

Μηχανική Συμπεριφορά Εδαφών σε (υπο)κατηγορίες φορτίσεων

Ξεκινάμε από:

Μονοδιάστατη (1D) Συμπύεση

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 II)

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

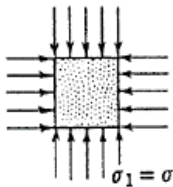
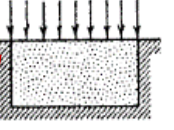
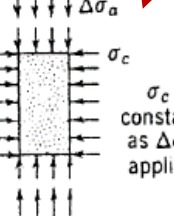
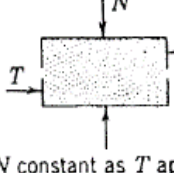
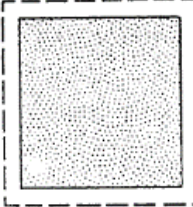
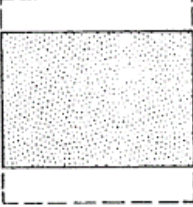
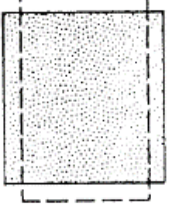

- Όπως και στη Μηχανική, στην αρχή εστιάζουμε σε επιλεγμένα επί μέρους επιλύσιμα προβλήματα (πχ, στη Μηχανική: κάμψη, στρέψη)
- Όπως είπαμε, το έδαφος συμπεριφέρεται γραμμικώς ελαστικά για μικρό μόνο εύρος παραμορφώσεων, γι' αυτό συχνά δεν μπορούμε να δουλέψουμε με τις γνωστές ελαστικές παραμέτρους (δηλ. E , 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 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$
 - τριαξονική δοκιμή: επιβάλλουμε ολόπλευρη πίεση και στη συνέχεια αυξάνουμε την κατακόρυφη τάση, $\sigma_1 \neq \sigma_2 = \sigma_3$

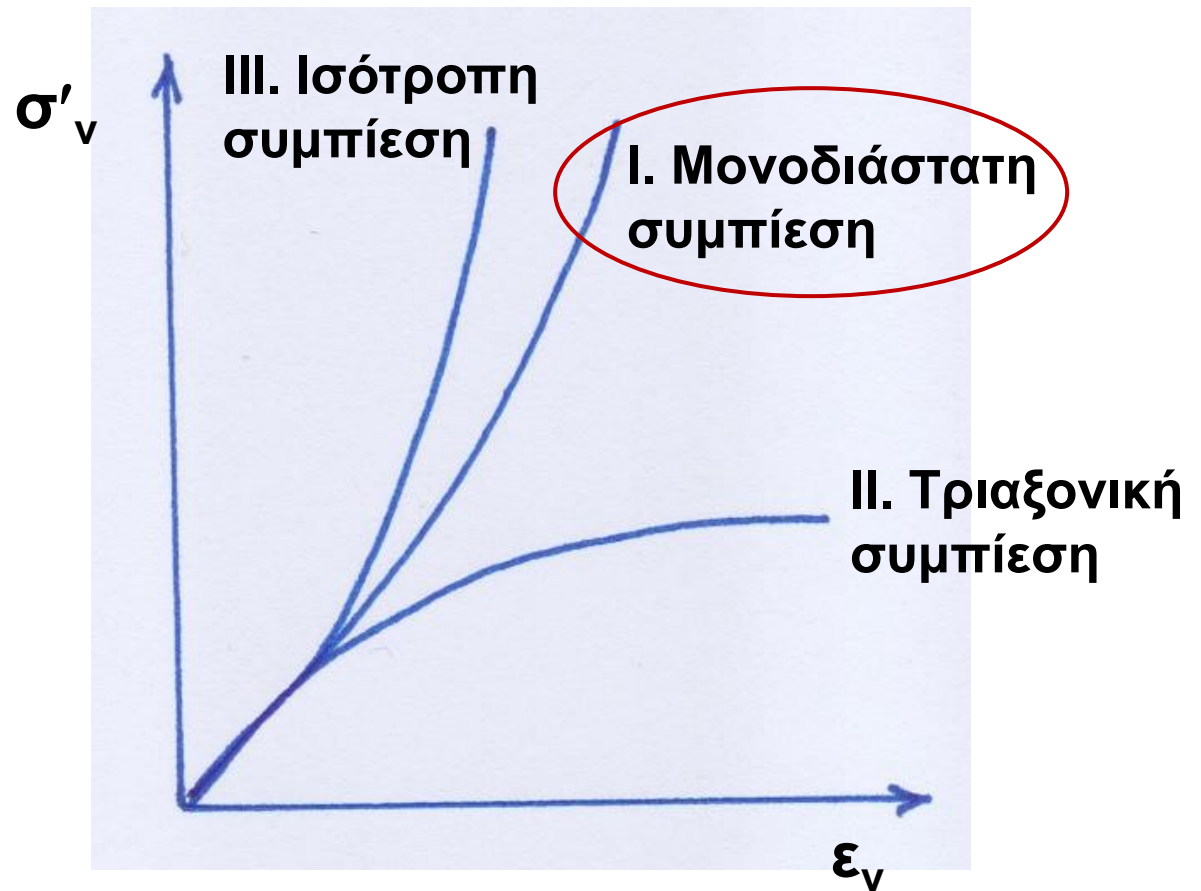
Συνήθεις εργαστηριακές δοκιμές της Γεωτεχνικής Μηχανικής: τάσεις & παραμορφώσεις

Ισότροπη συμπίεση
 1D συμπίεση (μηδενική πλευρική παραμόρφωση*)
 Τριαξονική συμπίεση
 Απ' ευθείας διάτμηση

Test	Isotropic compression	Confined compression (oedometer)	Triaxial compression	Direct shear
Basic conditions	 <p>$\sigma_1 = \sigma_3$</p>	 <p>No horizontal movement</p>	 <p>$\Delta\sigma_a$ σ_c σ_c constant as $\Delta\sigma_a$ applied</p>	 <p>N T N constant as T applied</p>
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 κατηγορίες 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

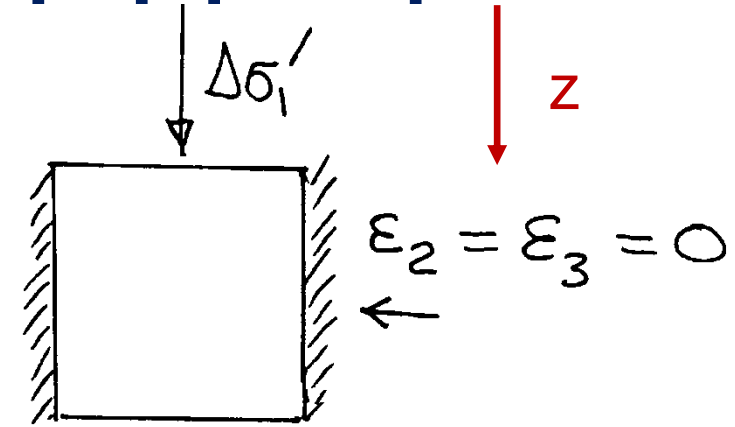
- Όπως έχουμε δει

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

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

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

Συντελεστής ουδέτερης ώθησης γαιών ή λόγος τάσεων σε μονοδιάστατη παραμόρφωση



μέτρο μονοδιάστατης παραμόρφωσης (συμπίεσης)

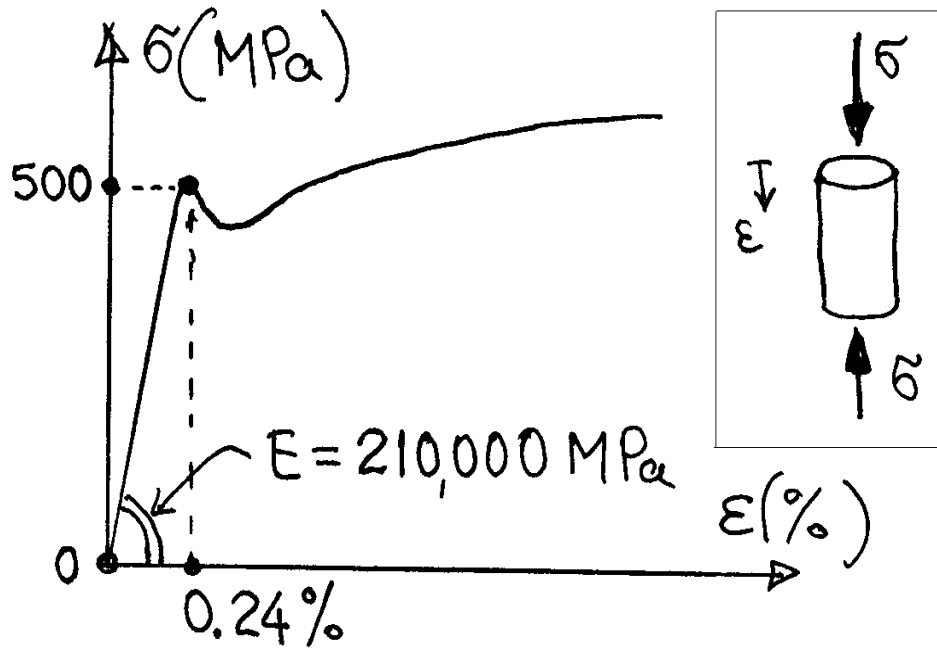
$$K_o \equiv \frac{\Delta \sigma'_h}{\Delta \sigma'_v} = \frac{\Delta \sigma'_x}{\Delta \sigma'_z}$$

