

# Μηχανική Συμπεριφορά Εδαφών σε (υπο)κατηγορίες φορτίσεων

**Τελειώνουμε με:**

Συμπεριφορά σε αστράγγιστες συνθήκες  
(= σταθερός όγκος για κορεσμένα δοκίμια)

# Αστράγγιστες συνθήκες

- **ΣΤΟ ΠΕΔΙΟ (πρακτικώς αστράγγιστες)**
  - Μετά από μια αλλαγή φόρτισης, η αποτόνωση των υπερπιέσεων  $\Delta u$  (που προκλήθηκαν από την αλλαγή φόρτισης) καθυστερεί για κάποιο χρονικό διάστημα επειδή **η κίνηση του νερού καθυστερεί** για κάποιο χρονικό διάστημα, που είναι...
    - ... σημαντικό όταν η κίνηση του νερού είναι αργή (σε χαμηλής περατότητας εδάφη)
    - ... αμελητέο σε υψηλής περατότητας εδάφη (πχ άμμους)
- **ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ (αυστηρώς αστράγγιστες)**
  - Μετά από μια αλλαγή φόρτισης, **η κίνηση του νερού εμποδίζεται** κι έτσι η  $\Delta u$  δεν αποτονώνεται

## Έως τώρα

- Είδαμε ότι η ενεργός τάση  $\sigma'$  είναι το μέγεθος-κλειδί για να καταλάβουμε τη συμπεριφορά του εδάφους αφού 1) αυτή συνδέεται με παραμορφώσεις και 2) το κριτήριο διατμητικής αντοχής εκφράζεται ως προς τις ενεργές τάσεις
- Δεν πρόκειται να ξεχάσουμε ποτέ ότι  $\sigma' = \sigma - u$ , οπότε  $\sigma' = \sigma$  μόνο αν  $u=0$ . Ομοίως  $\Delta\sigma' = \Delta\sigma - \Delta u$ , οπότε  $\Delta\sigma' = \Delta\sigma$  μόνο αν  $\Delta u=0$ .
- Την υπόθεση  $\Delta u=0$  μετά από κάποιο χρονικό διάστημα την κάναμε ως τώρα δυο φορές: στον υπολογισμό α) των επιφορτικών τάσεων και β) της καθίζησης λόγω μονοδιάστατης συμπίεσης.
  - Γιατί; Γιατί η επιβολή ενός εξωτερικού φορτίου αρχικά διαταράσσει και την τάση του εδάφους και την πίεση του νερού, αλλά στην περίπτωση (α) δεν μπορούμε να υπολογίσουμε τη διαταραχή της πίεσης του νερού  $\Delta u$ , ενώ στην περίπτωση (β) ξέρουμε μόνο την αρχική τιμή της  $\Delta u$ .

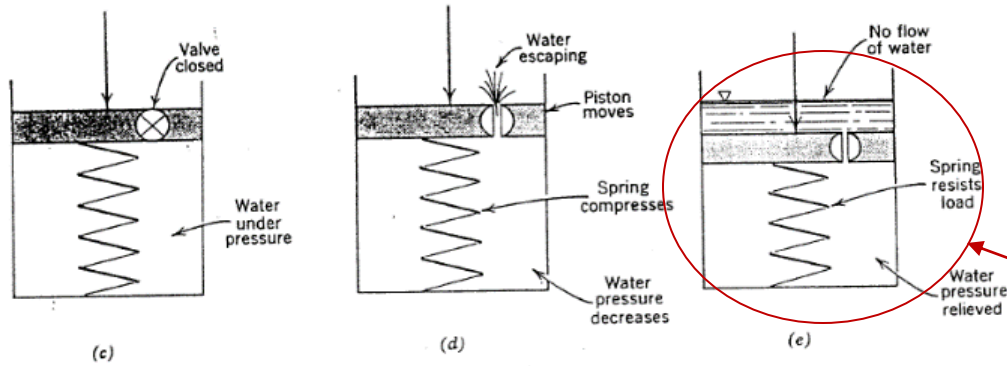
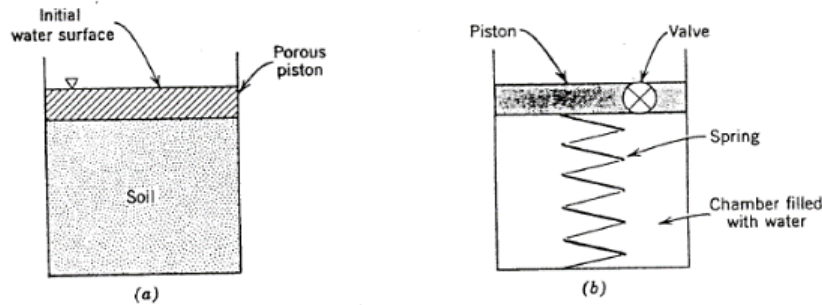
## Έως τώρα (συνέχεια)

- Όσο δεν μπορούσαμε να υπολογίσουμε την  $\Delta u$ , λέγαμε ΟΚ, θα περιμένω μέχρι να αποτονωθεί η διαταραχή της πίεσης του νερού και να ξαναγουρίσει η πίεση στην αρχική της τιμή.
  - Πόσο θα χρειαστεί να περιμένω; Πολύ λίγο, υποθέτω καθόλου στις άμμους και, άρα, οι αστράγγιστες συνθήκες είναι κάτι που δεν με απασχολεί στις άμμους (με την εξαίρεση του σεισμού). Αρκετά στις αργίλους. **Γι' αυτό πρέπει να ασχοληθώ με το τι συμβαίνει στις αργίλους σε αστράγγιστες συνθήκες.**
- Σ' αυτήν την τελευταία ενότητα, θα μάθουμε να υπολογίζουμε την  $\Delta u$  για κάποιες περιπτώσεις. Με γνωστή την  $u$ , πάλι θα βρίσκω τις ενεργές τάσεις από τις ολικές τάσεις, και άρα θα ξέρω (α) τι συμβαίνει στο έδαφος και την στιγμή επιβολής του εξωτερικού φορτίου και (β) αν το έδαφος αστοχεί.

# Έως τώρα – μονοδιάστατη συμπίεση = αναλογία κορεσμένου εδάφους– ελατηρίου+πιστονιού

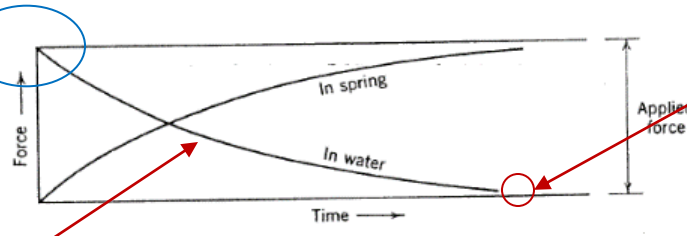
- Τι πρέπει να γίνει για να μπορέσει να αλλάξει ο όγκος των πόρων;

- Να φύγει το νερό



$$\Delta u = 0$$

$\Delta u = ?$   
στην αρχή;



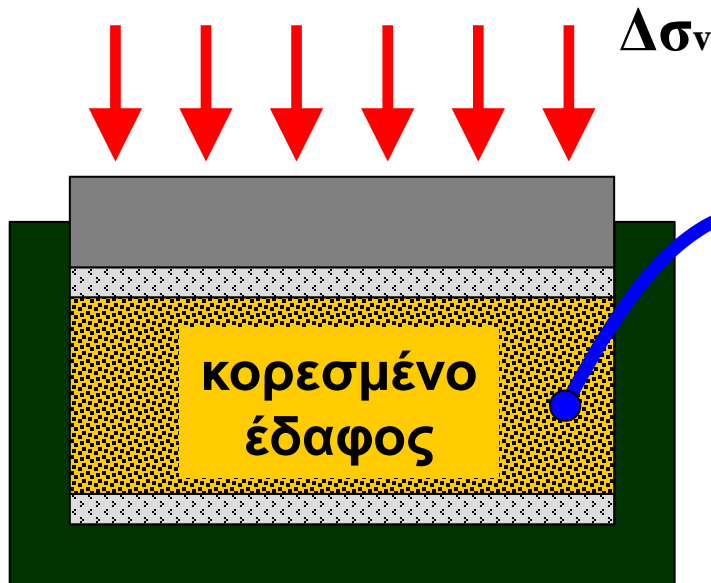
$$\Delta u(t) \neq 0$$

# Μονοδιάστατη συμπίεση– αστράγγιστες συνθήκες

- Χωρίς αλλαγή όγκου, είχαμε υποθέσει στην αρχή της φόρτισης  $\Delta u = \Delta \sigma_v$  και  $\Delta \sigma'_v = 0$ 
  - Καλή υπόθεση ιδίως για μαλακά και χαλαρά εδάφη, των οποίων ο εδαφικός σκελετός είναι πολύ λιγότερο συμπιεστός σε σχέση με τη συμπιεστότητα του νερού
- Πιο γενικά:
- **$\Delta u = B \Delta \sigma_v$  και  $\Delta \sigma'_v = (1-B) \Delta \sigma_v$** 
  - Ο συντελεστής B είναι χαρακτηριστικό του εδαφικού υλικού
  - Για κορεσμένο έδαφος ( $S_r > 98\%$ ) και συμπιεστά εδάφη,  $B=1$
  - Για ακόρεστο έδαφος,  $B < 1$  και για ξηρό έδαφος  $B=0$
- Το ίδιο ισχύει και για ισοτροπική συμπίεση:
- **$\Delta u = B \Delta \sigma_c$  και  $\Delta \sigma'_c = (1-B) \Delta \sigma_c$**

