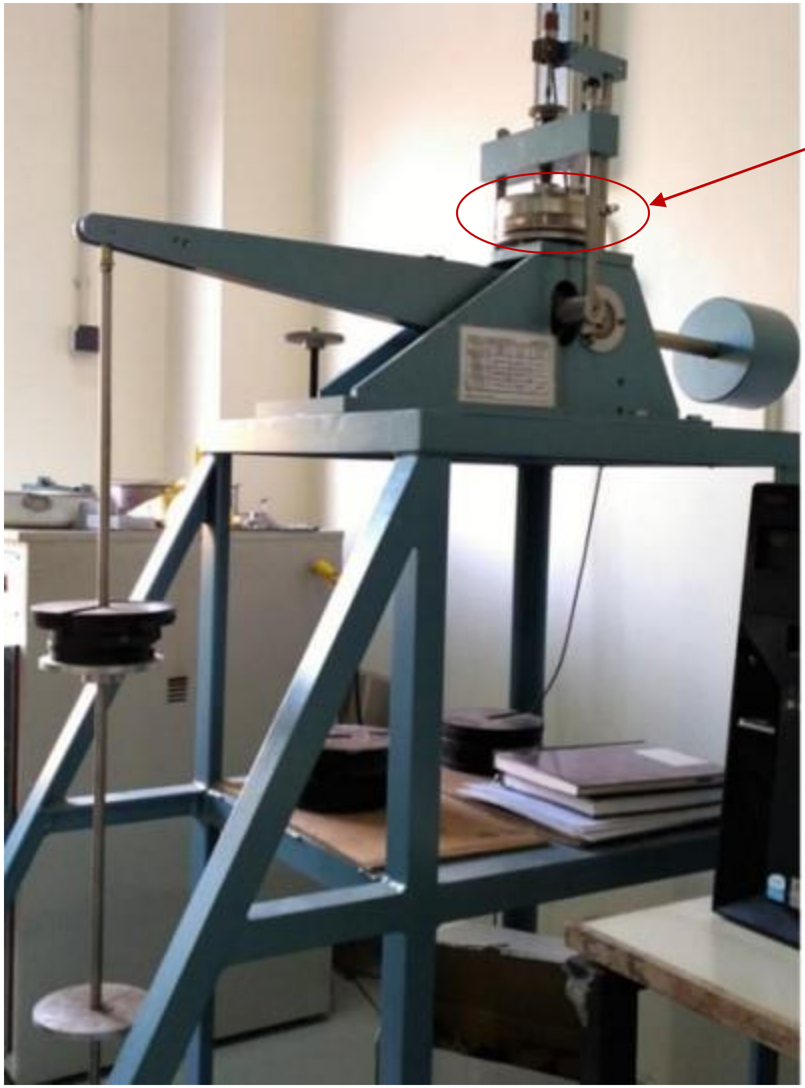
Όταν η καθίζηση ολοκληρωθεί: Δu=0

Δu(t)≠0

Συμπίεση κορεσμένου εδάφους

- Αν το έδαφος είναι κορεσμένο, τι πρέπει να γίνει για να μπορέσει να αλλάξει ο όγκος των πόρων; Να φύγει νερό.
- Θυμάμαι ότι η πίεση των πόρων θα αλλάξει με τη φόρτιση, δηλ. $\Delta u \neq 0$. Σε κάθε χρονική στιγμή t, **$\Delta\sigma' + \Delta u = \Delta\sigma$**. Όμως, αφού φύγει όσο νερό ήθελε να φύγει, η πίεση των πόρων θα ξαναγυρίσει στην αρχική τιμή της, δηλ. τότε $\Delta u=0$, και το έδαφος θα έχει πάρει την τελική του συμπίεση (ή καθίζηση).
- **Αυτήν την τελική τιμή της συμπίεσης, όταν $\Delta u=0$ και, άρα, $\Delta\sigma'=\Delta\sigma$, θα μάθουμε να υπολογίζουμε σε αυτήν την ενότητα** κι έτσι δεν θα ασχοληθούμε με το πόσο εύκολα μπορεί το έδαφος να στραγγίσει, δηλ. δεν έχει διαφορά αν το έδαφος είναι άμμος, που στραγγίζει αμέσως, ή άργιλος, που αργεί να στραγγίσει. Στην Εδαφομηχανική ΙΙ θα μάθουμε πόσος χρόνος θα χρειαστεί για να φύγει το νερό από μια άργιλο, ή να στερεοποιηθεί η άργιλος, όπως λέμε στη Γεωτεχνική Μηχανική, και να αναπτυχθεί η πλήρης καθίζηση.

Συμπίεση κορεσμένου εδάφους → Συμπιεσόμετρο

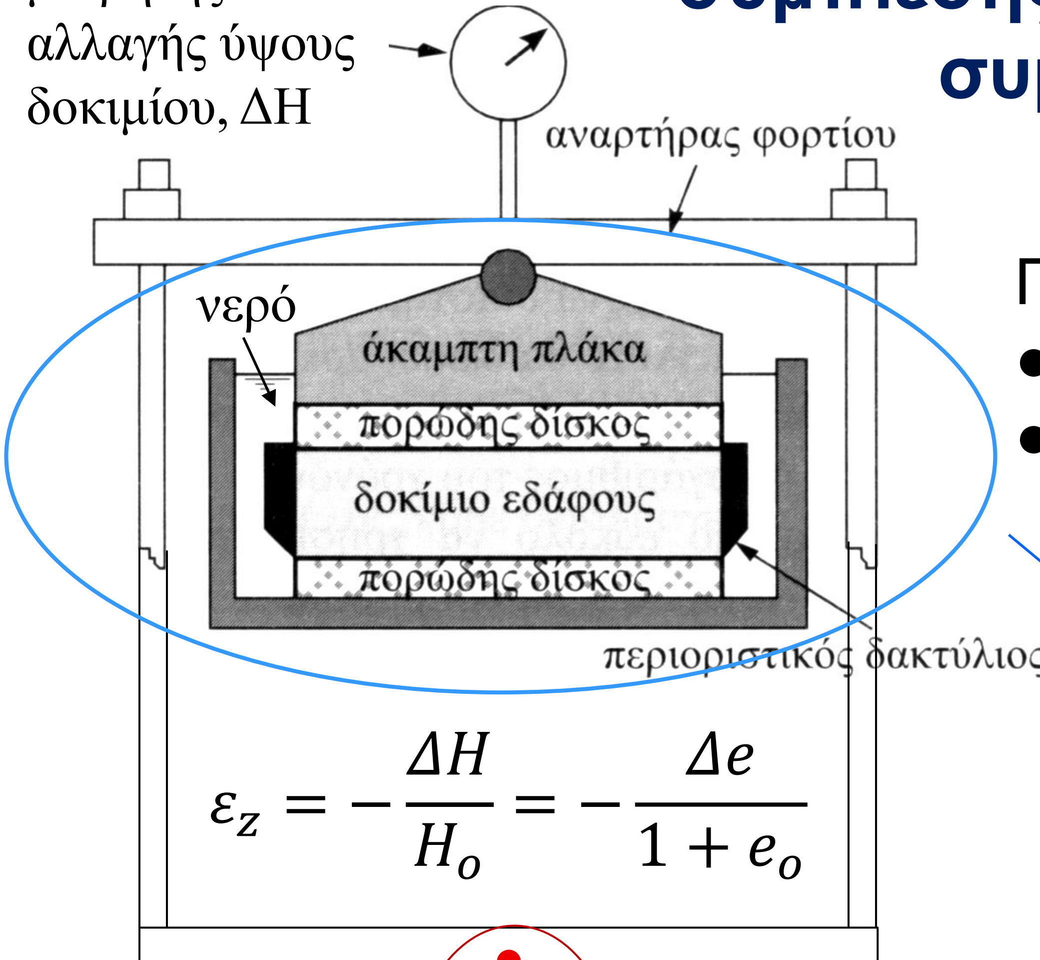


εδαφικό δοκίμιο

φωτογραφία: geoengineer.org (σύνδεσμος)