Για γραμμική ισότροπη ελαστικότητα:

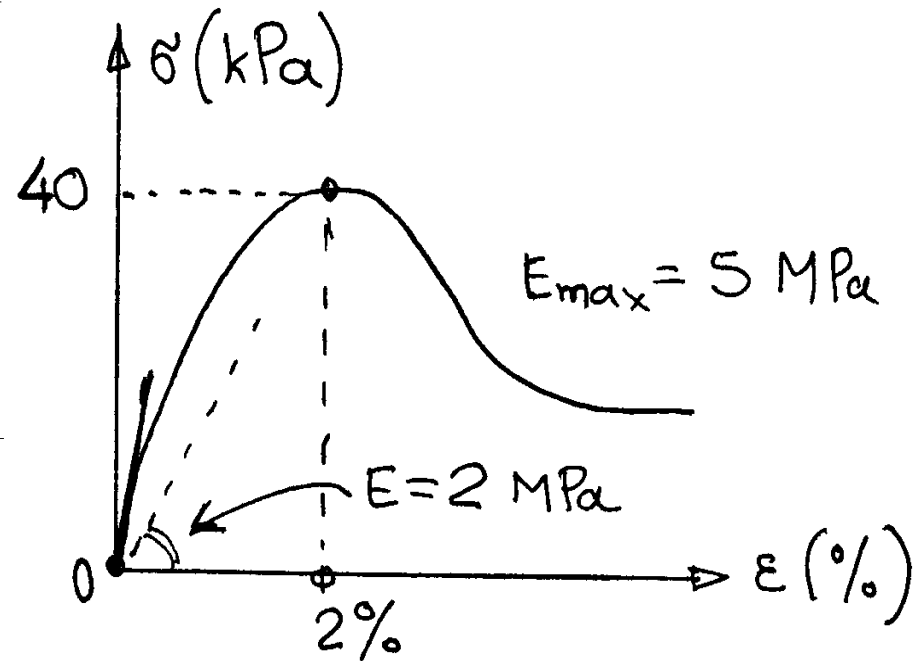
$$K_o = \frac{\nu}{1-\nu}$$

Φλας μπακ 22/2/2022: συγκρίναμε χάλυβα - έδαφος

Χάλυβας St IV



Άργιλος μέσης αντοχής



Χάλυβας: πρακτικώς
γραμμική συμπεριφορά έως
το όριο διαρροής

(Πηγή: Διαφάνειες Μ. Καββαδά)

Μονοδιάστατη παραμόρφωση, εφαρμογή

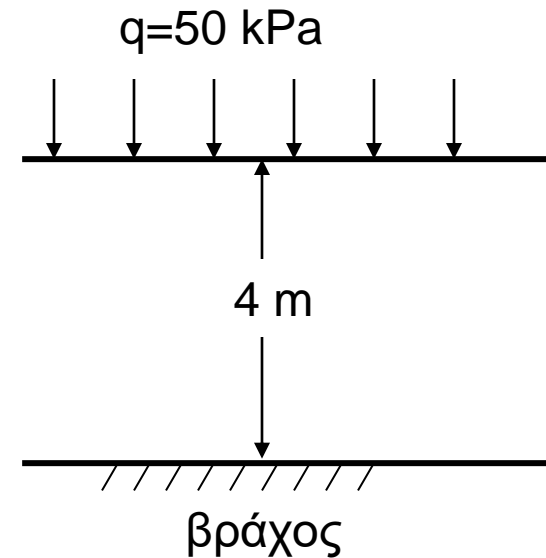
- Ας κάνουμε μια απόπειρα να βρούμε την καθίζηση s στρώματος πάχους $H=4\text{m}$, για τις δύο τιμές του μέτρου ελαστικότητας E που είδαμε στο εισαγωγικό μάθημα, αρχικό $E = 5\text{MPa}$, τέμνον $E = 2\text{MPa}$, και $\nu=1/3$

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

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

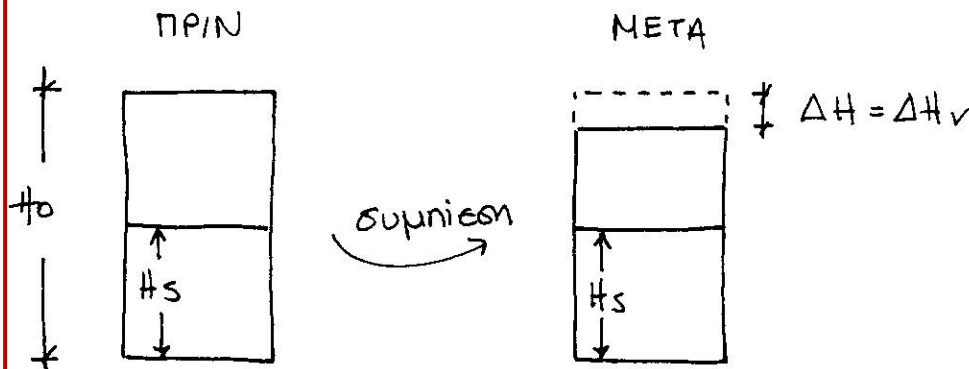
$$\Delta\varepsilon_z = \frac{1}{D} \Delta\sigma'_z$$

- $s=\Delta\varepsilon_z H \rightarrow s= \Delta\sigma'_z H/D \rightarrow$ για $D = 7500\text{kPa}$, $s= 50 \times 4 / 7500 = 0.027\text{m}$ και για $D = 3000\text{kPa}$, $s= 50 \times 4 / 3000 = 0.067\text{m}$
- Ποια τιμή από τις δύο θα διαλέξω; Καλύτερα καμία (γιατί;). Θα πρέπει να έχω αποτελέσματα από δοκιμές συμπίεσομέτρου (διαφάνεια 14) και από αυτά να βρω την καθίζηση.



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

Σε 1D συμπίεση...



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

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

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

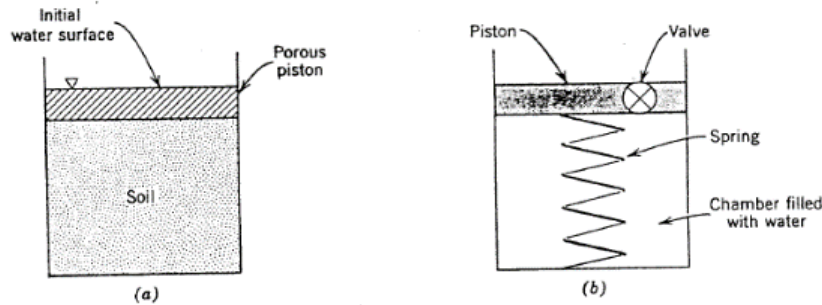
$$\rightarrow H_o = H_s \cdot (1 + e_o)$$

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

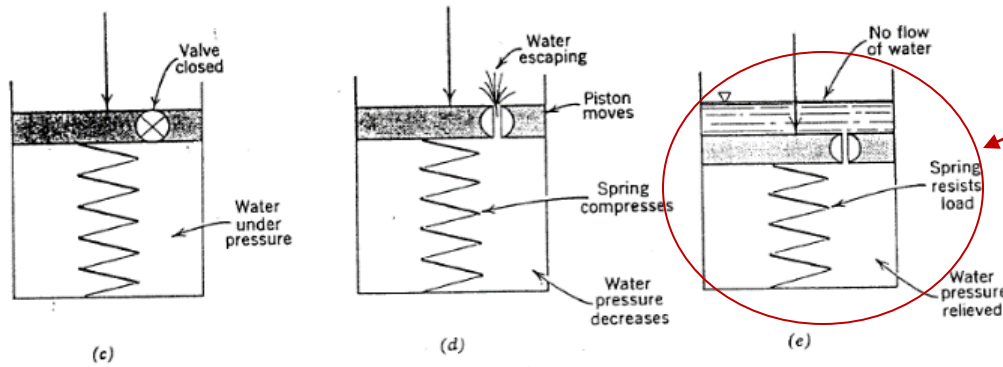
...η κατακόρυφη παραμόρφωση ε_z εκφράζεται ως συνάρτηση της αλλαγής του δείκτη πόρων, Δe