# Ανάπτυξη υπερπίεσης πόρων υπό αστράγγιστες συνθήκες

## 1-διάστατη συμπίεση



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

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

ή πιο γενικά

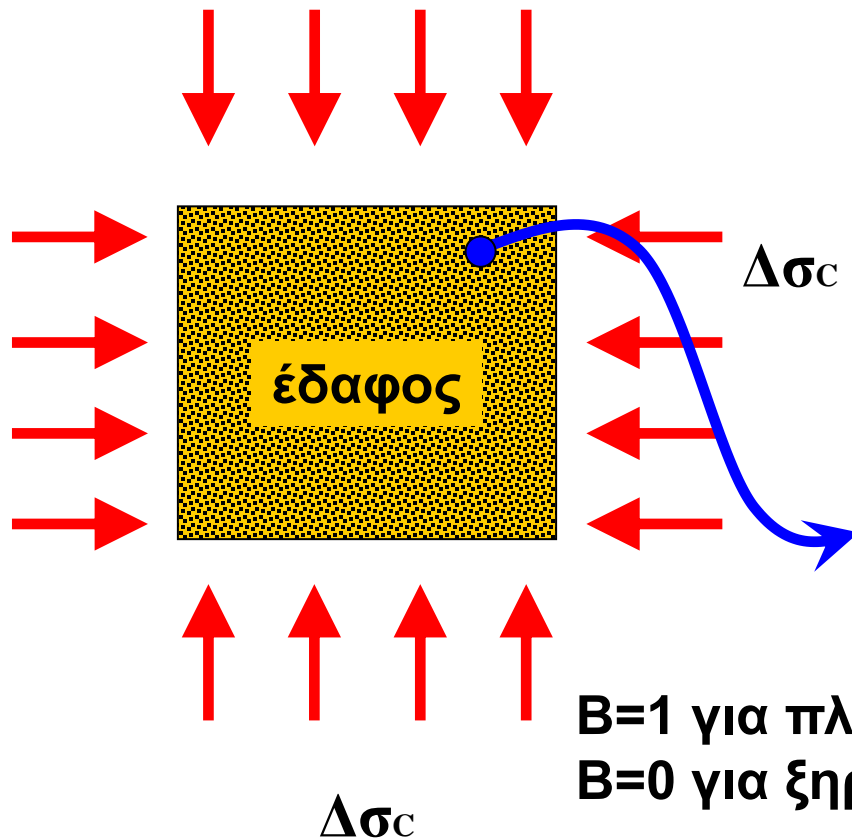
$$\Delta u = B \Delta \sigma_v$$

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

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

# Ισοτροπική συμπίεση

Για τους ίδιους λόγους με την 1-D 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



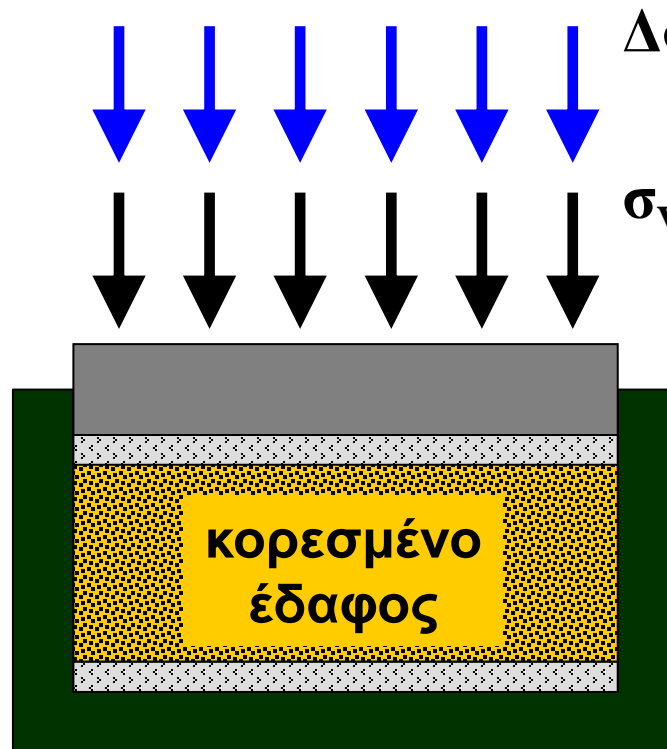
## ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 1

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

**στάδιο 1:** στερεοποίηση υπό κατακόρυφη τάση  $\sigma_{v0}=\sigma'_{v0}=100$  kPa

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

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

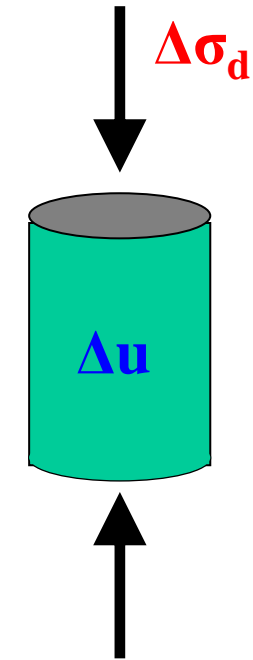


τα μπλέ βέλη δείχνουν αστράγγιστη φόρτιση και τα μαύρα στραγγιζόμενη

# Μονοαξονική φόρτιση

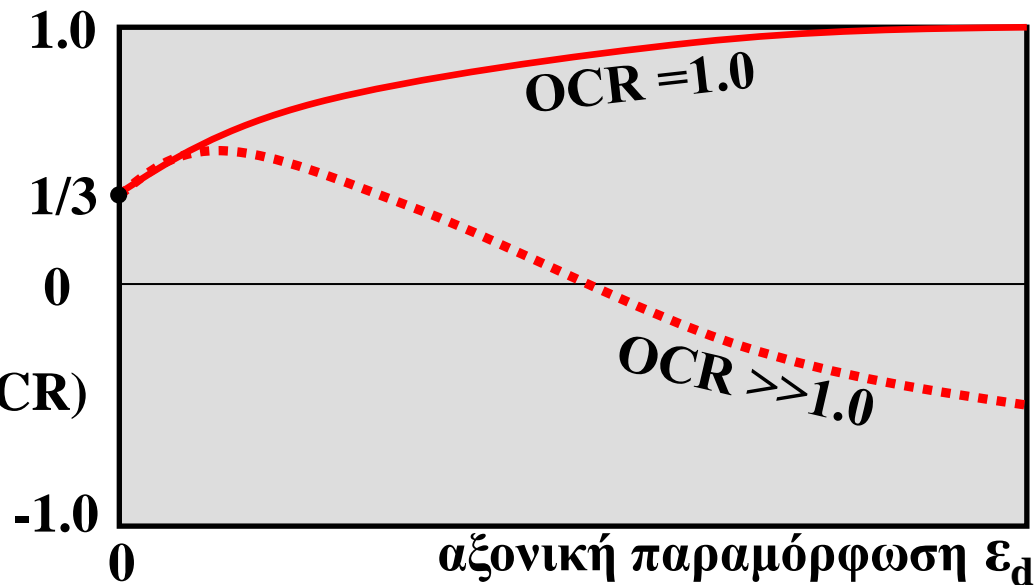
Δεν ισχύει το μηχανικό ανάλογο που παρουσιάσαμε προηγουμένως για την 1-D και την ιστροπική συμπίεση, επειδή η τάση για μεταβολή του όγκου δεν προέρχεται από την επιβαλλόμενη ορθή τάση, αλλά κυρίως από τη διατμητική καταπόνηση

