

ΚΕΦΑΛΑΙΟ VII.

ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ & ΑΣΤΟΧΙΑ ΤΟΥ ΚΟΡΕΣΜΕΝΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ

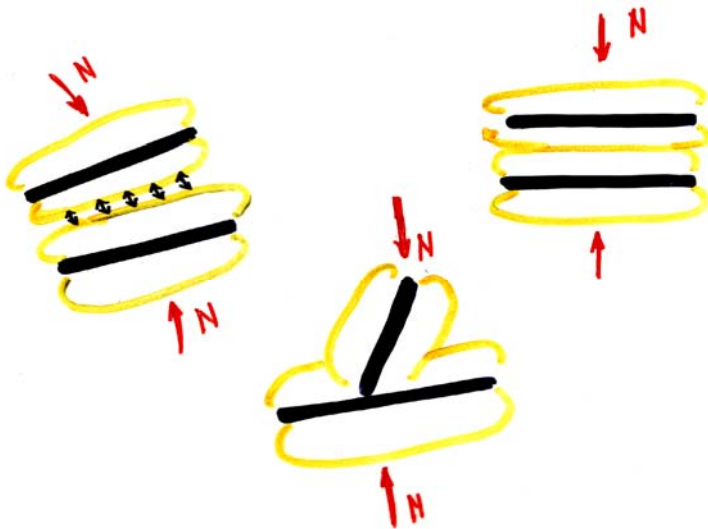
1. Ο τρίπτυχος ρόλος της υγρής φάσης (νερού)
 - Χημική αλληλεπίδραση
 - Φυσική αλληλεπίδραση
 - Μηχανική αλληλεπίδραση
2. Ανάπτυξη (υπερ-) πίεσης των πόρων υπό «αστράγγιστες» συνθήκες
 - 1-Δ & ισότροπη συμπίεση
 - Διάτμηση
3. Η έννοια της «αστράγγιστης διατμητικής αντοχής»

1. Ο «τρίπτυχος» ρόλος της υγρής φάσης (του νερού των πόρων δηλαδή)

Χημική αλληλεπίδραση

Την έχουμε κουβεντιάσει ήδη.

Αφορά το “**διπλό στρώμα**” νερού που επηρεάζει τον τρόπο μεταφοράς των δυνάμεων μεταξύ των **αργίλικών** πλακιδίων.



Είναι σημαντική **μόνον** για **λεπτόκοκκα εδάφη**, δηλαδή αργίλους και κάποιους τύπους (πλαστικών) ιλύων. Δεν παίζει κανένα ρόλο σε πιο χονδρόκοκκα εδάφη, όπως άμμους και χάλικες (γιατί άραγε;)

Φυσική αλληλεπίδραση

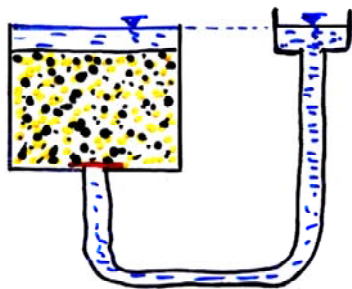


Όταν υπάρχει ροή νερού μέσω των πόρων του εδάφους, τότε ασκούνται δυνάμεις επί των στερεών κόκκων (κάτι ανάλογο προς τις δυνάμεις που ασκεί ένας χείμαρρος σε ογκόλιθους που βρίσκονται εντός της κοίτης του), οι οποίες μεταβάλλουν τις τάσεις επαφής.

Η μορφή αυτή αλληλεπίδρασης είναι **σημαντική**

σε **χονδρόκοκκα** κυρίως εδάφη (άμμους, χάλικες, κλπ..) όπου το νερό δεν είναι δεσμευμένο στο “**διπλό στρώμα**” αλλά είναι ελεύθερο και μπορεί να δημιουργήσει εσωτερική ροή.

Φυσική αλληλεπίδραση



Υδροστατικές συνθήκες – δεν υπάρχει ροή νερού προς τα άνω.

Η μόνη δύναμη που ασκείται στους κόκκους είναι η άνωση A , η οποία μειώνει το βάρος του κόκκου από G σε $G'=G-A$.

Για συνήθη εδάφη $G' > 0$ (γιατί ;)



Ροή προς τα άνω.

Τώρα, εκτός από την άνωση A , ασκείται και μία υδροδυναμική δράση $F_{υδρ}$ και επομένως το βάρος του κόκκου μειώνεται ακόμη περισσότερο, από G σε $G'=G-A-F_{υδρ}$, και μπορεί ακόμη και να μηδενισθεί ($G'=0$ **φαινόμενο ρευστής άμμου**)

Φυσική αλληλεπίδραση

Ερώτηση:

Ένας μικρός και αμέριμος βεδουίνος πέφτει κατά λάθος σε ρευστή (“κινούμενη” κατά κόσμον) άμμο. Τι θα του συμβεί; Θα πνιγεί άραγε ή όχι;

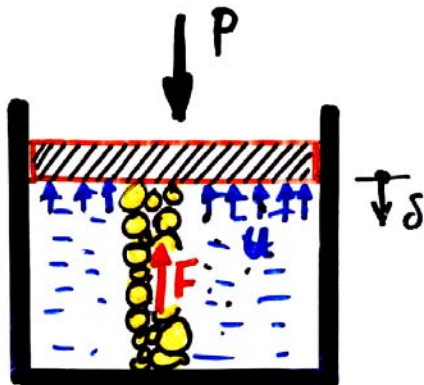
(από την κλασσική ταινία *Laurence of Arabia* με πρωταγωνιστή τον *Peter O'Toul*)



Να σχεδιασθεί η μεταβολή των

$P(=\text{σταθ.}), U, F, \delta$

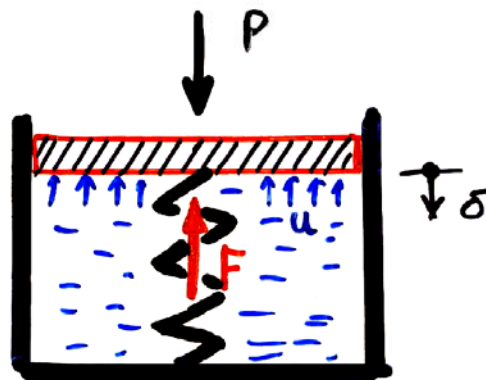
με τον χρόνο στις παρακάτω περιπτώσεις :



