



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ – ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ

ΔΙΑΛΕΞΕΙΣ ΤΟΥ ΜΑΘΗΜΑΤΟΣ

« ΕΔΑΦΟΜΗΧΑΝΙΚΗ Ι - Τμήμα 2 (Μ-Ω) »

4^ο ΕΞ. ΠΟΛ-ΜΗΧ. ΕΜΠ - Ακαδ. Έτος 2020 - 21

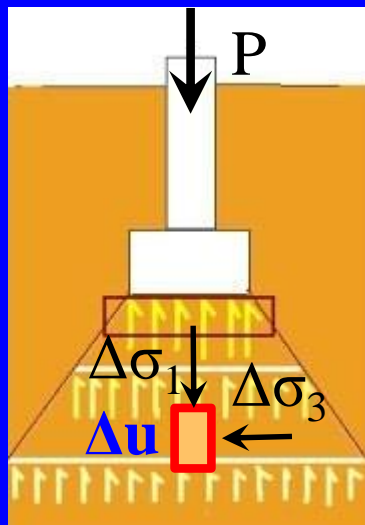
ΔΙΑΛΕΞΗ 9 – Μέρος 5

ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ
& ΦΟΡΤΙΣΗ ΥΠΟ ΑΣΤΡΑΓΓΙΣΤΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

ΑΣΤΡΑΓΓΙΣΤΗ ΦΟΡΤΙΣΗ ΤΩΝ ΕΔΑΦΩΝ



Φόρτιση του εδάφους με θεμέλιο

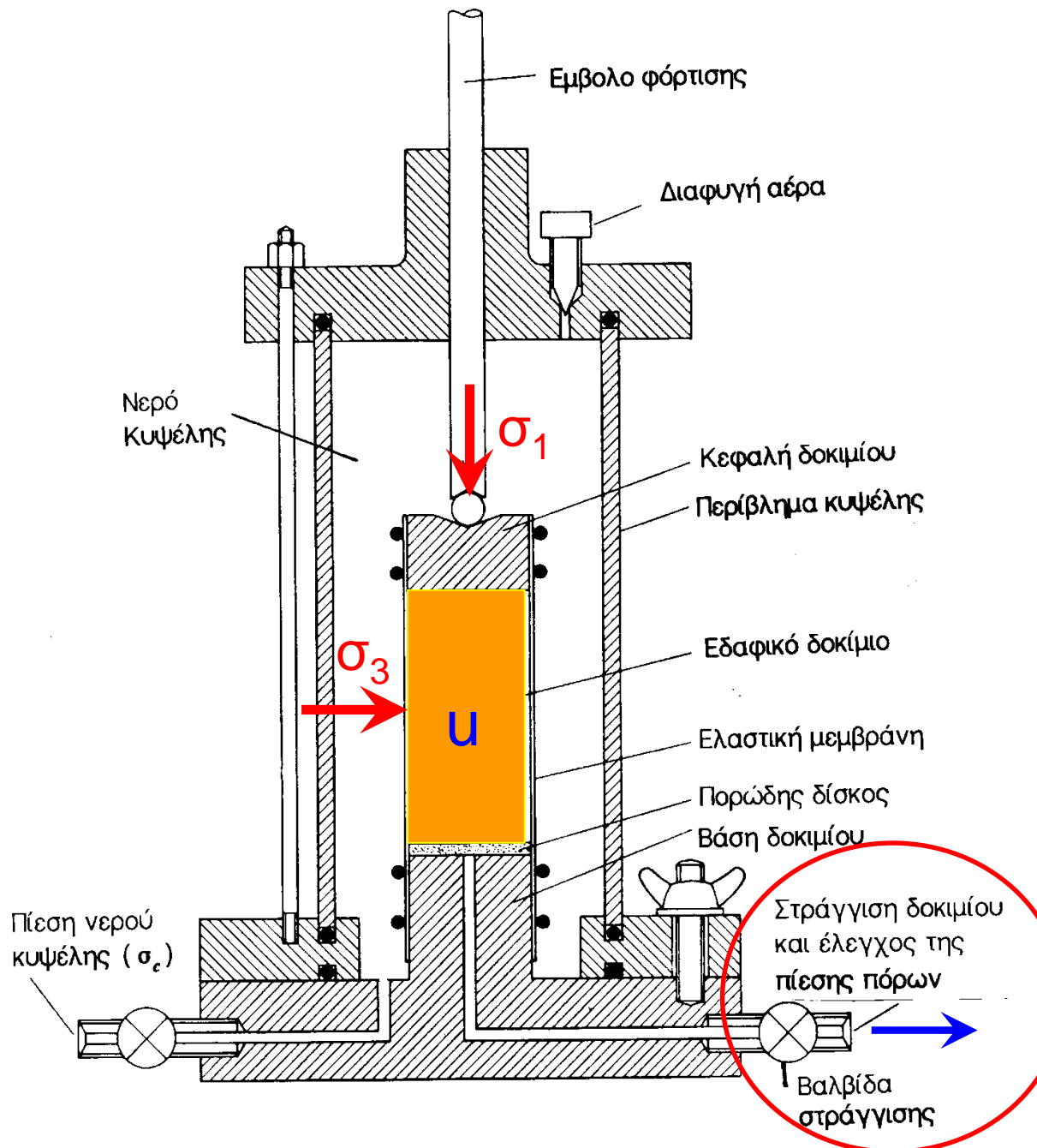


$\Delta\sigma_1, \Delta\sigma_3$ = πρόσθετες ολικές τάσεις στο έδαφος λόγω του P (προστίθενται στις γεωστατικές)

Οι πρόσθετες ολικές τάσεις ($\Delta\sigma$) προκαλούν πρόσθετη πίεση πόρων (Δu) και πρόσθετες ενεργές τάσεις ($\Delta\sigma' = \Delta\sigma - \Delta u$), με αποτέλεσμα την παραμόρφωση του εδάφους ($\Delta\sigma' \rightarrow \Delta\varepsilon$)

- Κατά την φόρτιση των αργιλικών εδαφών, το έδαφος τείνει να συμπιεσθεί (καθίζηση), συνήθως με μείωση του όγκου του (διόγκωση σε πολύ σφιχτά/πυκνά εδάφη).
- Η συμπίεση απαιτεί εξώθηση (απώλεια) ίσου όγκου νερού των πόρων (στράγγιση).
- Η στράγγιση του νερού των πόρων απαιτεί χρόνο (επειδή οι πόροι της αργίλου είναι μικρού μεγέθους). Ο απαιτούμενος χρόνος (T) συχνά είναι πολλά έτη ή δεκάδες ετών.
- Ο χρόνος φόρτισης του εδάφους (t) λόγω κατασκευής του έργου, συνήθως είναι πολύ μικρότερος του T, οπότε δεν προλαβαίνει να γίνει στράγγιση του εδάφους κατά την κατασκευή του έργου. Συνεπώς, κατά την κατασκευή του έργου, το έδαφος συνήθως παραμορφώνεται χωρίς την απαιτούμενη μείωση όγκου (υπό σταθερό όγκο $\rightarrow \Delta u$).
- Η φόρτιση του εδάφους υπό σταθερό όγκο ονομάζεται «αστράγγιστη φόρτιση»

Αστράγγιστη φόρτιση κατά την τριαξονική δοκιμή



Ενεργές τάσεις:

$$\sigma'_1 = \sigma_1 - u$$

$$\sigma'_3 = \sigma_3 - u$$

Βαλβίδα στράγγισης:

Ανοικτή – στραγγισμένη:

$$u = u_0 = \text{σταθ.}$$

Όγκος δοκιμίου μεταβλητός ($\Delta V \neq 0$)

Κλειστή – αστράγγιστη:

$$u = \text{μεταβλ.}$$

$$u = u_0 + \Delta u \quad (\Delta u \neq 0)$$

όγκος δοκιμίου = σταθ

$$\Delta V = 0$$

Κατά τη φόρτιση, εάν ο όγκος τείνει να μειωθεί $\rightarrow \Delta u > 0$ (αντίσταση στη μείωση του όγκου), ενώ εάν ο όγκος τείνει να αυξηθεί $\rightarrow \Delta u < 0$

Αστράγγιστη φόρτιση των εδαφών

Φόρτιση του εδάφους με θεμέλιο

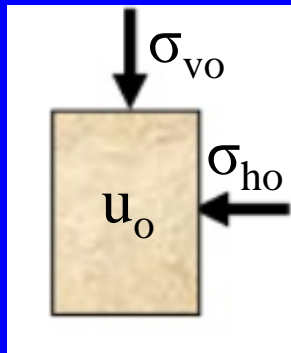
$\Delta\sigma_1, \Delta\sigma_3$ = πρόσθετες τάσεις στο έδαφος λόγω του φορτίου P

Πρόσθετες ενεργές τάσεις (Δu = υπερπίεση πόρων):

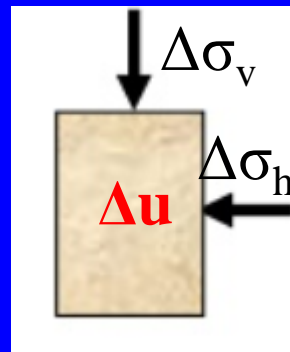
$$\Delta\sigma'_1 = \Delta\sigma_1 - \Delta u \quad , \quad \Delta\sigma'_3 = \Delta\sigma_3 - \Delta u$$

Στραγγισμένη (αργή) φόρτιση: $\Delta u = 0$, Αστράγγιστη (ταχεία): $\Delta u = \max$