Πειραματική διάταξη μονοδιάστατης συμπίεσης – παραμόρφωσης: συμπιεσόμετρο

αναλογικός μετρητής αλλαγής ύψους δοκιμίου, ΔΗ



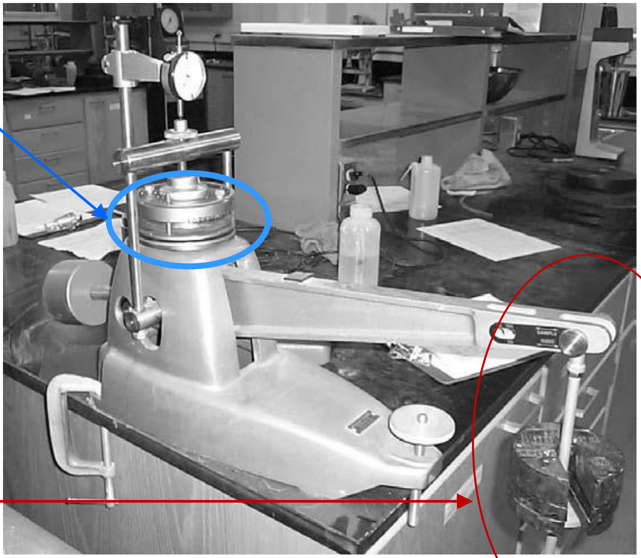
$$\varepsilon_z = -\frac{\Delta H}{H_o} = -\frac{\Delta e}{1 + e_o}$$

F

Ανάγουμε δύναμη F στην επιφάνεια του δοκιμίου → σ_z

Πειραματικά δεδομένα:

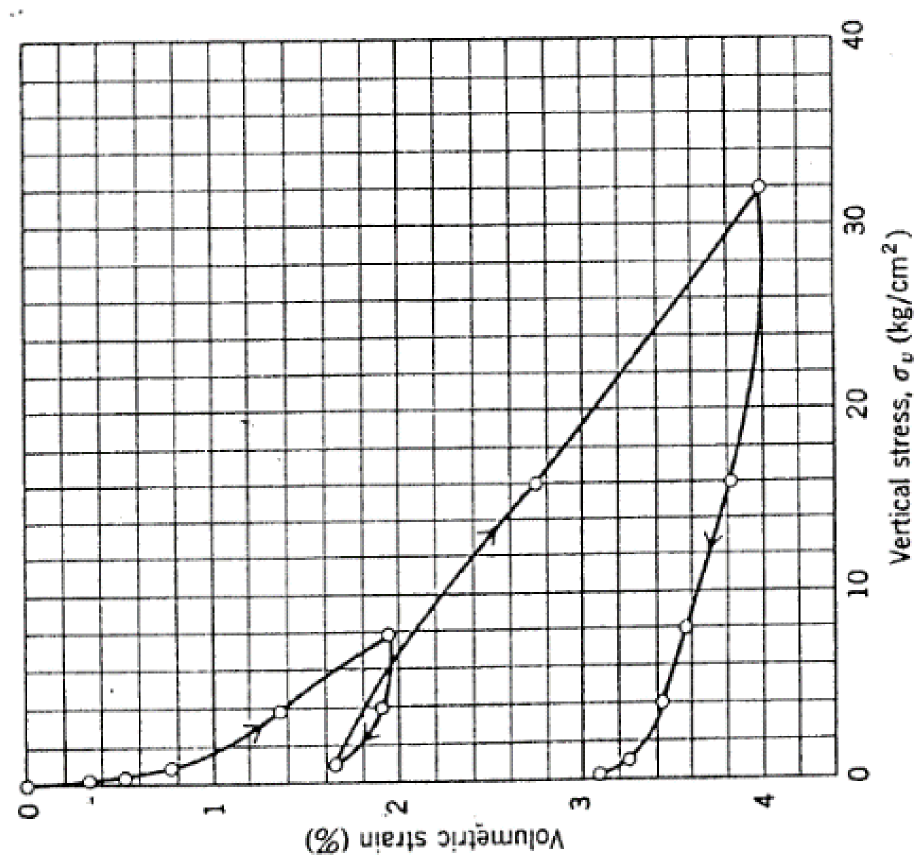
- σε διαδοχικές σ'_z, $\varepsilon_z(\sigma'_z)$
- για κάθε σ'_z, $\varepsilon_z(t)$, t_{max}=1d



Αποτελέσματα δοκιμής συμπιεσομέτρου σε άμμο

σε οικείο προσανατολισμό αξόνων

κατακόρυφη ενεργός τάση σ'_z



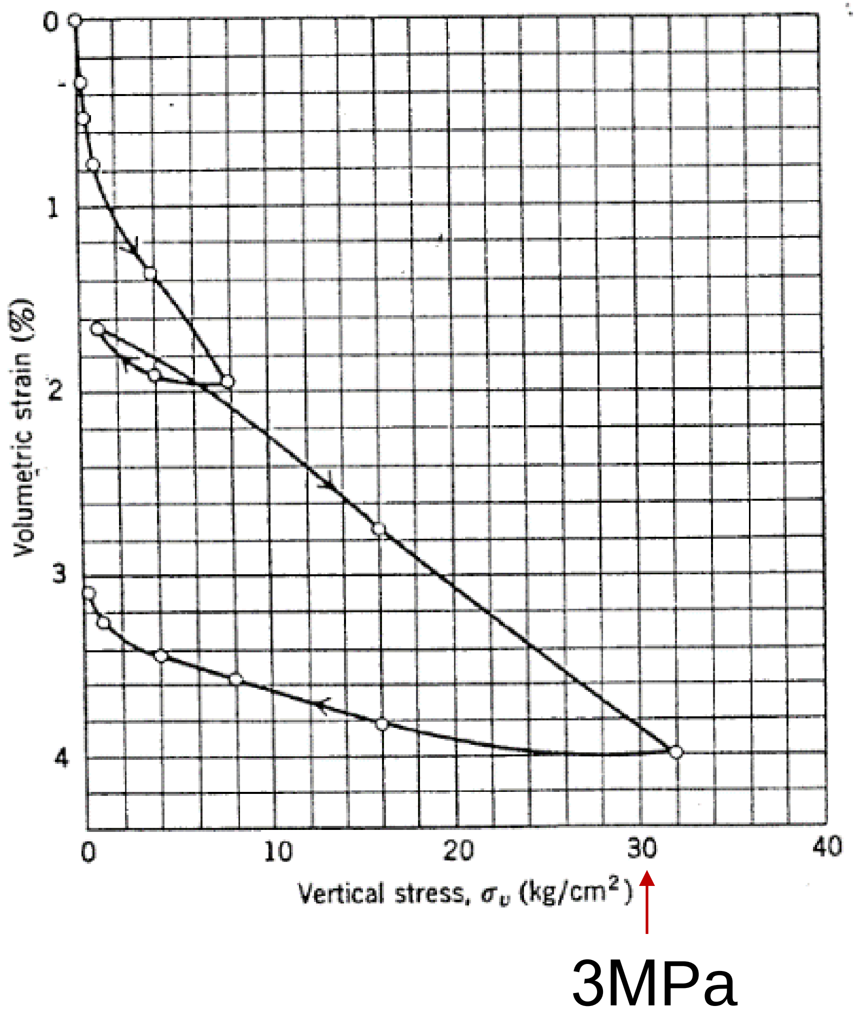
ογκομετρική (ε_{vol}) =κατακόρυφη (ε_z) παραμόρφωση

