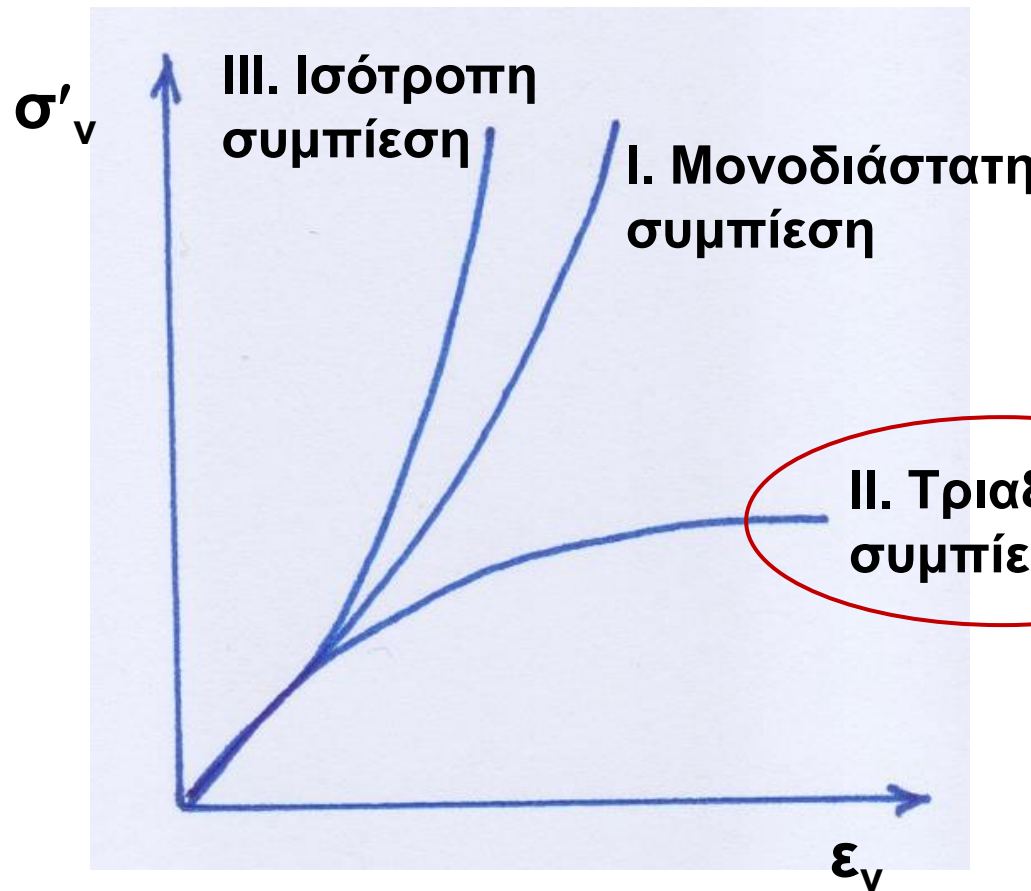


# Μηχανική Συμπεριφορά Εδαφών σε (υπο)κατηγορίες φορτίσεων

**Πλησιάζουμε στο τέλος με:**  
Διατμητική αντοχή

Εισαγωγή: Διατμητική αντοχή & πρακτικά προβλήματα  
Μέρος Α: Ποιοτική προσέγγιση διατμητικής αντοχής  
Μέρος Β: Ποσοτική αποτύπωση διατμητικής αντοχής

# Διατμητική αστοχία & παραμορφώσεις

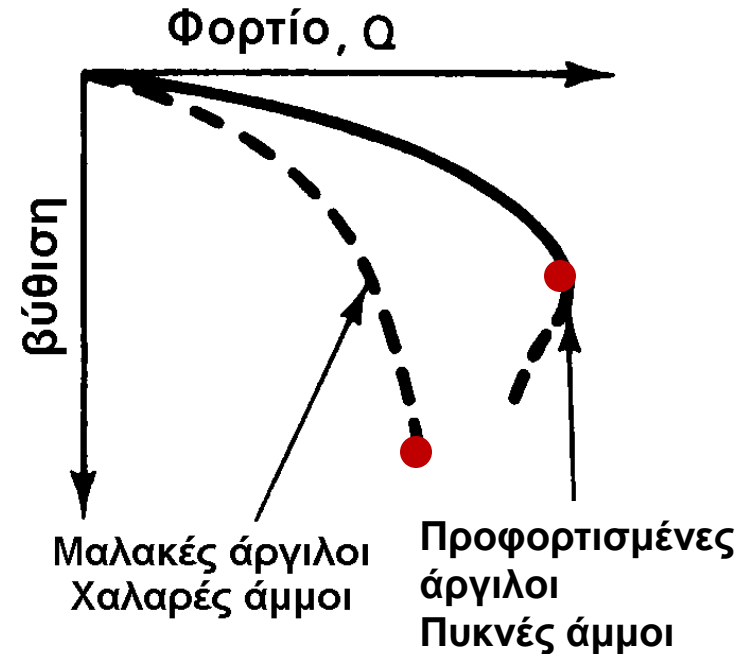
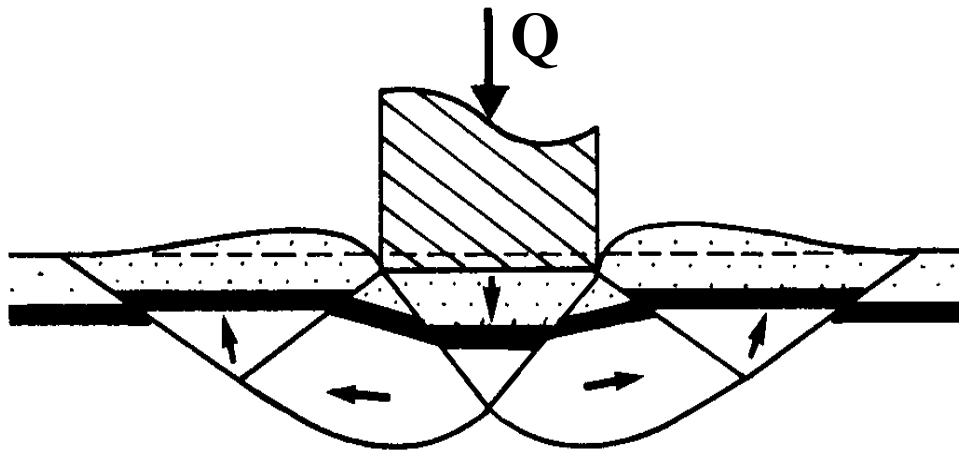


διατμητική  
αστοχία =  
μεγάλες  
παραμορφώσεις  
= αλλαγή  
γεωμετρίας  
εδαφικής μάζας

# Διατμητική αντοχή και πρακτικά προβλήματα: θεμέλια

**Αστοχία:** Η κατάσταση κατά την οποία το έδαφος έχει φθάσει την αντοχή του και δεν μπορεί να αναλάβει πρόσθετα φορτία

## Αστοχία επιφανειακού θεμελίου



Συνέπεια της αστοχίας: πολύ μεγάλη βύθιση θεμελίου, αλλαγή γεωμετρίας εδαφικής μάζας

# Διατμητική αστοχία & καθίζηση θεμελίου

- Το θεμέλιο βυθίζεται, καθώς εκτοπίζει έδαφος που ανυψώνεται πλευρικά: αλλαγή γεωμετρίας εδαφικής μάζας (προσοχή: σε δύο διαστάσεις περιορίζεται η αλλαγή γεωμετρίας)