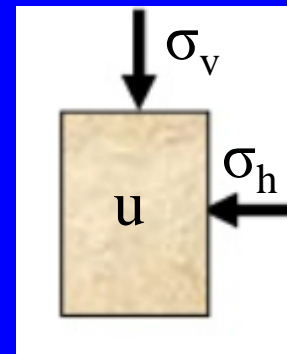
Η ανάγκη διατήρησης σταθερού όγκου του εδάφους, απαιτεί την ανάπτυξη κατάλληλης υπερπίεσης πόρων (Δu), ώστε οι πρόσθετες ενεργές τάσεις ($\Delta\sigma' = \Delta\sigma - \Delta u$) να «προσαρμοστούν» σε τιμές συμβατές με την διατήρηση σταθερού όγκου ($\epsilon_{vol} = 0$)



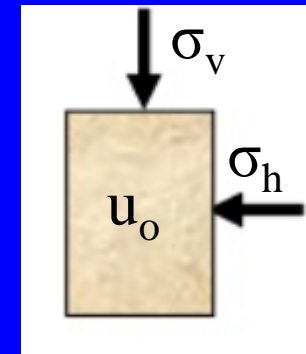
+



=



→



Αρχική κατάσταση
(γεωστατική)

Πρόσθετη φόρτιση
λόγω του πεδίου

Τελική κατάσταση
(αμέσως μετά την
φόρτιση)

Τελική κατάσταση
(μετά την στραγγισή)
 $u \rightarrow u_0 = u - \Delta u$

$$\sigma_v = \sigma_{v0} + \Delta\sigma_v$$

$$\sigma_h = \sigma_{h0} + \Delta\sigma_h$$

$$u = u_0 + \Delta u$$

Αστράγγιστη φόρτιση με παραδοχή Γραμμικής Ισοτροπής Ελαστικότητας

$$\Delta \varepsilon_{xx} = \frac{1}{E} \left[\Delta \sigma'_{xx} - \nu (\Delta \sigma'_{yy} + \Delta \sigma'_{zz}) \right]$$

$$\Delta \varepsilon_{yy} = \frac{1}{E} \left[\Delta \sigma'_{yy} - \nu (\Delta \sigma'_{xx} + \Delta \sigma'_{zz}) \right]$$

$$\Delta \varepsilon_{zz} = \frac{1}{E} \left[\Delta \sigma'_{zz} - \nu (\Delta \sigma'_{xx} + \Delta \sigma'_{yy}) \right]$$

$$\Delta \gamma_{xy} = \frac{1}{G} \Delta \tau_{xy}$$

$$\Delta \gamma_{yz} = \frac{1}{G} \Delta \tau_{yz}$$

$$\Delta \gamma_{xz} = \frac{1}{G} \Delta \tau_{xz}$$

Ογκομετρική παραμόρφωση : $\Delta \varepsilon_{vol} \equiv \Delta \varepsilon_{xx} + \Delta \varepsilon_{yy} + \Delta \varepsilon_{zz}$

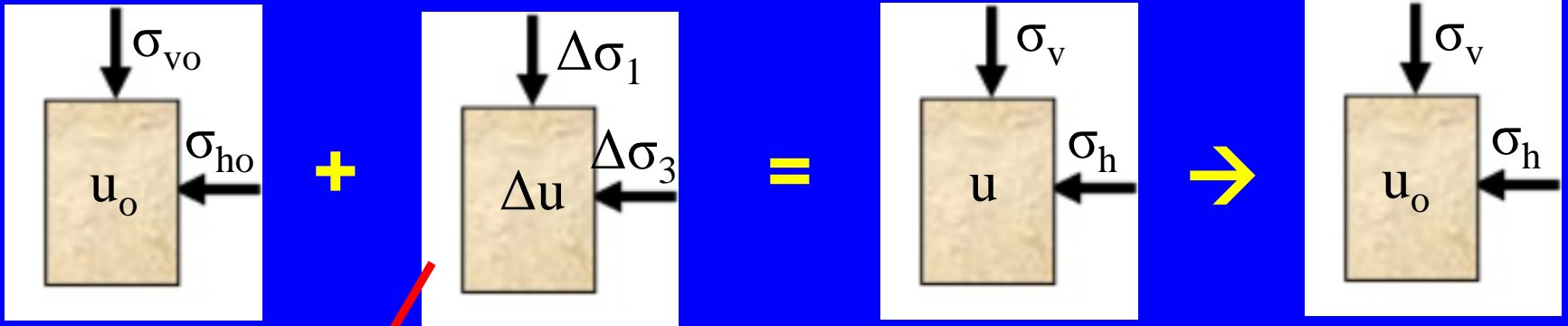
Με άθροιση των ορθών παραμορφώσεων προκύπτει :

$$\Delta \varepsilon_{vol} = \frac{1}{3K} (\Delta \sigma'_{xx} + \Delta \sigma'_{yy} + \Delta \sigma'_{zz}) = \frac{1}{3K} (\Delta \sigma_{xx} + \Delta \sigma_{yy} + \Delta \sigma_{zz}) - \frac{1}{K} (\Delta u)$$

Κατά την αστράγγιστη φόρτιση εδαφών ($\Delta \varepsilon_{vol} = 0$) με παραδοχή ΓΙΕ, η υπερπίεση πόρων είναι :

$$\Delta u = \frac{1}{3} (\Delta \sigma_{xx} + \Delta \sigma_{yy} + \Delta \sigma_{zz}) = \frac{1}{3} (\Delta \sigma_1 + \Delta \sigma_2 + \Delta \sigma_3)$$

Αστράγγιστη φόρτιση των εδαφών



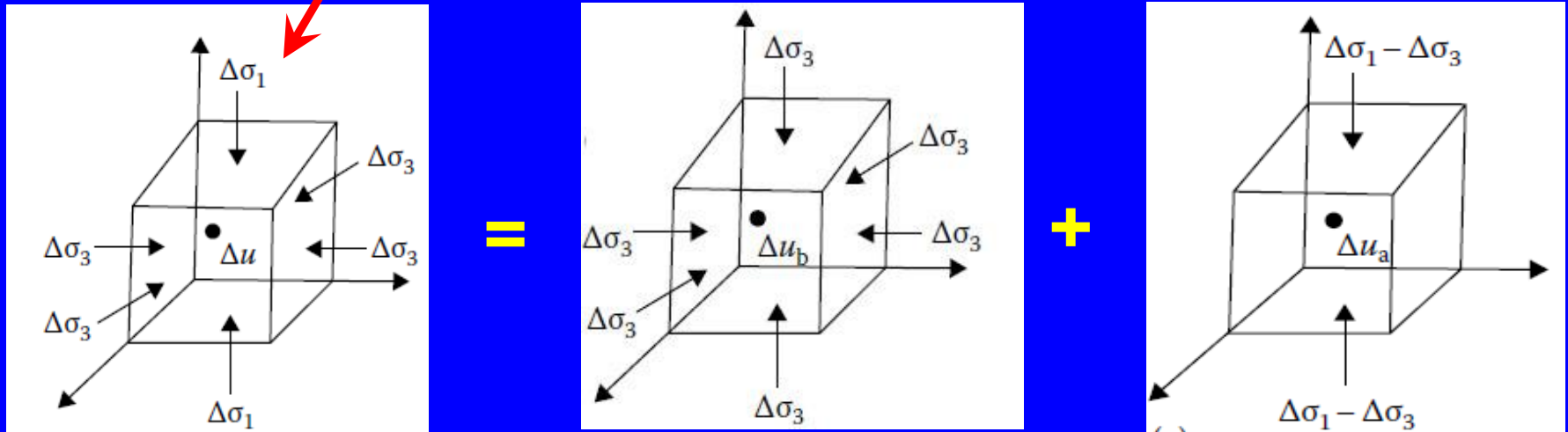
Αρχική κατάσταση
(γεωστατική)

Πρόσθετη φόρτιση
λόγω του πεδίου

Τελική κατάσταση
(αμέσως μετά την
φόρτιση)

Τελική κατάσταση
(μετά την
στράγγιση $u \rightarrow u_o$)

Υπολογισμός της υπερπίεσης πόρων (Δu) χωρίς παραδοχή ΓΙΕ:



$$\Delta u = \Delta u_i = \Delta \sigma_3 + \Delta u_a = A(\Delta \sigma_1 - \Delta \sigma_3)$$

Σημείωση: $\Delta u_i = \Delta \sigma_3$ επειδή $\Delta \sigma'_3 = 0$ (ισότροπη συμπίεση χωρίς μεταβολή όγκου)

Άρα: $\Delta u = \Delta \sigma_3 + A(\Delta \sigma_1 - \Delta \sigma_3)$, $A = \text{παράμετρος Skempton}$

Αστράγγιστη φόρτιση των εδαφών

Σχέση του Skempton για τριαξονική φόρτιση ($\Delta\sigma_2 = \Delta\sigma_3$):

$$\Delta u = \Delta\sigma_3 + A (\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3) \quad , \quad A = \text{παράμετρος}$$

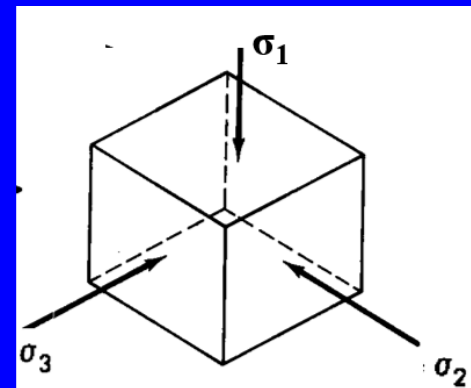
Για ΓΙΕ:

$$\Delta u = (1/3) (\Delta\sigma_1 + \Delta\sigma_2 + \Delta\sigma_3) = (1/3) (\Delta\sigma_1 + 2 \Delta\sigma_3) = \Delta\sigma_3 + (1/3) (\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3)$$

που σε συνδυασμό με την: $\Delta u = \Delta\sigma_3 + A (\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3)$: δίνει $A = 1/3$

Τιμές του A για διάφορα εδάφη:

Type of Clay	A
Clays of high sensitivity	$+\frac{3}{4}$ to $+1\frac{1}{2}$
Normally consolidated clays	$+\frac{1}{2}$ to $+1$
Compacted sandy clays	$+\frac{1}{4}$ to $+\frac{3}{4}$
Lightly over-consolidated clays	0 to $+\frac{1}{2}$
Compacted clay-gravels	$-\frac{1}{4}$ to $+\frac{1}{4}$
Heavily over-consolidated clays	$-\frac{1}{2}$ to 0



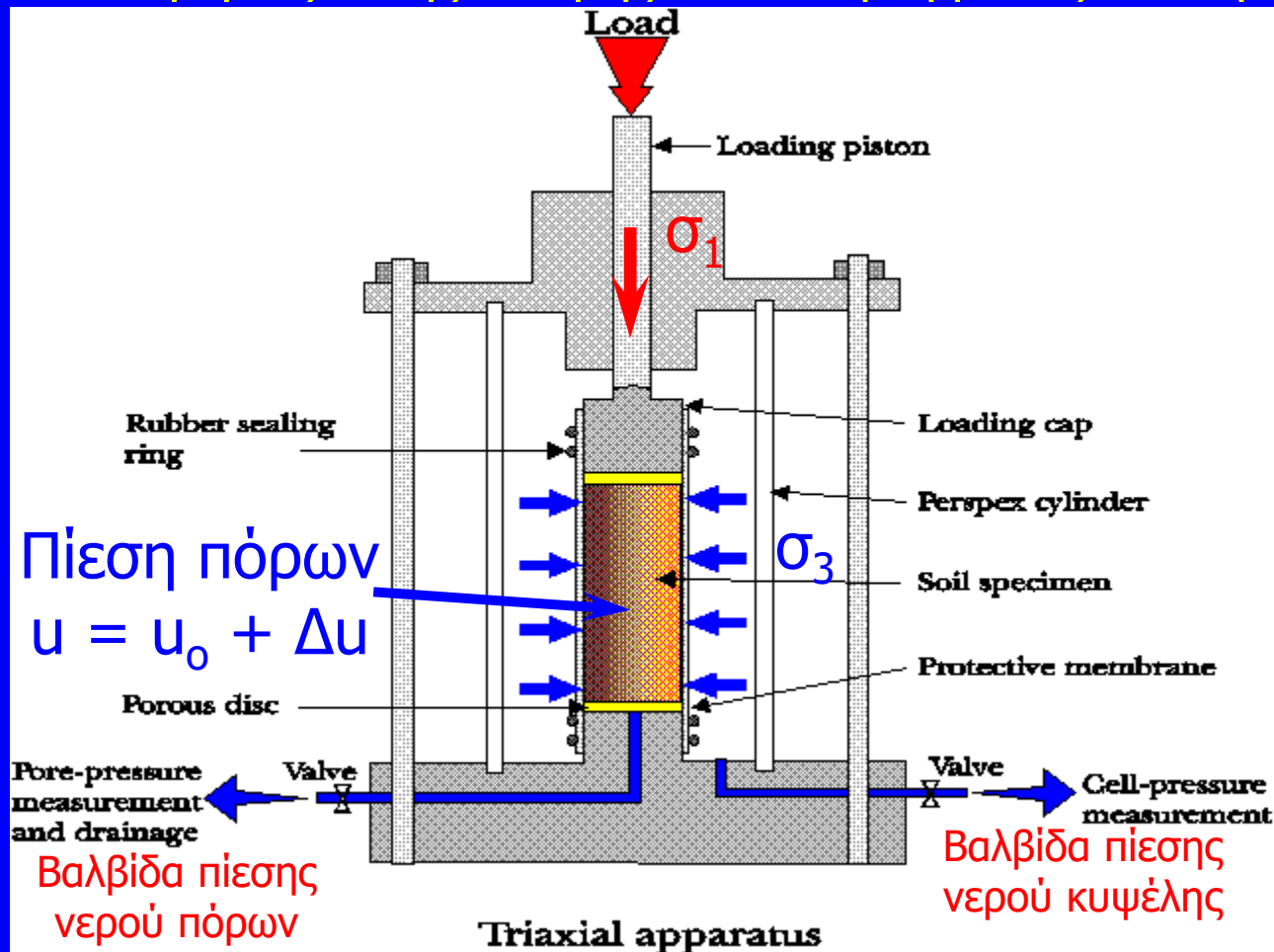
Γενίκευση σε οποιαδήποτε φόρτιση υπό αστράγγιστες συνθήκες ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$):

$$\Delta u = \frac{1}{3} (\Delta\sigma_1 + \Delta\sigma_2 + \Delta\sigma_3) + \left(A - \frac{1}{3} \right) \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_2)^2 + (\Delta\sigma_2 - \Delta\sigma_3)^2 + (\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3)^2}$$

η οποία μεταπίπτει στην: $\Delta u = \Delta\sigma_3 + A (\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3)$ όταν $\Delta\sigma_2 = \Delta\sigma_3$

Αστράγγιστη φόρτιση των εδαφών

Εκτέλεση τριαξονικής δοκιμής υπό αστράγγιστες συνθήκες

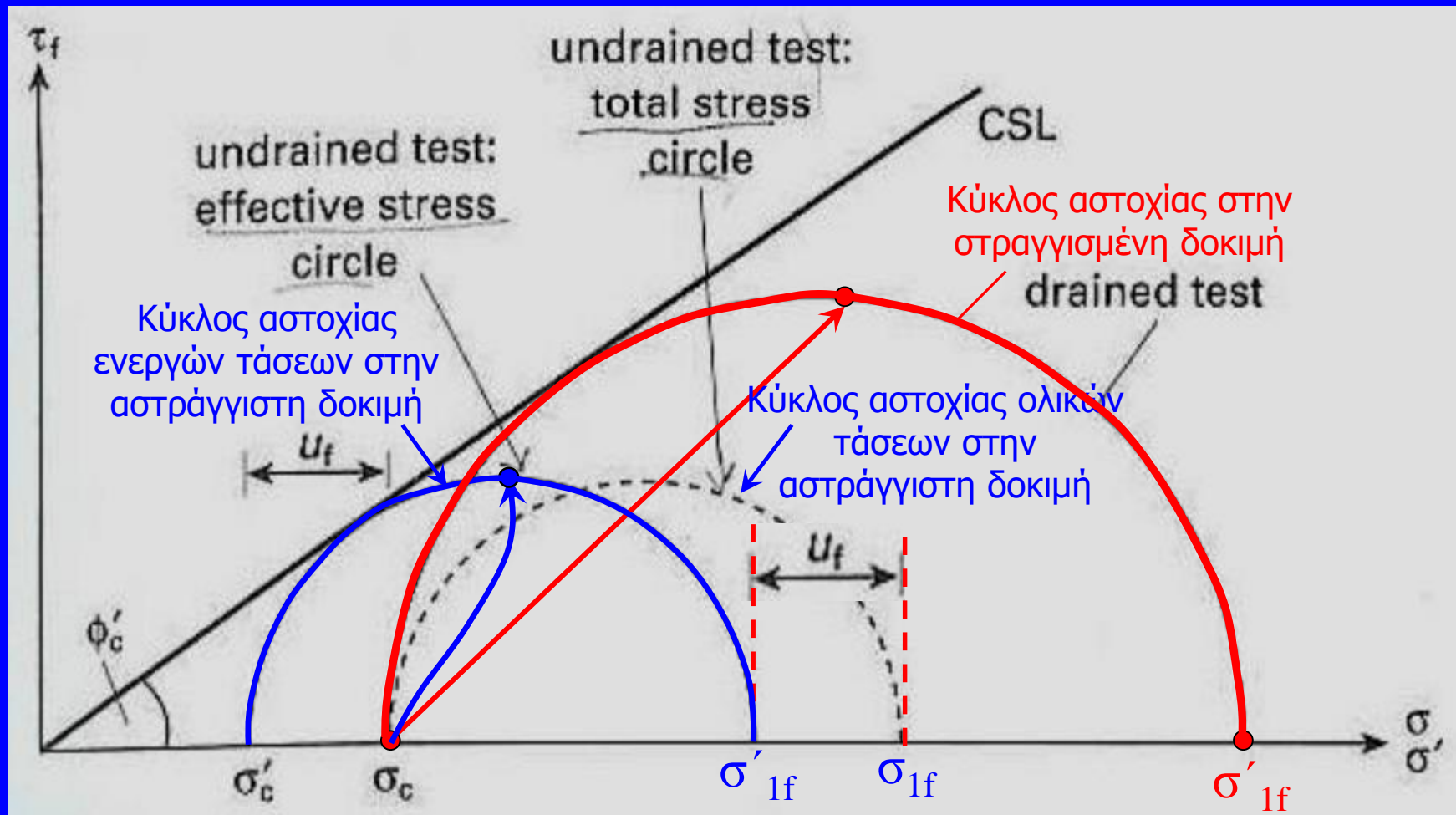


Αρχικές τάσεις: $\sigma_{10} = \sigma'_{10}$ και $\sigma_{30} = \sigma'_{30}$. Συνήθως: $\sigma'_{10} = \sigma'_{30}$

Κατά την δοκιμή, η οριζόντια ολική τάση (σ_{30}) παραμένει σταθερή ($\Delta\sigma_3 = 0$) και αυξάνει η κατακόρυφη ολική τάση ($\sigma_1 = \sigma_{10} + \Delta\sigma_1$), με κλειστή την βαλβίδα πίεσης νερού πόρων (δηλαδή χωρίς στράγγιση, οπότε το Δu μεταβάλλεται).