Αποτελέσματα δοκιμής συμπιεσομέτρου σε άμμο

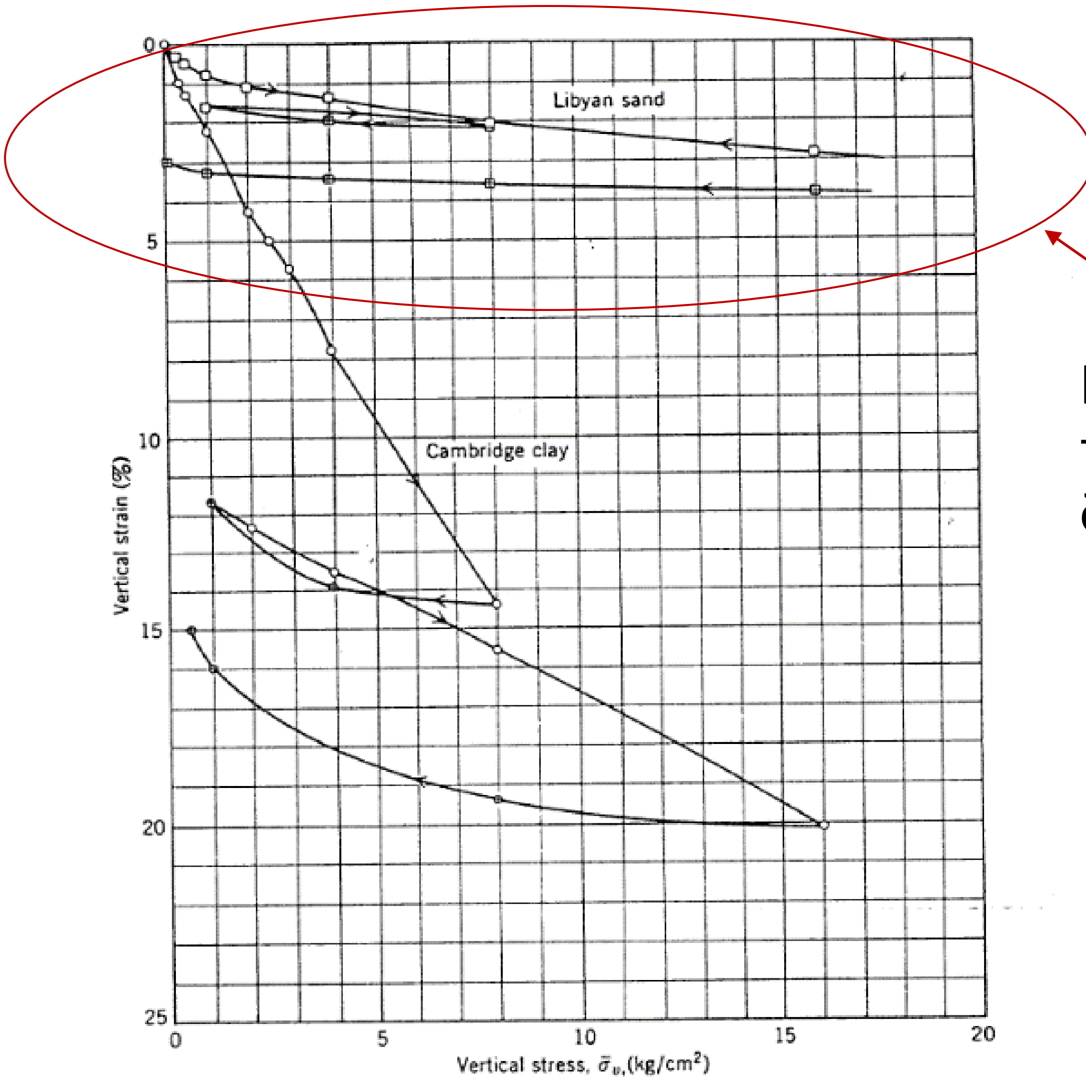
Σχόλια για τους άξονες:
(α) οι συνήθεις άξονες για δοκιμές 1D συμπίεσης διαφέρουν από τους συνήθεις άξονες τάσεων (κατακόρυφο) – παραμορφώσεων (οριζόντιο)
β) Σε 1D, $\varepsilon_{vol} = \varepsilon_z$

Σημείωση για τις μονάδες:
Η μονάδα (kg) αναφέρεται σε (kg) βάρους, 1 kg/cm^2 = 100kN/m^2