Να μην ξεχάσω την αναλογία κορεσμένου εδάφους– ελατηρίου+πιστονιού

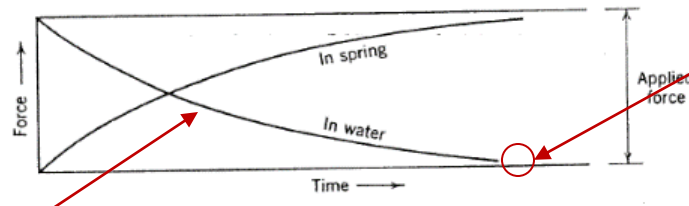
- Τι πρέπει να γίνει για να μπορέσει να αλλάξει ο όγκος των πόρων;



- Να φύγει το νερό



Όταν η καθίζηση ολοκληρωθεί:
 $\Delta u = 0$



$\Delta u(t) \neq 0$

Συμπίεση κορεσμένου εδάφους

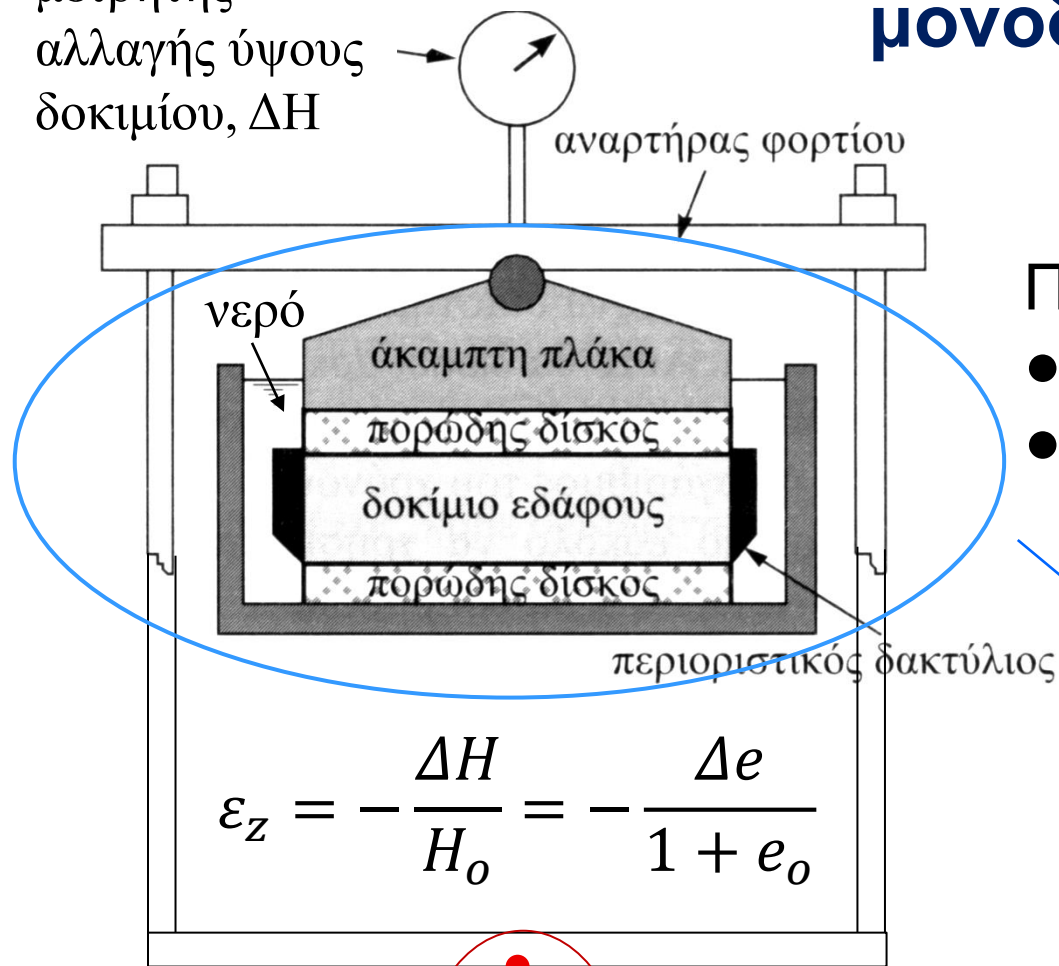
- Αν το έδαφος είναι κορεσμένο, τι πρέπει να γίνει για να μπορέσει να αλλάξει ο όγκος των πόρων; Να φύγει νερό.
- Θυμάμαι ότι η πίεση των πόρων θα αλλάξει με τη φόρτιση, δηλ. $\Delta u \neq 0$. Σε κάθε χρονική στιγμή t , $\Delta \sigma' + \Delta u = \Delta \sigma$. Όμως, αφού φύγει όσο νερό ήθελε να 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 II 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.

αναλογικός
μετρητής
αλλαγής ύψους
δοκιμίου, ΔH

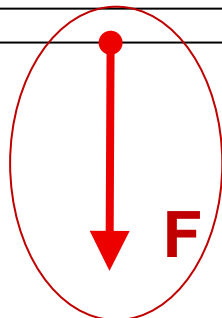
Πειραματική διάταξη μονοδιάστατης συμπίεσης: συμπιεσόμετρο

Πειραματικά δεδομένα:

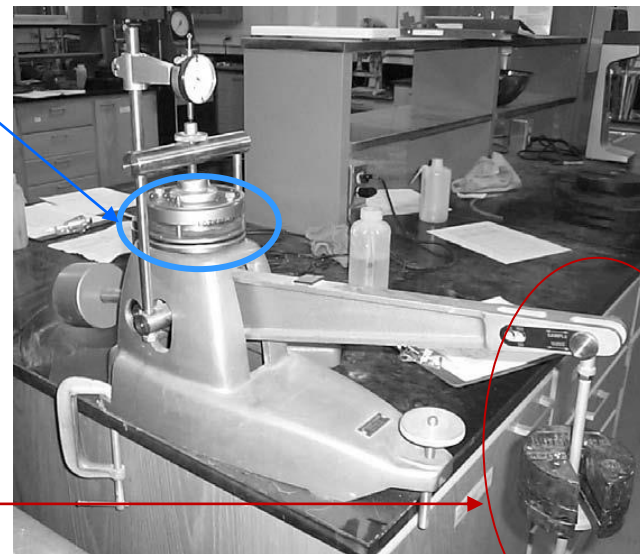
- σε διαδοχικές σ'_z, ϵ_z (σ'_z)
- για κάθε $\sigma'_z, \epsilon_z(t), t_{\max}=1d$



$$\epsilon_z = -\frac{\Delta H}{H_0} = -\frac{\Delta e}{1 + e_0}$$



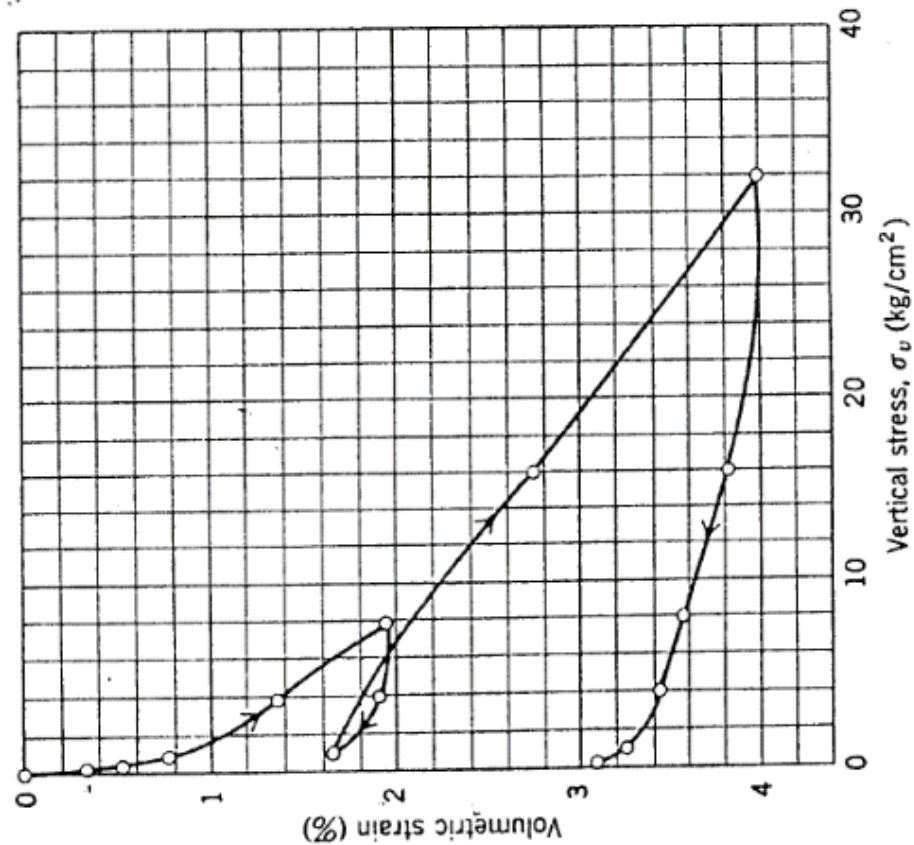
Ανάγουμε δύναμη F
στην επιφάνεια του
δοκιμίου $\rightarrow \sigma_z$