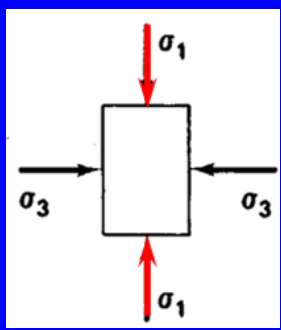
Αστράγγιστη φόρτιση των εδαφών

Εκτέλεση τριαξονικής δοκιμής υπό αστράγγιστες συνθήκες



Με αφετηρία την ίδια πίεση κυψέλης ($\sigma_1 = \sigma_3 = \sigma_c$) γίνονται δύο δοκιμές:
 Στραγγισμένη: $\sigma_3 = \sigma'_3 = \sigma_c = \text{σταθ.}$ και $\sigma_1 = \sigma'_1 = \sigma_c$ που αυξάνει σε σ'_{1f}
 Αστράγγιστη: Από $\sigma_1 = \sigma_3 = \sigma_c$ και $u = 0$ σε $\sigma'_3 = \sigma_c - u_f$ και $\sigma'_1 = \sigma_{1f} - u_f$

Αστράγγιστη φόρτιση των εδαφών



Αρχικές τάσεις: $\sigma_{10} = \sigma'_{10}$ και $\sigma_{30} = \sigma'_{30}$. Συνήθως: $\sigma'_{10} = \sigma'_{30} = \sigma_c$
 Κατά τη δοκιμή, η οριζόντια ολική τάση (σ_{30}) παραμένει σταθερή ($\Delta\sigma_3 = 0$) και αυξάνει η κατακόρυφη ολική τάση ($\sigma_1 = \sigma_{10} + \Delta\sigma_1$), με κλειστή την βαλβίδα πίεσης νερού πόρων (δηλαδή χωρίς στράγγιση, οπότε το Δu μεταβάλλεται).

$$\begin{aligned} \text{Αρα: } \sigma'_{1f} &= \sigma_{1f} - u_f = (\sigma_{10} + \Delta\sigma_{1f}) - (u_0 + \Delta u_f) = \\ &= (\sigma_{10} - u_0) + (\Delta\sigma_{1f} - \Delta u_f) = \sigma'_{10} + (\Delta\sigma_{1f} - \Delta u_f) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sigma'_{3f} &= \sigma_{3f} - u_f = (\sigma_{30} + \cancel{\Delta\sigma_{3f}}) - (u_0 + \Delta u_f) = \\ &= (\sigma_{30} - u_0) - \Delta u_f = \sigma'_{30} - \Delta u_f \end{aligned}$$

$$\Delta u_f = \Delta\sigma_{3f} + A (\Delta\sigma_{1f} - \Delta\sigma_{3f}) \rightarrow \Delta u_f = A \Delta\sigma_{1f}$$

Κριτήριο αστοχίας
Mohr-Coulomb:

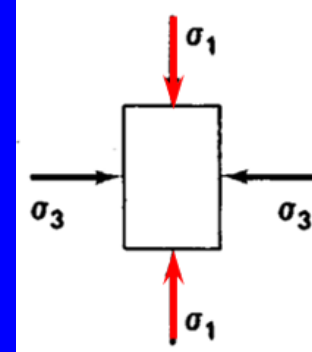
$$\sigma'_{1f} = \sigma'_{3f} \tan^2 \left(45 + \frac{\phi}{2} \right) + 2c \tan \left(45 + \frac{\phi}{2} \right) \rightarrow$$

$$\Delta\sigma_{1f} = \left[\sigma'_{30} \tan^2 \left(45 + \frac{\phi}{2} \right) - \sigma'_{10} \right] + \Delta u_f \left[1 - \tan^2 \left(45 + \frac{\phi}{2} \right) \right] + 2c \tan \left(45 + \frac{\phi}{2} \right) \rightarrow$$

$$\left[1 - A \left(1 - \tan^2 \left(45 + \frac{\phi}{2} \right) \right) \right] \Delta\sigma_{1f} = \left[\sigma'_{30} \tan^2 \left(45 + \frac{\phi}{2} \right) - \sigma'_{10} \right] + 2c \tan \left(45 + \frac{\phi}{2} \right)$$

Σύγκριση αντοχής σε τριαξονική δοκιμή υπό στραγγισμένες και αστραγγιστες συνθήκες

$$\text{Αρχικές τάσεις: } \sigma_{10} = \sigma'_{10} \text{ και } \sigma_{30} = \sigma'_{30}$$



(1) Στραγγισμένη δοκιμή ($\Delta u=0$) :

Κατά την δοκιμή, η οριζόντια τάση ($\sigma_{30} = \sigma'_{30}$) παραμένει σταθερή ($\Delta\sigma_3 = 0$) και αυξάνει η κατακόρυφη τάση ($\sigma_1 = \sigma'_1$) με ανοικτή την βαλβίδα του νερού πίεσης πόρων (δηλαδή με $\Delta u=0$)

$$\text{Κατά την αστοχία: } \sigma'_{1f} = \sigma'_{3f} \tan^2 \left(45 + \frac{\phi}{2} \right) + 2c \tan \left(45 + \frac{\phi}{2} \right) \Rightarrow$$

$$\sigma'_{1f} = \sigma'_{30} \tan^2 \left(45 + \frac{\phi}{2} \right) + 2c \tan \left(45 + \frac{\phi}{2} \right)$$
$$\sigma'_{3f} = \sigma'_{30}$$

$$\sigma'_{1f} - \sigma'_{3f} = \sigma'_{30} \left[\tan^2 \left(45 + \frac{\phi}{2} \right) - 1 \right] + 2c \tan \left(45 + \frac{\phi}{2} \right)$$

Δηλαδή, ο κύκλος Mohr κατά την αστοχία εξαρτάται από: σ'_{30} και (c, ϕ)

(2) Αστράγγιστη δοκιμή ($\Delta u \neq 0$) :

Κατά την δοκιμή, η οριζόντια ολική τάση (σ_{30}) παραμένει σταθερή ($\Delta\sigma_3 = 0$) και αυξάνει η κατακόρυφη ολική τάση (σ_1) με κλειστή την βαλβίδα πίεσης νερού πόρων. Κατά την αστοχία, η κατακόρυφη ενεργός τάση ($\sigma'_{1f} = \sigma'_{10} + \Delta\sigma_1 - \Delta u$) και η οριζόντια ενεργός τάση ($\sigma'_{3f} = \sigma'_{30} - A \Delta\sigma_{1f}$) είναι:

$$\sigma'_{1f} = \sigma'_{10} + \frac{\left(\frac{1}{A} - 1\right)}{\left[\frac{1}{A} - 1 + \tan^2\left(45 + \frac{\phi}{2}\right)\right]} \left[\sigma'_{30} \tan^2\left(45 + \frac{\phi}{2}\right) - \sigma'_{10} + 2c \tan\left(45 + \frac{\phi}{2}\right) \right]$$

$$\sigma'_{3f} = \sigma'_{30} - \frac{\left[\sigma'_{30} \tan^2\left(45 + \frac{\phi}{2}\right) - \sigma'_{10} \right] + 2c \tan\left(45 + \frac{\phi}{2}\right)}{\left[\frac{1}{A} - 1 + \tan^2\left(45 + \frac{\phi}{2}\right)\right]}$$

$$\sigma'_{1f} - \sigma'_{3f} = (\sigma'_{10} - \sigma'_{30}) + \frac{\sigma'_{30} \tan^2\left(45 + \frac{\phi}{2}\right) - \sigma'_{10} + 2c \tan\left(45 + \frac{\phi}{2}\right)}{1 - A \left(1 - \tan^2\left(45 + \frac{\phi}{2}\right)\right)}$$

Δηλαδή, ο κύκλος Mohr κατά την αστοχία εξαρτάται από: $(\sigma'_{10}, \sigma'_{30})$, (c, ϕ) , A

Αστράγγιστη φόρτιση των εδαφών – Παράδειγμα εφαρμογής

Σύγκριση αντοχής σε τριαξονική δοκιμή υπό στραγγισμένες και αστράγγιστες συνθήκες:

Αρχική κατάσταση: $\sigma'_{10} = \sigma'_{30} = 100 \text{ kPa}$, $\phi=30^\circ$, $c=10 \text{ kPa}$, $A=0.75$

(1) Στραγγισμένη δοκιμή ($\Delta u=0$):

$$\sigma'_{1f} = \sigma'_{30} \tan^2\left(45 + \frac{\phi}{2}\right) + 2c \tan\left(45 + \frac{\phi}{2}\right) \rightarrow \sigma'_{1f} = 100 \times 3 + 2 \times 10 \times \text{sqrt}(3) = 334.6 \text{ kPa}$$

(2) Αστράγγιστη δοκιμή ($\Delta u \neq 0$):

$$\Delta u = A \Delta \sigma_1 = 0.75 \Delta \sigma_1 \quad (\sigma'_{10} + \Delta \sigma_1 - \Delta u) = (\sigma'_{30} - \Delta u) \tan^2\left(45 + \frac{\phi}{2}\right) + 2c \tan\left(45 + \frac{\phi}{2}\right)$$

$$\text{Άρα: } (100 + \Delta \sigma_1 - 0.75 \Delta \sigma_1) = (100 - 0.75 \Delta \sigma_1) \times 3 + 2 \times 10 \times \text{sqrt}(3)$$

$$\text{Άρα: } \Delta \sigma_1 = 93.9 \text{ kPa} \rightarrow \sigma'_{1f} = 100 + 93.9 - 0.75 \times 93.9 = 123.5 \text{ kPa}$$

Η αντοχή στην αστράγγιστη δοκιμή είναι αρκετά μικρότερη.