Σχόλιο για τη δοκιμή: Η συγκεκριμένη δοκιμή φτάνει σε πάρα πολύ υψηλές τάσεις

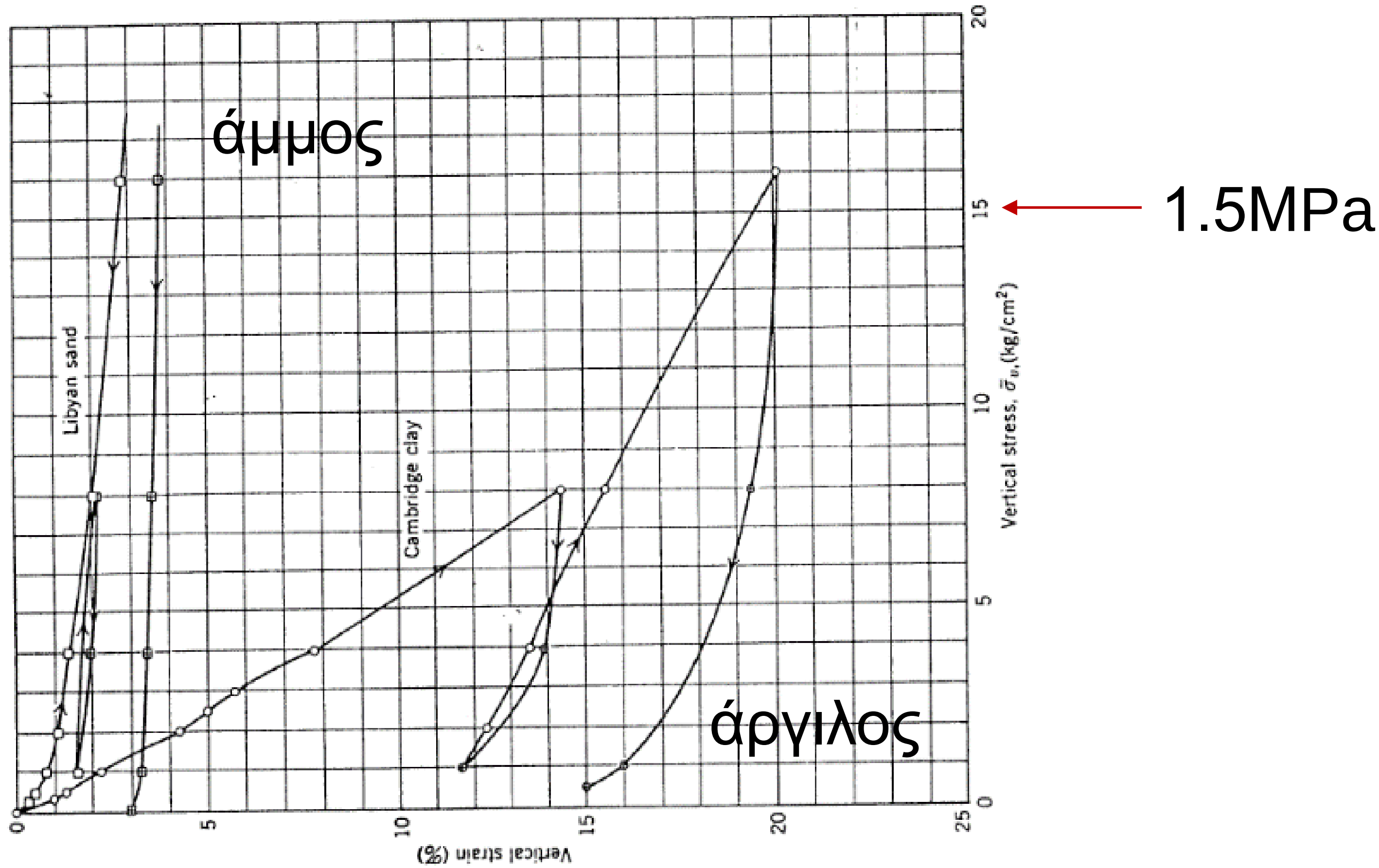


Αποτελέσματα δοκιμής συμπιεσομέτρου σε άμμο & σε άργιλο



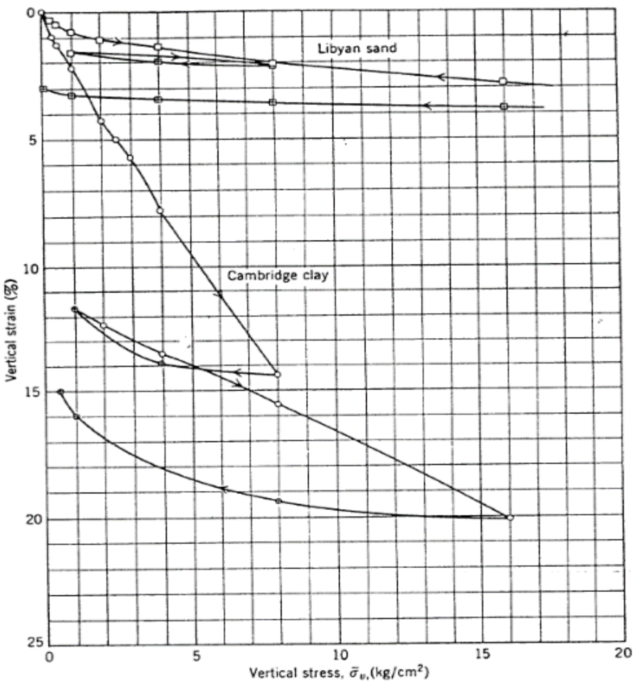
Η άμμος των προηγούμενων δύο διαφανειών

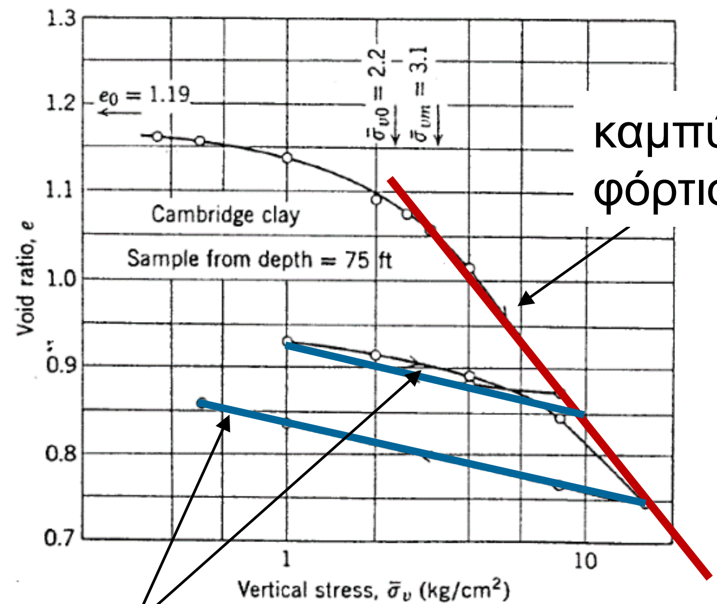
Αποτελέσματα δοκιμής συμπιεσομέτρου σε άμμο & σε άργιλο



μια τελευταία φορά στον πιο οικείο προσανατολισμό αξόνων…

Αποτελέσματα δοκιμής συμπιεσομέτρου σε άργιλο: διαφορετικοί άξονες για την τάση





καμπύλη φόρτισης

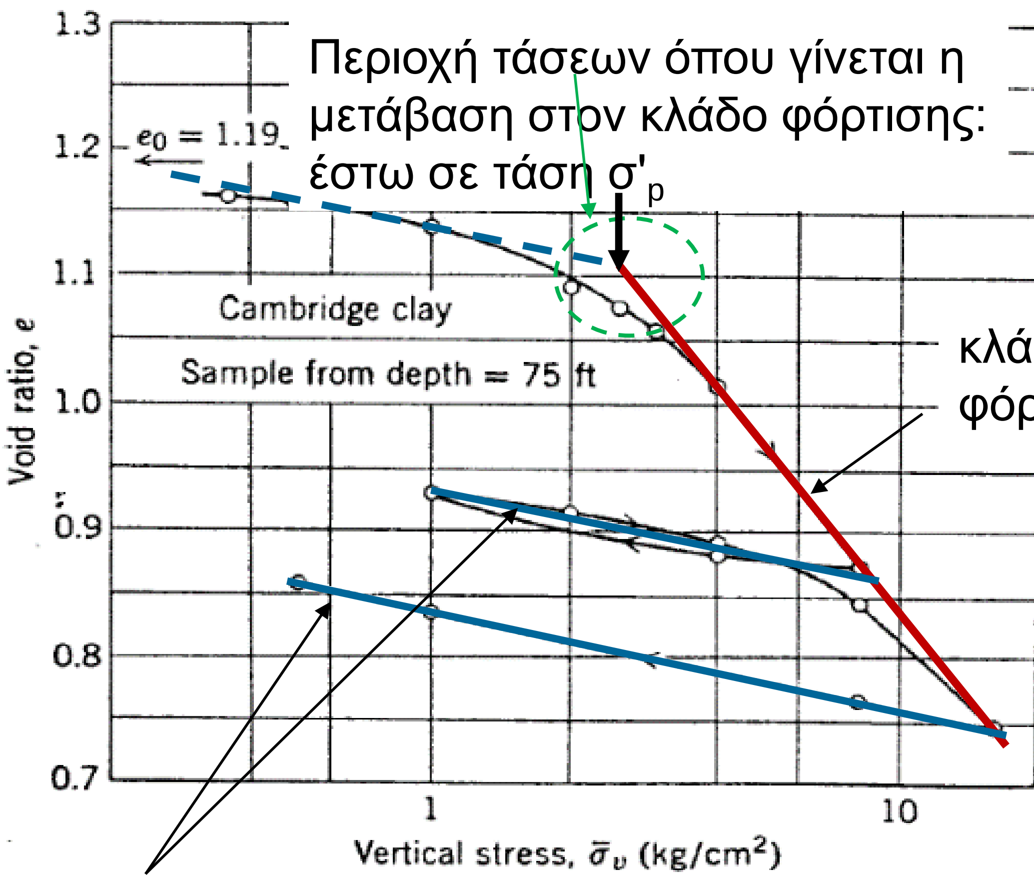
καμπύλες αποφόρτισης - επαναφόρτισης

Άξονες: κατακόρυφη παραμόρφωση (ισοδύναμα: δείκτης πόρων) – **κατακόρυφη ενεργός τάση**

Άξονες: δείκτης πόρων – **<u>λογάριθμος</u> κατακόρυφης ενεργού τάσης**

Τι μαθαίνουμε από τα αποτελέσματα του συμπιεσομέτρου για την ιστορία της αργίλου

- Η τάση σ'$_p$ λέγεται τάση προφόρτισης ή τάση προστερεοποίησης και είναι η μέγιστη τάση που έχει επιβληθεί στο δοκίμιο στο παρελθόν