(α) Ξηρό έδαφος

(β₁) Κορεσμένο έδαφος, αδιαπέρατη πλάκα φόρτισης

(β₂) Κορεσμένο έδαφος, διαπερατή πλάκα φόρτισης

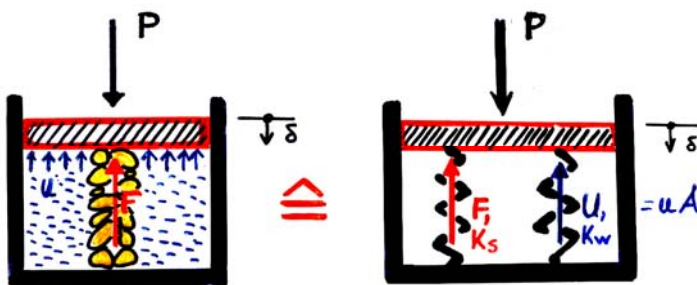


$$P = U + F$$

$$F = \sigma' A$$

$$U = u A$$

$A = \text{επιφάνεια πλάκας}$



$$K_s \cdot \delta + K_w \cdot \delta = P \rightarrow \delta = \frac{P}{K_s} \left(\frac{1}{1 + K_w/K_s} \right)$$

$$U = K_w \cdot \delta \rightarrow U = P \left(\frac{1}{1 + K_s/K_w} \right)$$

$$F = K_s \cdot \delta \rightarrow F = P \left(\frac{1}{1 + K_w/K_s} \right)$$

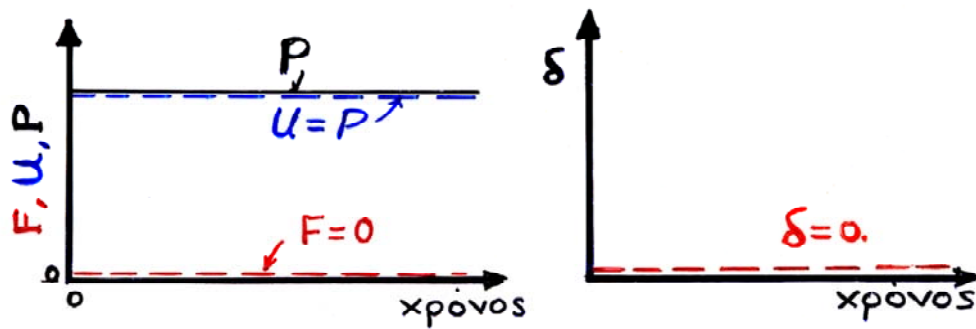
(β) Διαπερατή πλάκα
(σταδιακή διαφυγή νερού)

$t=0+$ δεν έχει προλάβει να διαφύγει νερό, άρα ως (α)

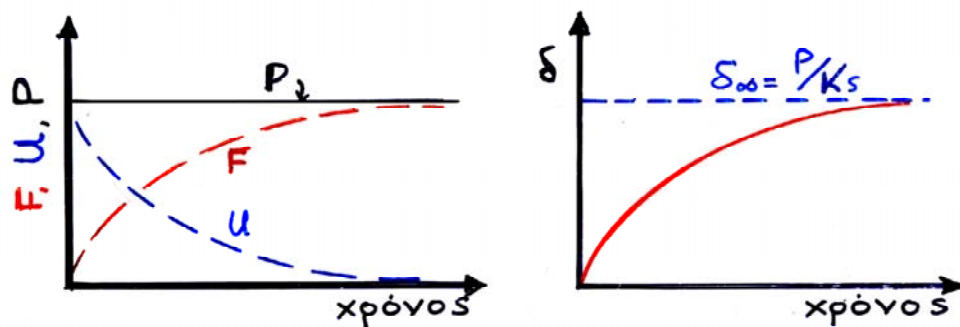
$t=\infty$ έχει προλάβει να διαφύγει όλο το νερό

$$K_w = 0 \rightarrow \left. \begin{array}{l} K_w/K_s = 0 \\ K_s/K_w = \infty \end{array} \right\} \rightarrow \begin{array}{l} \delta = P/K_s \\ U = 0 \\ F = P \end{array}$$

(α) χωρίς δυνατότητα στράγγισης :



(β) με δυνατότητα στράγγισης



από την ΕΙΣΑΓΩΓΗ

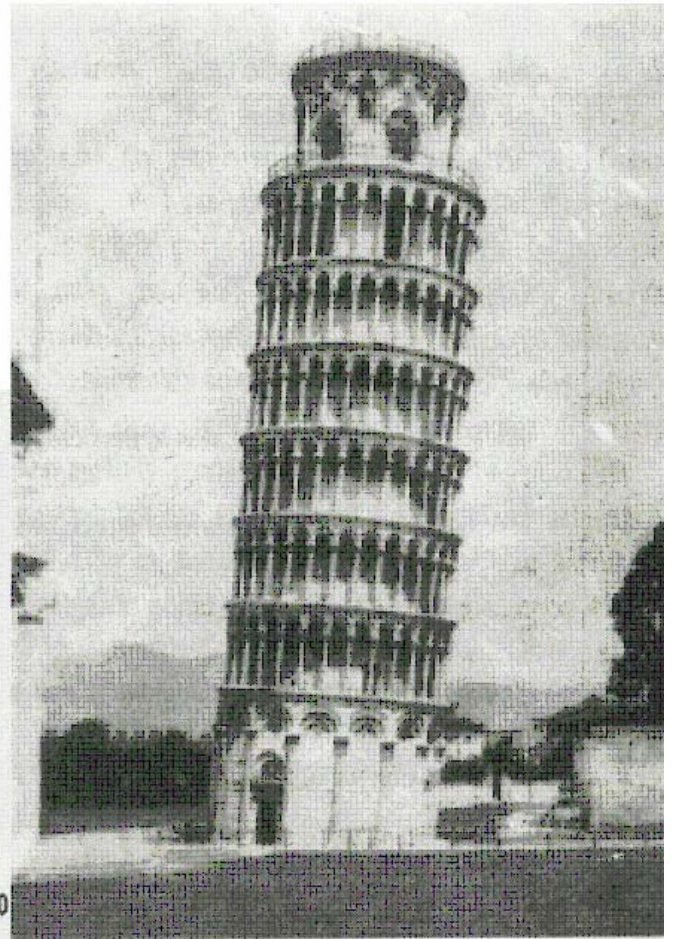
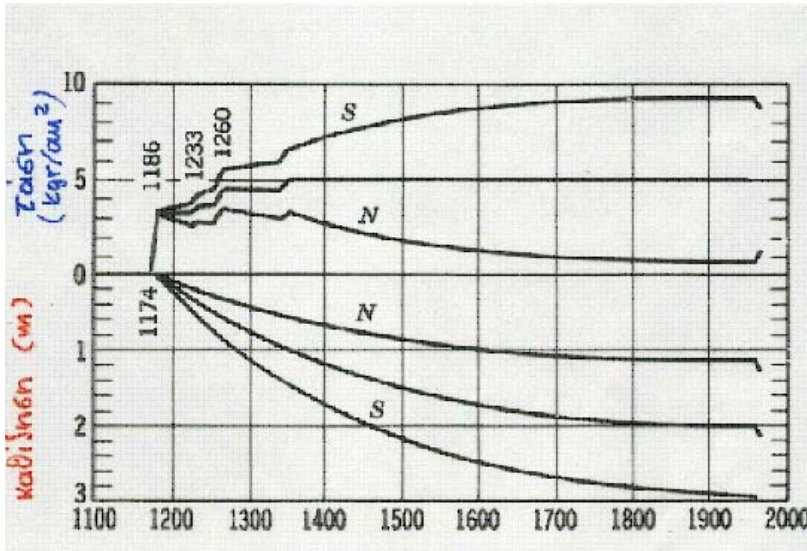


έκλεψα λίγο στην
Θεμελίωση αλλά ποτέ
δεν θα μαθευτεί !!!