Εάν όμως οι υπερπιέσεις πόρων της αστράγγιστης φόρτισης ήταν αρνητικές (π.χ. $A = -0.25$), τότε, η αντοχή στην αστράγγιστη φόρτιση θα ήταν:

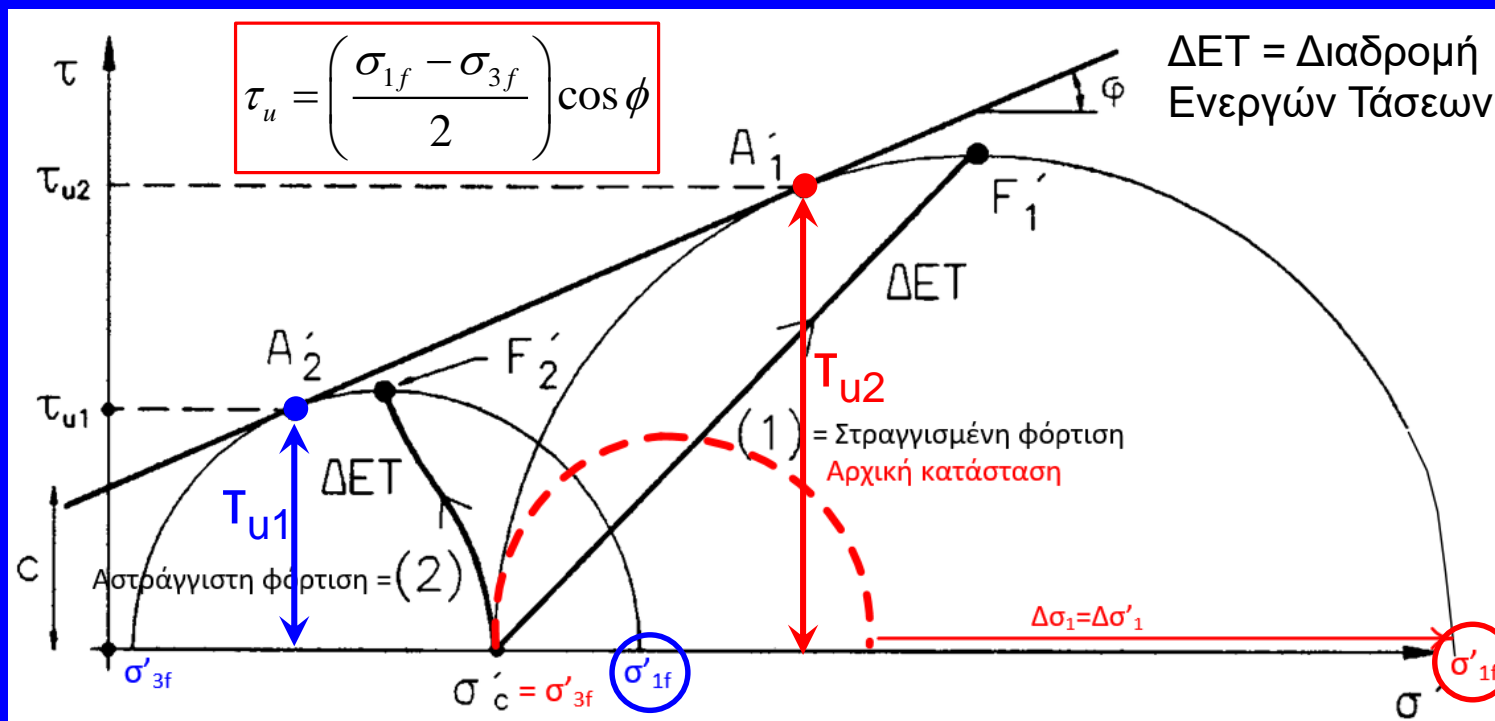
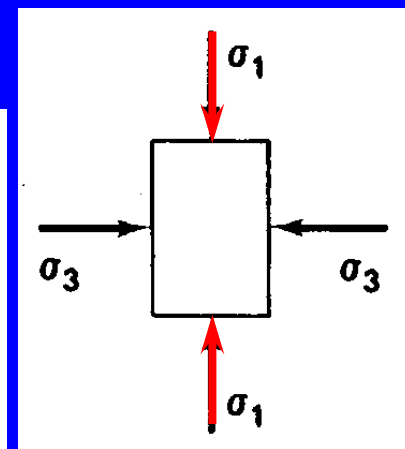
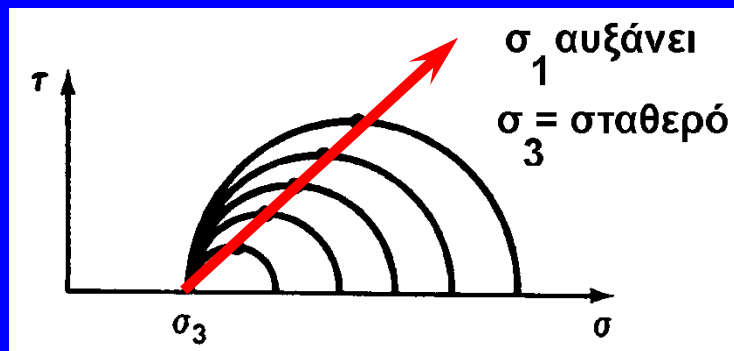
$$\Delta u = A \Delta \sigma_1 = -0.25 \Delta \sigma_1$$

$$\text{Άρα: } (100 + \Delta \sigma_1 + 0.25 \Delta \sigma_1) = (100 + 0.25 \Delta \sigma_1) \times 3 + 2 \times 10 \times \text{sqrt}(3)$$

$$\text{Άρα: } \Delta \sigma_1 = 469.3 \text{ kPa} \rightarrow \sigma'_{1f} = 100 + 469.3 + 0.25 \times 469.3 = 686.6 \text{ kPa}$$

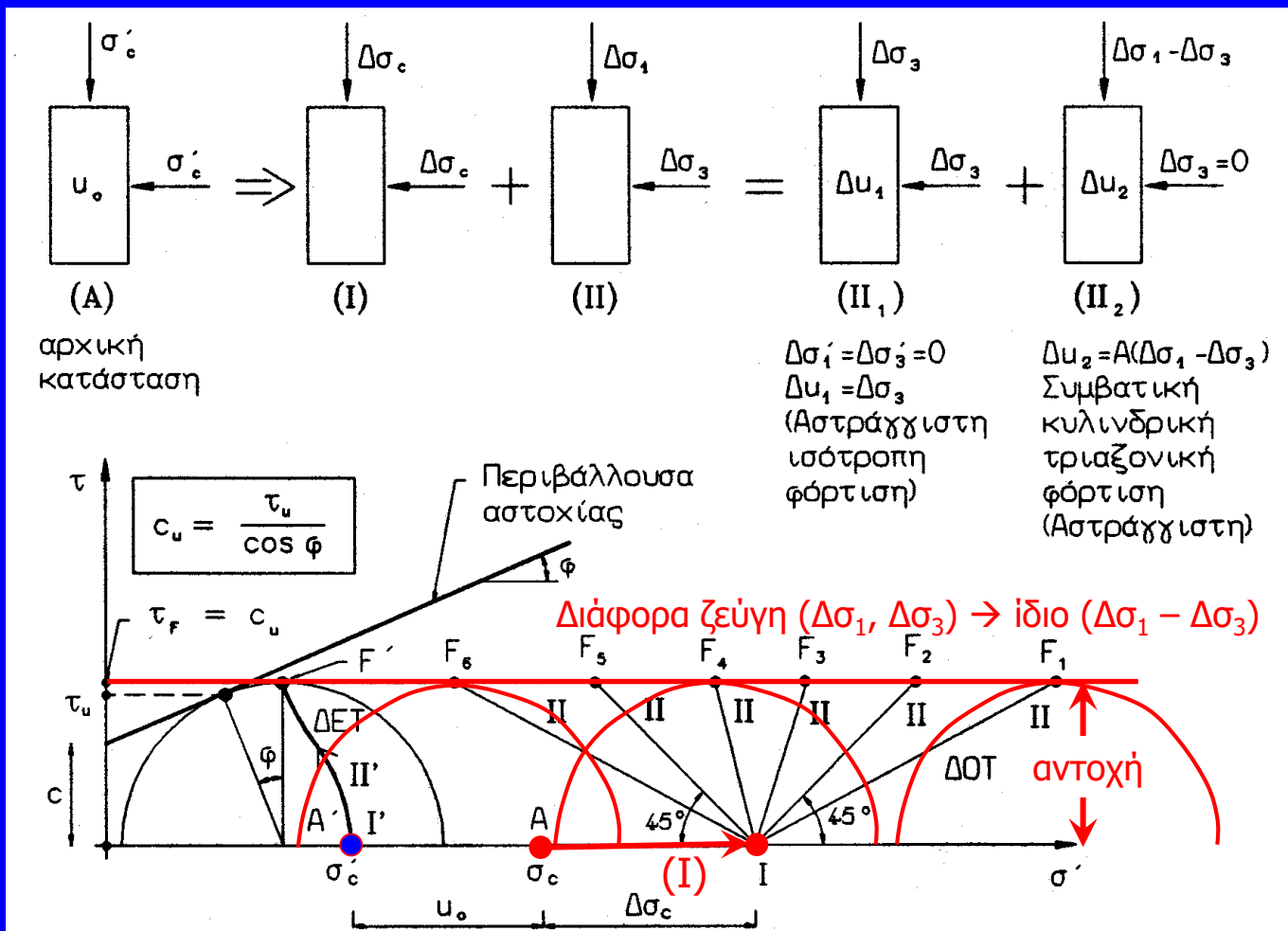
Σύγκριση της αντοχής δοκιμίων στην τριαξονική δοκιμή κατά την:

- (1) στραγγισμένη φόρτιση και
- (2) αστράγγιστη φόρτιση



Η αντοχή κατά την αστράγγιστη φόρτιση (τ_{u1}) είναι πολύ μικρότερη της αντοχής στην στραγγισμένη φόρτιση (τ_{u2})