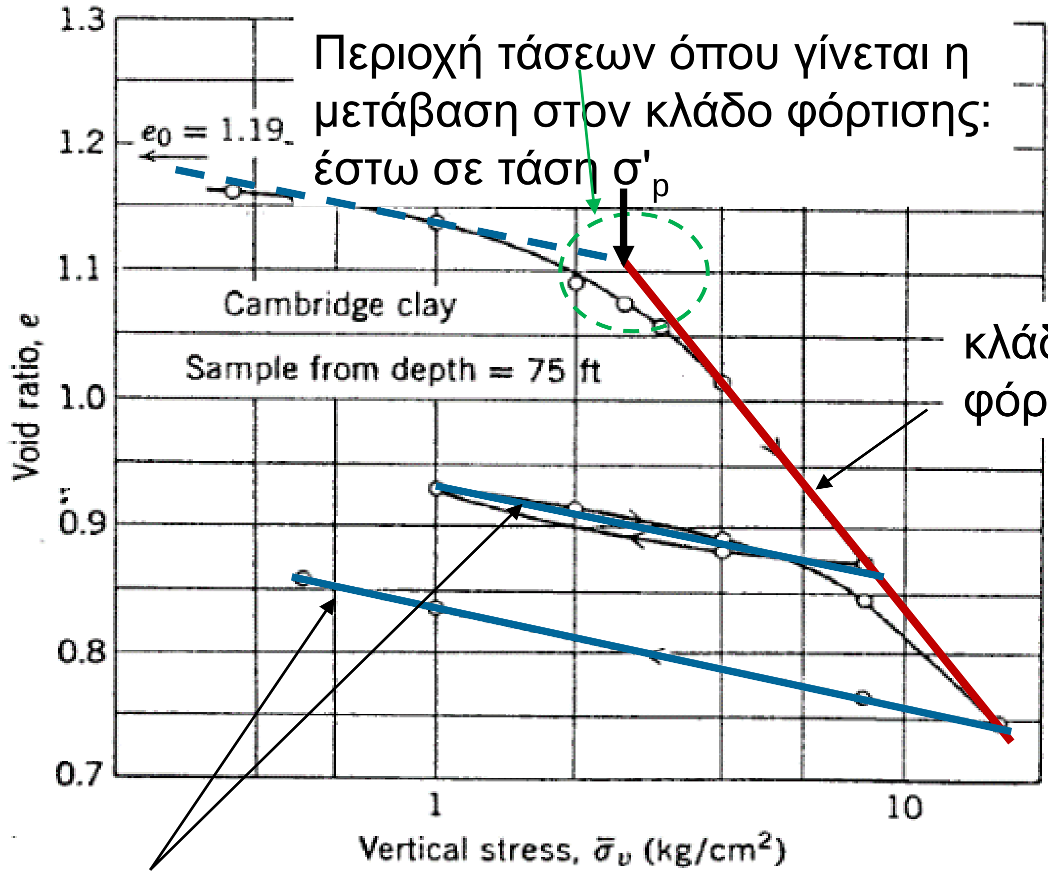
κλάδος φόρτισης

- Αν σ'$_p$ = σ'$_{vo}$, όπου σ'$_{vo}$ είναι η γεωστατική τάση στο σημείο που έχει ληφθεί το δοκίμιο, τότε η άργιλος λέγεται κανονικά στερεοποιημένη, normally consolidated (NC)

κλάδοι αποφόρτισης - επαναφόρτισης

- Αν σ'$_p$ > σ'$_{vo}$, τότε η άργιλος λέγεται προφορτισμένη ή υπερστερεοποιημένη, overconsolidated (OC), και ορίζουμε τον λόγο υπερστερεοποίησης, OCR = σ'$_p$ / σ'$_{vo}$

Προφορτισμένες άργιλοι – λόγος K_o



κλάδοι αποφόρτισης - επαναφόρτισης

- Κατά την αποφόρτιση, η οριζόντια ορθή τάση σ'_h μειώνεται αλλά με ρυθμό βραδύτερο της σ'_v

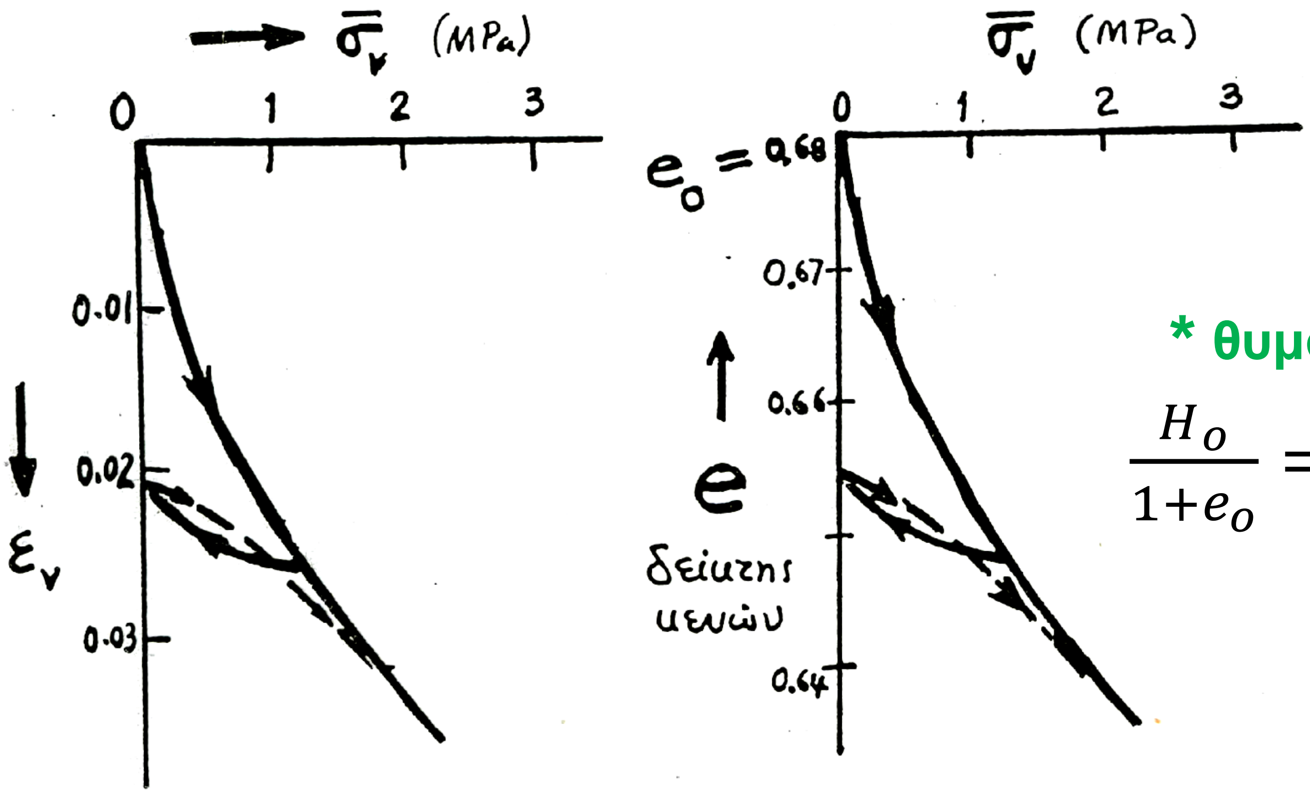
- Έτσι ο λόγος $K_o = \sigma'_h / \sigma'_v$ μεγαλώνει, όσο μεγαλώνει ο λόγος OCR

- Αν $\sigma'_p > \sigma'_{vo}$, τότε η άργιλος λέγεται προφορτισμένη ή υπερστερεοποιημένη, overconsolidated (OC), και ορίζουμε τον λόγο υπερστερεοποίησης, $OCR = \sigma'_p / \sigma'_{vo}$