Αποτελέσματα δοκιμής συμπίεσομέτρου σε άμμο

σε οικείο
προσανατολισμό
αξόνων

κατακόρυφη
ενεργός τάση
 σ'_z



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

Αποτελέσματα δοκιμής συμπίεσομέτρου σε άμμο

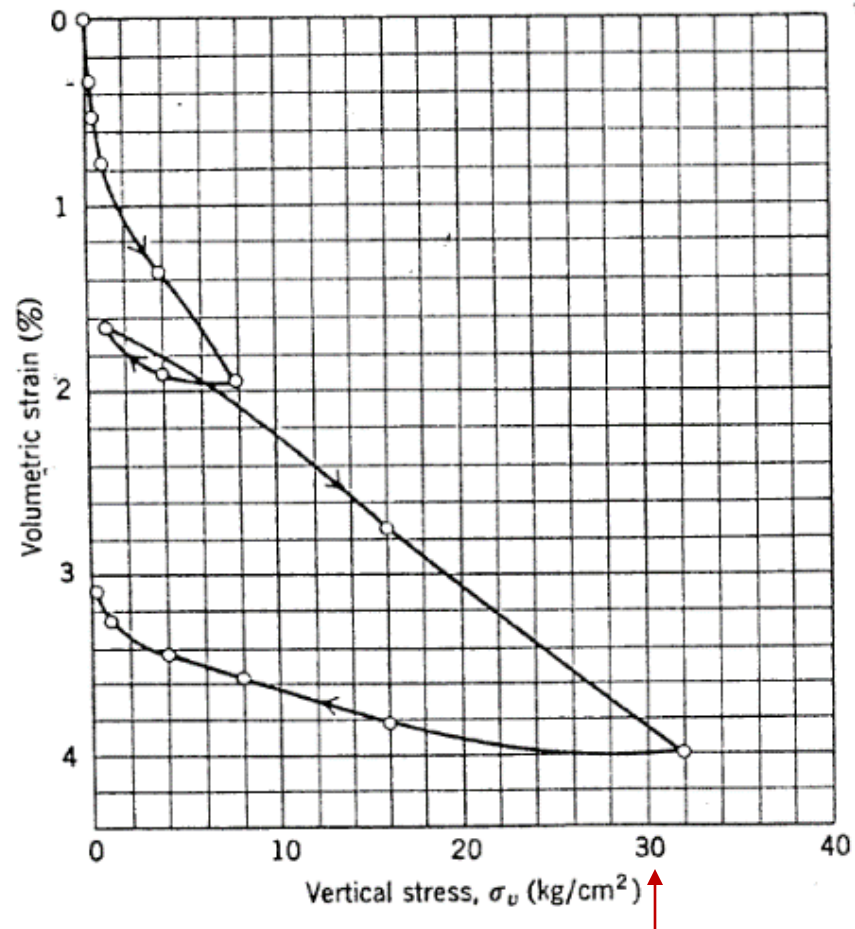
Σχόλια για τους άξονες:

(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:

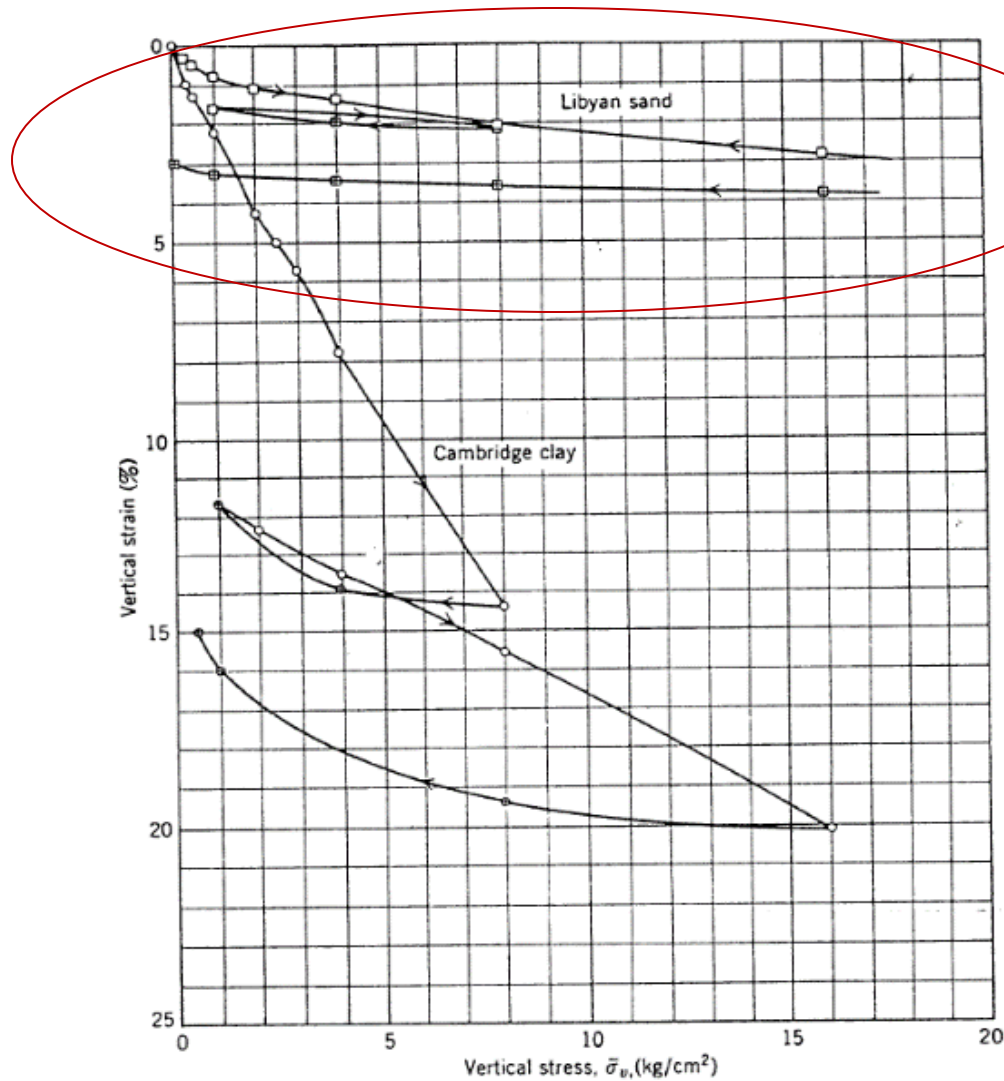
Η μονάδα (kg) αναφέρεται σε (kg) βάρους, $1 \text{ kg/cm}^2 = 100 \text{ kN/m}^2$

