

E<sub>3</sub>

## Θλίψη Σκυροδέματος

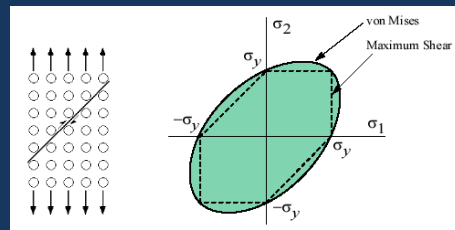
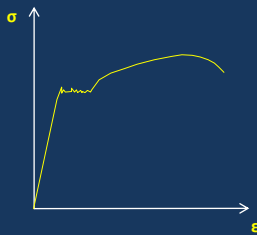
Δρ. Σωτήρης Δέμης



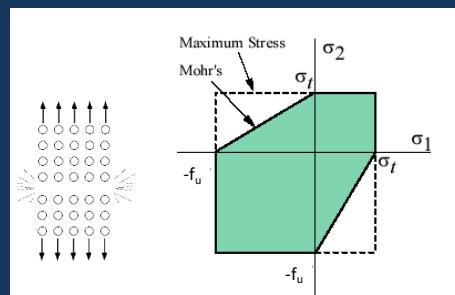
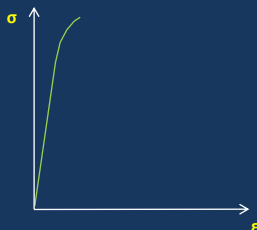
1

Έως τώρα ...

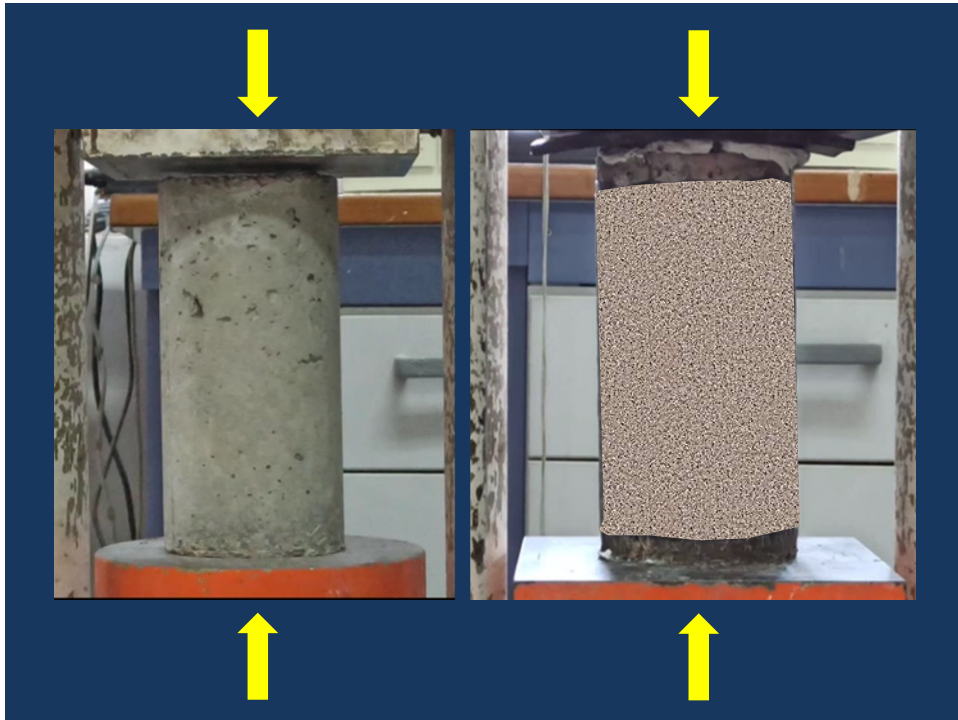
- Καταστατικός νόμος όλκιμων υλικών (αξονική καταπόνηση σε μία διεύθυνση)