Καθίζηση: 22mm

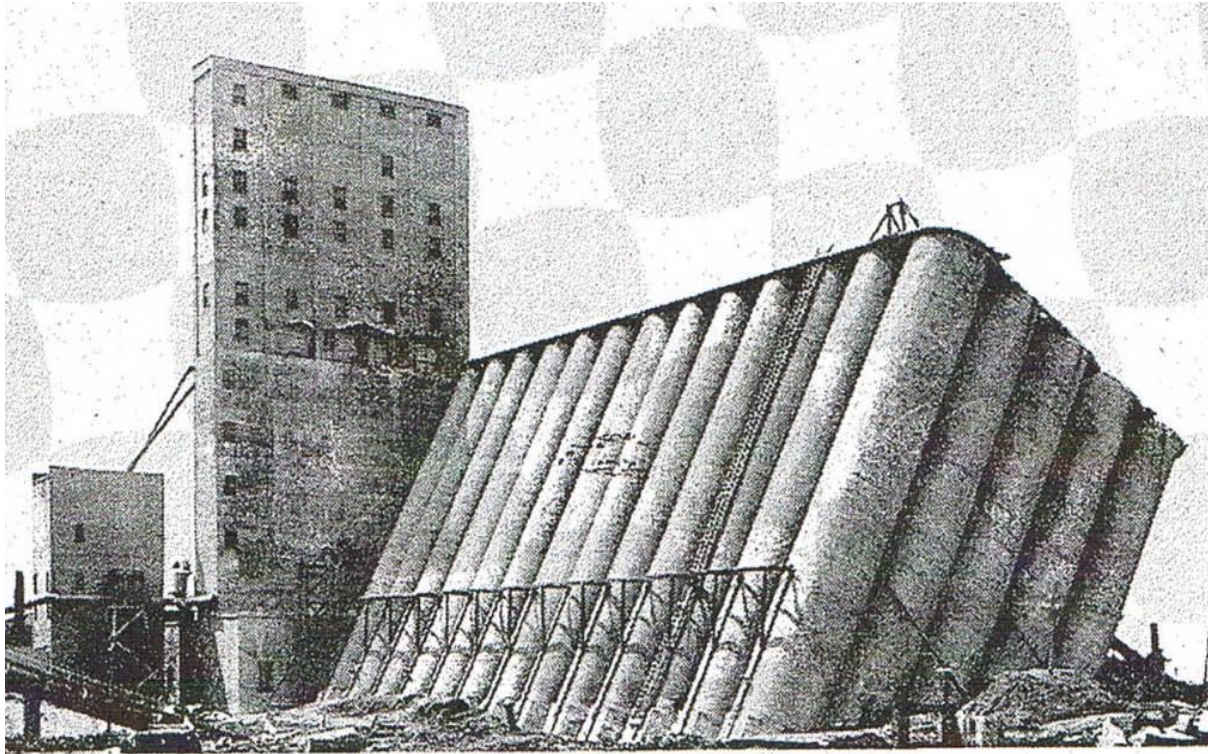


Καθίζηση: 17mm



Καθίζηση: 12mm

# Ιστορική αστοχία αποθήκης σιτηρών στον Καναδά, θεμελιωμένης σε μαλακή άργιλο (1/3)

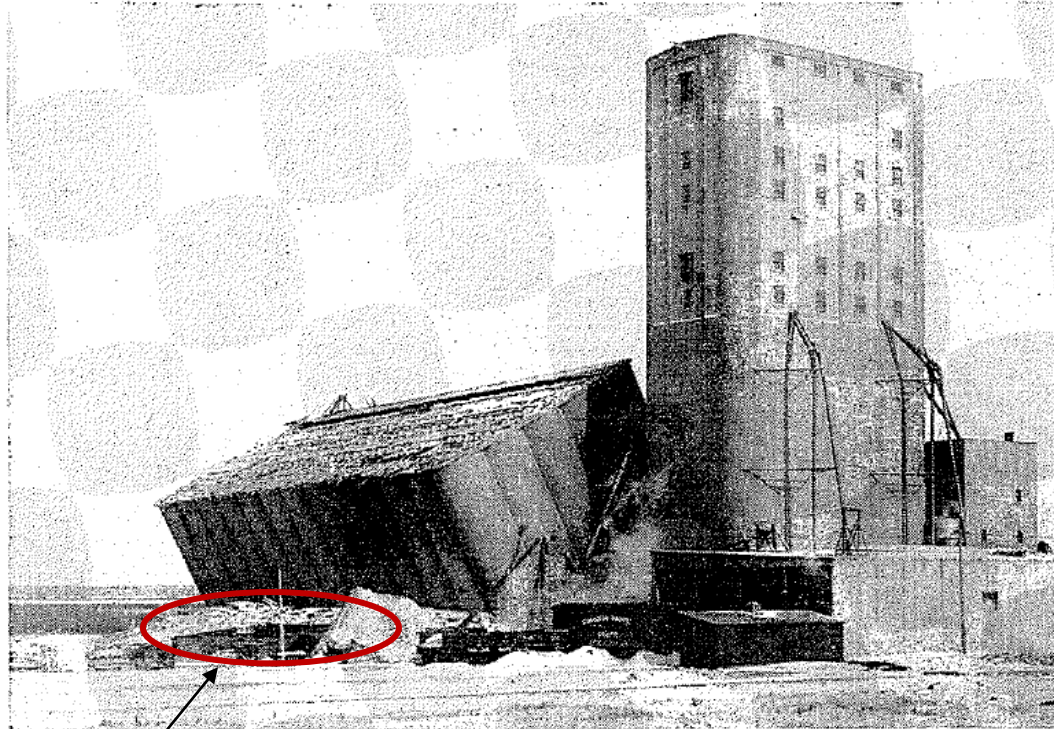


Αποθήκη  
σιτηρών  
Transcona,  
1913:  
υπέρβαση  
διατμητικής  
αντοχής  
(φέρουσας  
ικανότητας)  
αργίλου

Ανατολική όψη (**έχουν αρχίσει εργασίες επαναφοράς της αποθήκης σε κατακόρυφη θέση** – μετά την αποκατάσταση λειτούργησε τουλάχιστον ως το 1956)



# Ιστορική αστοχία αποθήκης σιτηρών στον Καναδά, θεμελιωμένης σε μαλακή άργιλο (2/3)

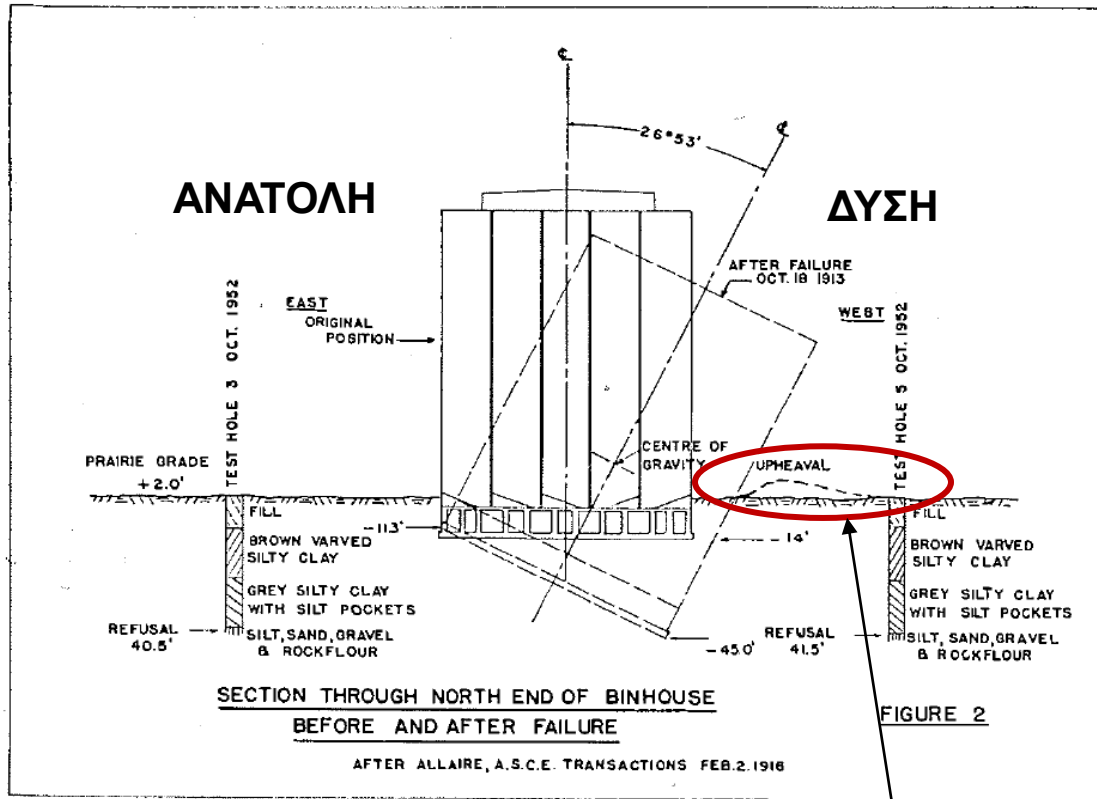


ανύψωση εδάφους

Δυτική όψη

- Αποθήκη  
σιτηρών  
Transcona:
- Κατασκευή:  
άρχισε 1911
    - Χρήση:  
άρχισε Σεπτ.  
1913
  - Αστοχία: 18  
Οκτ. 1913
  - Μελέτη  
αστοχίας:  
1952-1953

# Ιστορική αστοχία αποθήκης σιτηρών στον Καναδά, θεμελιωμένης σε μαλακή άργιλο (3/3)



Αποθήκη  
σιτηρών  
Transcona,  
1913:  
υπέρβαση  
διατμητικής  
αντοχής  
(φέρουσας  
ικανότητας)  
αργίλου

ανύψωση εδάφους – αλλαγή  
γεωμετρίας

## Περιστατικό Transcona – συζήτηση

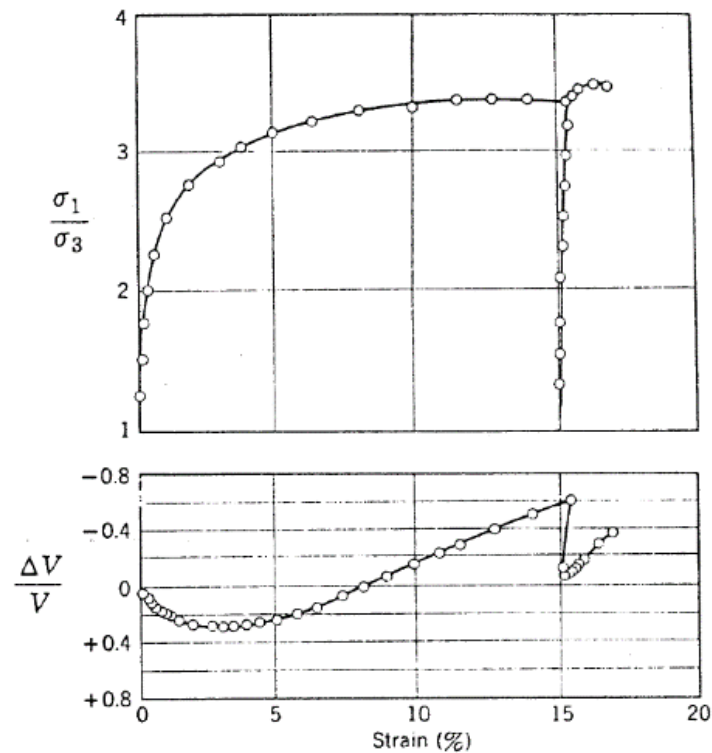
- Ερώτηση: γιατί επανέφεραν στη θέση του το κτήριο σε έδαφος που είχε αστοχήσει; Δεν ξαναέγειρε το κτήριο;
- Τέσσερα σχόλια:
- (α) Εύλογη ερώτηση!
- (β) Μη εδαφομηχανικό σχόλιο: μάλλον στη συνέχεια θα πρόσεχαν να μην γεμίσουν τα σιλό τόσο πολύ.
- (γ) Το μαλακό έδαφος αστόχησε γρήγορα, άρα σε αστράγγιστες συνθήκες. Η όποια επιπλέον στράγγιση σημειώθηκε στη συνέχεια βελτίωσε το έδαφος.
- (δ) Το έδαφος μπορεί να συμπεριφερθεί καλύτερα σε επαναφόρτιση (όπως είδαμε και στη μονοδιάστατη συμπίεση) – βλέπε επόμενη διαφάνεια.



# Περιστατικό Transcona – συζήτηση στην τάξη (συνέχεια)

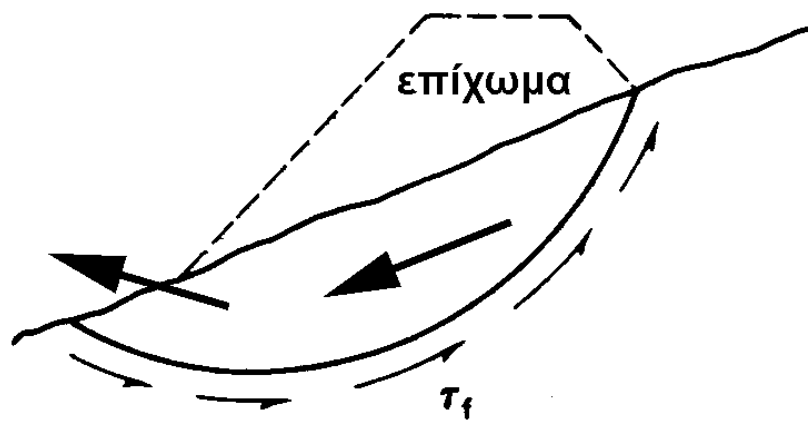
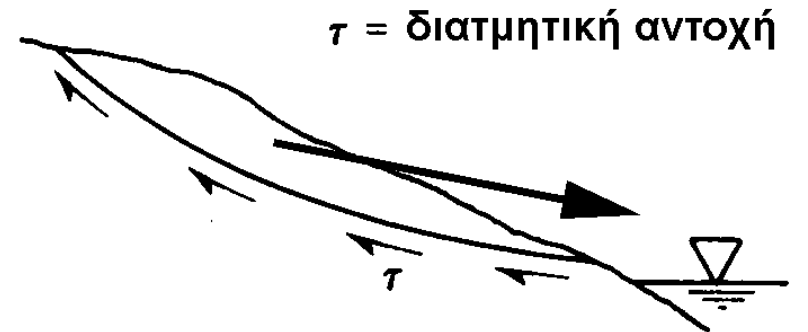
- (δ) Το έδαφος μπορεί να συμπεριφερθεί καλύτερα σε επαναφόρτιση (όπως είδαμε και στη μονοδιάστατη συμπίεση)