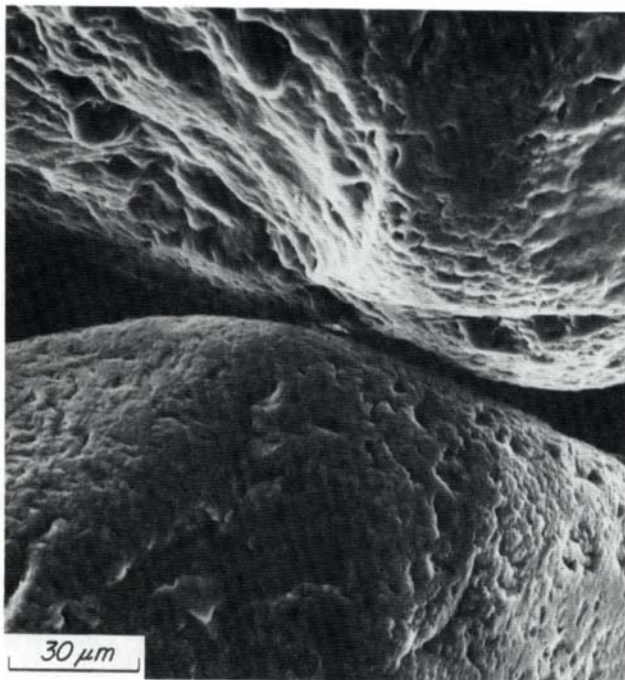
"I skimped a little on the foundation,
but no one will ever know it!"

850 χρόνια μετά...

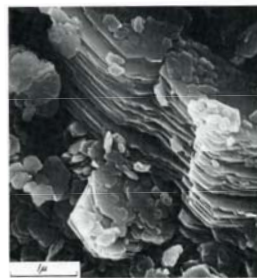
σας θυμίζει τίποτα;



Σύγκριση Άμμου, Καολινίτη, Ιλλίτη & Μοντμοριλονίτη



ΑΜΜΟΣ / 10 (Ε.Ε. = ..?)



Καολινίτης
Ε.Ε. = 5-15 m²/gr



Ιλλίτης
Ε.Ε. = 80-100 m²/gr



Μοντμοριλονίτης
Ε.Ε. = 800 m²/gr

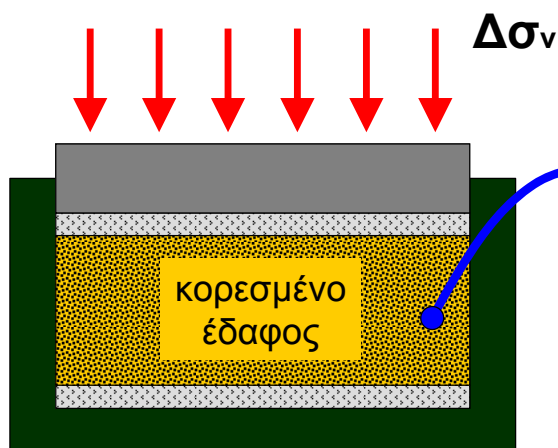
Όλες οι φωτό.. είναι περίπου
στην ίδια κλίμακα

Γ. Δ. Μπουκοβάλας, Καθηγητής Σχολής Πολ. Μηχανικών, Ε.Μ.Π.

2. Ανάπτυξη (υπέρ-) πίεσης πόρων υπό «αστράγγιστες» συνθήκες φόρτισης

1-διάστατη συμπίεση

Την έχουμε κουβεντιάσει ήδη



$$\Delta u = \Delta \sigma_v$$

$$\Delta \sigma'_v = 0$$

ή πιο γενικά

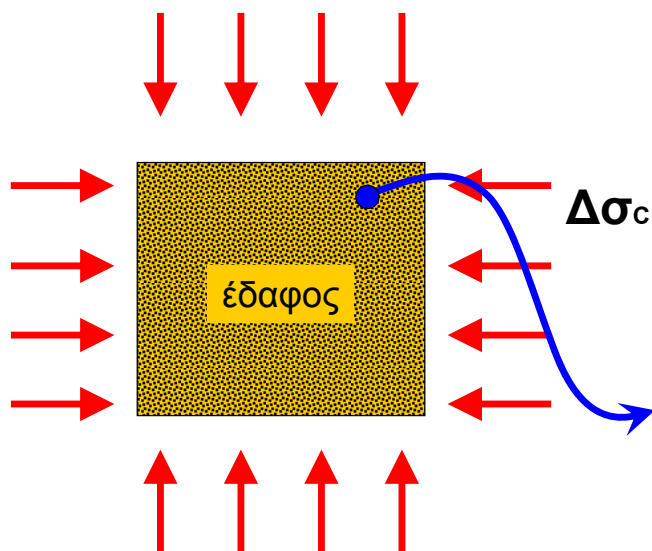
$$\Delta u = B \Delta \sigma_v$$

$$\Delta \sigma'_v = (1-B) \Delta \sigma_v$$

$B=1$ για πλήρως κορεσμένο ($S_r > 98\%$) και
 $B=0$ για ξηρό ή μερικώς κορεσμένο έδαφος

ισοτροπική συμπίεση

Για τους ίδιους λόγους με την 1-Δ συμπίεση (μηχανική αλληλεπίδραση μεταξύ εδαφικού σκελετού και ασυμπίεστου νερού).....