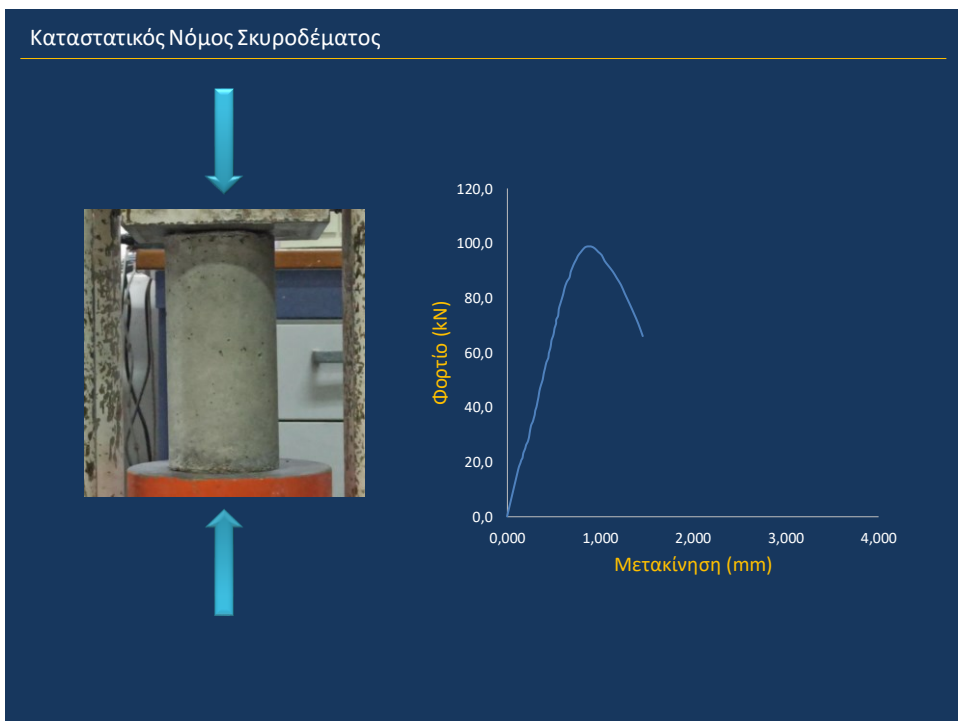
- Συμπεριφορά ψαθυρών υλικών



2

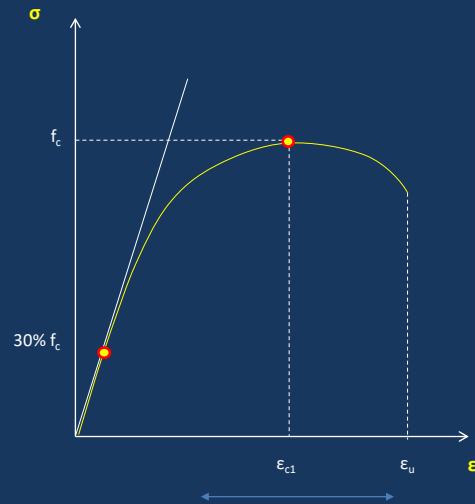


3

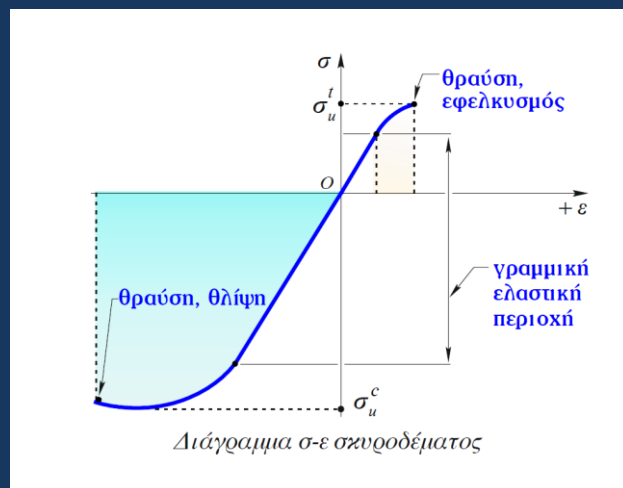


4

## Καταστατικός Νόμος Σκυροδέματος



5



6

## Βασικά Συστατικά Σκυροδέματος



Σκυρόδεμα (δέμα σκύρων)

7

## Το Σκυρόδεμα ως Υλικό

### • Ανομοιογενές

- Αδρανή διαφόρων μεγεθών “περίπλοκο” σύστημα πόρων τσιμεντοπολτού
- Με αποτέλεσμα κάποιες περιοχές να καταπονούνται περισσότερο από κάποιες άλλες



- **Ισότροπο** (Μέτρο Ελαστικότητας και συμπεριφορά σε φόρτιση είναι ανεξάρτητα διεύθυνσης φόρτισης)
- **“Περίπλοκοι” μηχανισμοί αστοχίας** (Λόγω πολυπλοκότητας δομής του)

Αστοχία σε θλίψη λόγω ανάπτυξης/επέκτασης ρωγμών στη μάζα σκληρούμενου τσιμεντοπολτού

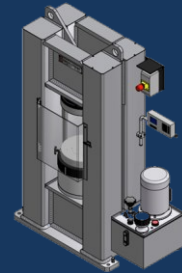
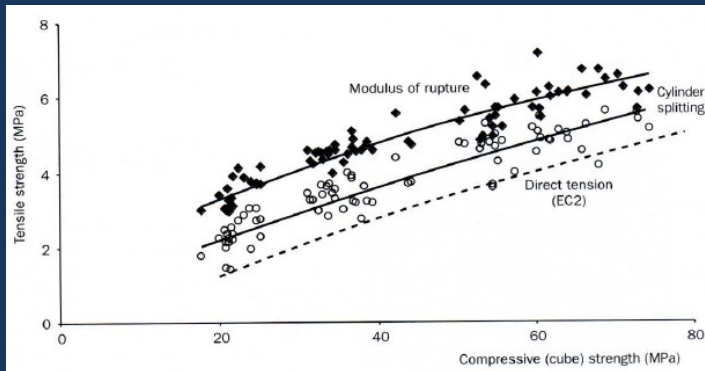
Μη-γραμμική σχέση  $\sigma-\epsilon$ , μεταβολή μέτρου ελαστικότητας με φόρτιση

8

## Θλιπτική Αντοχή Σκυροδέματος

**Θλιπτική αντοχή σκυροδέματος σημαντικότερη ιδιότητα για το υλικό**  
(με αυτή σχετίζονται άμεσα/έμμεσα υπόλοιπες ιδιότητες)

- Πολύ μικρή εφελκυστική αντοχή (Λόγος εφελκυστικής/θλιπτική αντοχή: 0.07 – 0.13)