Συμπεριφορά πυκνής  
άμμου σε τριαξονική  
αποφόρτιση -  
επιαναφόρτιση



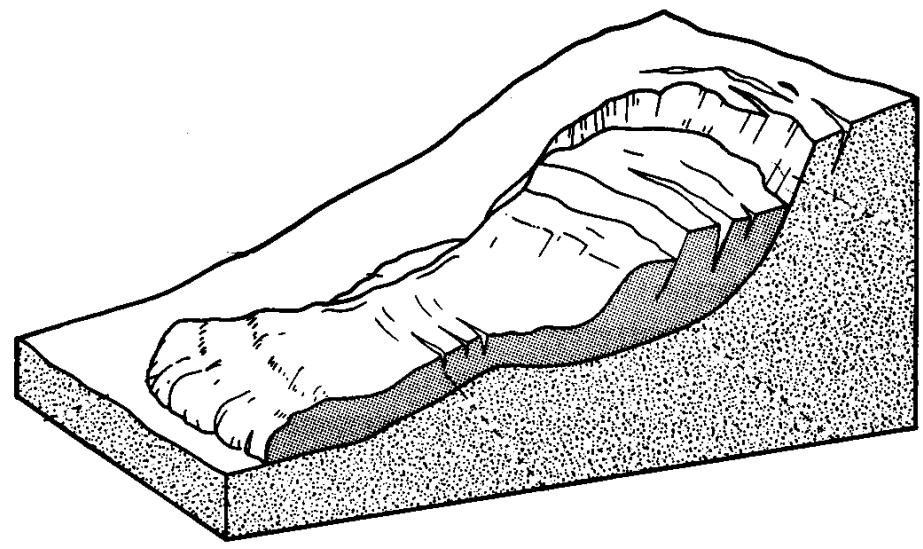
# Διατμητική αντοχή και πρακτικά προβλήματα: πρανή

## Κατολισθήσεις πρανών



$\tau_f$  = διατμητική αντοχή του εδάφους

Κατολίσθηση πρανούς λόγω της κατασκευής του επιχώματος



Το έδαφος αστοχεί όταν οι διατμητικές τάσεις φθάσουν την αντοχή του

Οι διατμητικές τάσεις εξαρτώνται από τις φορτίσεις (ίδιο βάρος του εδάφους, πρόσθετα φορτία, κλπ)

# Φεβρουάριος 2022: σε άρθρα εφημερίδων διαβάσαμε για καθίζηση διπλοκατοικίας στον Νέο Βουτζά



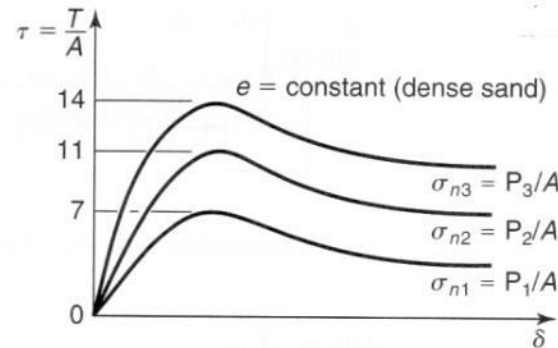
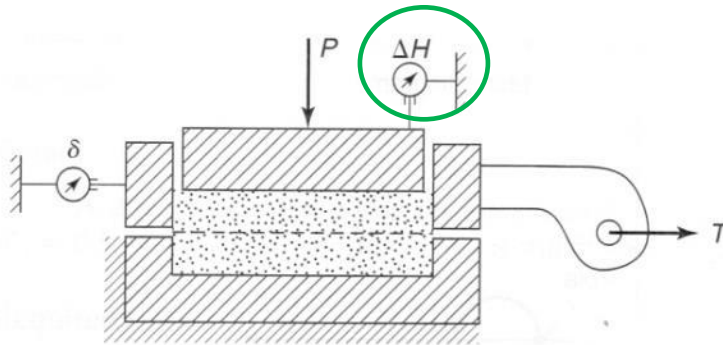
Από εφημερίδα ΝΕΑ (8/2/2022), «Κατολισθητικό φαινόμενο εν εξελίξει», του Σπύρου Καβουνίδη: «Πρώτα – πρώτα ας ξεκαθαριστεί από πλευράς ορολογίας ότι δεν πρόκειται για καθίζηση αλλά για κατολίσθηση.»

## Τι κρατήσαμε (από Ενότητα: Διατμητική Καταπόνηση)

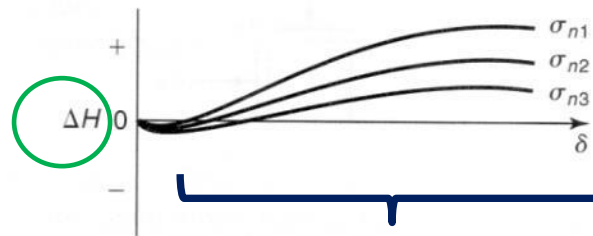
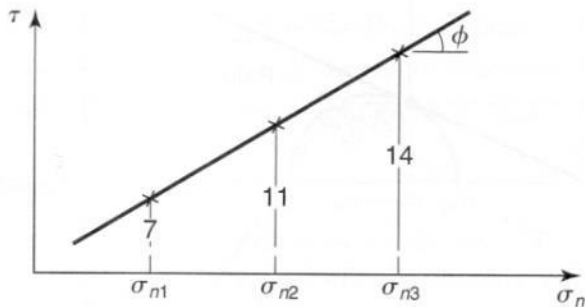
- Οι μορφές των διαγραμμάτων διατμητικής καταπόνησης στις τρεις δοκιμές είναι συγκρίσιμες
- Οι συμπεριφορά άμμων-αργίλων στη διατμητική καταπόνηση μοιάζει στα βασικά χαρακτηριστικά (ποσοτικά διαφέρει)
  - Τα πυκνά εδάφη αρχικά συμπιέζονται ενώ στη συνέχεια διογκώνονται μέχρι να φτάσουν στην κρίσιμη κατάσταση ( $\Delta V=0$ ). Παρουσιάζουν σε μικρή παραμόρφωση μέγιστη διατμητική αντίσταση, η οποία στη συνέχεια μειώνεται έως ότου φτάσει στην αντοχή κρίσιμης κατάστασης.
  - Τα χαλαρά εδάφη συμπιέζονται και φτάνουν σταδιακά στην κρίσιμη κατάσταση ( $\Delta V=0$ ) και στην αντοχή κρίσιμης κατάστασης.

# ΜΕΡΟΣ Α

## Ογκομετρική παραμόρφωση, απ' ευθείας διάτμηση: αλλαγή ύψους δοκιμίου $\Delta H$



τρεις δοκιμές  
στην ίδια  
πυκνή άμμο  
με διαφορετική  
ορθή τάση  
 $\sigma_{n3} > \sigma_{n2} > \sigma_{n1}$



Αύξηση όγκου

Τα αποτελέσματα πολλών δοκιμών δείχνουν ότι η μέγιστη διατμητική τάση αυξάνεται με την αύξηση της ορθής τάσης: αν  $\phi$  η κλίση της ευθείας,  $\tau = \sigma \tan \phi$  (ΣΧΟΛΙΟ: και τα τρία σημεία ακριβώς στην ευθεία = εξιδανίκευση για διδακτικούς σκοπούς)



# Διατμητική αντοχή = αντίσταση σε διάτμηση: Ποιοι μηχανισμοί συμβάλλουν;

- Ποιοτική περιγραφή διατμητικής αντοχής: όσο μεγαλώνει η ενεργός ορθή τάση, τόσο μεγαλύτερη διατμητική τάση μπορεί να αναλάβει το έδαφος
  - γι' αυτό λέμε ότι η διατμητική αντοχή του εδάφους είναι «τύπου τριβής»
- Όταν αυτή η αύξηση μπορεί να προσεγγιστεί με μια ευθεία γραμμή που περνάει από την αρχή των αξόνων (θα δούμε πότε)
  - $\tau = \sigma' \tan \varphi$  **Κριτήριο αστοχίας Coulomb**
  - γωνία εσωτερικής τριβής του εδάφους,  $\varphi$ : η κλίση της ευθείας

# Διατμητική αντοχή: Ποιοι μηχανισμοί συμβάλλουν; ΠΡΟΣΟΧΗ!

- Η διατμητική αντίσταση του εδάφους δεν οφείλεται στην τριβή, αλλά οφείλεται ΚΑΙ στην τριβή
  - γι' αυτό είναι σωστό να λέμε ότι η διατμητική αντοχή είναι «τύπου τριβής» και την γωνία  $\phi$  να την λέμε όχι «γωνία τριβής» αλλά «γωνία εσωτερικής τριβής» ή ακόμα καλύτερα «παράμετρος διατμητικής αντοχής  $\phi$ » (αν και αυτό παραγίνεται μακρύ)
- Για να δούμε γιατί επιμένουμε να κάνουμε αυτήν τη διάκριση
  - ας θυμηθούμε πρώτα πώς παραμορφώνεται το έδαφος

## Από προηγούμενο μάθημα (1/2):

# Επίδραση πυκνότητας – χαρακτηριστικών κόκκων

- Είπαμε ότι θέλουμε το έδαφος να είναι πυκνό (γι' αυτό και σε κάποιες εφαρμογές το συμπυκνώνω), αφού είναι αναμενόμενο σε μια πρώτη προσέγγιση οι μηχανικές ιδιότητες του εδάφους να εξαρτώνται από το πόσο πυκνή είναι η διάταξη των κόκκων
- Στα [βίντεο](#) με τον καθηγητή Burland, είδαμε την επίδραση της κατανομής του μεγέθους των κόκκων (επηρεάζει την πυκνότητα) και του σχήματός τους στο πόσο καθιζάνει θεμέλιο σε σωματιδιακό υλικό που αναπαριστά το έδαφος



Καθίζηση: 22mm



Καθίζηση: 17mm



Καθίζηση: 12mm

# Από προηγούμενο μάθημα (2/2): Ζουμάρω στους κόκκους

- Η στιβαρότητα και η αντοχή του εδάφους εξαρτώνται από το πώς αλληλεπιδρούν οι κόκκοι
- ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ ΚΟΚΚΩΝ
- (1) Ελαστική παραμόρφωση στα σημεία επαφής των εδαφικών κόκκων
- (2) Κάμψη των αργιλικών πλακιδίων
- (3) Συνθλιβή (τοπική) κόκκων στα σημεία επαφής μεταξύ κόκκων
- (4) Θραύση κόκκων
- ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗ ΚΟΚΚΩΝ = ιδιομορφία σωματιδιακών υλικών!!
- (5) Ολίσθηση και κύλιση κόκκων

Ποιοι μηχανισμοί εμπλέκονται;