Αστοχία κατά την αστράγγιστη φόρτιση στην τριαξονική δοκιμή



Κατά την αστοχία στην αστράγγιστη τριαξονική φόρτιση το μέγεθος:

$$c_u = \frac{1}{2}(\sigma'_{1f} - \sigma'_{3f}) = \frac{1}{2}(\sigma_{1f} - \sigma_{3f}) = \frac{1}{2}(\sigma'_{10} - \sigma'_{30}) + \frac{1}{2}(\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3)$$

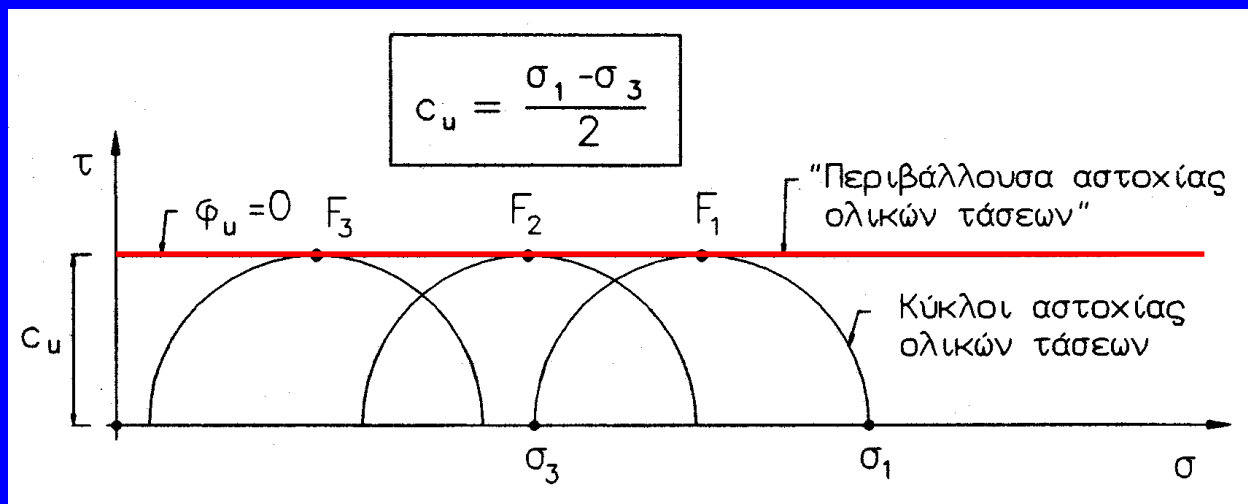
εξαρτάται μόνον από τις αρχικές ενεργές τάσεις σ'_{10} , σ'_{30} και το $(\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3)$
 Συνεπώς, αποτελεί χρήσιμο μέγεθος: $c_u =$ αστράγγιστη διατμητική αντοχή

Αστοχία κατά την αστράγγιστη φόρτιση στην τριαξονική δοκιμή

- Κατά την αστοχία, όλοι οι κύκλοι ολικών τάσεων έχουν το ίδιο μέγεθος (αφού αντιστοιχούν σε κοινό κύκλο ενεργών τάσεων), με ακτίνα:

$$c_u = \frac{1}{2}(\sigma'_{1f} - \sigma'_{3f}) = \frac{1}{2}(\sigma_{1f} - \sigma_{3f}) = \frac{1}{2}(\sigma'_{10} - \sigma'_{30}) + \frac{1}{2}(\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3)$$

- Συνεπώς, μπορεί να θεωρηθεί ότι οι “κύκλοι αστοχίας ολικών τάσεων” εφάπτονται σε οριζόντια “περιβάλλουσα ολικών τάσεων”, δηλαδή η περιβάλλουσα αστοχίας ολικών τάσεων έχει $\varphi_u=0$



- Συνεπώς, κατά την φόρτιση του εδάφους υπό αστράγγιστες συνθήκες (που είναι αρκετά συνήθης), μπορεί να γίνει ανάλυση με χρήση ολικών τάσεων (αντί των ενεργών), και χρήση «οριζόντιας περιβάλλουσας αστοχίας ολικών τάσεων», δηλαδή με $\varphi = \varphi_u = 0$ και $c = c_u$.

Παράδειγμα Εφαρμογής:

Δύο κυλινδρικά δοκίμια (I, II) κανονικά στερεοποιημένης αργίλου ($c=0$) υποβάλλονται αρχικά σε στερεοποίηση υπό ισότροπη ολική και ενεργό τάση (σ_c, σ_c') στην τριαξονική κυψέλη. Στη συνέχεια φορτίζονται αξονικά υπό αστράγγιστες συνθήκες με πρόσθετη κατακόρυφη ολική τάση μέχρι την αστοχία του δοκιμίου που συνέβη όταν η κατακόρυφη ολική τάση έφθασε την τιμή ($\sigma_{1\alpha}$) και η υπερπίεση πόρων έγινε (Δu_α). Στον ακόλουθο Πίνακα δίνονται τα αποτελέσματα των δοκιμών:

Δοκίμιο	σ_c' (kPa)	σ_c (kPa)	$\sigma_{1\alpha}$ (kPa)	Δu_α (kPa)
I	150	180	300	90
II	300	350	590	???

Ζητούνται:

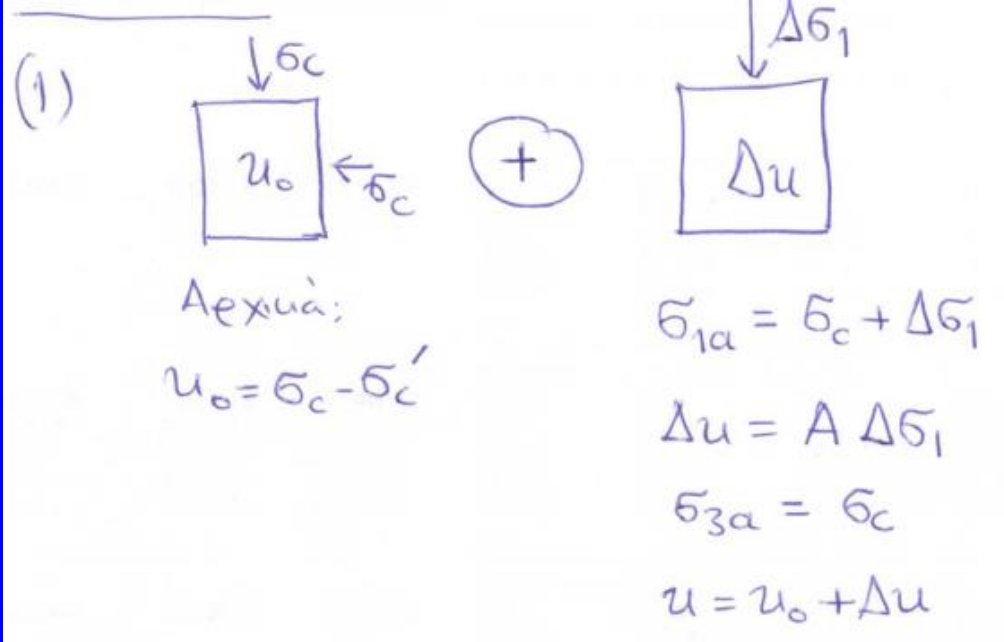
- (1) Ο συντελεστής A του Skempton κατά την αστοχία [$\Delta u = \Delta \sigma_3 + A (\Delta \sigma_1 - \Delta \sigma_3)$].
Η γωνία εσωτερικής τριβής (φ) της αργίλου.
Η υπερπίεση πόρων (Δu_α) κατά την αστοχία στην δοκιμή II.
- (2) Η αστράγγιστη διατμητική αντοχή C_u των δοκιμίων I και II. Γιατί τα δύο δοκίμια έχουν διαφορετική τιμή του C_u ?
- (3) Εάν το δοκίμιο I, μετά την στερεοποίηση υπό (σ_c, σ_c') στην τριαξονική κυψέλη, είχε υποβληθεί σε αξονική φόρτιση υπό στραγγισμένες συνθήκες, να υπολογισθεί η κατακόρυφη ολική τάση ($\sigma_{1\alpha}$) κατά την αστοχία. Πού οφείλεται το γεγονός ότι είναι διαφορετική από την τιμή της ($\sigma_{1\alpha}$) του Πίνακα ? Ποιά είναι μεγαλύτερη και γιατί ?

(1) Ο συντελεστής A του Skempton κατά την αστοχία, $\Delta u = \Delta \sigma_3 + A (\Delta \sigma_1 - \Delta \sigma_3)$

Η γωνία εσωτερικής τριβής (φ) της αργίλου.

Η υπερπίεση πόρων (Δu_0) κατά την αστοχία στην δοκιμή II.

$$\frac{\sigma'_{1f}}{\sigma'_{3f}} = \tan^2 \left(45 + \frac{\varphi}{2} \right)$$



Κατά την αστοχία:

$$\sigma'_{1a} = \sigma'_{3a} N_\varphi \quad \text{όπου} \quad N_\varphi = \tan^2 \left(45 + \frac{\varphi}{2} \right)$$

$$(\sigma_{1a} - u) = (\sigma_{3a} - u) N_\varphi \Rightarrow$$

$$(\sigma_c + \Delta \sigma_1 - u_0 - A \Delta \sigma_1) = (\sigma_c - u_0 - A \Delta \sigma_1) N_\varphi \Rightarrow$$

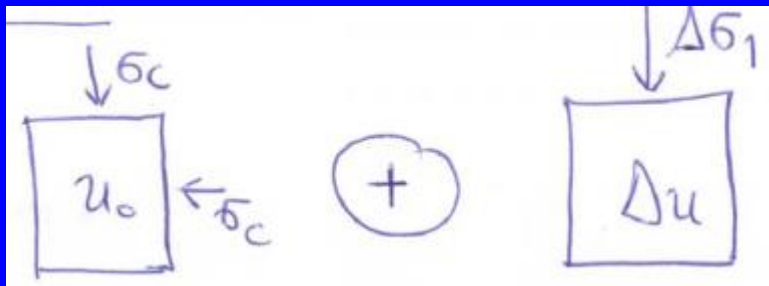
$$\rightarrow N_\varphi = \frac{\sigma'_c - (1-A) \Delta \sigma_1}{\sigma'_c - A \Delta \sigma_1}$$

(1) Ο συντελεστής A του Skempton κατά την αστοχία, $\Delta u = \Delta \sigma_3 + A (\Delta \sigma_1 - \Delta \sigma_3)$

Η γωνία εσωτερικής τριβής (φ) της αργίλου.