9

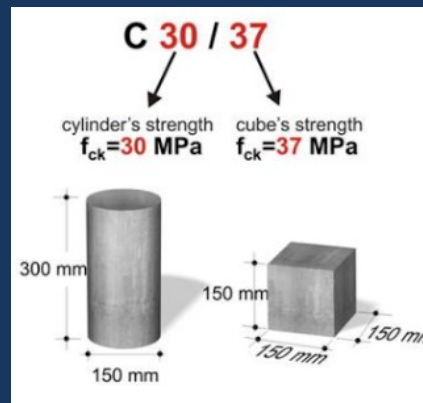
## Θλιπτική Αντοχή Σκυροδέματος



Κυβικά Δοκίμια  
150x150x150 mm



Κυλινδρικά Δοκίμια  
150x300 mm



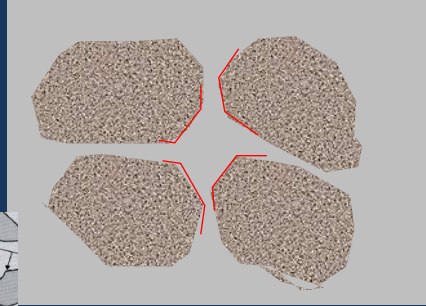
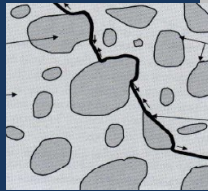
**C 20/25:** Χαρακτηριστική αντοχή κυλίνδρου 20 Mpa  
Χαρακτηριστική αντοχή κύβου 25 Mpa

10

## Πως το Σκυρόδεμα Αστοχεί

### Αστοχία σε θλίψη λόγω ανάπτυξης και επέκτασης ρωγμών στη μάζα σκληρυμένου τσιμεντοπολτού

- Υπαρξη μικρορωγμών στην επιφάνεια αδρανών-σκληρυμένου τσιμεντοπολτού.
- Αναπτύσσονται λίγο μετά σκλήρυνση τσιμεντοπολτού, λόγω συστολής ξήρασης

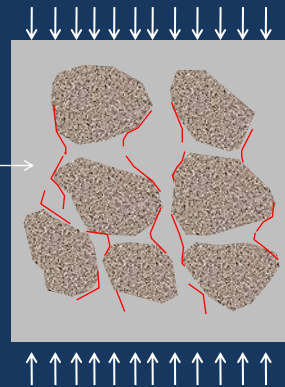
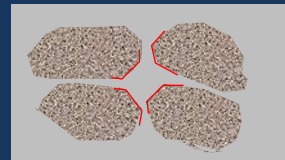
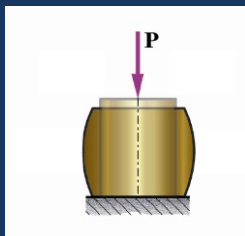


- Ρωγμές λόγω ανάπτυξη συγκεντρώσεων τάσεων (εφελκυστικές) στη διεπιφάνεια αδρανών / τσιμεντοπολτού  
→ τοπική αποκόλληση, λόγω των διαφορετικών μέτρων ελαστικότητας αδρανών/τσιμεντοπολτού

11

## Πως το Σκυρόδεμα Αστοχεί

- Λόγω θλιπτικής φόρτισης **σταδιακή επέκταση μικρορωγμών** (σε διεύθυνση παράλληλα με αυτή της φόρτισης)
- Με αύξηση τάσης, **μήκος μικρορωγμών αυξάνεται** έως ότου **υλικό χάνει συνοχή** του και αστοχεί (μεμονωμένες κολόνες).
- Αστοχία με μορφή πολλαπλών ρωγμών // διεύθυνση θλίψης και σημαντική εγκάρσια διόγκωση του υλικού.

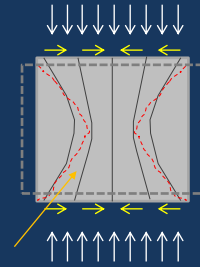


12

### Πως το Σκυρόδεμα Αστοχεί

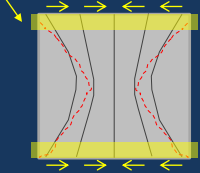
- Ανάπτυξη εγκάρσιων παραμορφώσεων (**διόγκωση**)
- **Εμποδίζεται λόγω δυνάμεων τριβής** (διεύθυνση προς κέντρο) στην περιοχή επιφανειών επαφής με άκαμπτες πλάκες μηχανής φόρτισης

Εγκάρσια παρεμπόδιση επιβραδύνει ανάπτυξη και επέκταση κατακόρυφων μικρορωγμών και αυξάνει θλιπτική αντοχή σκυροδέματος.



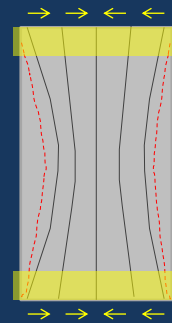
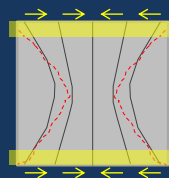
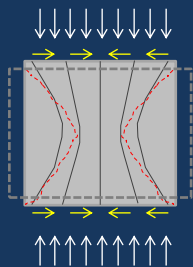
- «Εγκιβωτισμός» υλικού έντονος μόνο στις ακραίες περιοχές δοκιμίου

- **Δυνάμεις τριβής στα άκρα προκαλούν τοπική καμπύλωση τροχιών κυρίων θλιπτικών τάσεων** (στα κυβικά δοκίμια φτάνει μέχρι το μέσο του ύψους).
- Για αυτό το λόγο οι κύβοι αστοχούν με τη μορφή διπλού κώνου