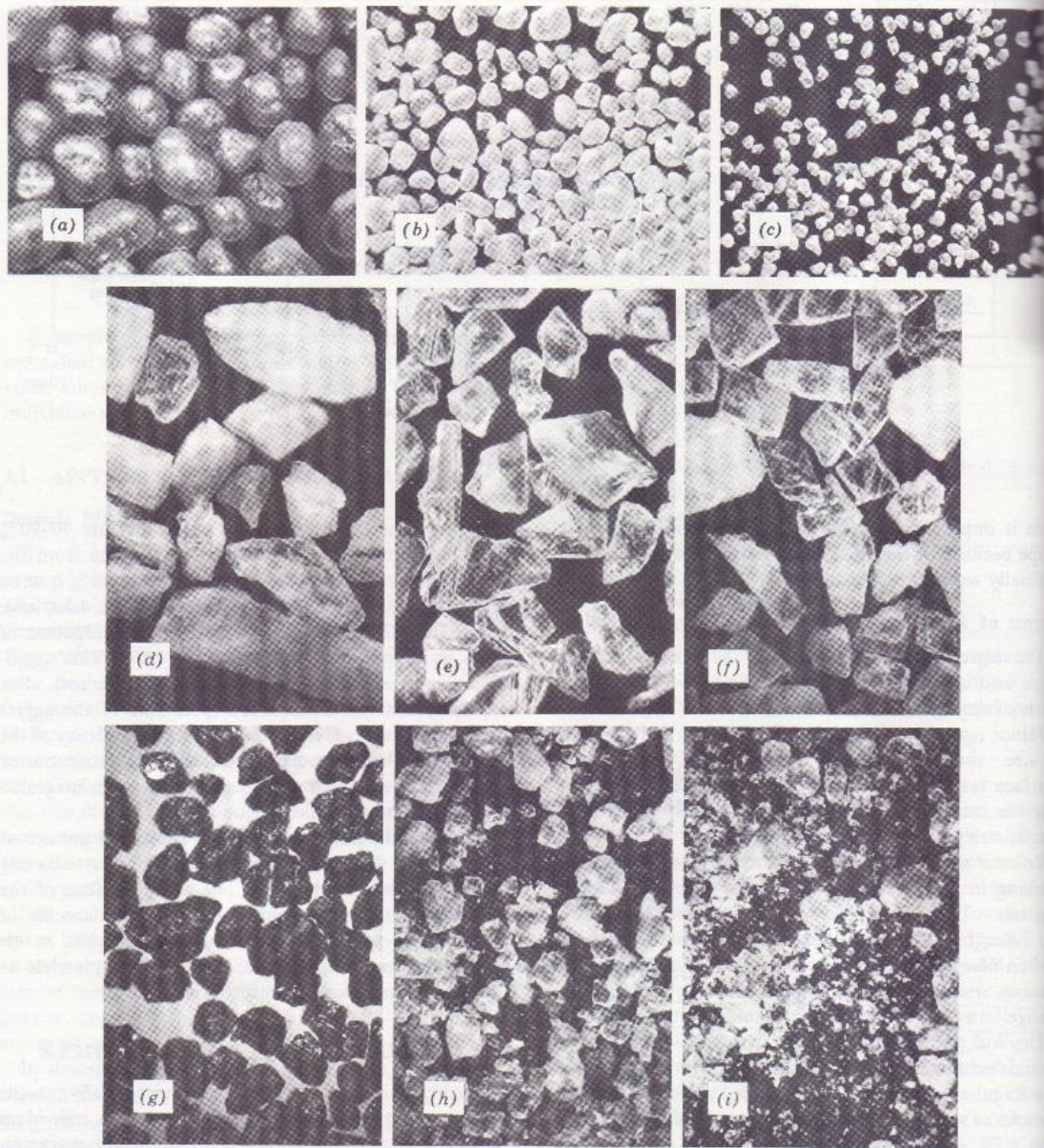
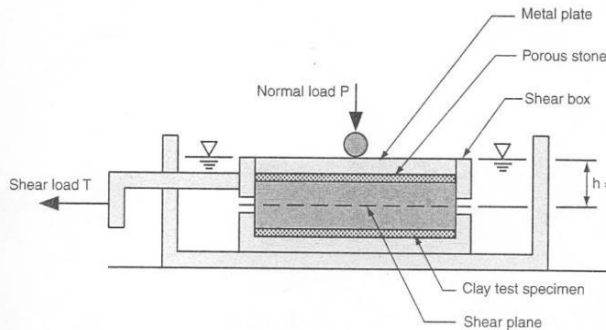


Fig. 4.2 Sand particles. (a) Ottawa sand, 0.42 to 0.84 mm. (b) Ottawa sand, 0.19 to 0.42 mm. (c) Ottawa sand, 0.11 to 0.19 mm. (d) Ground feldspar, 0.19 to 0.42 mm. (e) Ground quartz, 0.19 to 0.42 mm. (f) Ground dolomite, 0.19 to 0.42 mm. (g) Hawaiian beach sand. (h) Venezuelan sand. (i) Venezuelan sand (sand h after compression to 140 MN/m<sup>2</sup>). (From Roberts, 1964.)

Εξετάζοντας  
μόνο τη  
συμβολή του  
σχήματος των  
κόκκων στην  
αντίσταση σε  
διάτμηση, για  
ποιο υλικό  
εκτιμάτε ότι  
είναι μικρότερη;





# Μηχανισμοί αντίστασης στη διατμητική καταπόνηση

Σχετική κίνηση άνω-κάτω τμήματος τείνει να προκαλέσει:

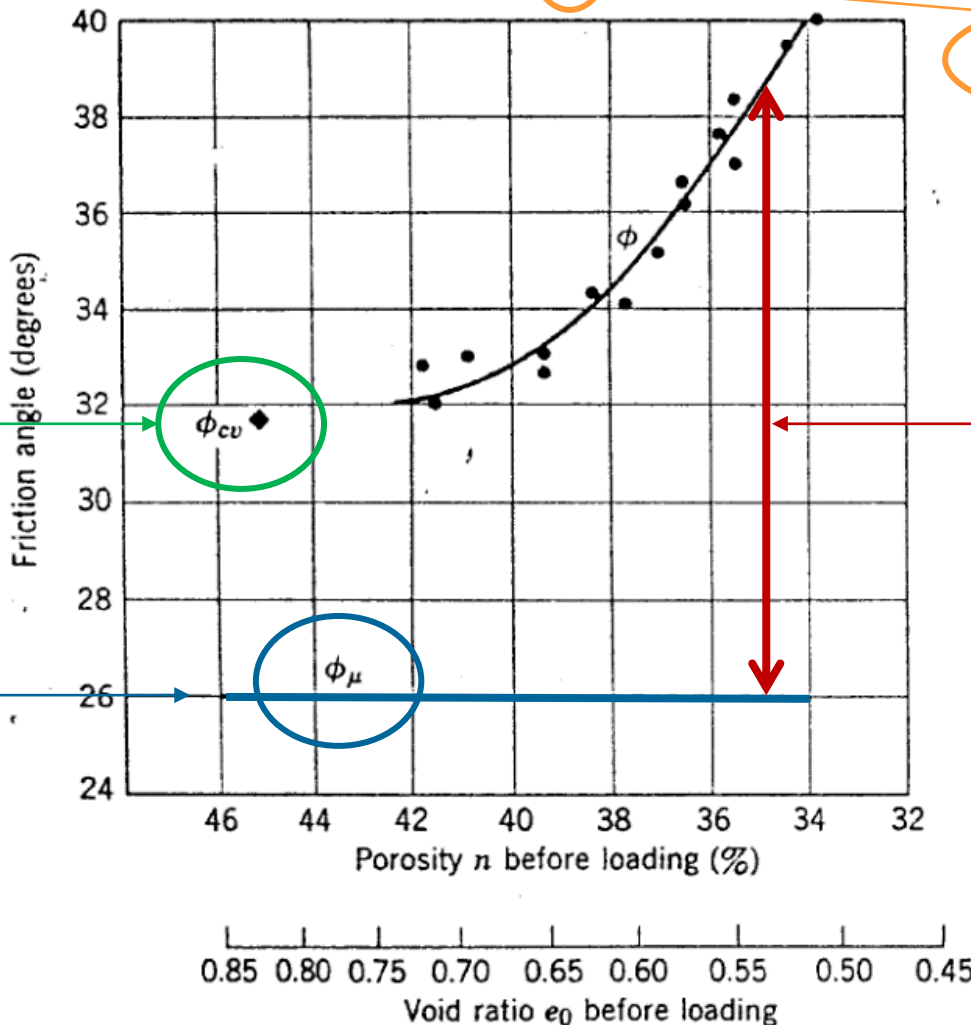
- ολίσθηση γειτονικών κόκκων στα σημεία επαφής
- μετατόπιση (συμπύεση ή διόγκωση)/στροφή κόκκων
- θραύση κάποιων κόκκων (για μεγάλες τιμές  $\sigma'$ )

Ποιος αντιστέκεται στην κίνηση;

- ← • τριβή
- ← • η διάταξη του υλικού (fabric, γεωμετρία)
- ← • αντοχή αρχικού υλικού (πχ βράχος)

# Συμβολή τριβής στην αντίσταση σε διάτμηση

Γράφημα: γωνία  $\phi$  – πορώδες  $n$



$$\tau = \sigma' \tan \phi$$

Η συμβολή της διάταξης του εδάφους: αλληλεμπλοκή και διαστολικότητα

η γωνία  $\phi_{cv}$  αντιστοιχεί στην κρίσιμη κατάσταση, παραμένουσα αντοχή ( $c_v = \text{constant volume}$ )

η συμβολή της τριβής  $\phi_\mu$  του υλικού των κόκκων

# Άλλοι μηχανισμοί αντίστασης σε διάτμηση

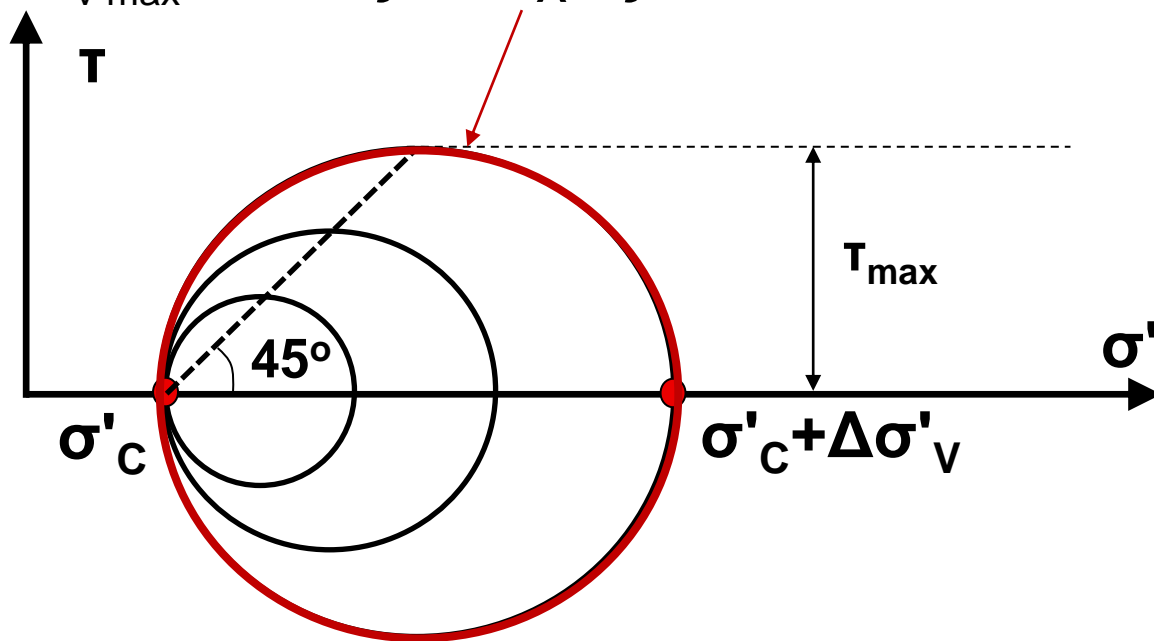
## Μηχανισμοί ανεξάρτητοι της ορθής τάσης