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



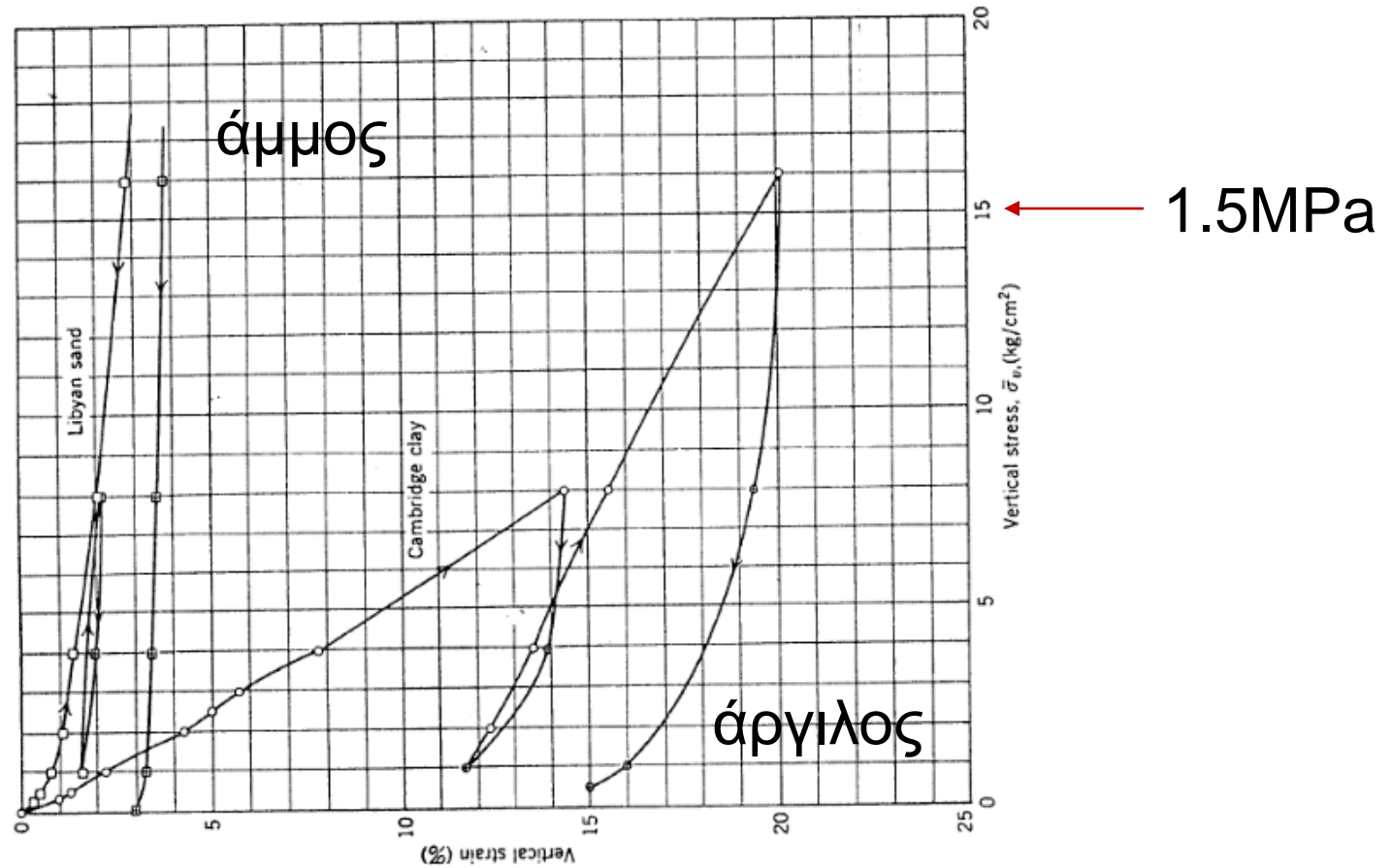
3MPa

Αποτελέσματα δοκιμής συμπίεσμέτρου σε άμμο & σε άργιλο



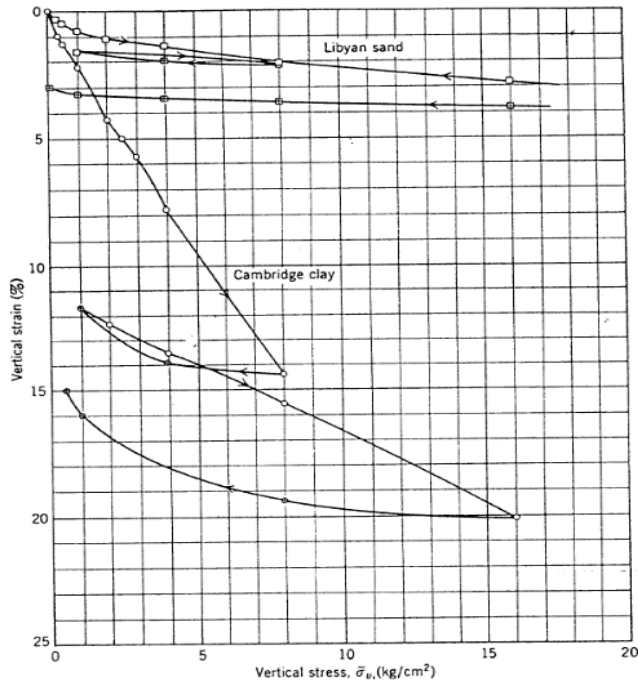
Η άμμος των προηγούμενων δύο διαφανειών

Αποτελέσματα δοκιμής συμπίεσμέτρου σε άμμο & σε άργιλο

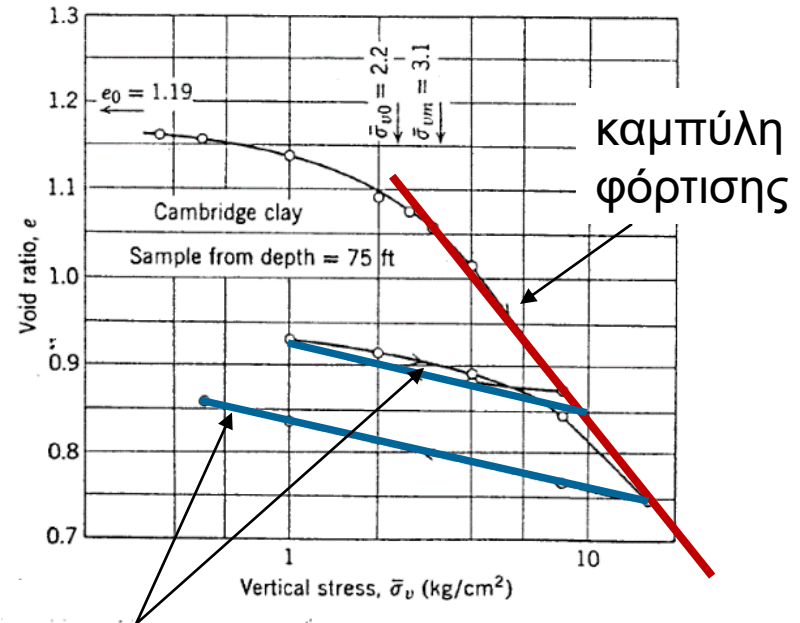


μια τελευταία φορά στον πιο οικείο προσανατολισμό αξόνων...

Αποτελέσματα δοκιμής συμπίεσομέτρου σε άργιλο: διαφορετικοί άξονες για την τάση



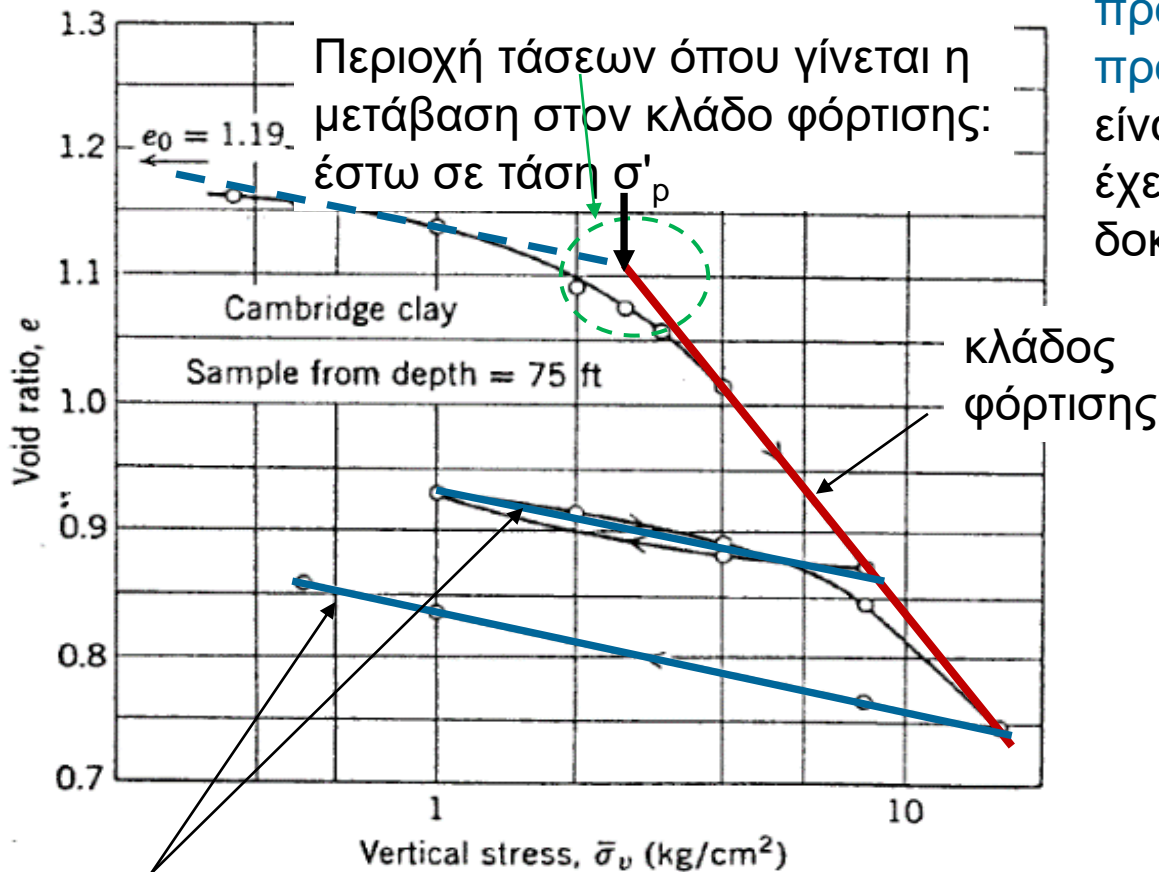
Άξονες: κατακόρυφη παραμόρφωση (ισοδύναμα: δείκτης πόρων) – **κατακόρυφη ενεργός τάση**