13

### Πως το Σκυρόδεμα Αστοχεί

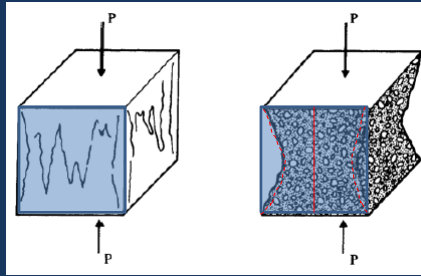


- «Εγκιβωτισμός» υλικού έντονος μόνο στις ακραίες περιοχές δοκιμίου

- Η επίδρασή του στο αποτέλεσμα της δοκιμής μειώνεται αυξάνοντας το λόγο ύψους/βάσης.
- Έτσι κυβικά δοκίμια εμφανίζουν μεγαλύτερη αντοχή από κυλινδρικά για λόγο ύψους/βάσης 2:1 ή μεγαλύτερο
- Γενικά όσο μεγαλύτερο είναι το δοκίμιο, τόσο μικρότερη είναι η αντοχή (μεγάλη πιθανότητα να βρεθεί ένα αδύνατο σημείο από όπου θα αρχίσει η αστοχία).

14

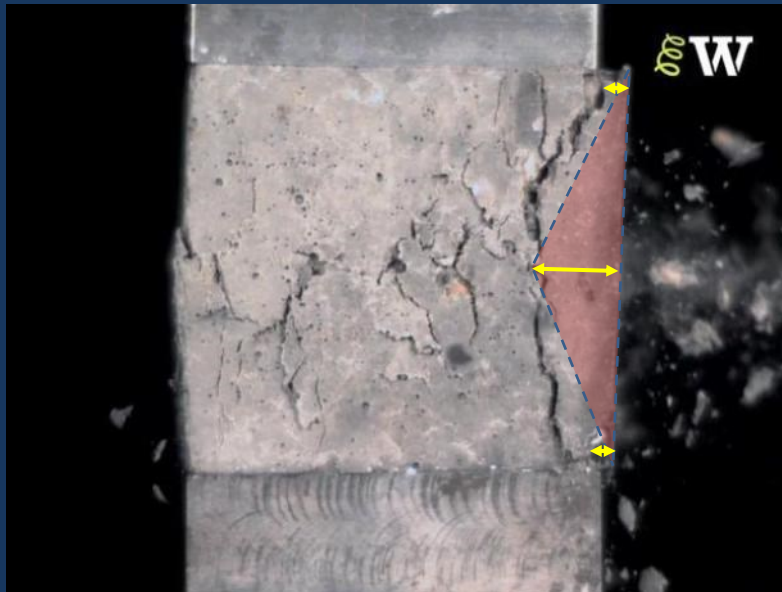
Πως το Σκυρόδεμα Αστοχεί - θλίψη Κύβου 150 mm



Video: Αστοχία Κυβικού Δοκιμίου

15

Πως το Σκυρόδεμα Αστοχεί - θλίψη Κύβου 150 mm

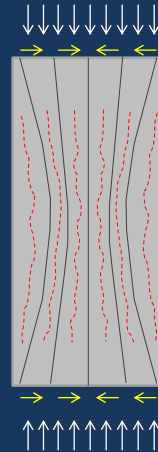


16



Πως το Σκυρόδεμα Αστοχεί - Θλίψη Κυλίνδρου 150 mm x 300 mm

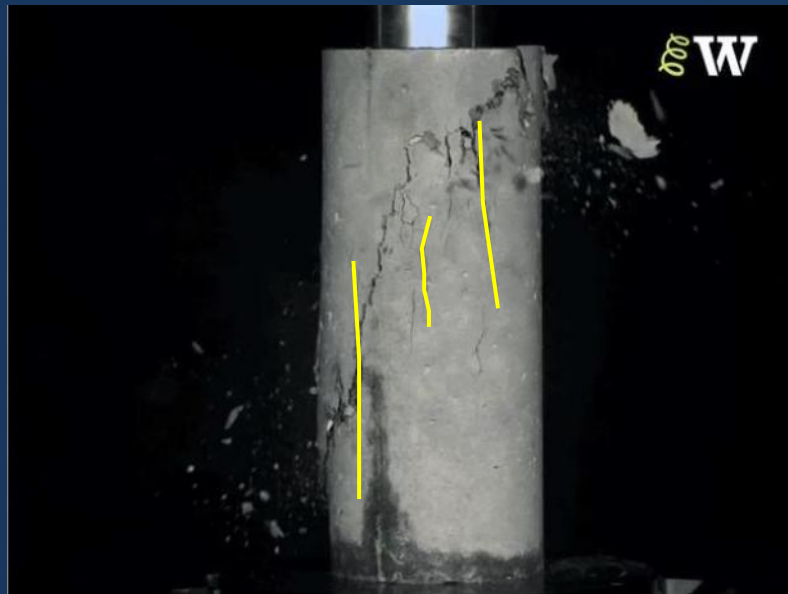
- Σε δοκίμια με λόγο ύψους/βάση  $\approx 2:1$  επίδραση συνοριακών συνθηκών στις ακραίες διατομές στις εσωτερικές τάσεις στο μέσο του ύψους (ή αλλιώς στην αντοχή) ουσιαστικά εκμηδενίζεται (σχεδόν ευθύγραμμες ή με ελαφριά καμπύλωση τροχιές).
- Επιφάνειες θραύσης παράλληλες (μικρές γωνίες με διεύθυνση φόρτισης)



- Θλιπτική αντοχή κυλίνδρου 150x300 mm περίπου ίση με 75-85% αντοχής κύβου 150 mm (το ποσοστό αυξάνεται με την αντοχή του σκυροδέματος).