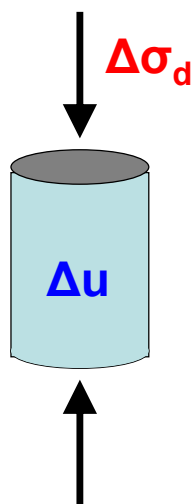
$$\Delta u = B \Delta \sigma_c$$

$$\Delta \sigma'_c = (1-B) \Delta \sigma_c$$

$B=1$ για πλήρως κορεσμένο ($S_r > 98\%$) και
 $B=0$ για ξηρό ή μερικώς κορεσμένο έδαφος

$\Delta \sigma_c$

μονο-αξονική φόρτιση



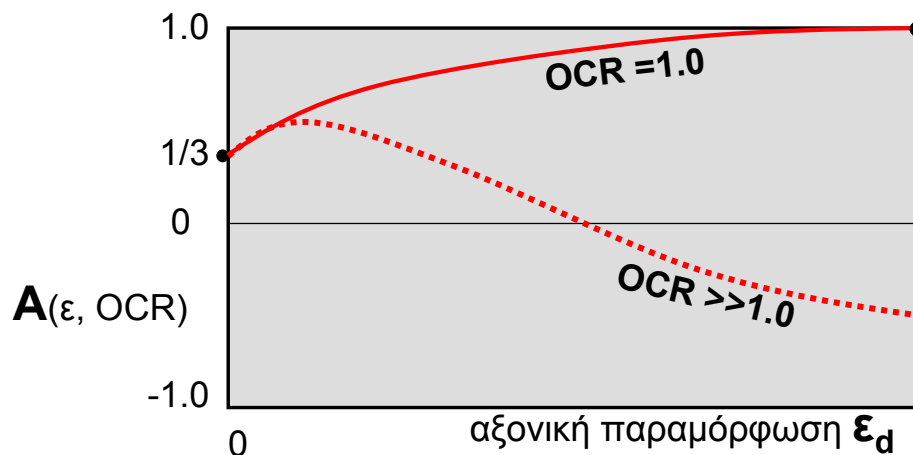
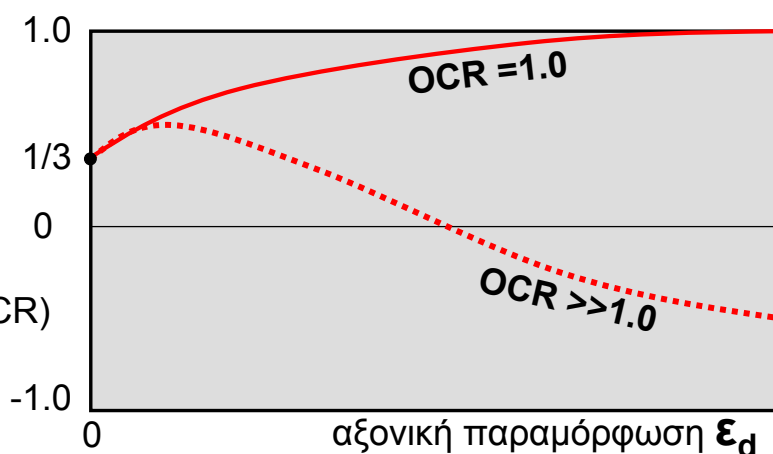
Στην περίπτωση αυτή δεν ισχύει άμεσα το μηχανικό ανάλογο που παρουσιάσαμε προηγουμένως για την 1-Δ και την ισοτροπική συμπίεση, μια και η τάση για μεταβολή του όγκου δεν προέρχεται από την επιβαλλόμενη ορθή τάση, αλλά κυρίως από την διάτμητική (διαστολικότητα).

Έτσι, με βάση πειραματικά αποτελέσματα για κορεσμένο έδαφος, προκύπτει ότι: $\Delta u = A \Delta \sigma_d$

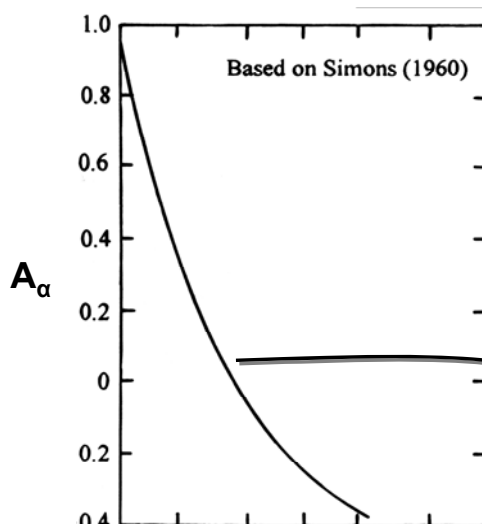
[ή γενικότερα: $\Delta u = B(A \Delta \sigma_d)$]

όπου:

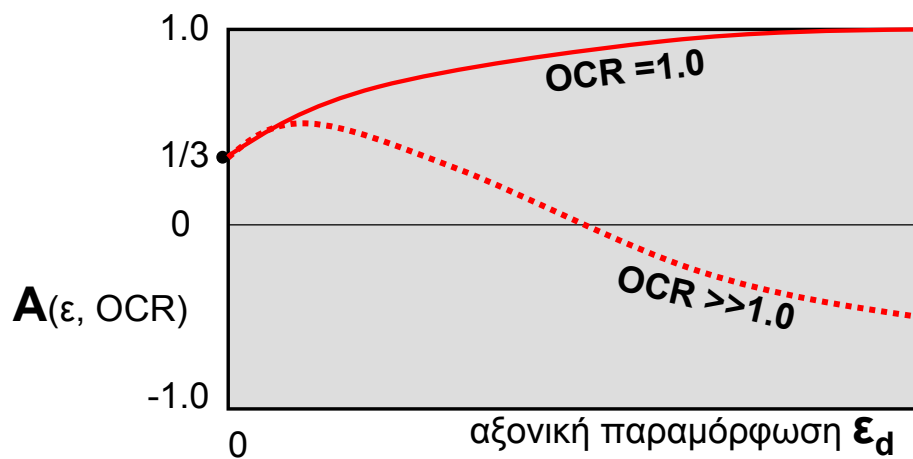
$A(\epsilon, OCR)$



και
κάτι
ακόμη:

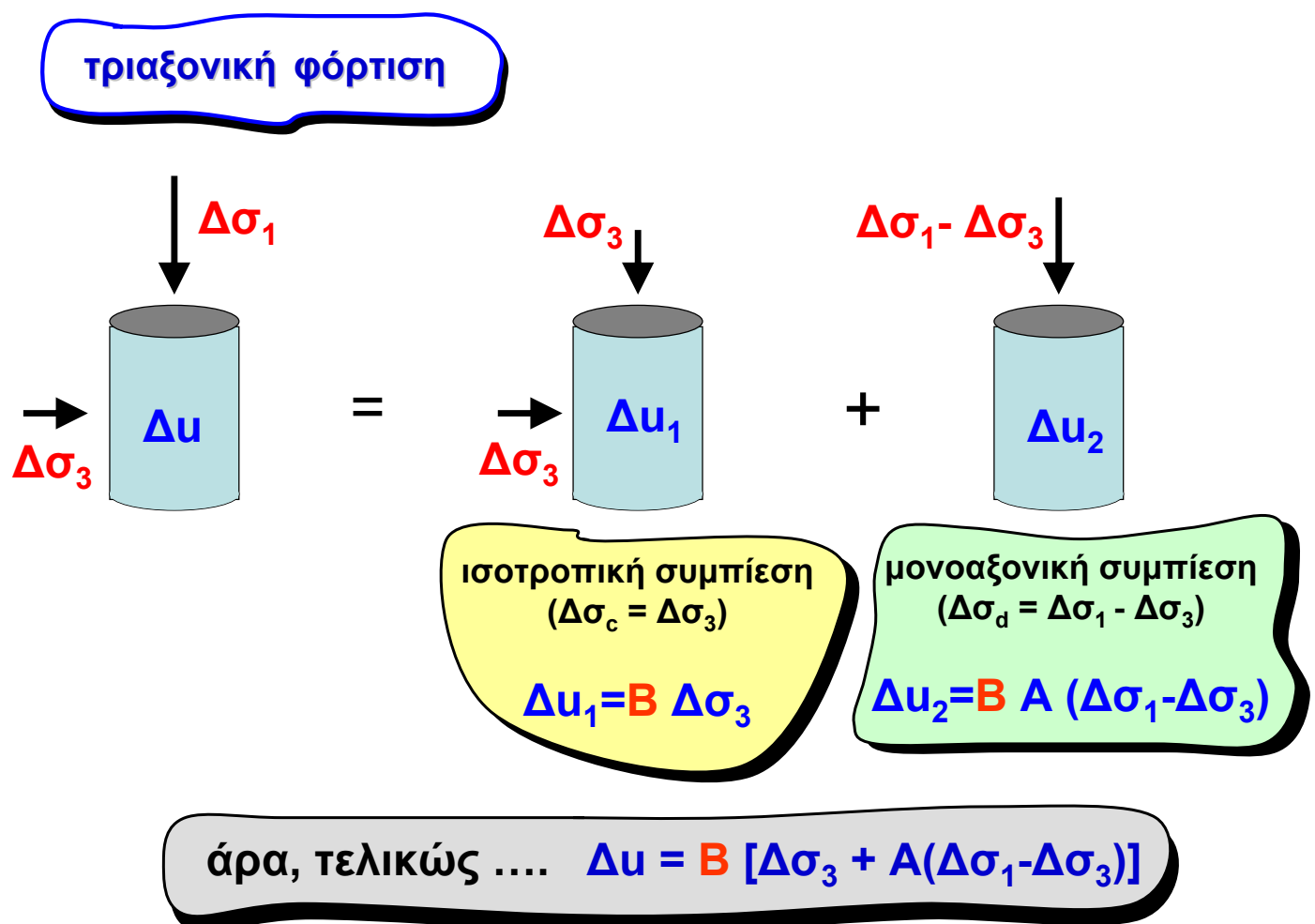


$$A_\alpha \approx 1.00 - 0.65[OCR - 1]^{0.40}$$



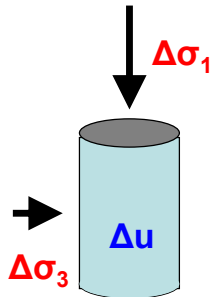
Δύο ερωτήματα σχετικά με τον δείκτη πίεσης πόρων A :

- Γιατί γίνεται αρνητικός όταν $OCR \gg 1.0$;
- Γιατί γίνεται ίσος με $1/3$ ανεξαρτήτως OCR , όταν $\varepsilon_d=0$;



$A = A(\varepsilon, OCR)$ & $B=1$ για πλήρως κορεσμένο έδαφος (ή αλλιώς $B=0$)

τριαξονική φόρτιση

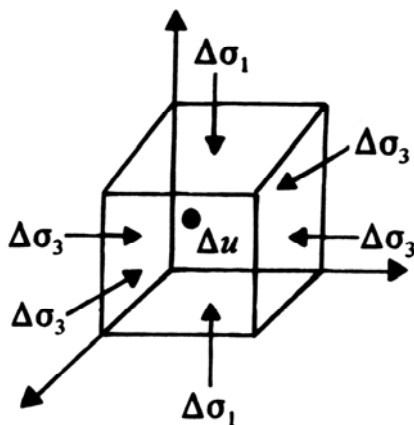


Initial Stress System	Stress Increment	Final Stress State	$\Delta\sigma_1$		$\Delta\sigma_3$	
			Magnitude	Direction	Magnitude	Direction
			4	V*	0	H*
			0	H	-2	V
			-1	H	-4	V

*V = Vertical; H = Horizontal.

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

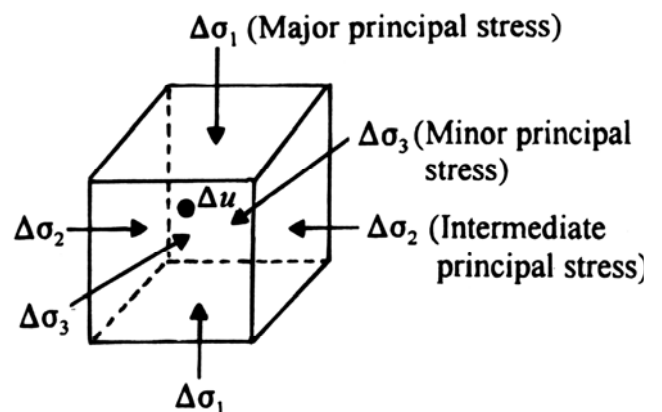
τριαξονική φόρτιση



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

Skempton (1954)

πολυ-αξονική φόρτιση



$$\Delta u = B [\Delta\sigma_{OCT} + 3a\Delta\tau_{OCT}]$$

Henkel (1960)

πολυ-αξονική φόρτιση

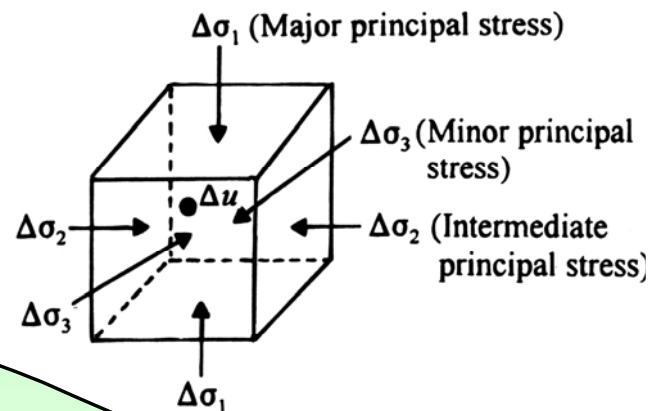
όπου:

$$\Delta\sigma_{OCT} = \frac{\Delta\sigma_1 + \Delta\sigma_2 + \Delta\sigma_3}{3}$$