καμπύλες αποφόρτισης - επαναφόρτισης

Άξονες: δείκτης πόρων – **λογάριθμος κατακόρυφης ενεργού τάσης**

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



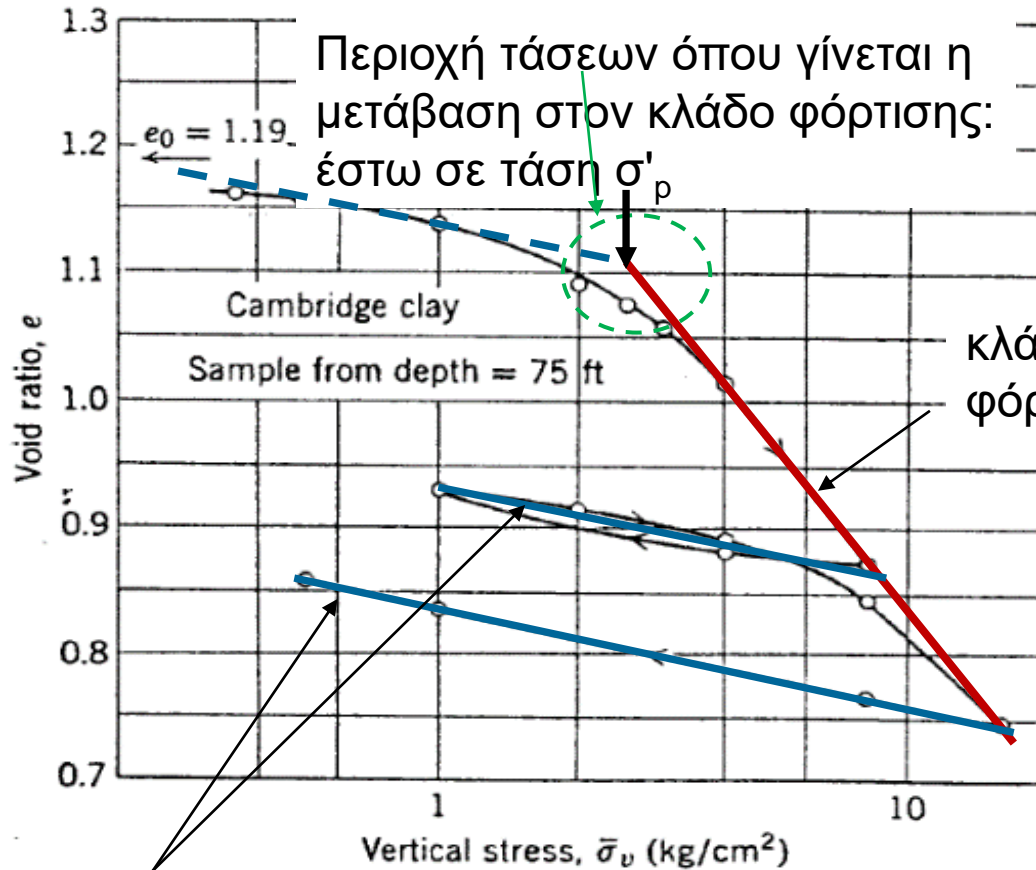
- Η τάση σ'_p λέγεται **τάση προφόρτισης** ή **τάση προστερεοποίησης** και είναι η μέγιστη τάση που έχει επιβληθεί στο δοκίμιο στο παρελθόν

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

Προφορτισμένες άργιλοι – λόγος K_0



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

- Έτσι ο λόγος $K_0 = \sigma'_h / \sigma'_v$ μεγαλώνει, όσο μεγαλώνει ο λόγος OCR

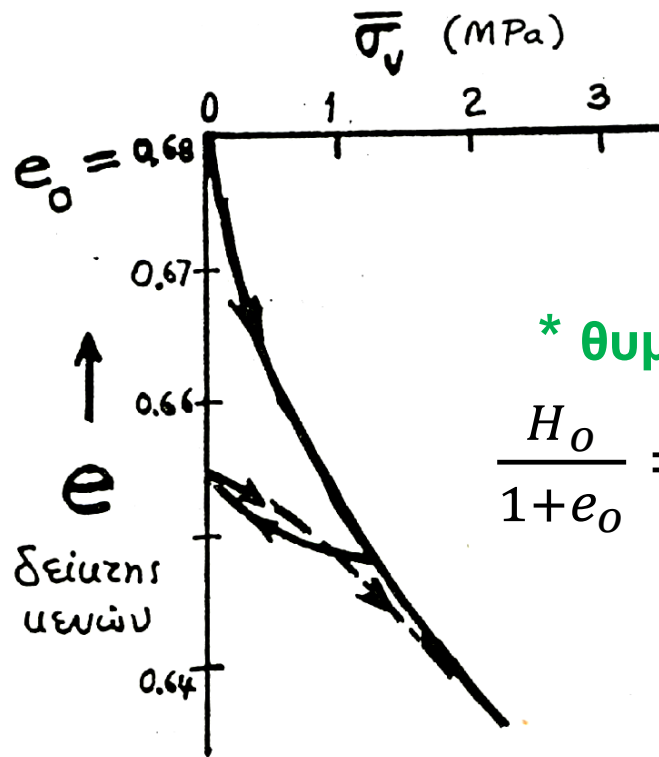
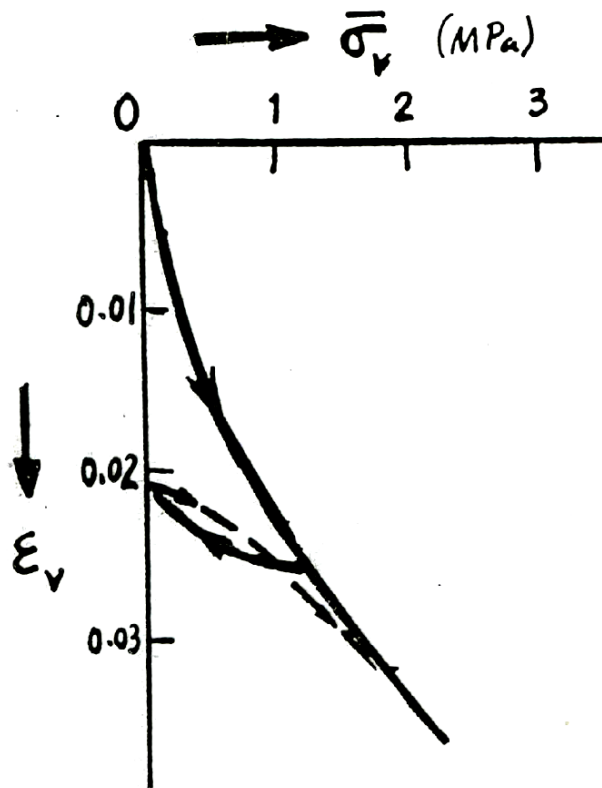
κλάδοι αποφόρτισης - επαναφόρτισης