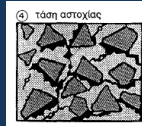
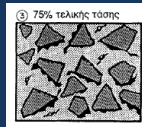
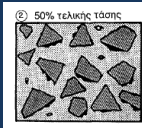
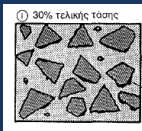
17

Πως το Σκυρόδεμα Αστοχεί - Θλίψη Κυλίνδρου 150 mm x 300 mm



18

## Καμπύλη $\sigma$ - $\epsilon$



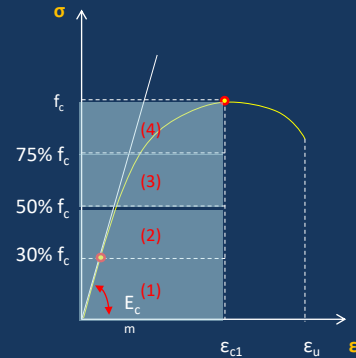
- Σχέση  $\sigma$ - $\epsilon$  γραμμική-ελαστική μέχρι **30% τελικής αντοχής  $f_c$**  (ρωγμές μεταβατικής ζώνης παραμένουν **ως έχουν**).

- **$30% < \sigma < 50% f_c$**  ρωγμές αυξάνονται χωρίς να εισέρχονται στον σκληρυμένο τσιμεντοπολτό, **καμπύλη  $\sigma$ - $\epsilon$**  γίνεται όλο και περισσότερο μη-γραμμική.

- **$50% < \sigma < 75% f_c$  (κρίσιμη τάση)**, ρηγμάτωση επεκτείνεται με αυξανόμενους ρυθμούς στον τσιμεντοπολτό.

- **$\sigma > 75% f_c$** , σύστημα ασταθές, **παραμορφώσεις αυξάνονται απότομα** επιφάνειες θραύσης τείνουν να γίνουν συνεχείς.

- Για τάσεις 0.75-0.94 η σχέση  $\sigma$ - $\epsilon$  εμφανίζει βαθμιαία αύξηση καμπυλότητας, ενώ για ακόμα μεγαλύτερες τάσεις γίνεται σχεδόν οριζόντια και ακολούθως αποκτά αρνητική κλίση μέχρι την τελική θραύση του υλικού.



19

## Καμπύλη $\sigma$ - $\epsilon$

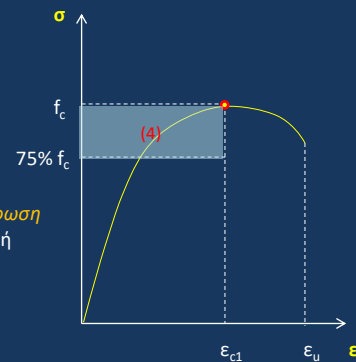
- **Θλιπτική τάση > κρίσιμη τιμή ( $75% f_c$ )**  
Συμπεριφορά σκυροδέματος εξαρτάται από διάρκεια φόρτισης, (ερπυσμός; ανάπτυξη παραμορφώσεων υπό σταθερή τάση).

### Κατερχόμενος κλάδος

Ικανότητα σκυροδέματος να αντιστέκεται στο φορτίο

**Εφικτός όταν επιβάλλεται συνεχώς αυξανόμενη παραμόρφωση**

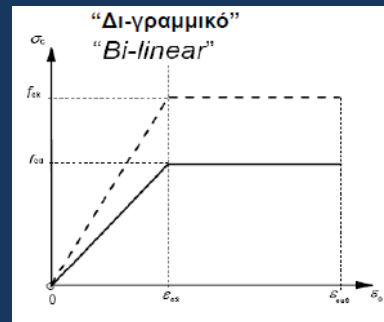
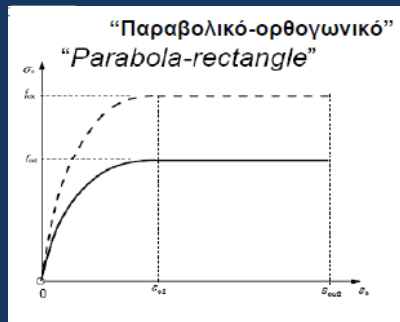
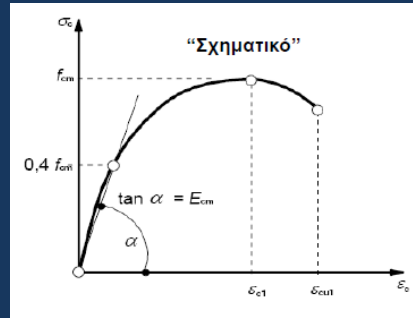
Εάν είχαμε συνεχώς αυξανόμενη τάση, αστοχία στη κορυφή διαγράμματος.