Υπολογισμός καθιζήσεων από καμπύλη παραμορφώσεων

$$\Delta H = H_o \frac{\Delta e}{1+e_o} \; *$$

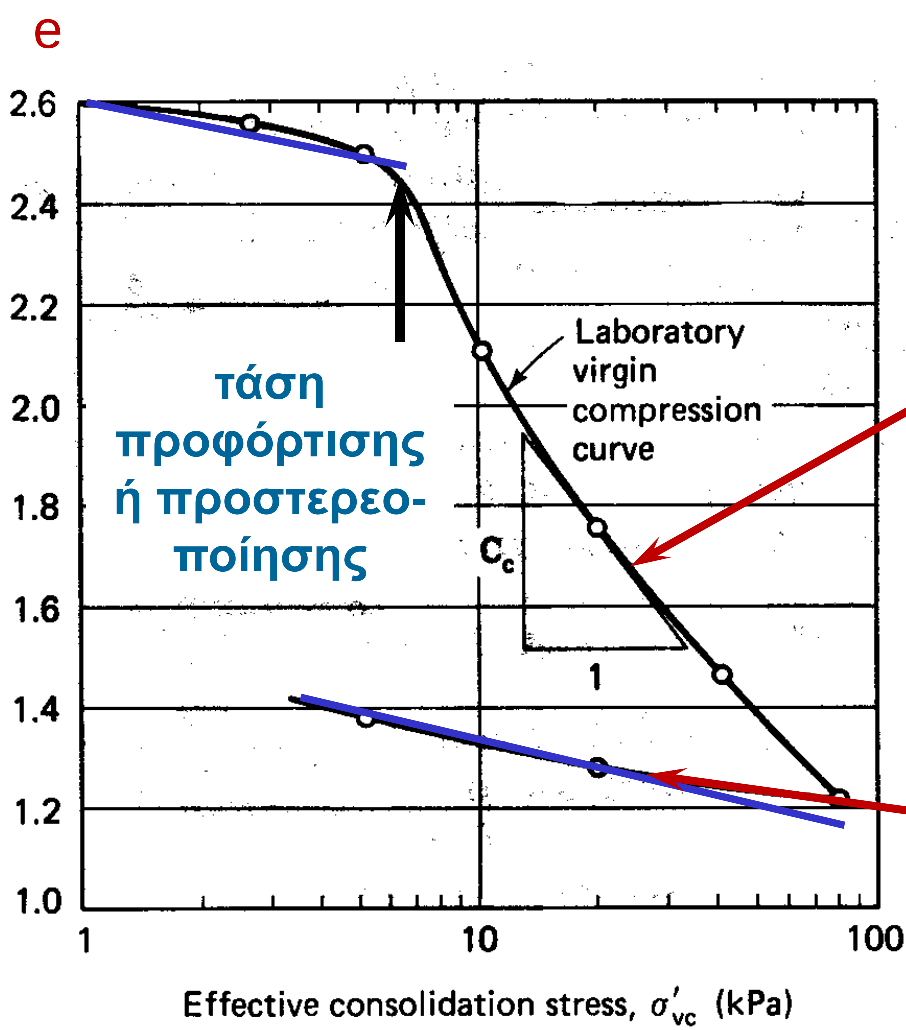
Μετρώ Δe από την καμπύλη, αν γράψω $\Delta e = e_{\tau\varepsilon\lambda\iota\kappa\acute{o}} - e_o$, καθίζηση $s = -\Delta H$, αν γράψω $\Delta e = e_o - e_{\tau\varepsilon\lambda\iota\kappa\acute{o}}$, καθίζηση $s = \Delta H$



*** θυμάμαι ότι:**

$$\frac{H_o}{1+e_o} = H_s = ct$$

Υπολογισμός καθιζήσεων χρησιμοποιώντας τις κλίσεις των κλάδων της καμπύλης συμπίεσης, C_c, C_r



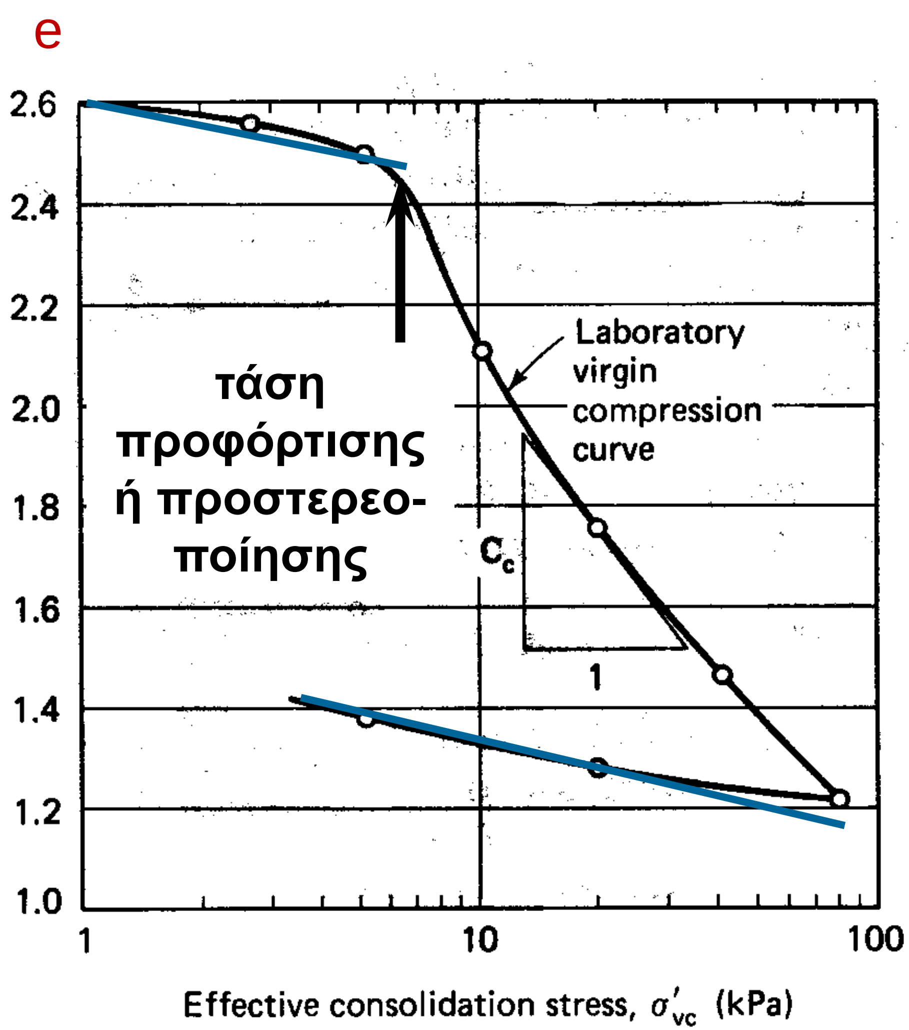
Δείκτης συμπιεστότητας = Συντελεστής στερεοποίησης κατά την κανονική φόρτιση:

$$C_c = \frac{e_o - e}{\log\left(\sigma'_v / \sigma'_{vo}\right)}$$

Δείκτης επαναφόρτισης = Συντελεστής στερεοποίησης κατά την αποφόρτιση και επαναφόρτιση:

$$C_r = \frac{e_o - e}{\log\left(\sigma'_v / \sigma'_{vo}\right)}$$

Υπολογισμός καθιζήσεων χρησιμοποιώντας τις κλίσεις των κλάδων της καμπύλης συμπίεσης, C_c, C_r (συνέχεια)