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

Υπολογισμός καθιζήσεων από καμπύλη παραμορφώσεων

$$\Delta H = H_0 \frac{\Delta e}{1 + e_0}^*$$

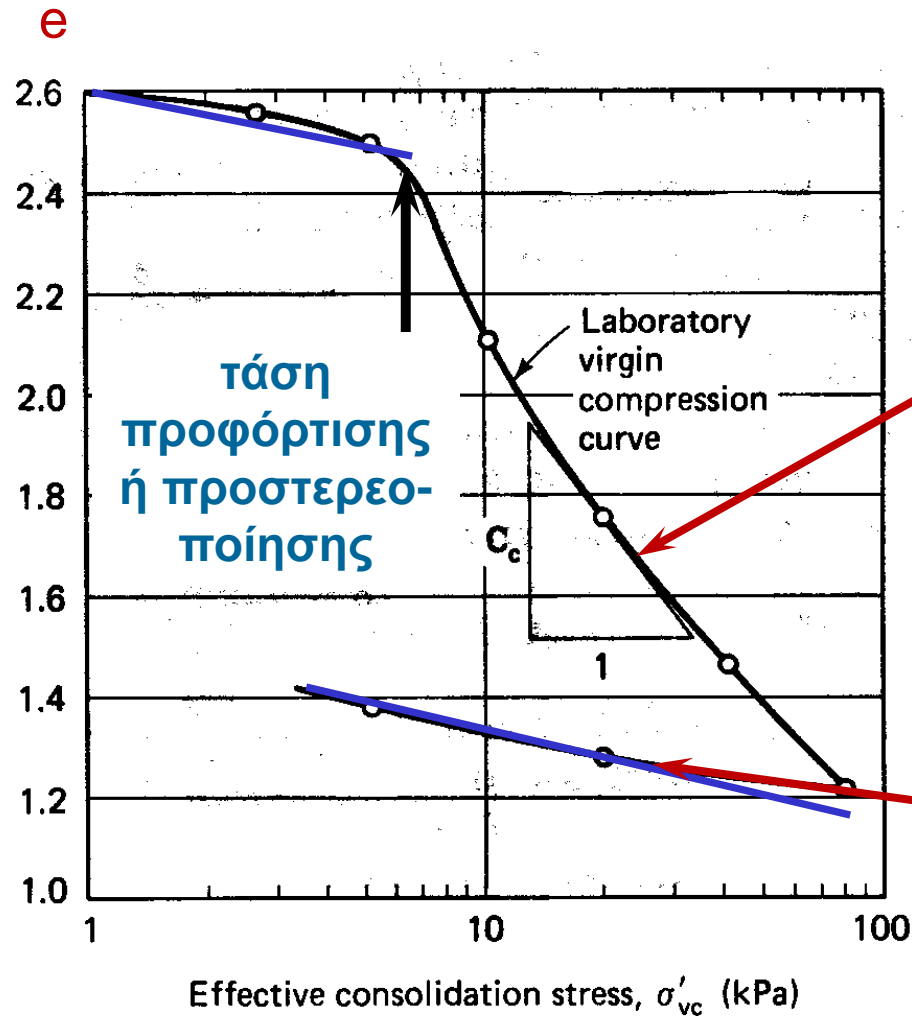
Μετρώ Δe από την καμπύλη, αν γράψω $\Delta e = e_{\text{ΤΕΛΙΚΟ}} - e_0$, καθίζηση $s = -\Delta H$, αν γράψω $\Delta e = e_0 - e_{\text{ΤΕΛΙΚΟ}}$, καθίζηση $s = \Delta H$



* θυμάμαι ότι:

$$\frac{H_0}{1 + e_0} = H_s = ct$$

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



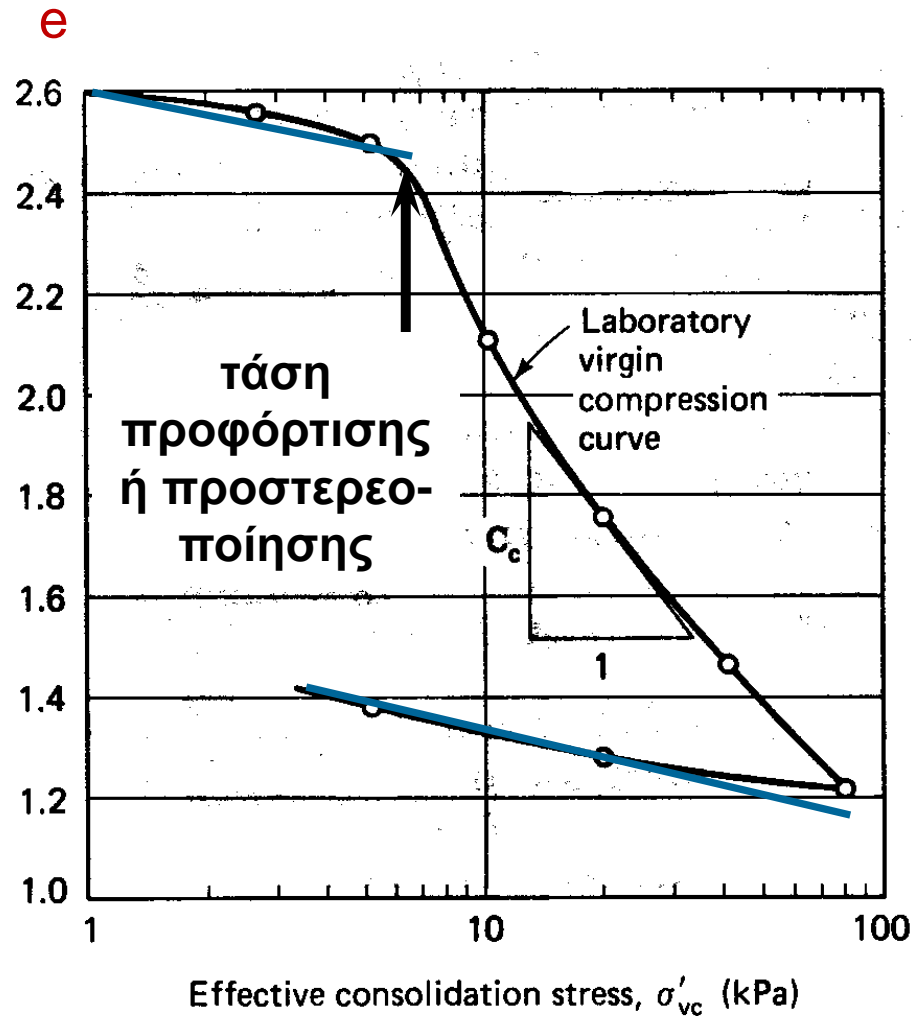
Δείκτης συμπίεστότητας = Συντελεστής στερεοποίησης κατά την κανονική φόρτιση:

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

Δείκτης επαναφόρτισης = Συντελεστής στερεοποίησης κατά την αποφόρτιση και επαναφόρτιση:

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

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



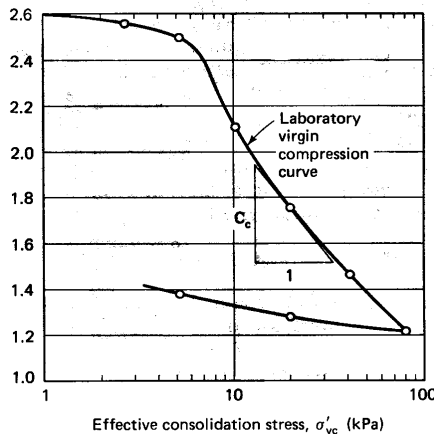
Η καθίζηση S υπολογίζεται πάλι από την σχέση:

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

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

Υπολογισμός καθιζήσεων, 1/4

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



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

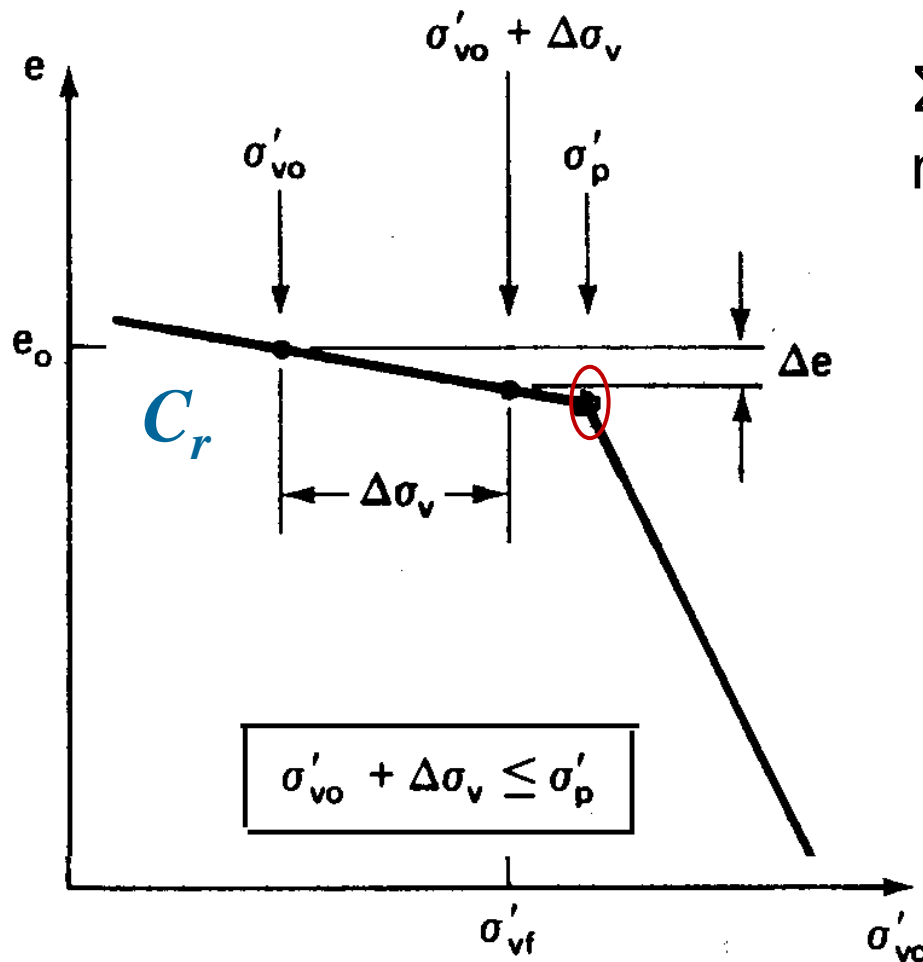
$$\Delta e = C_c \log \left(\frac{\sigma'_{vo} + \Delta \sigma'_v}{\sigma'_{vo}} \right)$$