και

$$\Delta\tau_{OCT} =$$

$$\frac{1}{3} \sqrt{(\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_2)^2 + (\Delta\sigma_2 - \Delta\sigma_3)^2 + (\Delta\sigma_3 - \Delta\sigma_1)^2}$$



$$\Delta u = B [\Delta\sigma_{OCT} + 3a\Delta\tau_{OCT}]$$

Henkel (1960)

πολυ-αξονική φόρτιση

όπου:

$$\Delta\sigma_{OCT} = \frac{\Delta\sigma_1 + \Delta\sigma_2 + \Delta\sigma_3}{3}$$

και

$$\Delta\tau_{OCT} =$$

$$\frac{1}{3} \sqrt{(\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_2)^2 + (\Delta\sigma_2 - \Delta\sigma_3)^2 + (\Delta\sigma_3 - \Delta\sigma_1)^2}$$

Για εξ-άσκηση, μπορείτε να αποδείξετε ότι:

$$A = \left(\frac{1}{3} + \alpha\sqrt{2} \right)$$

ή

$$\alpha = \frac{1}{\sqrt{2}} \left(A - \frac{1}{3} \right)$$

?

$$\Delta u = B [\Delta\sigma_{OCT} + 3a\Delta\tau_{OCT}]$$

Henkel (1960)

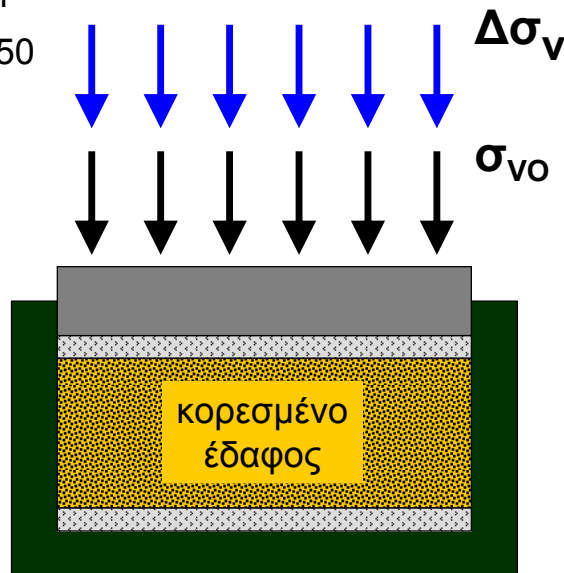
ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 1

Να υπολογισθούν οι ενεργές και οι ολικές τάσεις στο τέλος της ακόλουθης 1-Δ συμπίεσης:

στάδιο 1: στερεοποίηση υπό κατακόρυφη τάση $\sigma_{vo} = \sigma'_{vo} = 100 \text{ kPa}$

στάδιο 2: κατακόρυφη φόρτιση υπό αστράγγιστες συνθήκες, με $\Delta\sigma_v = 200 \text{ kPa}$

Το εδαφικό δοκίμιο είναι
κορεσμένο και έχει
συντελεστή $K_o = 0.50$



τα **μπλέ βέλη** δείχνουν
αστράγγιστη φόρτιση και
τα **μαύρα** στραγγιζόμενη

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 2

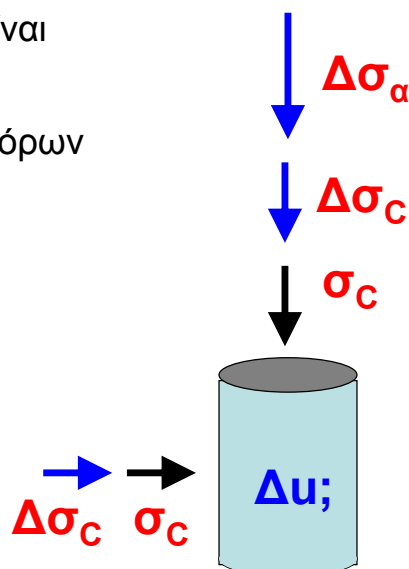
Να υπολογισθούν οι ενεργές και οι ολικές τάσεις στο τέλος της ακόλουθης τριαξονικής φόρτισης:

στάδιο 1: στερεοποίηση υπό ισοτροπική τάση $\sigma_c = \sigma'_c = 100 \text{ kPa}$

στάδιο 2: ισοτροπική φόρτιση υπό αστράγγιστες συνθήκες, με $\Delta\sigma_c = 100 \text{ kPa}$

στάδιο 3: αξονική συμπίεση υπό αστράγγιστες συνθήκες, με $\Delta\sigma_a = 200 \text{ kPa}$

Το εδαφικό δοκίμιο είναι
κορεσμένο και έχει
συντελεστή πίεσης πόρων
 $A = 0.50$

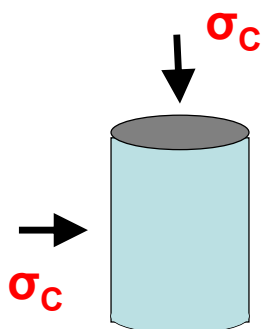


τα **μπλέ βέλη** δείχνουν
αστράγγιστη φόρτιση και
τα **μαύρα** στραγγιζόμενη

3. Η έννοια της «αστράγγιστης διατμητικής αντοχής» του εδάφους

Ας ξεκινήσουμε με ένα «θεωρητικό πείραμα» που θα μπορούσε να ήταν και άσκηση επάνω στον υπολογισμό των υδατικών υπερπίεσεων υπό αστράγγιστες συνθήκες φόρτισης. Εκτελώ βήμα–προς–βήμα μία δοκιμή τριαξονικής φόρτισης, και σε κάθε βήμα υπολογίζω τις πιέσεις πόρων και τις αντίστοιχες ενεργές τάσεις:

1ο ΒΗΜΑ: Ισοτροπική στερεοποίηση υπό πλήρως στραγγιζόμενες συνθήκες



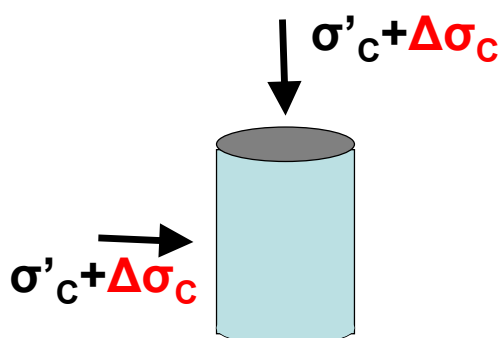
$$\sigma_1 = \sigma_3 = \sigma_c$$

$$\Delta u = 0$$

$$\sigma_c = \sigma'_c$$

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 = \sigma'_c$$

2ο ΒΗΜΑ: Ισοτροπική στερεοποίηση υπό αστράγγιστες συνθήκες (κλείνω τις στρόφιγγες της στράγγισης και δεν τις ξαναανοίγω μέχρι το τέλος του πειράματος).