- Σε αργιλικά εδάφη: πραγματική συνοχή (true cohesion) λόγω ελκτικών δυνάμεων μεταξύ των πλακιδίων
  - πολύ μικρή για να μπορεί να μετρηθεί ή να έχει πρακτική σημασία (λίγα kPa)
- Δέση του υλικού: (αν υπάρχουν) δεσμοί μεταξύ κόκκων
  - σιμέντωση, πχ λόγω ύπαρξης ανθρακικού ασβεστίου

Σχόλιο ορολογίας: **δομή** υλικού = **διάταξη** + **δέση**

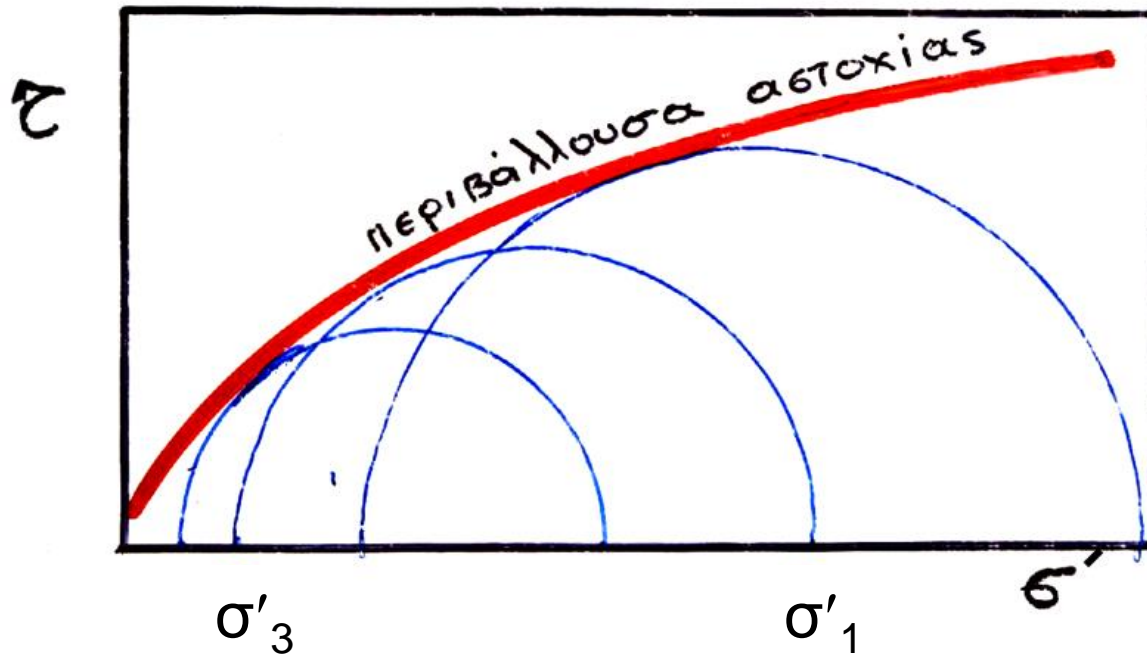
## Είδαμε ότι στην τριαξονική δοκιμή, ο κύκλος Mohr ξεκινάει από σημείο και φτάνει σε μια μέγιστη διάμετρο στην αστοχία

- Για σταθερή ολόπλευρη τάση  $\sigma'_c = \sigma'_3$ , αυξανόμενη  $\Delta\sigma'_v = \sigma'_1 - \sigma'_3$
- Για  $\Delta\sigma'_{v \max}$ : κύκλος αστοχίας



# Κριτήριο αστοχίας Mohr

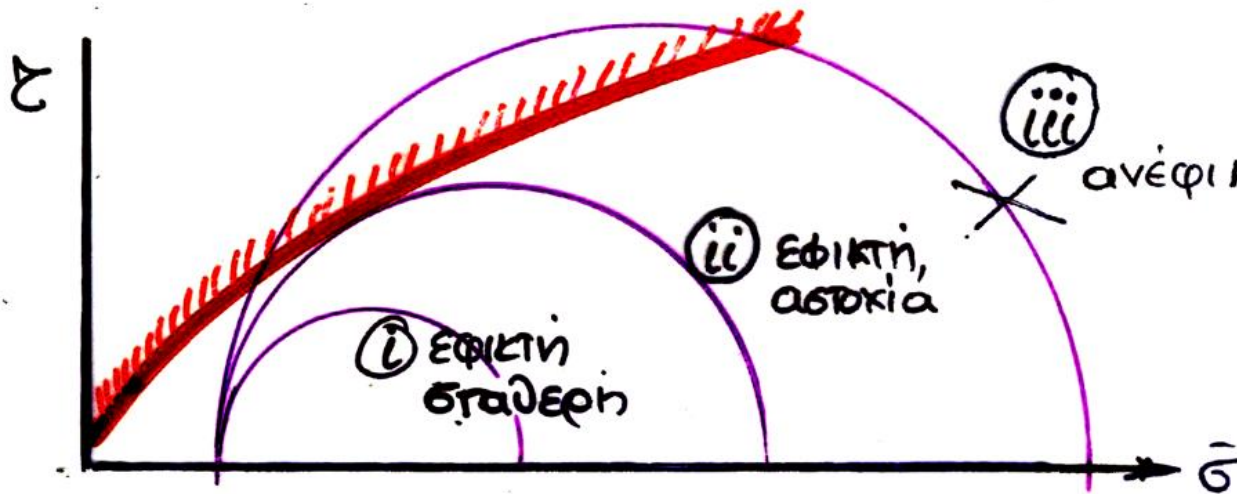
- Οι κύκλοι Mohr των ενεργών τάσεων αστοχίας εφάπτονται μίας κοινής περιβάλλουσας αστοχίας.





# Κριτήριο αστοχίας Mohr (συνέχεια)

- Η περιβάλλουσα αστοχίας ορίζει τρεις περιοχές τάσεων:



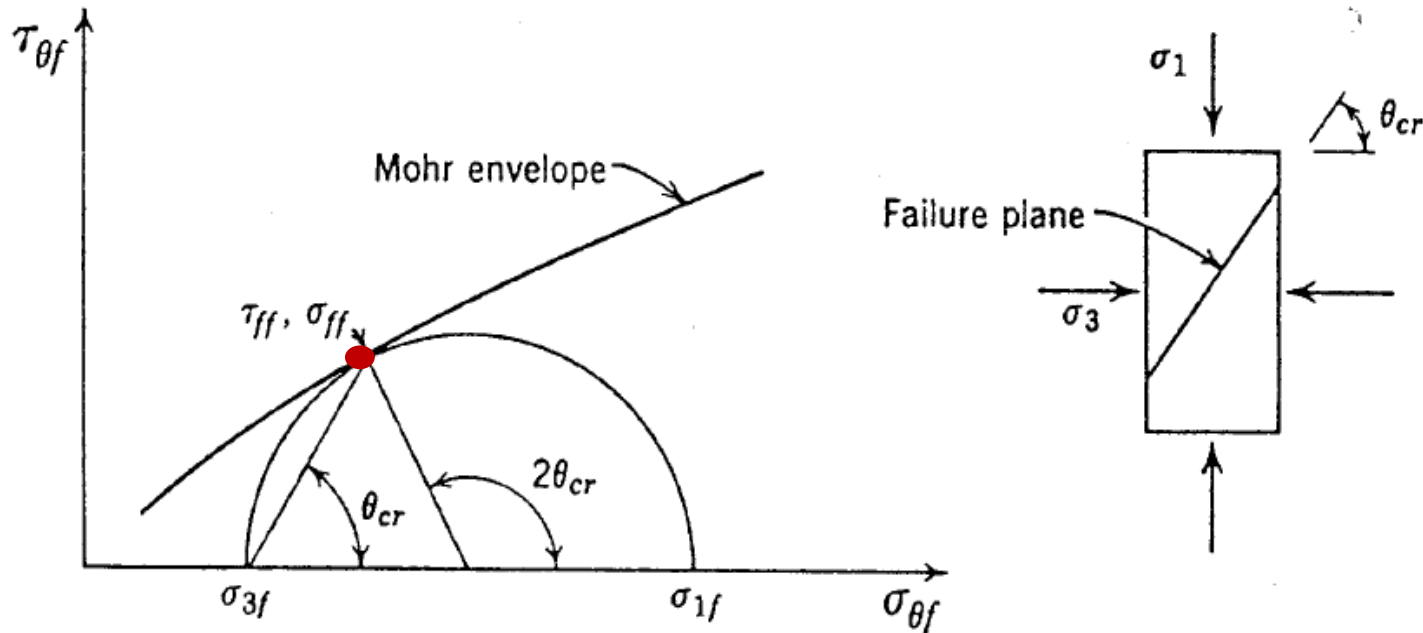
(i) **εφικτή – σταθερή**

(ii) **εφικτή – αστοχία**

(iii) **ανέφικτη**

- Η περιβάλλουσα αστοχίας είναι ανεξάρτητη από τον τρόπο φόρτισης, τις συνοριακές συνθήκες, την ύπαρξη νερού, κλπ
- Ίδια περιβάλλουσα αστοχίας για διαφορετικές δοκιμές

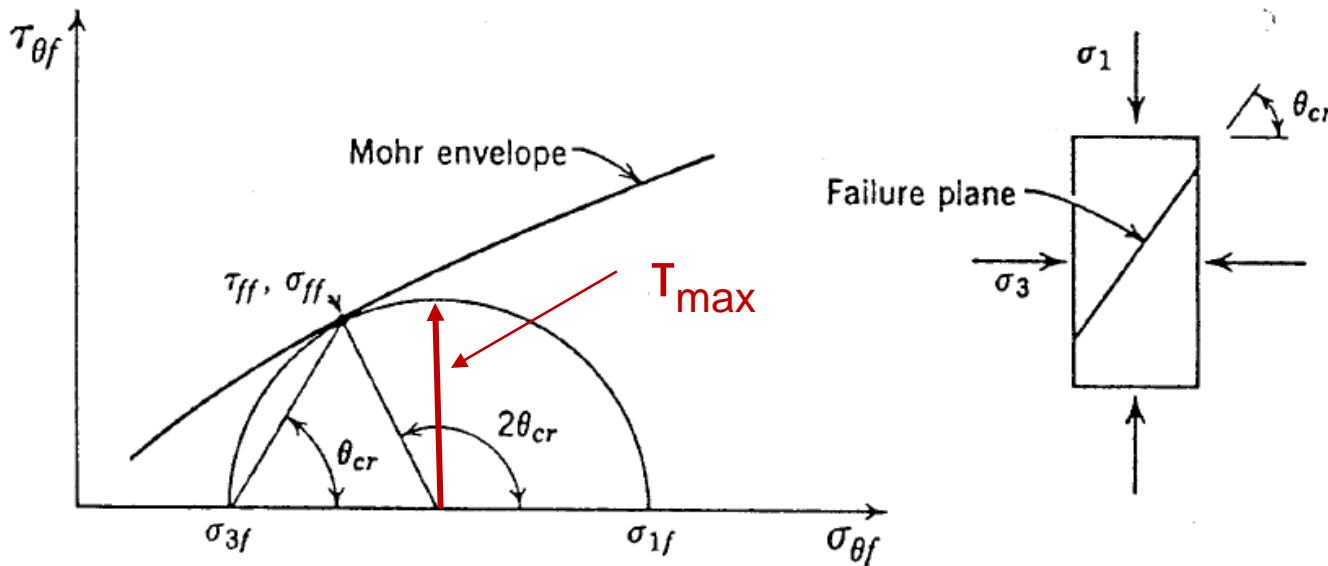
# Περιβάλλουσα αστοχίας & επίπεδο αστοχίας