- Παραμόρφωση στην μέγιστη τάση ποικίλλει από 0,2 – 0,25 %
- Παραμόρφωση στην θραύση από 0,35 - 0,7 %

20

## Καμπύλη $\sigma$ - $\epsilon$ , σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 2 (EN1992-1-1:2004 EL)



21

## Μέτρο Ελαστικότητας

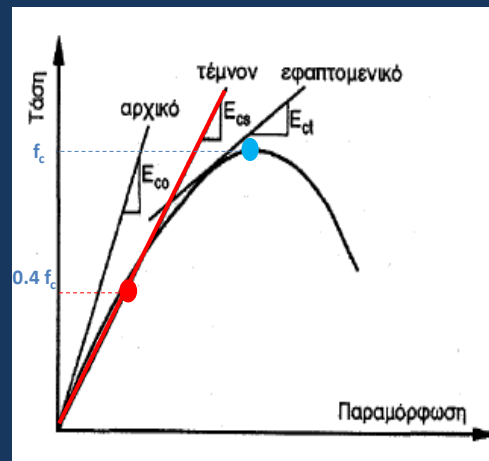
Ρηγμάτωση  
Σκυροδέματος

Μη-γραμμική  $\sigma$ - $\epsilon$

Μεταβολή  $E$  με  
φόρτιση

Επιβατικό (ή τέμνον) μέτρο  
ελαστικότητας,  $E_{cs}$ :

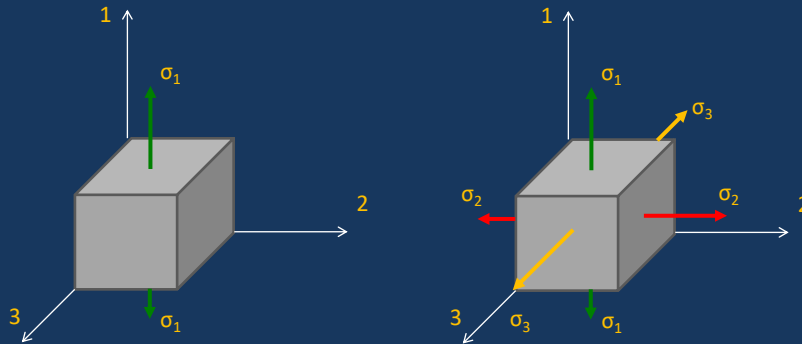
δίνεται από κλίση ευθύγραμμου  
τμήματος που ενώνει αρχή των αξόνων  
με σημείο όπου η τάση είναι ίση με 40%  
της μέγιστης.



22

### Πολυαξονική Φόρτιση

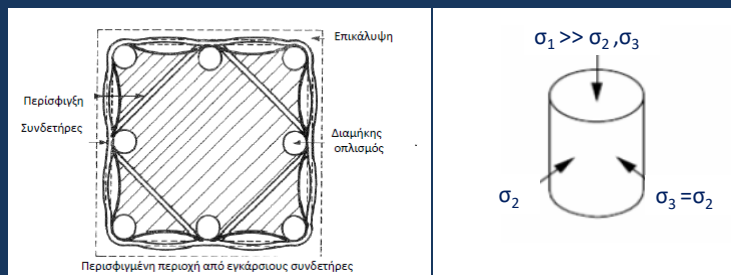
- Φόρτιση στο σκυρόδεμα είναι συχνά πολυαξονική (τάσεις μετασχηματίζονται σε δύο/τρεις κύριες τάσεις που ενεργούν σε κάθετες μεταξύ τους διευθύνσεις; τριαξονική εντατική κατάσταση)
- Περίπλοκη συμπεριφορά σε τριαξονική φόρτιση.



23

### Πολυαξονική Φόρτιση

- Φόρτιση στο σκυρόδεμα είναι συχνά πολυαξονική (τάσεις μετασχηματίζονται σε δύο/τρεις κύριες τάσεις που ενεργούν σε κάθετες μεταξύ τους διευθύνσεις; τριαξονική εντατική κατάσταση)
- Περίπλοκη συμπεριφορά σε τριαξονική φόρτιση.
- Συνηθισμένη φόρτιση στη πράξη:  
ανάπτυξη τριαξονικής θλίψης όπου η μία από τις τρεις κύριες τάσεις είναι σημαντικά μεγαλύτερη από τις άλλες ( $\sigma_1 \gg \sigma_2, \sigma_3$ ;  $\sigma_2 = \sigma_3$ )

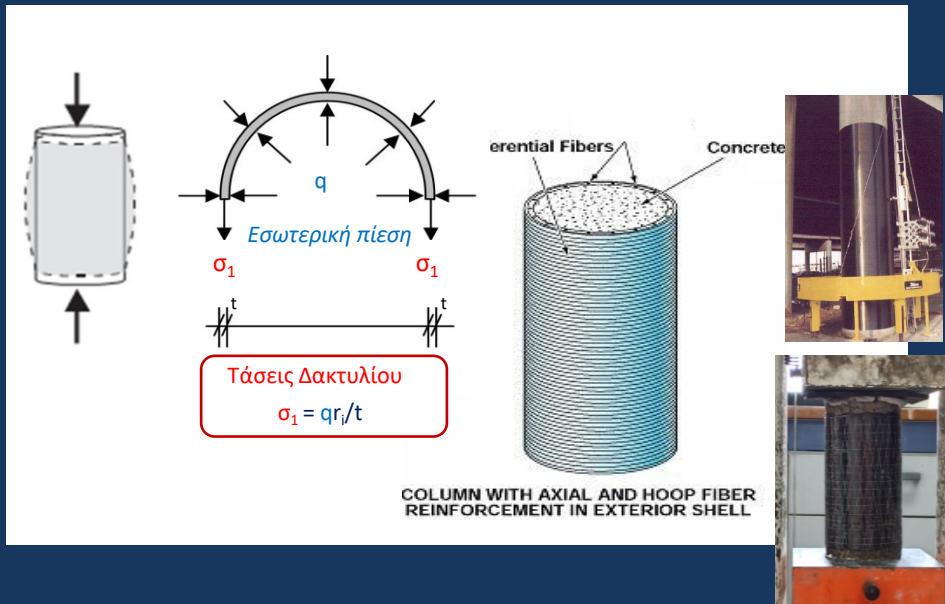


(π.χ. θλίψη σκυροδέματος σε υποστυλώματα με πυκνή διάταξη συνδετήρων).