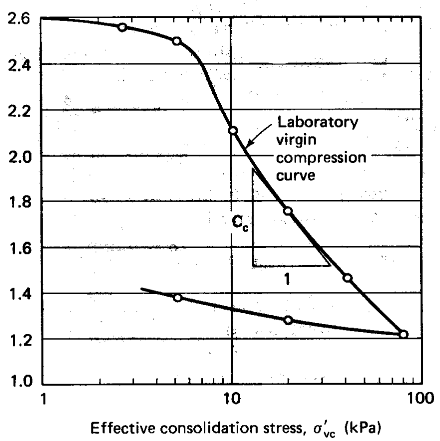
Η καθίζηση S υπολογίζεται πάλι από την σχέση:

$$S = \Delta H = \frac{H_o}{1+e_o}\Delta e$$

αλλά η αλλαγή του δείκτη πόρων Δe υπολογίζεται με τους δείκτες C_c, C_r

Υπολογισμός καθιζήσεων, τύποι 1/4

- **Άργιλος NC**: συμπιέζεται στον κύριο κλάδο φόρτισης



$$S = \Delta H = \frac{H_o}{1+e_o}\Delta e$$

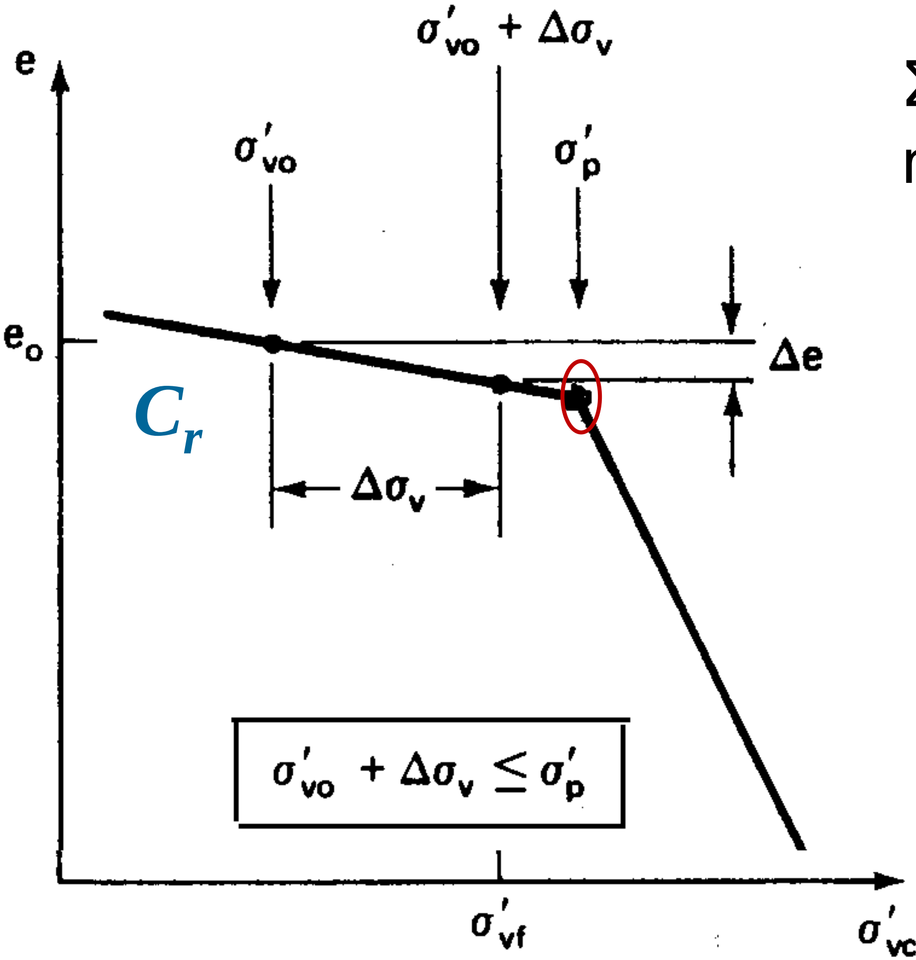
$$\Delta e = C_c log\left(\frac{\sigma'_{vo} + \Delta\sigma'_v}{\sigma'_{vo}}\right)$$

τελική ενεργός τάση στο μέσον του στρώματος

- H_o = αρχικό ύψος αργιλικού στρώματος
- e_o = αρχικός δείκτης πόρων αργιλικού στρώματος
- σ'_{vo}= αρχική ενεργός τάση στο μέσον του αργιλικού στρώματος
- $\Delta\sigma'_v$ = μεταβολή κατακόρυφης ενεργού τάσης στο μέσον του αργιλικού στρώματος

Υπολογισμός καθιζήσεων, τύποι 2/4

- **Άργιλος OC**: συμπιέζεται ως τελική ενεργό τάση < σ'$_p$



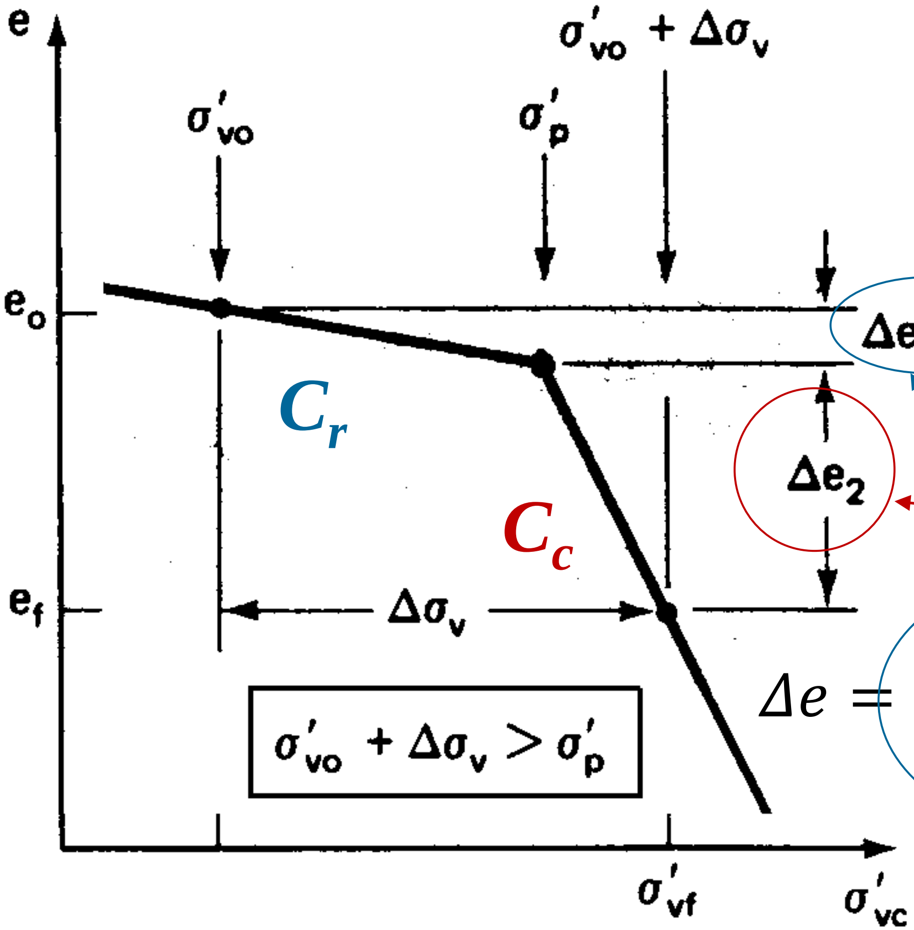
Σημ: στο τέλος της συμπίεσης η άργιλος παραμένει OC

$$S = \Delta H = \frac{H_o}{1 + e_o}\Delta e$$

$$\Delta e = C_r log\left(\frac{\sigma'_{vo} + \Delta\sigma'_v}{\sigma'_{vo}}\right)$$