- Το σημείο επαφής της περιβάλλουσας αστοχίας με τον κύκλο Mohr δίνει το επίπεδο αστοχίας = επίπεδο με τον συνδυασμό  $\tau_{ff}$  και  $\sigma'_{ff}$  που προκαλεί αστοχία

# Περιβάλλουσα αστοχίας & επίπεδο αστοχίας (συνέχεια)

- Το έδαφος δεν αστοχεί στο επίπεδο της μέγιστης διατμητικής αντοχής – πώς το εξηγούμε αυτό στον εαυτό μας;



- Η αντοχή του εδάφους εξαρτάται από την ενεργό ορθή τάση: ο συνδυασμός  $T_{max} = (\sigma'_1 - \sigma'_3)/2$ ,  $\sigma' = (\sigma'_1 + \sigma'_3)/2$  δεν είναι οριακός, σε αυτό το επίπεδο το έδαφος έχει ακόμα αποθέματα αντοχής

# Δοκίμια που έχουν αστοχήσει σε διάτμηση (υπότιτλος διαφάνειας: ιστορικά πειράματα)

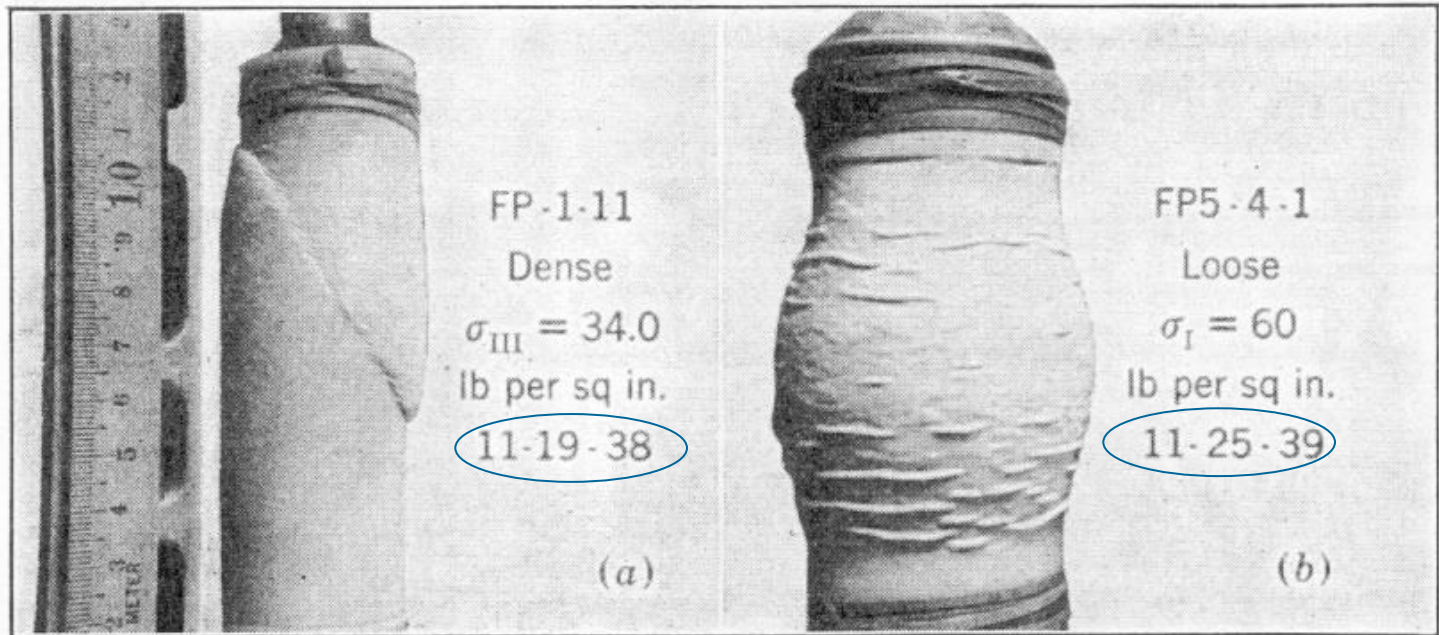


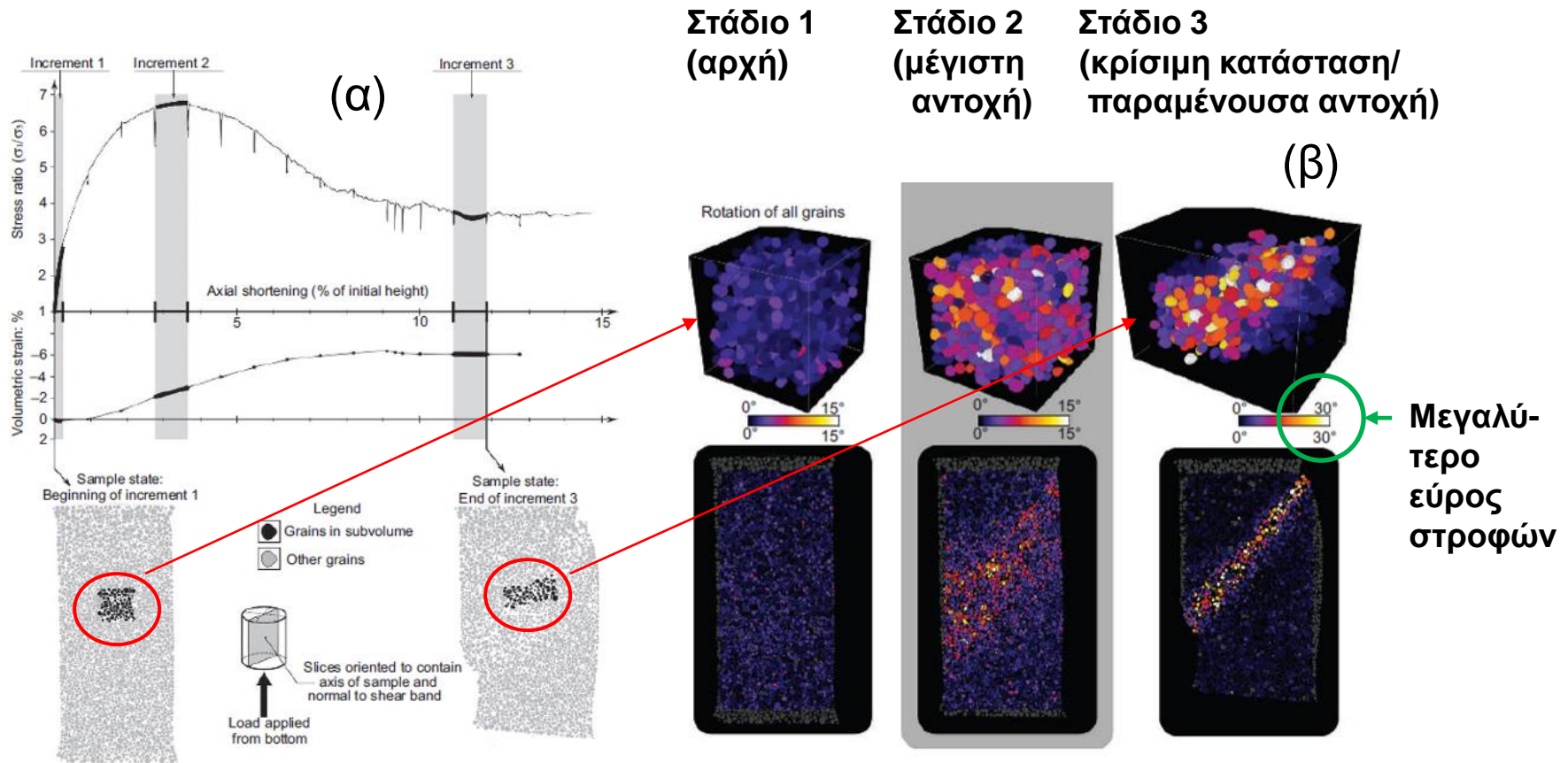
FIG. 14-4 Failed specimens from cylindrical compression tests (Fort Peck sand).

Πυκνή άμμος: διακριτή  
επιφάνεια αστοχίας -  
ολίσθησης

Χαλαρή άμμος

# Διάτμηση & αστοχία στην κλίμακα των κόκκων

(υπότιτλος διαφάνειας: πρόοδος της Εδαφομηχανικής)



(α) Διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων και παραμορφωμένο σχήμα πυκνού εδαφικού δοκιμίου υποβαλλόμενου σε τριαξονική καταπόνηση (διακριτή περιοχή συγκέντρωσης τάσεων = αστοχίας) και (β) στροφή (σε μοίρες) μεμονωμένων σωματιδίων στην αρχή της δοκιμής, στη μέγιστη αντοχή και στην παραμένουσα αντοχή.



# Κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb

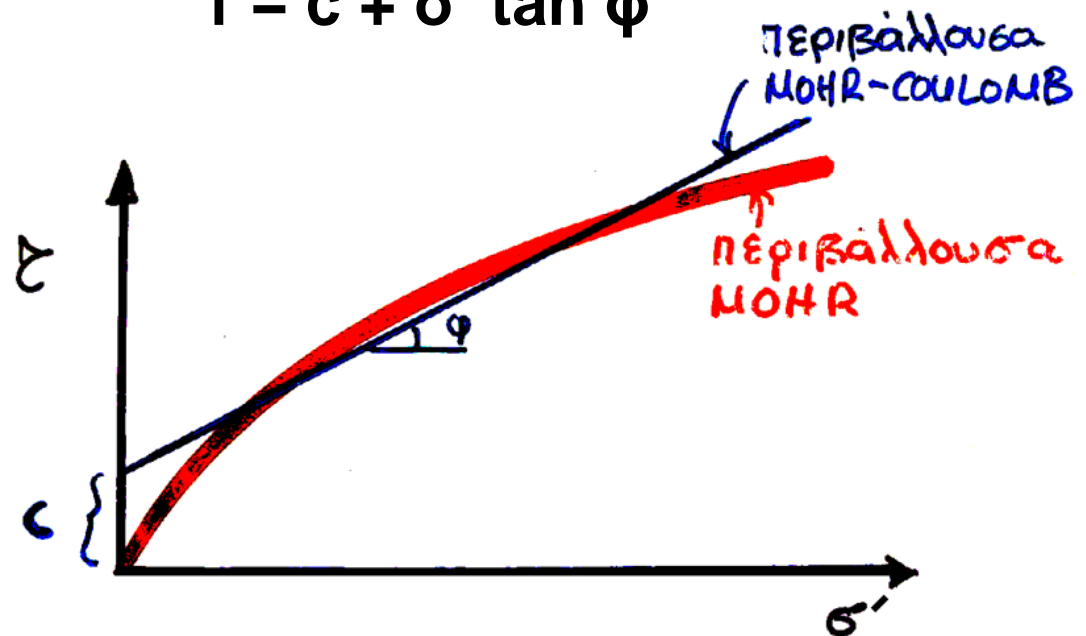
- Για αναλυτικούς υπολογισμούς, είναι πρακτική η προσέγγιση της περιβάλλουσας αστοχίας με μία ευθεία γραμμή

Οι πιο συχνοί όροι:

$\varphi$  = γωνία  
εσωτερικής τριβής  
(angle of internal  
friction)

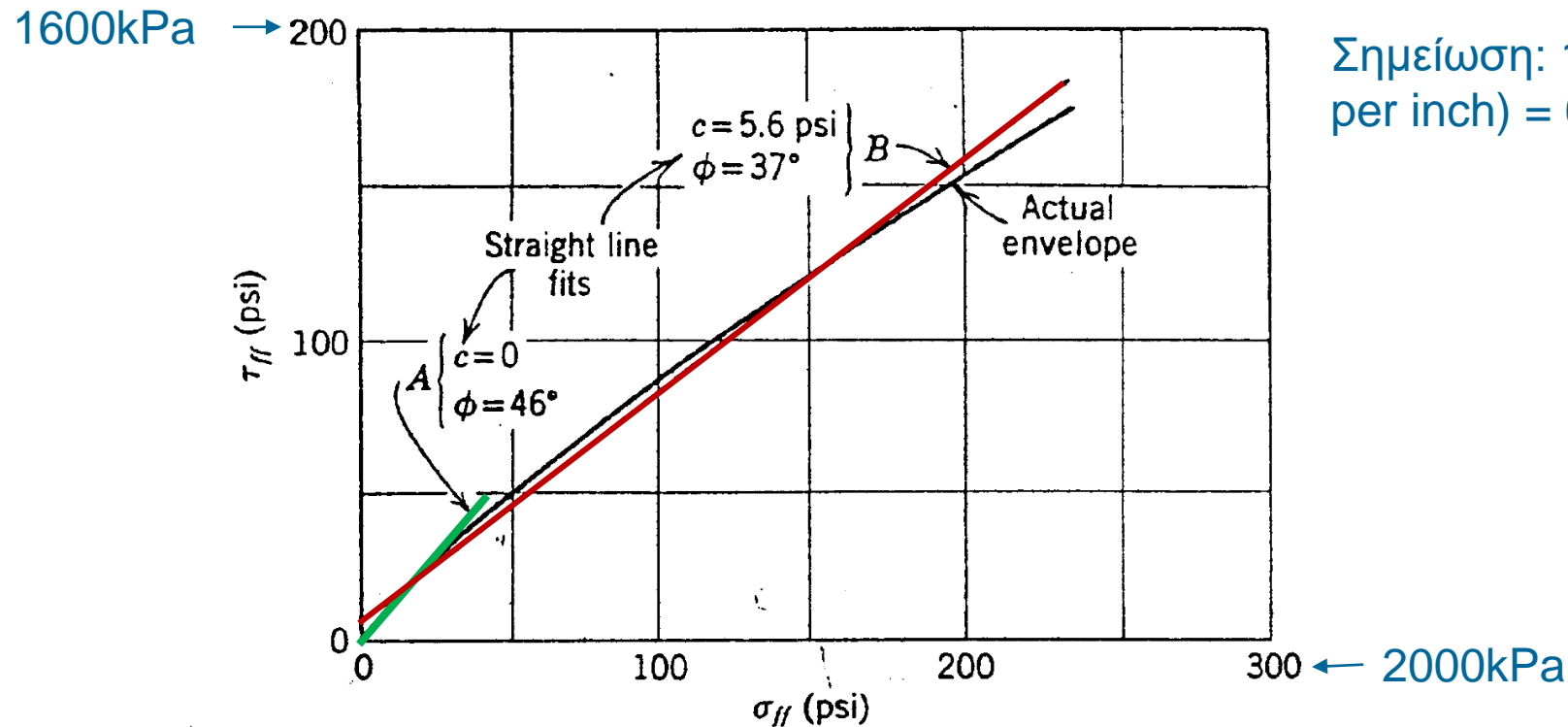
$c$  = συνοχή σε kPa  
(cohesion intercept =  
τεταγμένη για  $\sigma' = 0$ )

$$\tau = c + \sigma' \tan \varphi$$



Εναλλακτικά: παράμετροι διατμητικής αντοχής  $c$  και  $\varphi$

# Οι παράμετροι $c$ , $\phi$ της γραμμικής προσέγγισης εξαρτώνται από το εύρος των τάσεων που ενδιαφέρει

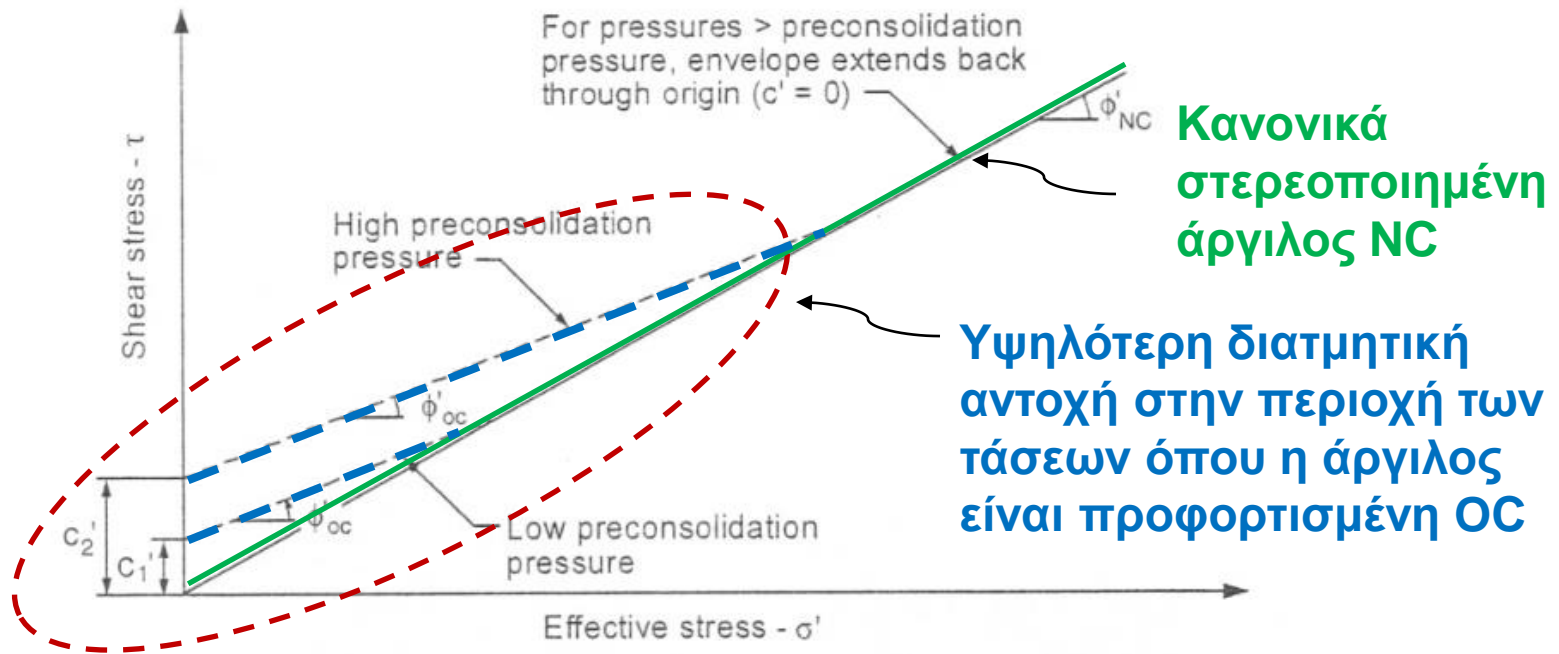


Προσεγγίσεις περιβάλλουσας με ευθεία γραμμή για αμμοχάλικο:

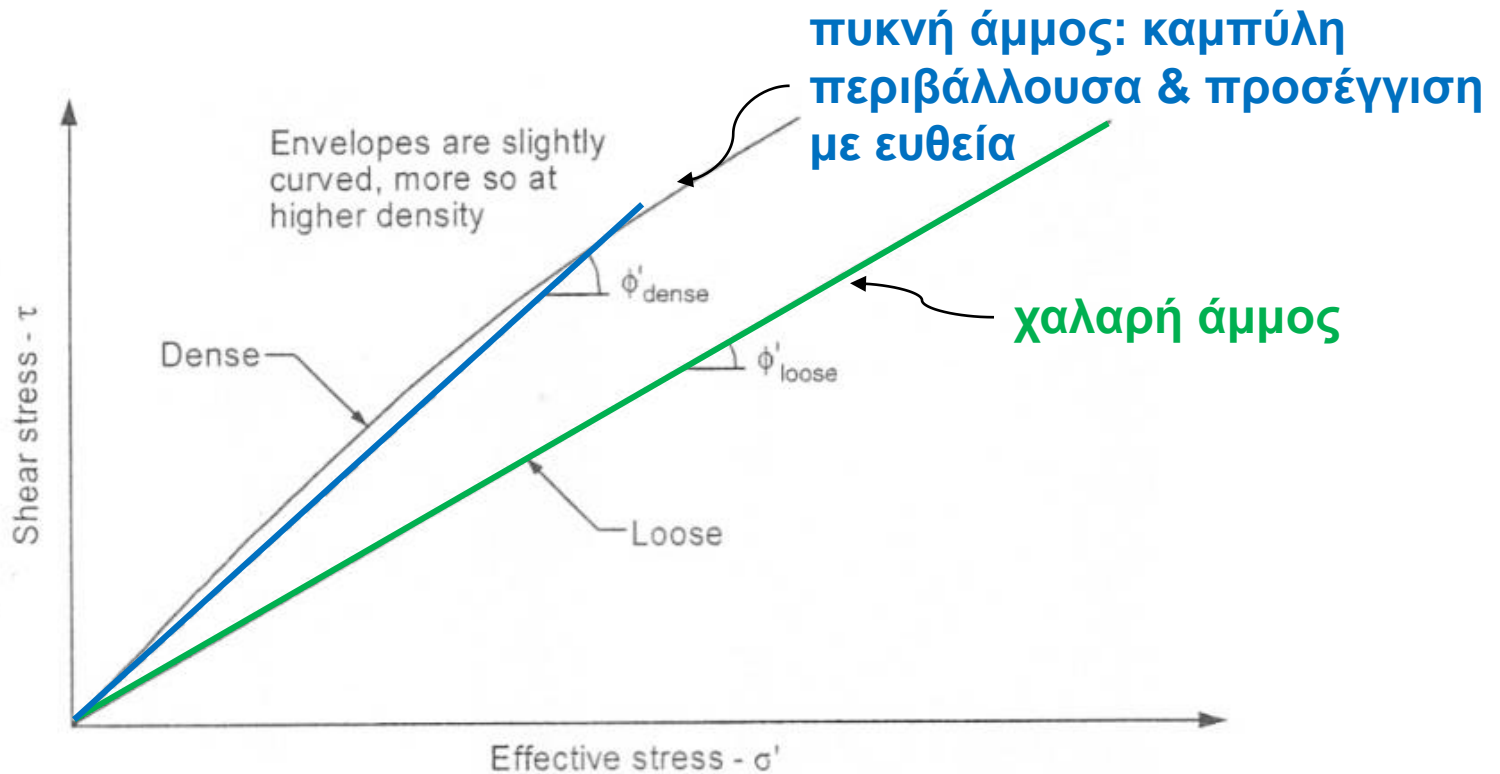
$\sigma = 0 - 175 \text{ kPa}: c = 0, \phi = 46^\circ$