Η υπερπίεση πόρων (Δu_α) κατά την αστοχία στην δοκιμή II.

Δοκίμιο	σ_c' (kPa)	σ_c (kPa)	$\sigma_{1\alpha}$ (kPa)	Δu_α (kPa)
I	150	180	300	90
II	300	350	590	???



$$N_\varphi = \tan^2(45 + \varphi/2)$$

$$N_\varphi = \frac{\sigma_c' - (1-A)\Delta\sigma_1}{\sigma_c' - A\Delta\sigma_1}$$

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

Δοκιμή I: $\Delta u = 90$

$$\Delta \sigma_1 = \sigma_{1\alpha} - \sigma_c = 300 - 180 = 120$$

$$A = \Delta u / \Delta \sigma_1 = 90 / 120 \Rightarrow \boxed{A = 0.75}$$

$$\rightarrow N_\varphi = \frac{150 - 0.25 \times 120}{150 - 0.75 \times 120} = \frac{120}{60} = 2 \Rightarrow \boxed{\varphi = 30^\circ}$$

Δοκίμιο	σ'_c (kPa)	σ_c (kPa)	$\sigma_{1\alpha}$ (kPa)	Δu_α (kPa)
I	150	180	300	90
II	300	350	590	???

Δοκίμιο II: $\Delta\sigma_1 = \sigma_{1\alpha} - \sigma_c = 590 - 350 = 240$

$\Delta u = A \Delta\sigma_1 = 0.75 \times 240 = \underline{\underline{180 \text{ kPa}}}$

$\Delta u = 180 \text{ kPa}$

(2) Η αστράγγιστη διατμητική αντοχή C_u των δοκιμίων I και II. Γιατί τα δύο δοκίμια έχουν διαφορετική τιμή του C_u ?

(2) Δοκίμιο I: $C_u = \frac{\sigma_{1\alpha} - \sigma_{3\alpha}}{2} = \frac{300 - 180}{2} \Rightarrow$

$C_u = 60 \text{ kPa}$

Δοκίμιο II: $C_u = \frac{\sigma_{1\alpha} - \sigma_{3\alpha}}{2} = \frac{590 - 350}{2} \Rightarrow$

$C_u = 120 \text{ kPa}$

Έχω διαφορετική τιμή του C_u επειδή
έχω διαφορετική σε διαφορετική τάση

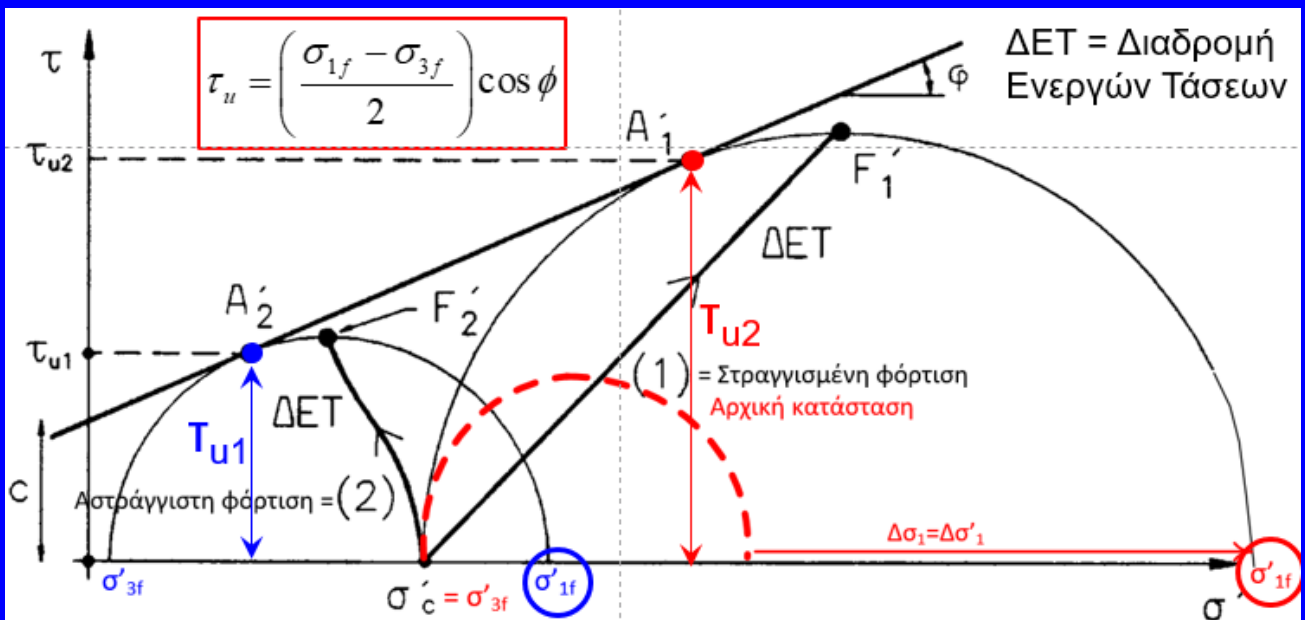
I: $\sigma'_c = 150 \text{ kPa}$

II: $\sigma'_c = 300 \text{ kPa}$

(3) Εάν το δοκίμιο Ι, μετά την στερεοποίηση υπό (σ_c, σ'_c) στην τριαξονική κυψέλη, είχε υποβληθεί σε αξονική φόρτιση υπό στραγγισμένες συνθήκες, να υπολογισθεί η κατακόρυφη ολική τάση ($\sigma_{1\alpha}$) κατά την αστοχία. Πού οφείλεται το γεγονός ότι είναι διαφορετική από την τιμή της ($\sigma_{1\alpha}$) του Πίνακα ? Ποιά είναι μεγαλύτερη και γιατί ?

(3) Δοκίμιο Ι: $u_o = \sigma_c - \sigma'_c = 180 - 150 = 30 \text{ kPa}$
 Στραγγισμένη φόρτιση: $\sigma'_{1\alpha} = \sigma'_{3\alpha} N_\phi = \sigma'_c N_\phi$
 Για το υπολογισθέν $\phi = 30^\circ$, $N_\phi = \tan^2 (45 + \phi/2) = \tan^2 (60) = 3$
 Άρα: $\sigma'_{1\alpha} = \sigma'_c N_\phi = 150 \times 3 = 450 \text{ kPa}$
 Άρα: $\sigma_{1\alpha} = \sigma'_{1\alpha} + u_o = 450 + 30 = 480 \text{ kPa}$.

Η στραγγισμένη τιμή της $\sigma_{1\alpha} = 480 \text{ kPa}$ είναι αρκετά μεγαλύτερη της αστράγγιστης τιμής $\sigma_{1\alpha} = 300 \text{ kPa}$ επειδή κατά την αστράγγιστη φόρτιση αναπτύσσονται θετικές υπερπιέσεις πόρων ($\Delta u = 90 \text{ kPa}$) οι οποίες μειώνουν τις ενεργές τάσεις του δοκιμίου και συνεπώς μειώνουν την αντοχή του.



Παράδειγμα Εφαρμογής:

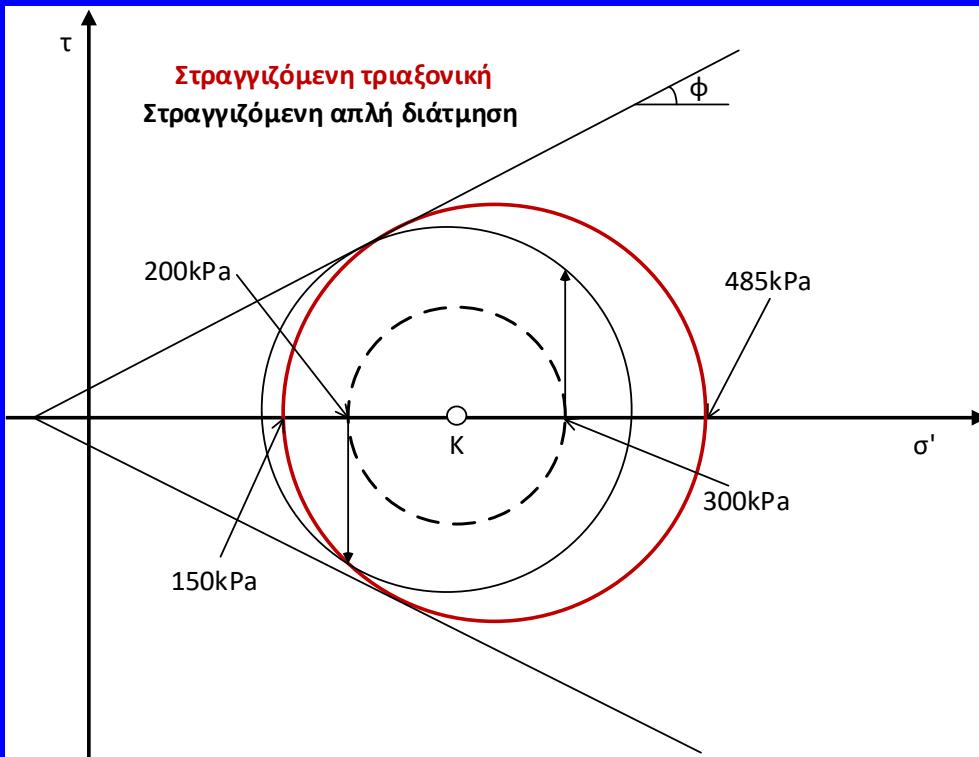
Σε τρία πανομοιότυπα δείγματα αργιλικού εδάφους εκτελέστηκαν οι δοκιμές διάτμησης με τις αρχικές και τις τελικές τάσεις αστοχίας του παρακάτω Πίνακα:

Δοκιμή	Τάσεις στερεοποίησης (kPa)			Τάσεις αστοχίας (kPa)			
	σ_{vo}	σ_{ho}	u_o	σ_{va}	σ_{ha}	T_a	u_a
Στραγγιζόμενη 3-αξονική	200	200	50	535	200	-	50
Αστράγγιστη 3-αξονική	200	200	50	386	200	-	?
Στραγγιζόμενη απλή διάτμηση	350	250	50	350	250	125	50

- (α)** Να υπολογισθούν οι παράμετροι διατμητικής αντοχής c και ϕ της αργίλου.
- (β)** Να υπολογισθεί ο συντελεστής υπερπίεσης πόρων κατά την αστοχία A της αργίλου
$$\Delta u = \Delta \sigma_3 + A(\Delta \sigma_1 - \Delta \sigma_3)$$
- (γ)** Σύμφωνα με την τιμή του A από το ανωτέρω ερώτημα (β), πρόκειται για προφορτισμένη ή για απροφόρτιστη άργιλο και γιατί;

(α) Να υπολογισθούν οι παράμετροι διατμητικής αντοχής c και ϕ της αργίλου.

Δοκιμή	Τάσεις στερεοποίησης (kPa)			Τάσεις αστοχίας (kPa)			
	σ_{Vo}	σ_{ho}	u_o	σ_{Va}	σ_{ha}	τ_a	u_a
Στραγγιζόμενη 3-αξονική	200	200	50	535	200	-	50
Αστράγγιστη 3-αξονική	200	200	50	386	200	-	?
Στραγγιζόμενη απλή διάτμηση	350	250	50	350	250	125	50



Στραγγιζόμενη τριαξονική δοκιμή :

$$\sigma_{v,a} = 535 \text{ kPa}$$

$$\sigma_{h,a} = 200 \text{ kPa}$$

$$u_a = 50 \text{ kPa}$$

$$\sigma'_{v,a} = \sigma_{v,a} - u_a = 485 \text{ kPa}$$

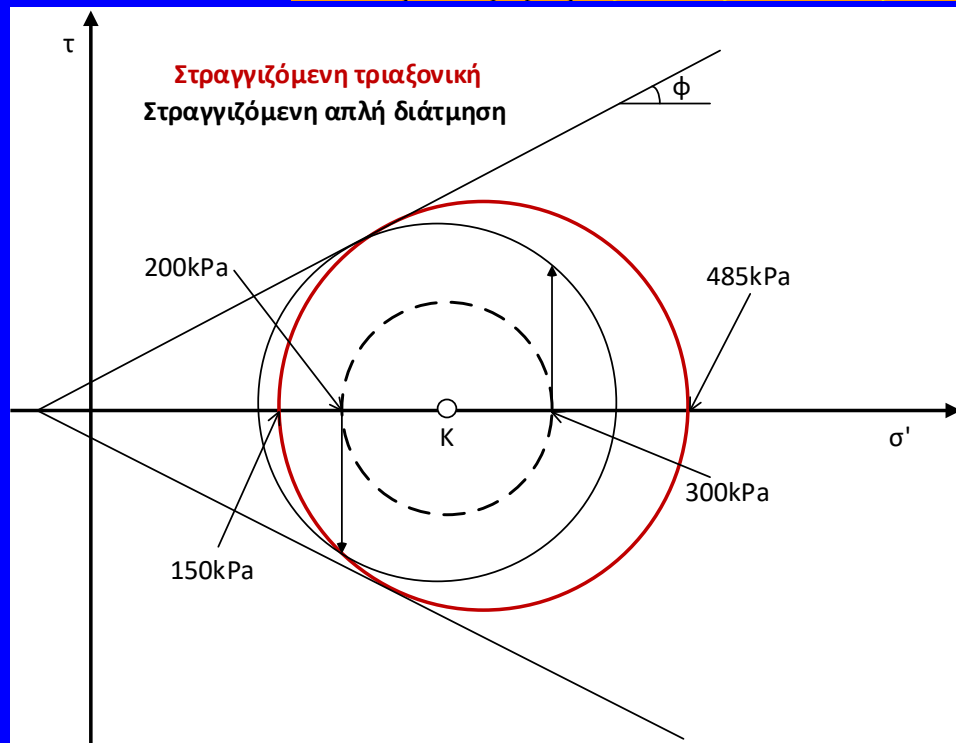
$$\sigma'_{h,a} = \sigma_{h,a} - u_a = 150 \text{ kPa}$$

$$s_1 = \frac{1}{2} (\sigma'_{v,a} + \sigma'_{h,a}) = 317.5 \text{ kPa}$$

$$t_1 = \frac{1}{2} (\sigma'_{v,a} - \sigma'_{h,a}) = 167.5 \text{ kPa}$$

(α) Να υπολογισθούν οι παράμετροι διατμητικής αντοχής c και ϕ της αργίλου.

Δοκιμή	Τάσεις στερεοποίησης (kPa)			Τάσεις αστοχίας (kPa)			
	σ_{v0}	σ_{h0}	u_0	σ_{va}	σ_{ha}	τ_a	u_a
Στραγγιζόμενη 3-αξονική	200	200	50	535	200	-	50
Αστράγγιστη 3-αξονική	200	200	50	386	200	-	?
Στραγγιζόμενη απλή διάτμηση	350	250	50	350	250	125	50



Στραγγιζόμενη απλή διάτμηση :

$$\sigma_{v,a} = \sigma_{v,0} = 350 \text{ kPa}$$

$$\sigma_{h,a} = \sigma_{h,0} = 250 \text{ kPa}$$

$$u_a = u_0 = 50 \text{ kPa}$$

$$\sigma'_{v,a} = \sigma'_{v,0} = \sigma_{v,0} - u_0 = 300 \text{ kPa}$$

$$\sigma'_{h,a} = \sigma'_{h,0} = \sigma_{h,0} - u_0 = 200 \text{ kPa}$$

$$s_2 = \frac{1}{2} (\sigma'_{v,a} + \sigma'_{h,a}) = 250 \text{ kPa}$$

$$t_2 = \sqrt{\tau_a^2 + (\sigma'_{v,a} - s_1)^2} = 134.63 \text{ kPa}$$

$$\sin \phi = \frac{t_1}{s_1 + \frac{c}{\tan \phi}} = \frac{t_2}{s_2 + \frac{c}{\tan \phi}} \Rightarrow \phi = 29.14^\circ$$

$$c = 14.75 \text{ kPa}$$

(β) Να υπολογισθεί ο συντελεστής υπερπίεσης πόρων κατά την αστοχία A της αργίλου $\Delta u = \Delta \sigma_3 + A(\Delta \sigma_1 - \Delta \sigma_3)$

(γ) Σύμφωνα με την τιμή του A από το ανωτέρω ερώτημα (β), πρόκειται για προφορτισμένη ή για απροφόρτιστη άργιλο και γιατί;

Δοκιμή	Τάσεις στερεοποίησης (kPa)			Τάσεις αστοχίας (kPa)			
	σ_{v0}	σ_{ho}	u_0	σ_{va}	σ_{ha}	τ_a	u_a
Στραγγιζόμενη 3-αξονική	200	200	50	535	200	-	50
Αστράγγιστη 3-αξονική	200	200	50	386	200	-	?
Στραγγιζόμενη απλή διάτμηση	350	250	50	350	250	125	50

Αστράγγιστη τριαξονική δοκιμή:

$$\sigma_{v,a} = 386 \text{ kPa}$$

$$\sigma_{h,a} = 200 \text{ kPa}$$

$$u_a = ???$$

$$\sigma_{v,0} = 200 \text{ kPa}$$

$$\sigma_{h,0} = 200 \text{ kPa}$$

$$u_0 = 50 \text{ kPa}$$

$$\Delta \sigma_1 = \sigma_{v,a} - \sigma_{v,0} = 386 - 200 = 186 \text{ kPa}$$

$$\Delta \sigma_3 = \sigma_{h,a} - \sigma_{h,0} = 0$$

$$\sigma'_{v,a} = \sigma_{v,a} - u_a = 386 - u_a$$

$$\sigma'_{h,a} = \sigma_{h,a} - u_a = 200 - u_a$$

$$s_3 = \frac{1}{2}(\sigma'_{v,a} + \sigma'_{h,a}) = 293 - u_a$$

$$t_3 = \frac{1}{2}(\sigma'_{v,a} - \sigma'_{h,a}) = 93 \text{ kPa}$$

$$\sin \varphi = \frac{t_3}{s_3 + \frac{c}{\tan \varphi}} \Rightarrow s_3 = \frac{t_3}{\sin \varphi} - \frac{c}{\tan \varphi} = 164.53 \text{ kPa} \Rightarrow u_a = 128.47 \text{ kPa}$$

$$\Delta u = u_a - u_0 = 78.47 \text{ kPa}$$

$$\Delta u = \Delta \sigma_3 - A \cdot (\Delta \sigma_1 - \Delta \sigma_3) = 186A$$

$$A = 0.42 \Rightarrow \text{Ελαφρά υπερστερεοποιημένη άργιλος.}$$