24

## Πολυαξονική Φόρτιση

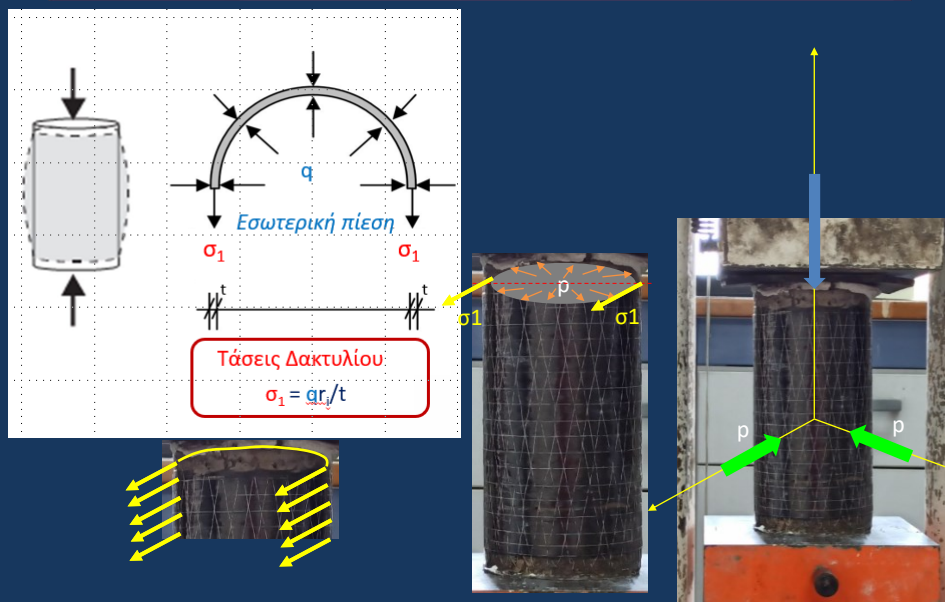
Ενίσχυση δομικών στοιχείων (περίσφιξη με μανδύα-ύφασμα FRP)



25

## Πολυαξονική Φόρτιση

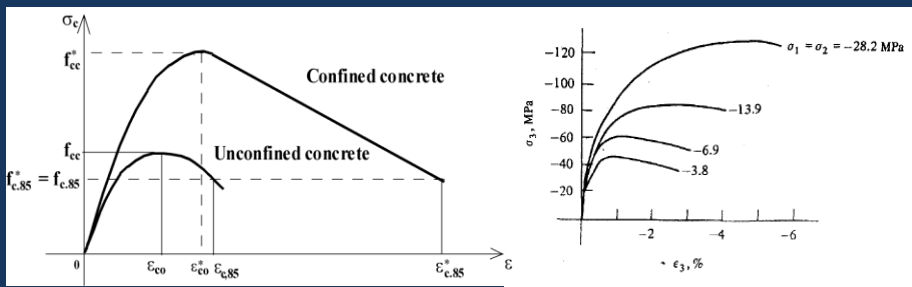
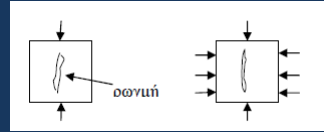
Ενίσχυση δομικών στοιχείων (περίσφιξη με μανδύα-ύφασμα FRP)