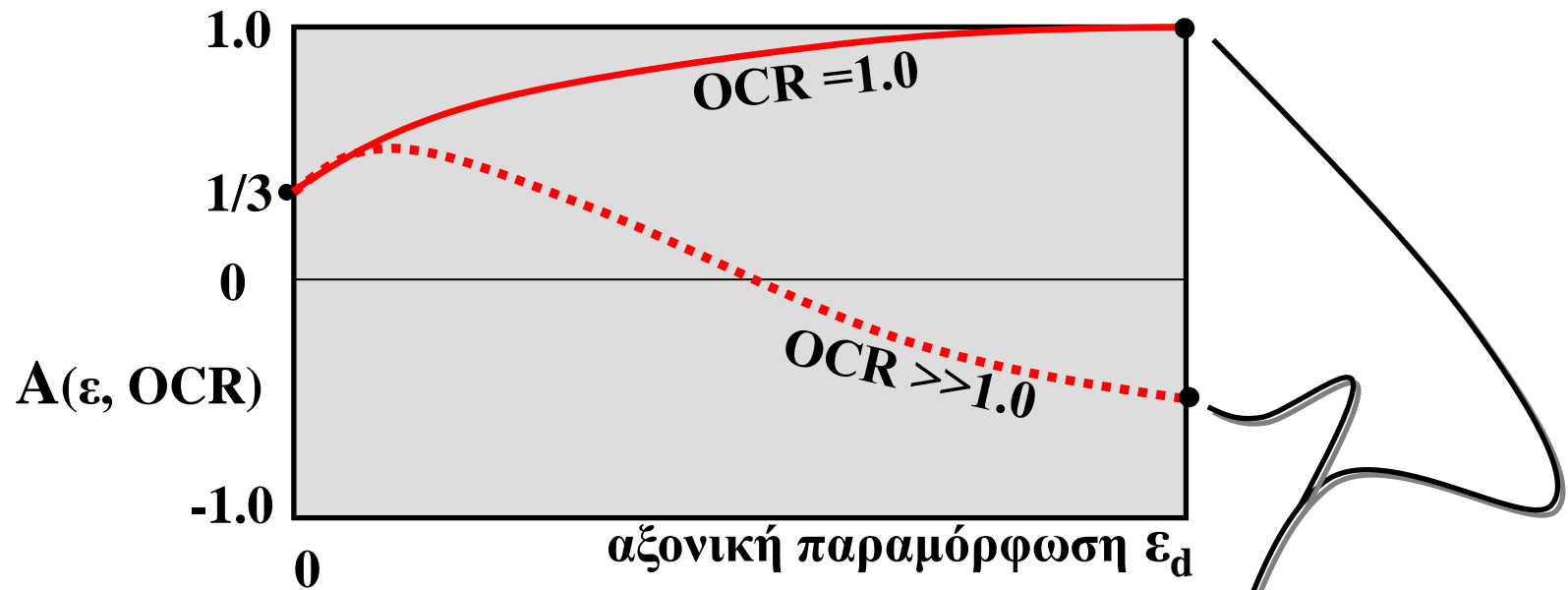
Με βάση πειραματικά αποτελέσματα για κορεσμένο έδαφος, προκύπτει ότι:  $\Delta u = A \Delta \sigma_d$   
[ ή γενικότερα:  $\Delta u = B(A \Delta \sigma_d)$  ]



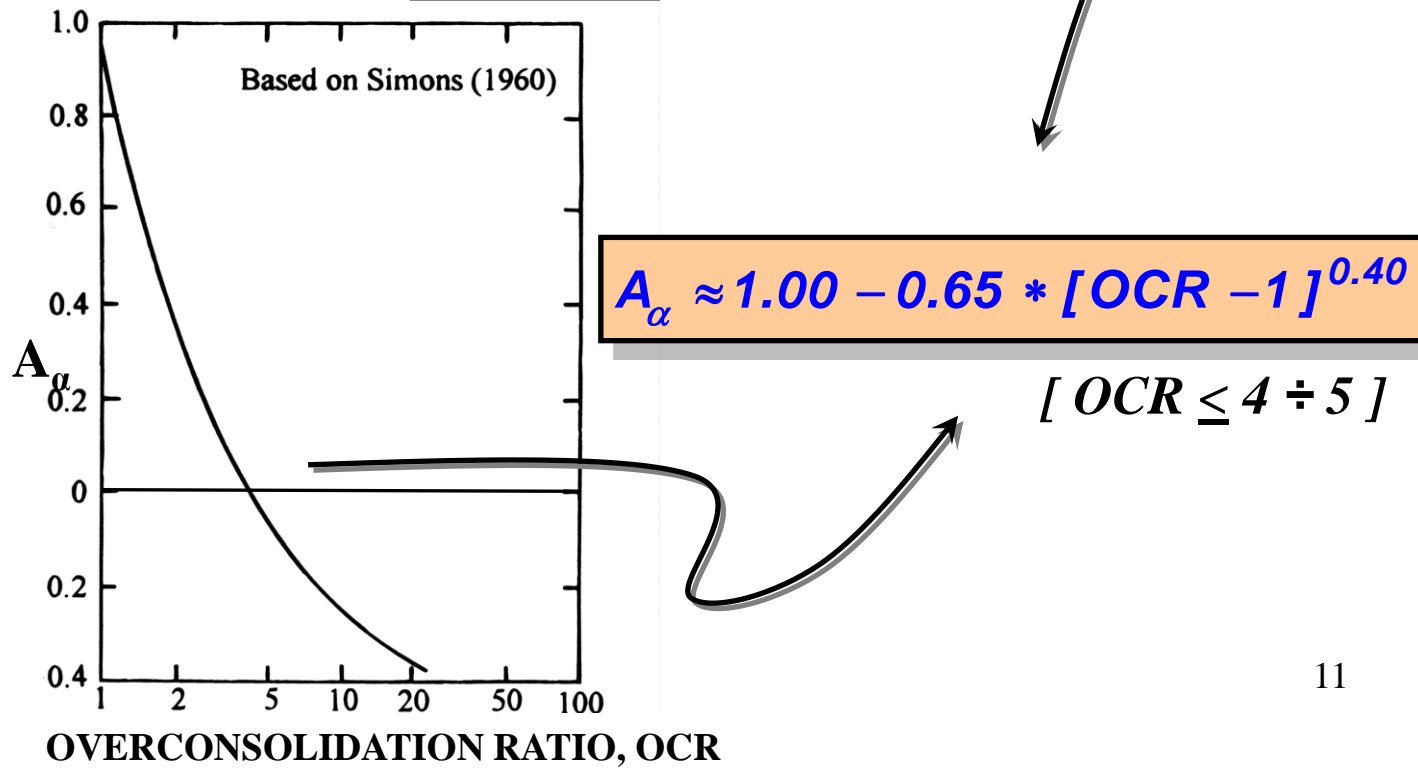
όπου:

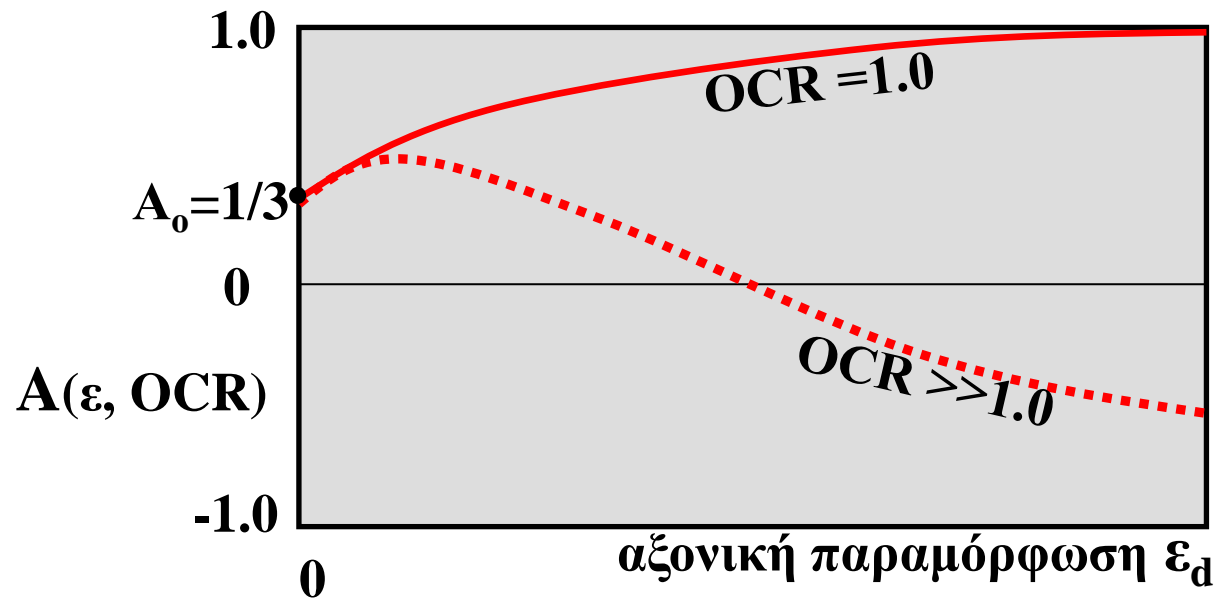
$A(\varepsilon, OCR)$





**και  
κάτι  
ακόμη:**

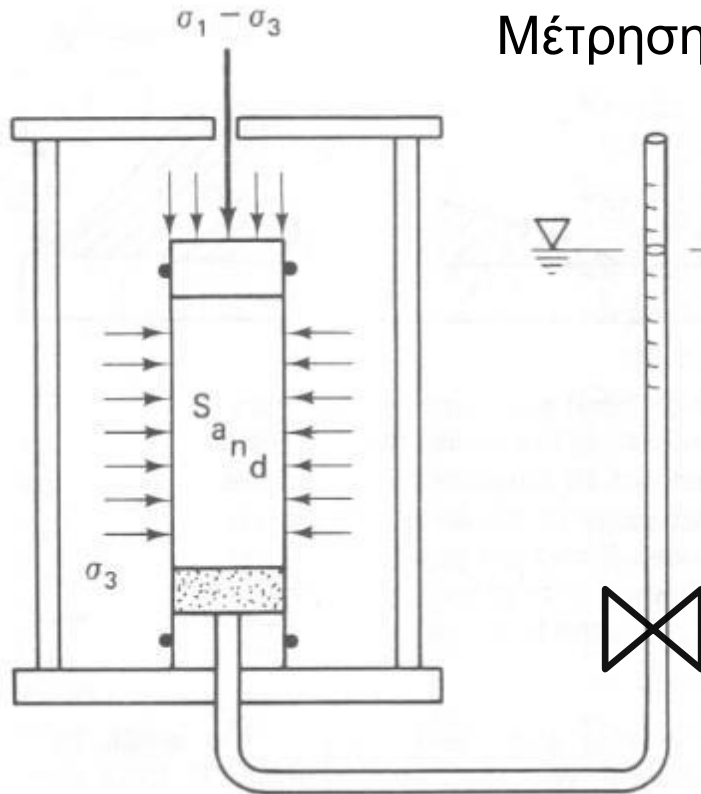




Δύο ερωτήματα σχετικά με τον δείκτη πίεσης πόρων  $A$ :

- **Γιατί γίνεται αρνητικός όταν  $OCR \gg 1.0$ ; (Απάντηση: Διαφάνεια 14)**
- **Γιατί  $A_0 = 1/3$  ανεξαρτήτως  $OCR$ ; (Απάντηση: Διαφάνεια 15)**

# Θυμόμαστε:



Μέτρηση αλλαγής στάθμης νερού

Δοκίμιο διώχνει νερό  $\Rightarrow$   
μείωση όγκου

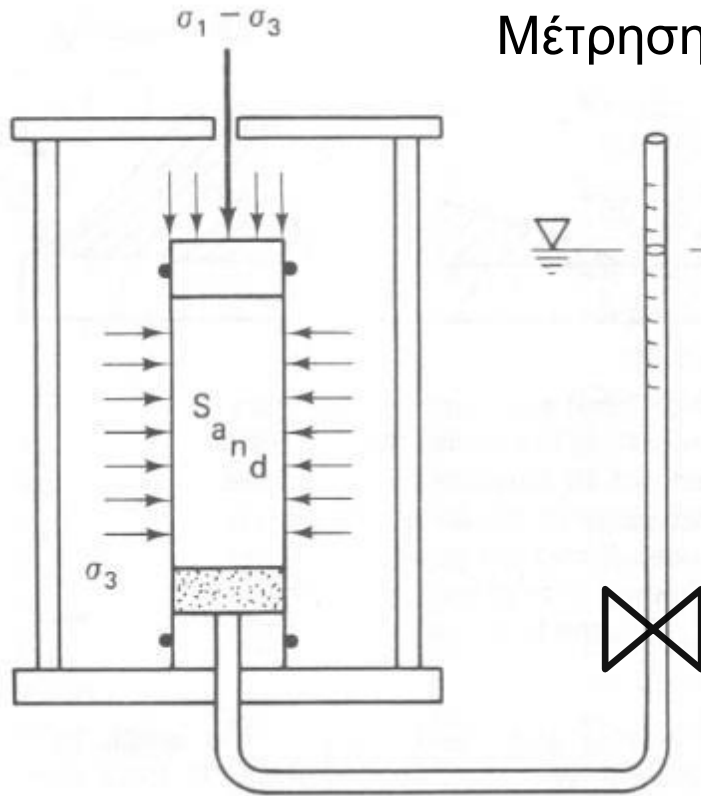
Δοκίμιο τραβάει νερό  $\Rightarrow$   
αύξηση όγκου

ή

**Αν κλείσω τη βάνα και  
χρησιμοποιήσω κατάλληλο  
μορφοτροπέα πίεσης  $\Rightarrow$  μετρώ  
αλλαγή πίεσης του νερού των  
πόρων.**

- Ποια είναι τα εδάφη που συμπιέζονται κατά τη διατμητική καταπόνηση;
- Συμπύεση σε στραγγισμένες συνθήκες  $\Leftrightarrow$  αύξηση πίεσης πόρων σε αστραγγιστες συνθήκες

# Θυμόμαστε (συνέχεια):



Μέτρηση αλλαγής στάθμης νερού

Δοκίμιο διώχνει νερό  $\Rightarrow$   
μείωση όγκου

Δοκίμιο τραβάει νερό  $\Rightarrow$   
αύξηση όγκου

ή

**Αν κλείσω τη βάνα και  
χρησιμοποιήσω κατάλληλο  
μορφοτροπέα πίεσης  $\Rightarrow$  μετρώ  
αλλαγή πίεσης του νερού των  
πόρων.**

- Ποια είναι τα εδάφη που διογκώνονται κατά τη διατμητική καταπόνηση;
- Διόγκωση σε στραγγισμένες συνθήκες  $\Leftrightarrow$   
μείωση πίεσης πόρων σε αστραγγιστες συνθήκες

# Θυμόμαστε: Ογκομετρική παραμόρφωση – τάσεις – αστράγγιστες συνθήκες (από Θεωρία Ελαστικότητας)

- Με άθροιση των ορθών παραμορφώσεων προκύπτει

$$\Delta \varepsilon_{vol} = \frac{1}{3K} (\Delta \sigma'_x + \Delta \sigma'_y + \Delta \sigma'_z)$$