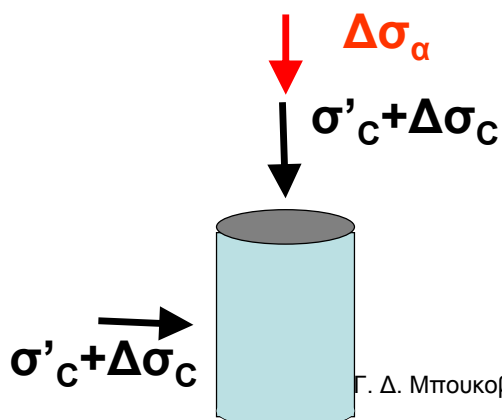


$$\sigma_1 = \sigma_3 = \sigma_c + \Delta \sigma_c$$

$$\Delta u = \Delta \sigma_c$$

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 = \sigma'_c \text{ (δεν αλλάζουν !)}$$

3ο ΒΗΜΑ: Αύξηση της κατακόρυφης τάσης υπό αστράγγιστες συνθήκες



$$\sigma_3 = \sigma_c + \Delta \sigma_c$$

$$\sigma_1 = \sigma_c + \Delta \sigma_c + \Delta \sigma_\alpha$$

$$\Delta u = \Delta \sigma_c + A \Delta \sigma_\alpha \quad (B=1.0)$$

$$\sigma'_3 = \sigma'_c - A \Delta \sigma_\alpha$$

$$\sigma'_1 = \sigma'_c + (1-A) \Delta \sigma_\alpha$$

4ο ΒΗΜΑ: Εάν η γωνία τριβής του εδάφους είναι φ ($C=0$), να υπολογισθεί η πρόσθετη ολική τάση που απαιτείται για να προκληθεί αστοχία.

$$(\sigma'_1 - \sigma'_3) / (\sigma'_1 + \sigma'_3) = \sin \varphi \rightarrow$$

$$\frac{\Delta \sigma_\alpha}{2\sigma'_c} = \frac{\sin \varphi}{1 - (1 - 2A_a) \sin \varphi}$$

όπου A_a είναι ο συντελεστής πίεσης πόρων κατά την αστοχία. Προσεγγιστικά είναι:

$$\rightarrow A_a = 1.00 - 0.50 \cdot OCR^{0.40}$$

5ο ΒΗΜΑ: Να εφαρμοσθούν οι ανωτέρω σχέσεις για $\sigma'_c = 150$ kPa, $\varphi = 30^\circ$, $OCR = 1$ και δύο τιμές της πρόσθετης ολικής τάσης στερεοποίησης $\Delta \sigma_c = 0$ και 50 kPa. Να σχεδιασθούν οι κύκλοι Mohr των ολικών και των ενεργών τάσεων κατά την αστοχία και να ορισθούν οι αντίστοιχες περιβάλλουσες αστοχίας.

Τι παρατηρείτε;;

Δοκιμή Α ($\Delta \sigma_c = 0$ kPa)

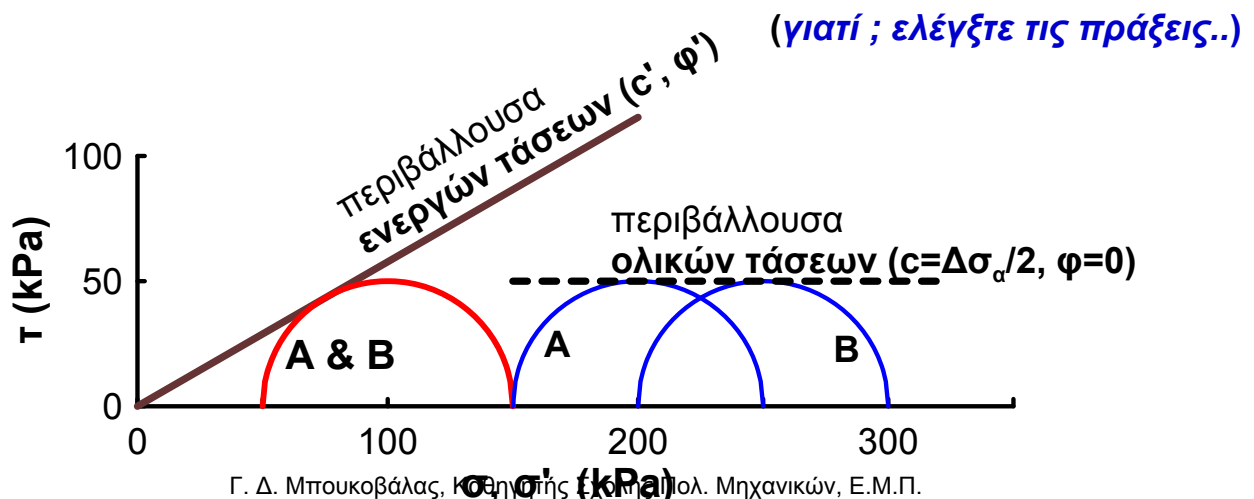
$\sigma'_c = 150$ kPa
 $\Delta \sigma_c = 0$ kPa
 $A_a = 1.0$

$\Delta \sigma_\alpha = 100$ kPa
 $\sigma'_3 = 50$ kPa
 $\sigma'_1 = 150$ kPa
 $\Delta u = 100$ kPa
 $\sigma_3 = 150$ kPa
 $\sigma_1 = 250$ kPa

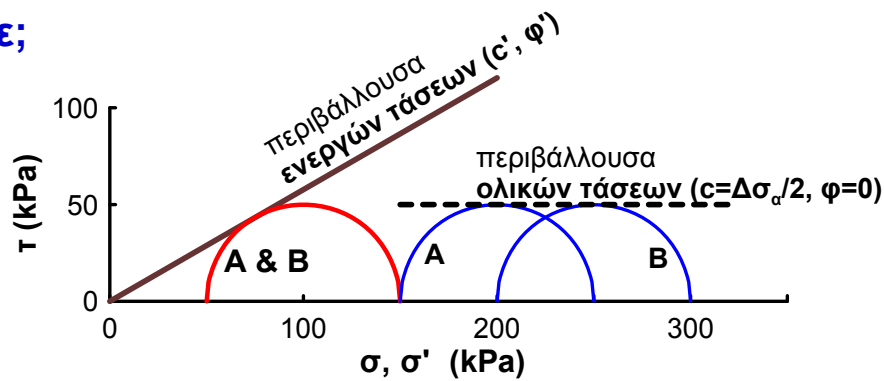
Δοκιμή Β ($\Delta \sigma_c = 50$ kPa)