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, 2/4

- Άργιλος OC: συμπιέζεται ως τελική ενεργό τάση $< \sigma'_p$



Σημ: στο τέλος της συμπίεσης η άργιλος παραμένει OC

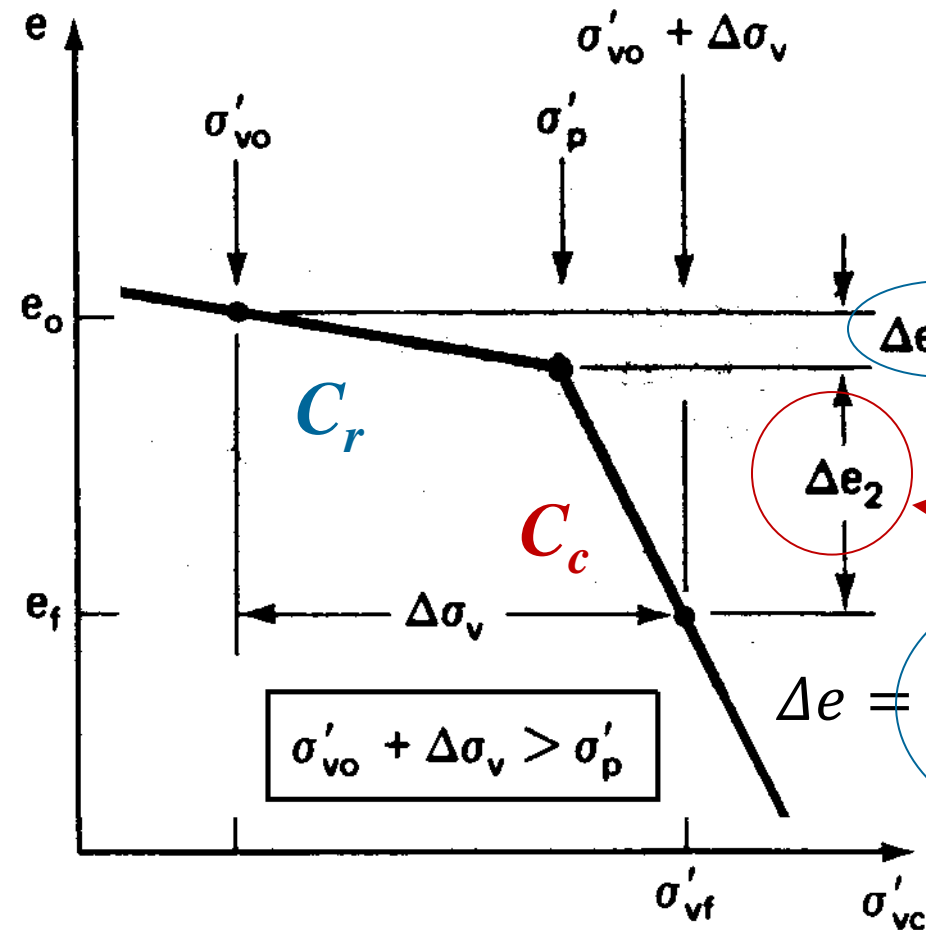
$$S = \Delta H = \frac{H_0}{1 + e_0} \Delta e$$

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

Υπολογισμός καθιζήσεων, 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, 4/4

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

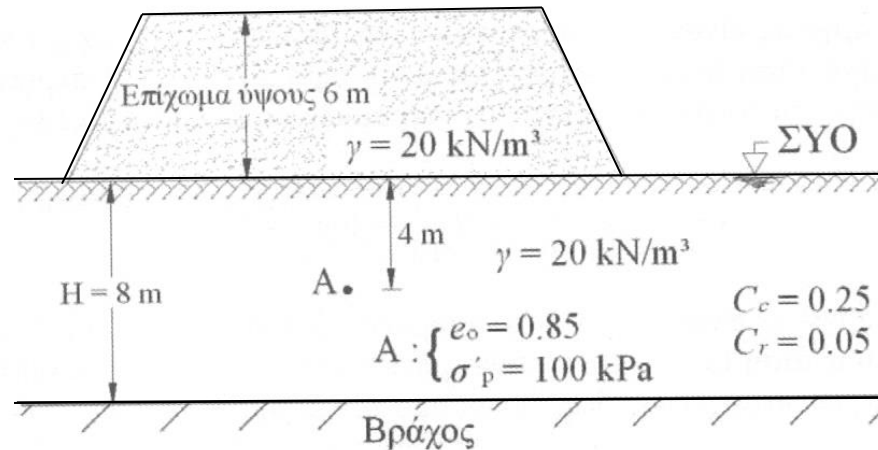
$$\Delta H = H_{o*} \frac{\Delta e}{1 + e_{o*}}$$

$$\Delta e = C_r \log \left(\frac{\sigma'_{τελικη}}{\sigma'_{αρχικη}} \right)$$

- **Επαναφόρτιση** – σαν άργιλος OC

Εφαρμογή (Καββαδάς, Κεφ. 6, σελ. 168)

Εκτίμηση της καθίζησης εδαφικού στρώματος πάχους (H) λόγω αύξησης της κατακόρυφης ενεργού τάσης από σ'_{v0} σε $\sigma'_{v0} + \Delta\sigma'_v$



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

Ειδικό βάρος: $\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$

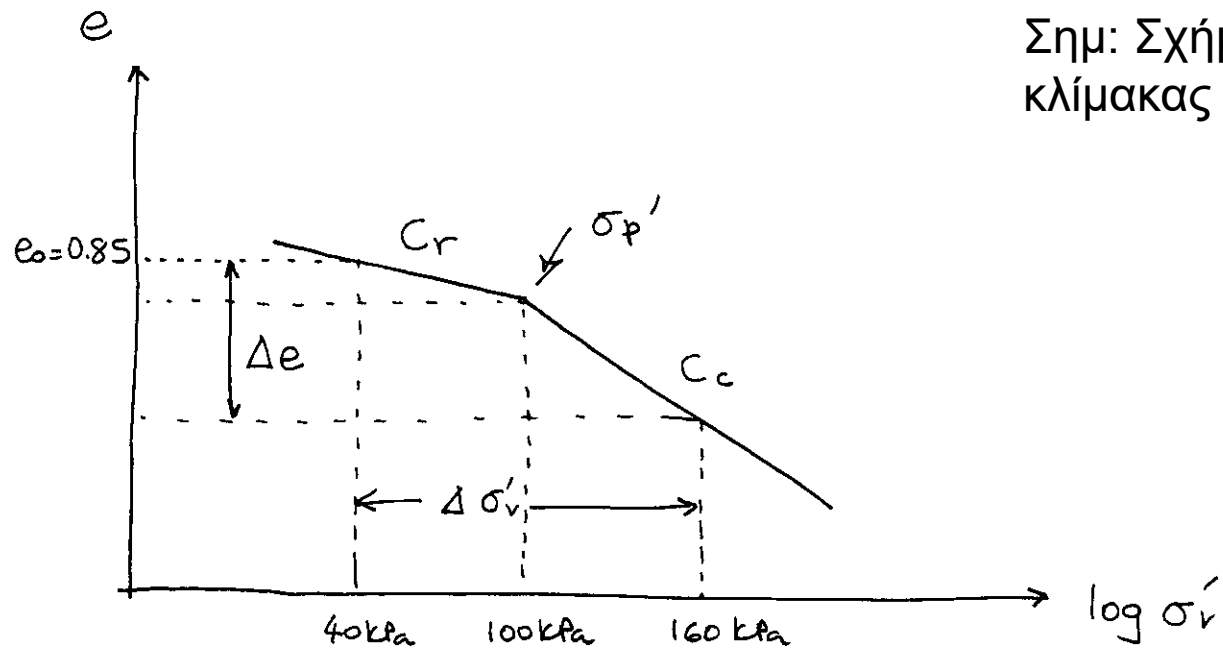
Δείκτης συμπίεστικότητας: $C_c = 0.25$, Δείκτης επαναφόρτισης: $C_r = 0.05$

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

Αρχικός δείκτης πόρων: $e_0 = 0.85$, Τάση προστερεοποίησης: $\sigma'_p = 100 \text{ kPa}$

Ζητείται η καθίζηση της άργιλου λόγω της κατασκευής του επιχώματος.

Εφαρμογή – απάντηση



Σημ: Σχήμα εκτός κλίμακας

Για $\Delta \sigma'_v = 120 \text{ kPa}$, βρίσκω $\Delta e = 0.071$ και καθίζηση 0.307 m

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 II 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, 15-21: Lambe T.W. and R.V. Whitman, 1969, Soil Mechanics, Wiley.