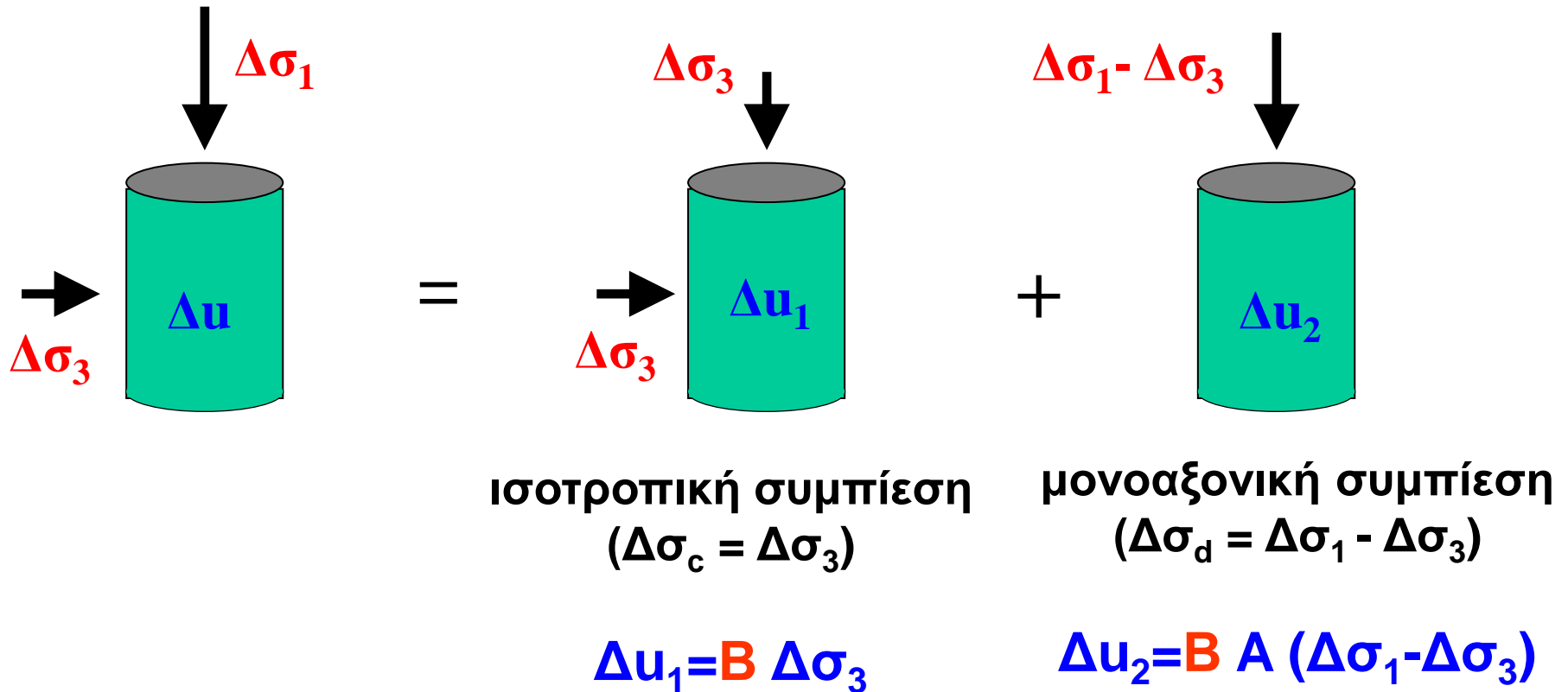
όπου  $K$  = μέτρο ισότροπης συμπίεσης  $K = \frac{E}{3(1-2\nu)}$

- Κατά την αστράγγιστη φόρτιση εδαφών  $\Delta \varepsilon_{vol} = 0$  και αφού  $\Delta \sigma' = \Delta \sigma - \Delta u$

$$\Delta u = \frac{1}{3} (\Delta \sigma_x + \Delta \sigma_y + \Delta \sigma_z)$$

Για  $\Delta \sigma_y = \Delta \sigma_z = 0$ ,  
 $\Delta u = \mathbf{A} \Delta \sigma_x$  με  $\mathbf{A} = 1/3$

# Τριαξονική φόρτιση



άρα, τελικώς ...  $\Delta u = B [\Delta\sigma_3 + A(\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3)]$

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



## ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 2

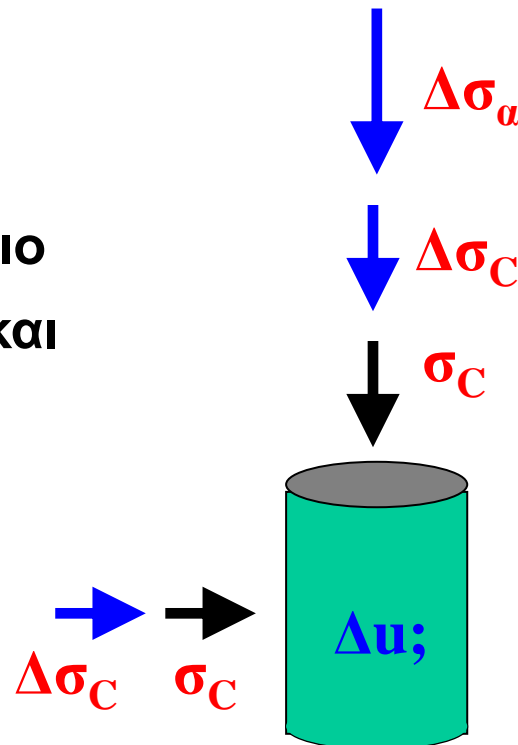
(α) Να υπολογισθούν οι ενεργές και οι ολικές τάσεις στο τέλος της ακόλουθης τριαξονικής φόρτισης:

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

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

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

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



τα μπλέ βέλη  
δείχνουν  
αστράγγιστη  
φόρτιση και τα μαύρα  
στραγγιζόμενη

## ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 2 - (β) Παραλλαγή και (γ) επιπλέον ερωτήσεις

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

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

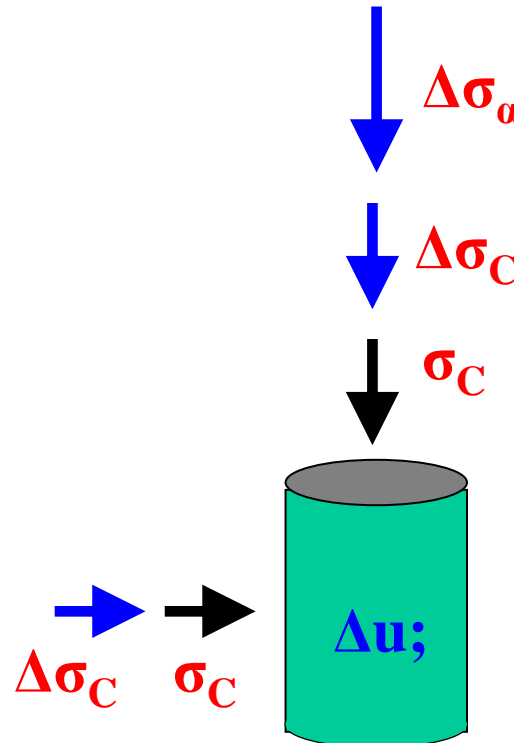
**στάδιο 2:** ισοτροπική φόρτιση υπό αστράγγιστες συνθήκες, με  $\Delta\sigma_c = 100 \text{ kPa}$

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

(β) Το κορεσμένο εδαφικό δοκίμιο έχει συντελεστή πίεσης πόρων  $A = -0.20$

(γ<sub>1</sub>) Ποια περίπτωση, (α) ή (β), «προτιμάτε»;

(γ<sub>2</sub>) Τι θα γίνει αν στο στάδιο 3 επιτρέψουμε στράγγιση;



τα μπλέ βέλη δείχνουν αστράγγιστη φόρτιση και τα μαύρα στραγγιζόμενη

### ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 3

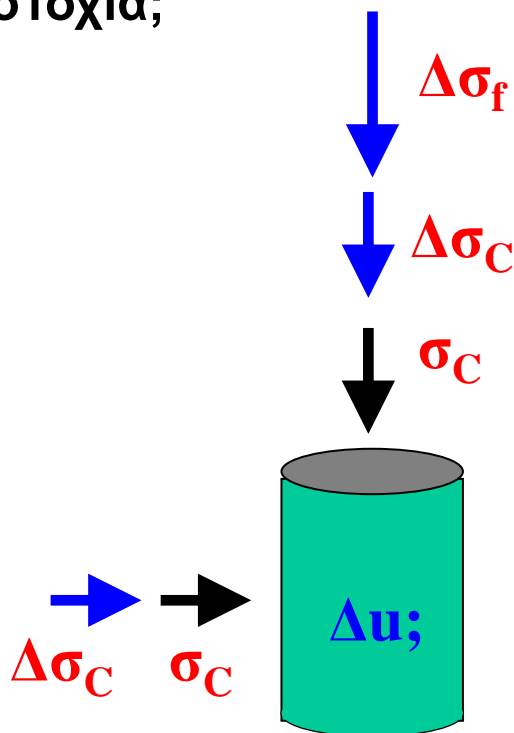
Να υπολογισθεί η πρόσθετη αξονική τάση  $\Delta\sigma_f$  που απαιτείται προκειμένου να έχω αστοχία υπό αστράγγιστες συνθήκες φόρτισης στην ακόλουθη τριαξονική δοκιμή:

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

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

**στάδιο 3:** για αξονική συμπίεση υπό αστράγγιστες συνθήκες, ποια μεταβολή τάσης  $\Delta\sigma_f$  επιφέρει αστοχία;

Το εδαφικό δοκίμιο είναι κορεσμένο, με συντελεστή πίεσης πόρων  $A=0.50$  και  $c=0$  &  $\varphi=30^\circ$

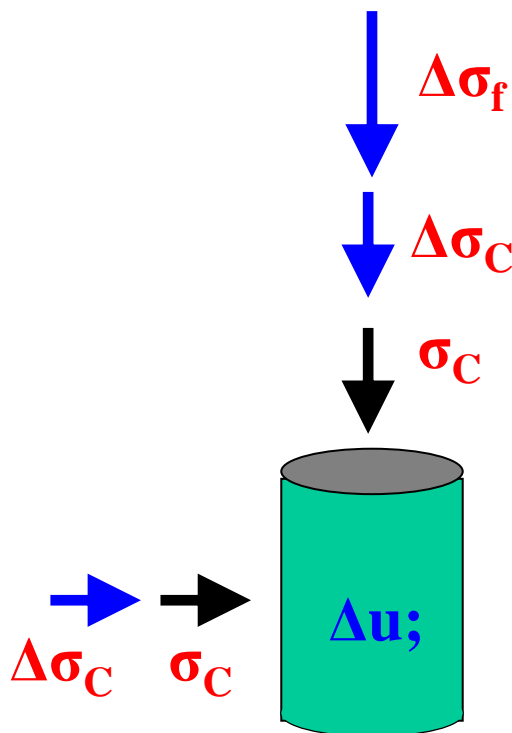


τα μπλέ βέλη δείχνουν αστράγγιστη φόρτιση και τα μαύρα στραγγιζόμενη

## ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 4

Θα αλλάξει η πρόσθετη αξονική τάση  $\Delta\sigma_f$  που απαιτείται για να επέλθω αστοχία στο Παράδειγμα 3 εάν η ιστροπική τάση που επιβάλλεται υπό αστράγγιστες συνθήκες στο στάδιο 2 είναι  $\Delta\sigma_c=300$  kPa (αντί για 100 kPa); Πόσο και γιατί;

Το εδαφικό δοκίμιο είναι κορεσμένο, με συντελεστή πίεσης πόρων  $A=0.50$  και  $c=0$  &  $\varphi=30^\circ$



τα μπλέ βέλη δείχνουν αστράγγιστη φόρτιση και τα μαύρα στραγγιζόμενη

### ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 3 - Παραλλαγή

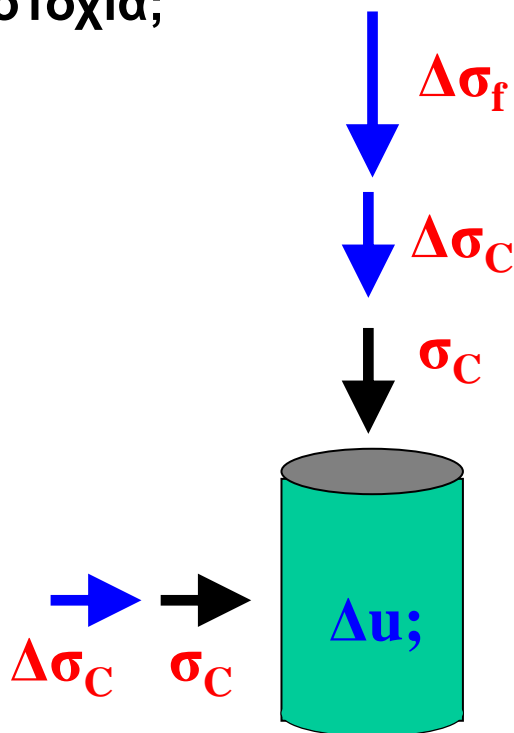
Να υπολογισθεί η πρόσθετη αξονική τάση  $\Delta\sigma_f$  που απαιτείται προκειμένου να έχω αστοχία υπό αστράγγιστες συνθήκες φόρτισης στην ακόλουθη τριαξονική δοκιμή:

**στάδιο 1:** στερεοποίηση\* υπό ισοτροπική τάση  $\sigma_c = \sigma'_c = 150 \text{ kPa}$

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

**στάδιο 3:** για αξονική συμπίεση υπό αστράγγιστες συνθήκες, ποια μεταβολή τάσης  $\Delta\sigma_f$  επιφέρει αστοχία;

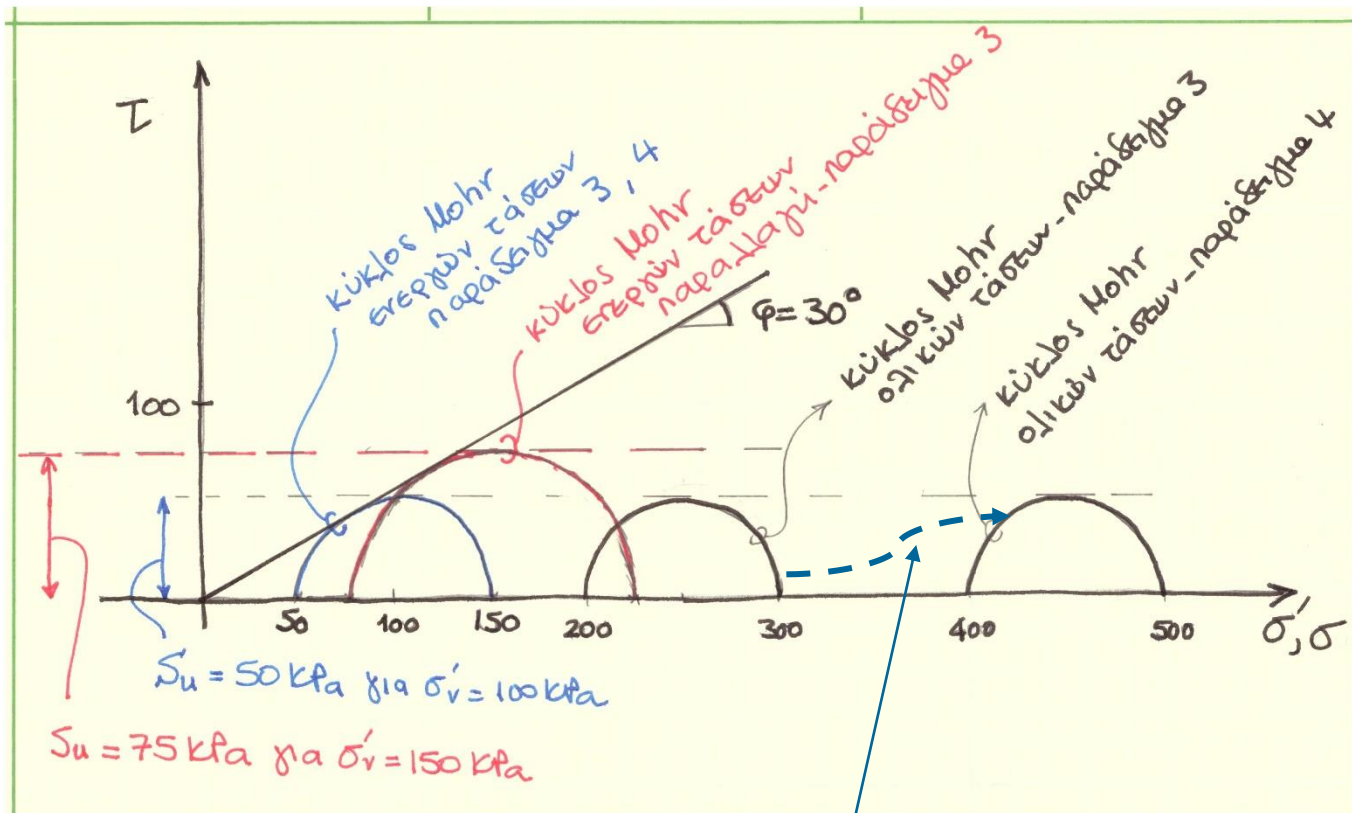
Το εδαφικό δοκίμιο είναι κορεσμένο, με συντελεστή πίεσης πόρων  $A=0.50$  και  $c=0$  &  $\varphi=30^\circ$