Υπολογισμός καθιζήσεων, τύποι 3/4

- **Άργιλος OC**: συμπιέζεται ως τελική ενεργό τάση > σ'$_p$



Σημ: στο τέλος της συμπίεσης η άργιλος από OC έχει γίνει NC

$$S = \Delta H = \frac{H_o}{1+e_o}\Delta e$$

$$\Delta e = C_r log\left(\frac{\sigma'_p}{\sigma'_{vo}}\right) + C_c log\left(\frac{\sigma'_{vo} + \Delta\sigma'_v}{\sigma'_p}\right)$$

Υπολογισμός καθιζήσεων, τύποι 4/4

- **Αποφόρτιση** από αρχική κατάσταση H_{o*}, e_{o*} - η υπολογιζόμενη παραμόρφωση αντιστοιχεί σε ανύψωση

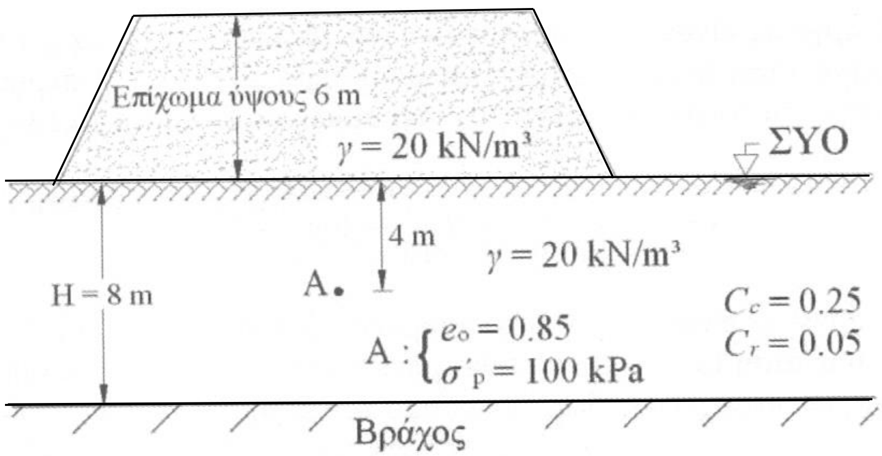
$$\Delta H = H_{o*} \frac{\Delta e}{1 + e_{o*}}$$

$$\Delta e = C_r log\left(\frac{\sigma'_{\tau\varepsilon\lambda\iota\kappa\eta}}{\sigma'_{\alpha\rho\chi\iota\kappa\eta}}\right)$$

- **Επαναφόρτιση** – σαν άργιλος OC

Εφαρμογή (Καββαδάς, Κεφ. 6, σελ. 168)

Εκτίμηση της καθίζησης εδαφικού στρώματος πάχους (Η) λόγω αύξησης της κατακόρυφης ενεργού τάσης από σ'_{vo} σε $\sigma'_{vo}+\Delta\sigma'_{v}$



Επίχωμα μεγάλου εύρους και ύψους 6m (υλικό επιχώματος γ=20 kN/m^3) κατασκευάζεται σε κορεσμένη αργιλική στρώση πάχους Η = 8m (Στάθμη Υδροφόρου Ορίζοντα στην επιφάνεια του εδάφους). Η άργιλος έχει τα εξής χαρακτηριστικά:

Ειδικό βάρος: γ = 20 kN/m^3

Δείκτης συμπιεστότητας: C_c = 0.25,   Δείκτης επαναφόρτισης: C_r = 0.05

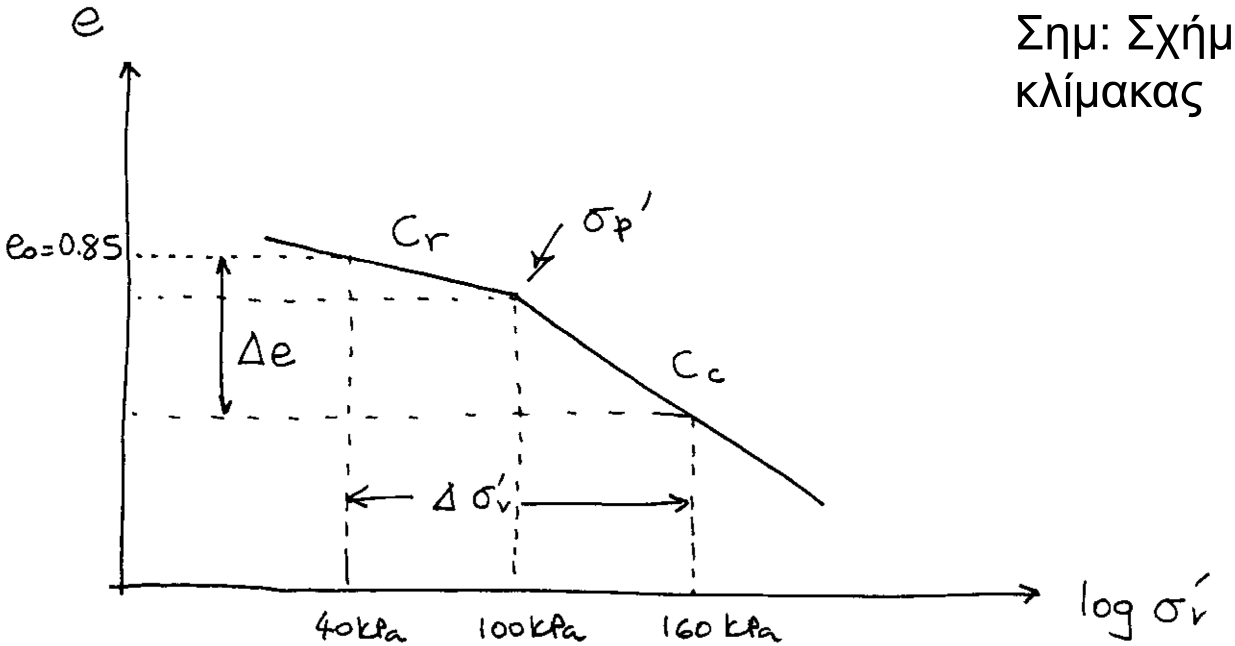
Για το σημείο Α (στο μέσον της αργιλικής στρώσης):

Αρχικός δείκτης πόρων: e_o = 0.85 , Τάση προστερεοποίησης: σ'_p = 100 kPa

Ζητείται η καθίζηση της αργίλου λόγω της κατασκευής του επιχώματος.

Εφαρμογή – απάντηση

Σημ: Σχήμα εκτός κλίμακας



Για Δσ′$_v$ = 120kPa, βρίσκω Δe=0.071 και καθίζηση 0.307m

Αν ήταν να επιλέξουμε δύο σημαντικά πράγματα που μάθαμε στην Ενότητα της 1D Συμπίεσης

- Τις παραμορφώσεις (καθιζήσεις) δεν τις υπολογίζουμε από σχέσεις ελαστικότητας αλλά με τη βοήθεια παραμέτρων από κατάλληλες εδαφικές δοκιμές
- Αρκετές άργιλοι έχουν την τάση να συμπιέζονται πολύ. Καταλαβαίνουμε ποιοτικά γιατί αργεί να ολοκληρωθεί η συμπίεση των κορεσμένων αργίλων – στην Εδαφομηχανική ΙΙ θα μάθουμε να υπολογίζουμε τον χρόνο που απαιτείται να ολοκληρωθεί η συμπίεση.

Πηγές υλικού διαφανειών

- Παρουσιάσεις Μ. Καββαδά, Γ. Μπουκοβάλα
- Σχήματα στις διαφάνειες 5, 12, 16-22: Lambe T.W. and R.V. Whitman, 1969, Soil Mechanics, Wiley.