$\sigma = 0 - 1400 \text{ kPa}: c = 38.8 \text{ kPa}, \phi = 37^\circ$

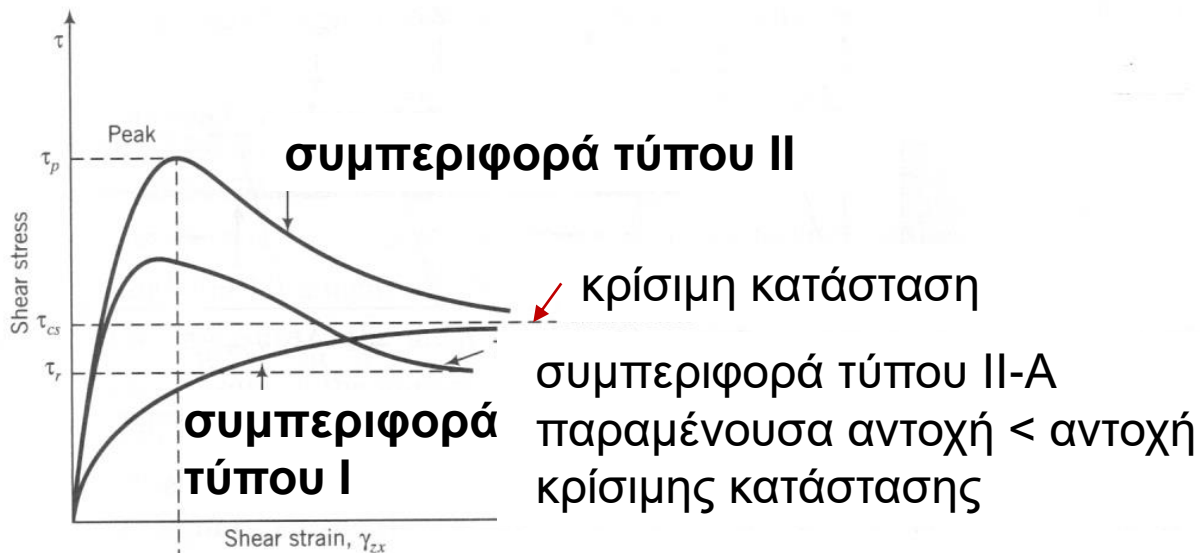
# Απεικόνιση διατμητικής αντοχής: Περιβάλλουσα αστοχίας - άργιλοι



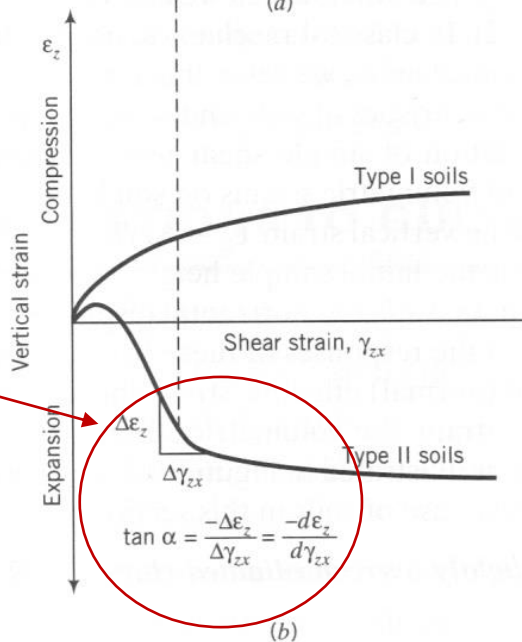
# Απεικόνιση διατμητικής αντοχής: Περιβάλλουσα αστοχίας - άμμοι



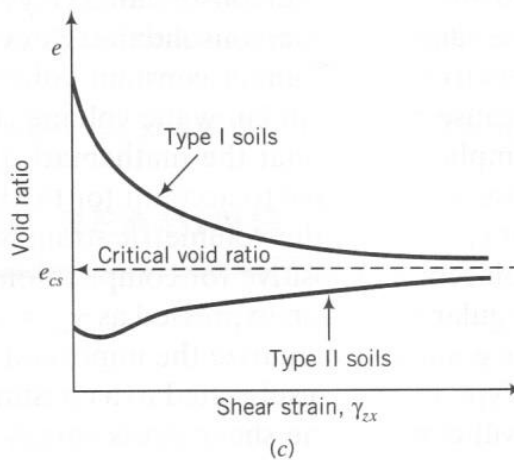
# Διατμητική καταπόνηση & αντοχή: τύπος I & II



συμπεριφορά τύπου II-A  
 παραμένουσα αντοχή < αντοχή  
 κρίσιμης κατάστασης



μέτρο της  
 διαστολικότητας





# Τι να κρατήσουμε

- Η διατμητική αντοχή συναρτάται με την ορθή ενεργό τάση και την πυκνότητα
- Το έδαφος αστοχεί για κρίσιμους συνδυασμούς  $\tau$  και  $\sigma'$
- Οι κρίσιμοι αυτοί συνδυασμοί ορίζουν μια καμπύλη, στη γενική περίπτωση, περιβάλλουσα αστοχίας στο επίπεδο  $\tau$  και  $\sigma'$ 
  - Οι κύκλοι Mohr αστοχίας εφάπτονται στην περιβάλλουσα αστοχίας
- Όταν προσεγγίζουμε την περιβάλλουσα αστοχίας με μία ευθεία γραμμή, με κλίση  $\varphi$  και τεταγμένη  $c$  στον άξονα  $\tau$ :
  - Για άμμους και NC αργίλους:  $c=0$ ,  $\varphi \neq 0$
  - Για OC αργίλους (και καμπύλες περιβάλλουσες):  $c \neq 0$ ,  $\varphi \neq 0$

## Πού να προσέξουμε

- Όταν προσεγγίζουμε την περιβάλλουσα αστοχίας με μία ευθεία γραμμή, με κλίση  $\varphi$  και τεταγμένη  $c$  στον άξονα  $\tau$ :
  - Για άμμους και NC αργίλους:  $c=0$ ,  $\varphi \neq 0$
  - Για OC αργίλους (και καμπύλες περιβάλλουσες):  $c \neq 0$ ,  $\varphi \neq 0$
- Προσοχή! Η (φαινόμενη) συνοχή  $c$  δεν είναι χαρακτηριστικό των αργιλικών εδαφών
  - Δεν ξεχνάμε ότι η πραγματική συνοχή των αργιλικών εδαφών είναι πολύ μικρή για να έχει πρακτική σημασία – δεν είναι το ίδιο μέγεθος με την τεταγμένη  $c$
  - Γι' αυτό είπαμε στο πρώτο εισαγωγικό μάθημα ότι θα αποφύγουμε τη χρήση του όρου «συνεκτικά εδάφη» για τις αργίλους

## Πού να προσέξουμε (συνέχεια)

- Όταν προσεγγίζουμε την περιβάλλουσα αστοχίας με μία ευθεία γραμμή, με κλίση  $\varphi$  και τεταγμένη  $c$  στον άξονα  $\tau$ :
  - Για NC αργίλους και χαλαρές άμμους:  $c=0$ ,  $\varphi \neq 0$
  - Για OC αργίλους και πυκνές άμμους:  $c \neq 0$ ,  $\varphi \neq 0$
- Προσοχή! Η τεταγμένη  $c$  της ευθείας περιβάλλουσας αστοχίας για  $\sigma' = 0$  δεν αντιστοιχεί σε διατμητική αντοχή του εδάφους για  $\sigma' = 0$ 
  - Με την εξαίρεση της σιμέντωσης, το κορεσμένο έδαφος δεν έχει διατμητική αντοχή για  $\sigma' = 0$

# Πηγές υλικού διαφανειών

- Παρουσιάσεις Μ. Καββαδά, Γ. Μπουκοβάλα
- Φωτογραφίες στις διαφάνειες 4 & 16: Burland, J.B., 2014, Bare Essentials of Soil Mechanics: The effect of particle size and shape on soil strength, διαθέσιμο στο: [https://www.youtube.com/watch?v=qY\\_PRCmg85E](https://www.youtube.com/watch?v=qY_PRCmg85E) (ημερομηνία πρόσβασης: 6-5-2022)
- Φωτογραφίες-σχήμα στις διαφάνειες 5-7: Baracos, A., 1957, Foundation failure of the Transcona grain elevator, Engineering Journal, 40, 7, pp. 973-977, 990, 1957-10-01.
- Σχήματα στις διαφάνειες 9, 20, 30 και φωτογραφία στη διαφάνεια 18: Lambe, T.W. and R.V. Whitman, 1969, Soil Mechanics, Wiley.
- Φωτογραφία στη διαφάνεια 11: [Εφημερίδα Καθημερινή](#), 8 Φεβρουαρίου 2022
- Σχήμα στη διαφάνεια 13: Holtz, R.D., W.D. Kovacs and T.C. Sheahan, 2011, An Introduction to Geotechnical Engineering, 2<sup>nd</sup> Ed. (1<sup>st</sup> Ed. 1981), Pearson.
- Σχήμα στη διαφάνεια 19, 31, 32: Duncan, J.M. and Wright, S.G., 2005, Soil Strength and Soil Stability, Wiley.
- Φωτογραφία στη διαφάνεια 27: Taylor, D.W., 1948, Fundamentals of Soil Mechanics, Wiley.
- Σχήματα στη διαφάνεια 28: Andò, E., S.A. Hall, G. Viggiani, J. Desrues & P. Bésuelle, 2012, Experimental micromechanics: grain-scale observation of sand deformation, Géotechnique Letters, 2:107-122.
- Σχήματα στις διαφάνειες 33: Budhu, M., 2011, Soil Mechanics and Foundations, 3<sup>rd</sup> Ed. (1<sup>st</sup> Ed. 2000), Wiley.