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

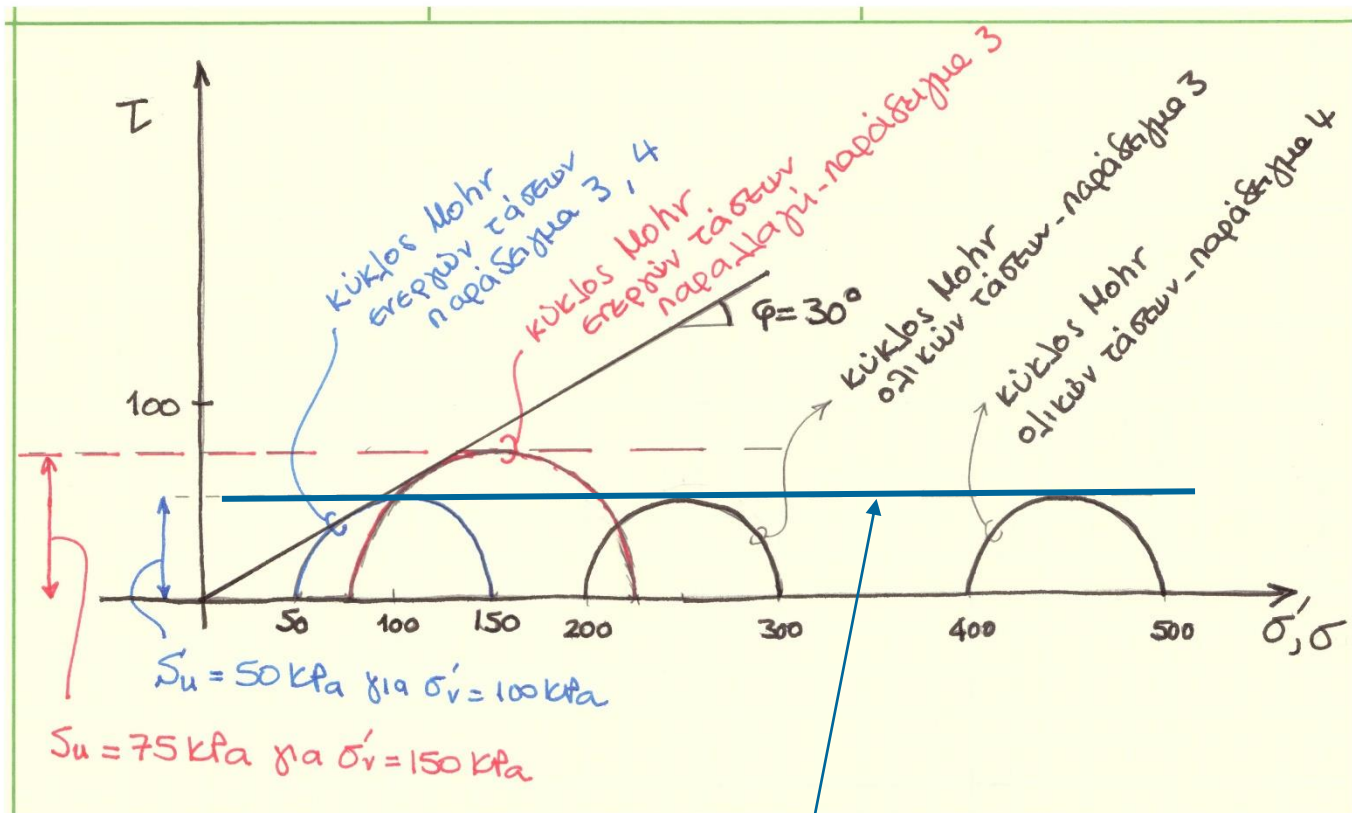
\* στερεοποίηση σε μεγαλύτερη ισοτροπική τάση προσομοιώνει το ίδιο έδαφος σε μεγαλύτερο βάθος

# Παραδείγματα 3 & 4: Περίληψη (σχήμα) και γενίκευση (κείμενο) αποτελεσμάτων (1/3)



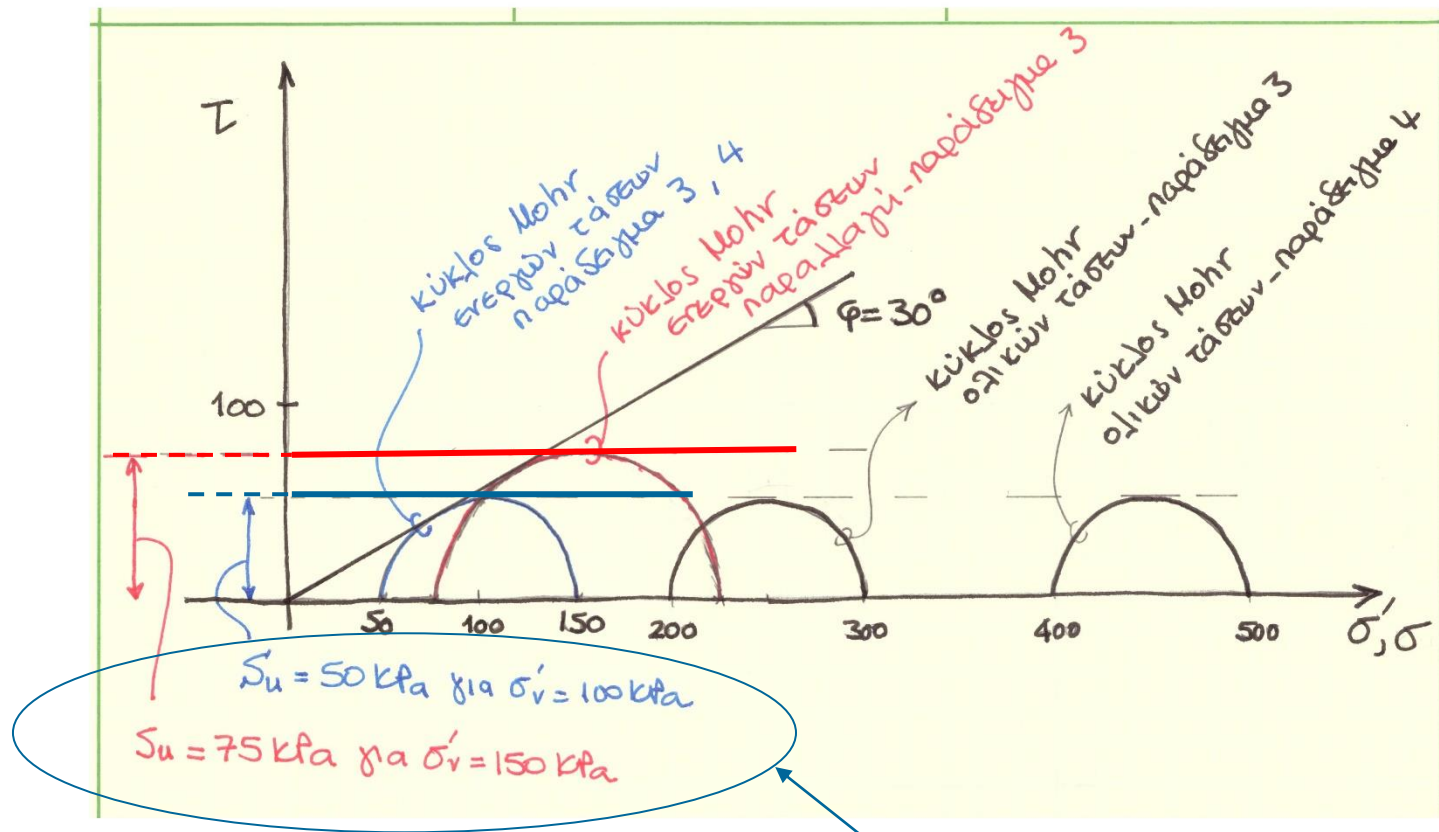
Για δοκίμια στερεοποιημένα στην ίδια τάση, η αύξηση της ιστροπικής τάσης υπό αστράγγιστες συνθήκες **μετατοπίζει** τον, σταθερής ακτίνας, κύκλο Mohr ολικών τάσεων προς τα δεξιά, ενώ ο κύκλος Mohr ενεργών τάσεων παραμένει ο ίδιος.