$\sigma'_c = 150$ kPa
 $\Delta \sigma_c = 50$ kPa
 $A_a = 1.0$

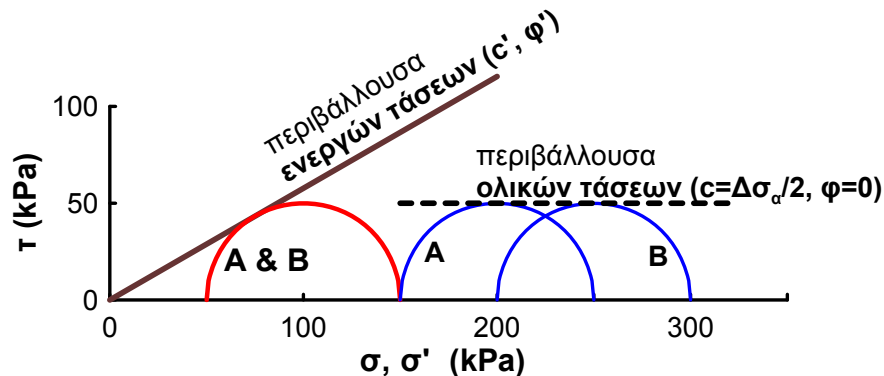
$\Delta \sigma_\alpha = 100$ kPa
 $\sigma'_3 = 50$ kPa
 $\sigma'_1 = 150$ kPa
 $\Delta u = 150$ kPa
 $\sigma_3 = 200$ kPa
 $\sigma_1 = 300$ kPa



Τι παρατηρείτε;



- Οι κύκλοι Mohr των ολικών τάσεων διαφέρουν αλλά οι αντίστοιχοι κύκλοι των ενεργών τάσεων ταυτίζονται.
- Η περιβάλλουσα αστοχίας των ενεργών τάσεων είναι η γνωστή μας (Mohr – Coulomb)
- Η περιβάλλουσα αστοχίας των ολικών τάσεων είναι οριζόντια, σαν να είχαμε δηλαδή **$c=\Delta\sigma_v/2$ και $\phi=0$** !
- Εάν γνωρίζουμε την «**αστράγγιστη διατμητική αντοχή**» **$C=C_u=\Delta\sigma_v/2$** (π.χ. από την δοκιμή A) μπορούμε να ορίσουμε τις συνθήκες με βάση τις ολικές τάσεις, χωρίς να έχουμε υπολογίσει πρώτα τις υπερ-πιέσεις πόρων (πράγμα καθόλου εύκολο στην πράξη). Η ευκολία αυτή έκανε την έννοια της **αστράγγιστης διατμητικής αντοχής** ιδιαίτερα δημοφιλή στην πράξη....

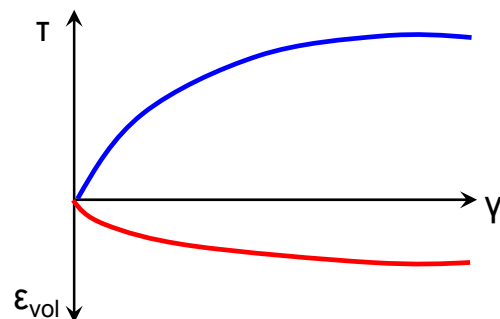
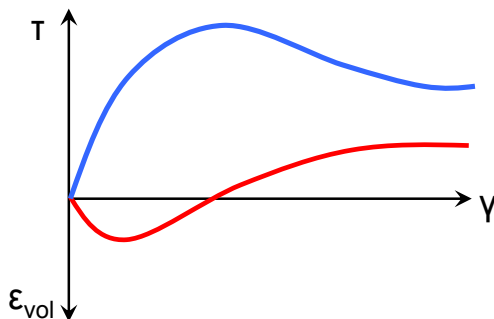


Προσοχή όμως !!!! Η περιβάλλουσα αστοχίας των ολικών τάσεων, και η «**αστράγγιστη διατμητική αντοχή**» **$C=C_u=\Delta\sigma_v/2$** ,

- Εξαρτώνται από την ενεργό τάση στερεοποίησης σ'_c και τον λόγο προφόρτισης OCR, **ΔΕΝ ΑΠΟΤΕΛΟΥΝ ΔΗΛΑΔΗ ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ** (όπως τα c' και ϕ').
- Θα πρέπει να χρησιμοποιούνται αποκλειστικά και μόνον με **ΟΛΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ**, όχι με ενεργές.

Εάν τα καταλάβατε αυτά, τότε προσπαθήστε τις παρακάτω ερωτήσεις....

1. Για μία απροφόρτιστη άργιλο ($OCR=1.0$) υπό τριαξονική φόρτιση (ή υπό απλή διάτμηση), η αστοχία επέρχεται ταχύτερα υπό στραγγιζόμενες ή υπό αστράγγιστες συνθήκες;
2. Ισχύει το ίδιο και για μια έντονα προφορτισμένη άργιλο (π.χ. $OCR=10$);
3. Θεμέλιο επί κορεσμένης αργίλου: πότε θα πρέπει να ανησυχήσω για αστοχία, αμέσως μετά την φόρτιση ή πολύ χρόνο μετά, όταν θα έχουν εκτονωθεί οι υπερπιέσεις πόρων.
4. Δοκιμή απλής διάτμησης υπό στραγγιζόμενες συνθήκες έδωσε τα παρακάτω διαγράμματα $\tau-\gamma$, και $\varepsilon_{vol}-\gamma$. Να γίνουν με ποιοτική προσέγγιση τα αντίστοιχα διαγράμματα $\tau-\gamma$, και $\Delta u-\gamma$ για αστράγγιστες συνθήκες φόρτισης.



Βασικά σημεία κεφαλαίου . . .

- ✚ Τι σημαίνει «αστράγγιστες συνθήκες φόρτισης», παραδείγματα από τεχνικά έργα, εργαστηριακή προσομοίωση.
- ✚ Ανάπτυξη υπερ-πίεσης πόρων σε 1-Δ συμπίεση και σε ισοτροπική συμπίεση.
- ✚ Ανάπτυξη υπερ-πίεσης πόρων σε 3-αξονική φόρτιση.
- ✚ Πως ορίζονται οι μεταβολές των κυρίων τάσεων $\Delta\sigma_1$ & $\Delta\sigma_3$.
- ✚ Έλεγχος ενεργών τάσεων αστοχίας υπό αστράγγιστες συνθήκες.
- ✚ Έλεγχος ολικών τάσεων αστοχίας υπό αστράγγιστες συνθήκες.
- ✚ Η έννοια της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής του εδάφους.
- ✚ Βραχυχρόνια και μακροχρόνια αστοχία υπό αστράγγιστες συνθήκες, ποια είναι δυσμενέστερη και γιατί.