# Παραδείγματα 3 & 4: Περίληψη (σχήμα) και γενίκευση (κείμενο) αποτελεσμάτων (2/3)



Μπορεί να θεωρηθεί ότι οι “κύκλοι αστοχίας ολικών τάσεων”, δηλαδή οι κύκλοι ολικών τάσεων που αντιστοιχούν στον ίδιο κύκλο αστοχίας ενεργών τάσεων, εφάπτονται σε οριζόντια “περιβάλλουσα ολικών τάσεων”, με  $\varphi_u = 0$  και αστράγγιστη διατμητική αντοχή  $s_u$ .

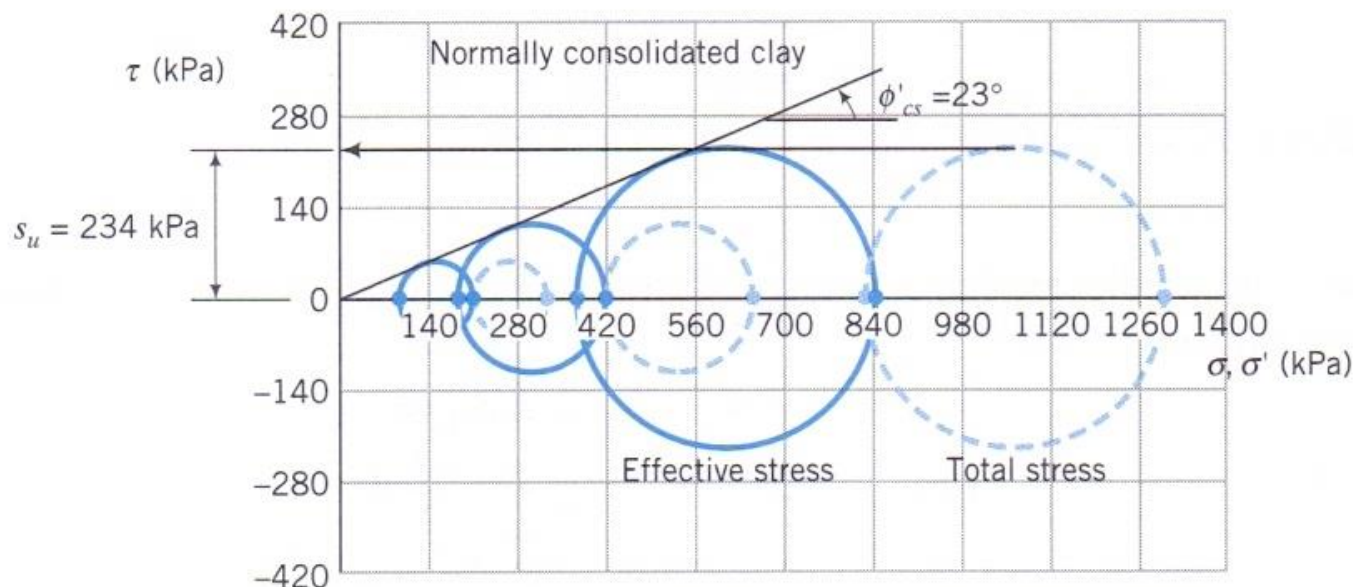
# Παραδείγματα 3 & 4: Περίληψη (σχήμα) και γενίκευση (κείμενο) αποτελεσμάτων (3/3)



- Η αστράγγιστη διατμητική αντοχή  $s_u$  ή  $c_u$  είναι μια μεταβλητή που εξαρτάται από την τάση στερεοποίησης (ή, στο πεδίο, από την αρχική εντατική κατάσταση του δοκιμίου: στο ίδιο έδαφος, **αυξάνει με το βάθος**).
- Συνιστάται ο συμβολισμός  $s_u$  (αντί του  $c_u$ ) για να αποφευχθεί τυχόν παρανόηση ότι η  $s_u$  αντιπροσωπεύει κάποια «συνοχή» υπό αστράγγιστες συνθήκες.



# Αστράγγιστη διατμητική αντοχή $s_u$ : ποια η χρήση της;



- Η **αστράγγιστη διατμητική αντοχή  $s_u$**  είναι ένα **τρικ** στο οποίο αναγκαζόμαστε να καταφύγουμε όταν δεν μπορούμε να υπολογίσουμε τις αλλαγές της πίεσης των πόρων υπό αστράγγιστες συνθήκες, δηλ. για χαμηλής περατότητας εδάφη αμέσως μετά την αλλαγή φόρτισης.
- Την προσδιορίζουμε για ένα βάθος αντιπροσωπευτικό του προβλήματός μας και την χρησιμοποιούμε αποκλειστικά σε αναλύσεις με ολικές τάσεις.

## Τι να συγκρατήσουμε;

- Στο πεδίο, αναλύσεις για αστράγγιστες συνθήκες θα χρειαστεί να κάνουμε αν έχουμε χαμηλής περατότητας εδάφη (αργίλους, ιλύες) για το χρονικό διάστημα που ακολουθεί βραχυπρόθεσμα μετά από αλλαγή εντατικής κατάστασης
  - Αλλαγή εντατικής κατάστασης υπό αστράγγιστες συνθήκες → μεταβολή της αρχικής πίεσης των πόρων,  $u_0$ , κατά  $\Delta u$  (για τριαξονική συμπίεση, μπορεί  $\Delta u > 0$ , πχ μαλακές/NC άργιλοι, ή  $\Delta u < 0$ , πχ στιφρές/OC άργιλοι)
  - Βραχυπρόθεσμα: η απόλυτη τιμή της  $\Delta u$  είναι μέγιστη
  - (Στο ενδιάμεσο διάστημα: η  $\Delta u$  αποτονώνεται, δηλ. η απόλυτη τιμή της μειώνεται)
  - Μακροπρόθεσμα: η  $\Delta u$  τείνει στο μηδέν και η πίεση των πόρων επιστρέφει στην αρχική τιμή της,  $u_0$

## Τι να συγκρατήσουμε; (συνέχεια)

- Στο πεδίο, αναλύσεις για αστράγγιστες συνθήκες θα χρειαστεί να κάνουμε αν έχουμε χαμηλής περατότητας εδάφη (αργίλους, ιλύες) για το χρονικό διάστημα που ακολουθεί βραχυπρόθεσμα μετά από αλλαγή εντατικής κατάστασης
  - Όταν μπορούμε να υπολογίσουμε τις αλλαγές της πίεσης των πόρων λόγω αλλαγών εντατικής κατάστασης (με τις παραμέτρους  $B$  και  $A$ ), δουλεύουμε με ενεργές τάσεις και ελέγχουμε για τυχόν αστοχία σε διάτμηση χρησιμοποιώντας τη γνωστή μας περιβάλλουσα αστοχίας που ορίζεται από τις παραμέτρους διατμητικής αντοχής  $c$  και  $\varphi$

## Τι να συγκρατήσουμε; (συνέχεια)

- Στο πεδίο, αναλύσεις για αστράγγιστες συνθήκες θα χρειαστεί να κάνουμε αν έχουμε χαμηλής περατότητας εδάφη (αργίλους, ιλύες) για το χρονικό διάστημα που ακολουθεί βραχυπρόθεσμα μετά από αλλαγή εντατικής κατάστασης
  - Όταν **δεν** μπορούμε να υπολογίσουμε τις αλλαγές της πίεσης των πόρων λόγω αλλαγών εντατικής κατάστασης, δουλεύουμε με ολικές τάσεις και ελέγχουμε για τυχόν αστοχία σε διάτμηση χρησιμοποιώντας την αστράγγιστη διατμητική αντοχή  $s_u$
- Με τον καιρό (αργά στις αργίλους, αμέσως στις άμμους), οι αλλαγές της πίεσης των πόρων θα αποτονωθούν
  - Ο έλεγχος για τυχόν διατμητική αστοχία σε αυτές τις συνθήκες (δηλ. «μακροπρόθεσμα») απαιτείται για όλα τα εδάφη

# Πηγές υλικού διαφανειών

- Παρουσιάσεις Μ. Καββαδά, Γ. Μπουκοβάλα
- Σχήμα στις διαφάνειες 13, 14: Holtz, R.D. and W.D. Kovacs, 1981, An Introduction to Geotechnical Engineering, Prentice Hall.
- Σχήμα στη διαφάνεια 25: Budhu, M., 2000, Soil Mechanics and Foundations, Wiley.