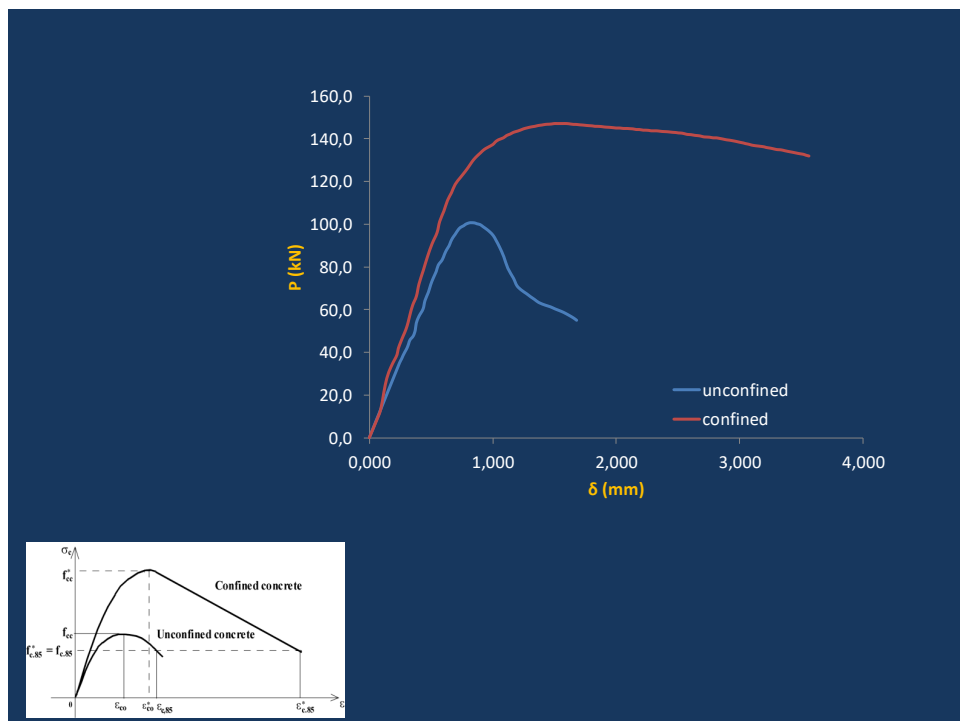
26

## Πολυαξονική Φόρτιση

- Περίσφιξη (μέσω τριαξονικής θλίψης) αυξάνει θλιπτική αντοχή στοιχείου
- Περιορισμός εγκάρσιας διαστολής δοκιμίου (κάθετα στη διεύθυνση μεγαλύτερης θλιπτικής τάσης) **αυξάνει σημαντικά την αντοχή του**, περιορίζοντας τη μικρορηγμάτωση παράλληλα στην διεύθυνση κύριας φόρτισης.
- **Αύξηση θλιπτικής αντοχής** λόγω ταυτόχρονης δράσης θλιπτικής ορθής τάσης στην εγκάρσια διεύθυνση **οφείλεται στον περιορισμό μικρορωγμών**, που έχει ως αποτέλεσμα την επιβράδυνση σχηματισμού και επέκτασης τους.



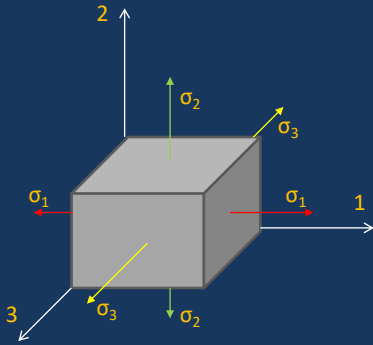
27



28

## Πολυαξονική Φόρτιση

Προσοχή – Γενικευμένη μορφή Hooke για γενική τρισδιάστατη εντατική και παραμορφωσιακή κατάσταση



$$\varepsilon_1 = \frac{\sigma_1}{E} - \nu \frac{\sigma_2}{E} - \nu \frac{\sigma_3}{E}$$

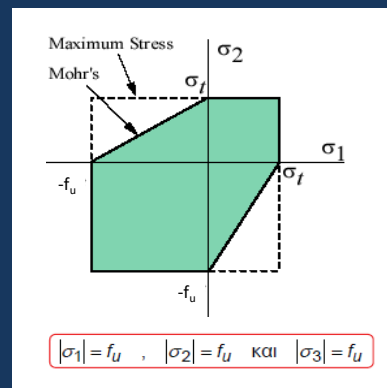
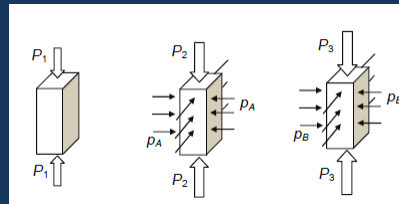
$$\varepsilon_2 = \frac{\sigma_2}{E} - \nu \frac{\sigma_1}{E} - \nu \frac{\sigma_3}{E}$$

$$\varepsilon_3 = \frac{\sigma_3}{E} - \nu \frac{\sigma_1}{E} - \nu \frac{\sigma_2}{E}$$

29

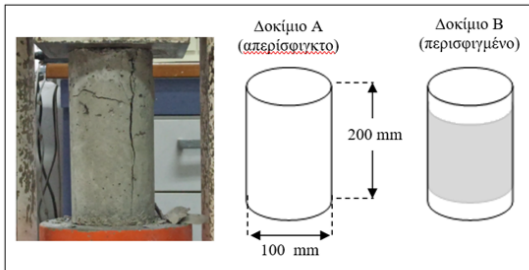
## Κριτήριο Αστοχίας

- Θλιπτική τάση στη κύρια διεύθυνση (τη στιγμή αστοχίας) εξαρτάται και από μέγεθος εγκάρσιων τάσεων
- Η σχέση αξονικής τάσης – εγκάρσιας πίεσης κατά την αστοχία, “ποσοτικοποιείται” από τα κριτήρια αστοχίας
- Στο σκυρόδεμα (ψαθυρό υλικό) αστοχία επέρχεται όταν μέγιστη (κατ’ απόλυτη τιμή) κύρια τάση φθάσει μία τιμή ανεξαρτήτως μεγέθους υπολοίπων τάσεων
- Η τιμή αυτή ισούται με την αντοχή του υλικού σε θλίψη



30

## Εργαστηριακή Άσκηση



**Θέμα 1<sup>ο</sup>** Δύο κυλινδρικά δοκίμια σκυροδέματος (Α και Β, με ύψος  $h$  200 mm και διάμετρο  $D$  100 mm), υποβάλλονται σε δοκιμή θλίψης (Σχήμα 1). Το δοκίμιο Β φέρει (καθ' ύψος) μία στρώση μανδύα από σύνθετο υλικό (ύφασμα ινών άνθρακα και ρητίνη).

Με βάση τα αρχεία με τα δεδομένα των δοκιμών, που σας δίνονται, ζητούνται:

- 1 Να κατασκευαστούν οι καμπύλες  $P-\delta$ , φορτίου-μετατόπισης, για κάθε δοκίμιο.
- 2 Να κατασκευαστούν οι καμπύλες  $\sigma-\epsilon$ , τάσης-παραμόρφωσης κατά τη διαμήκη διεύθυνση των δοκιμών.
- 3 Να υπολογιστεί η αντοχή (και η παραμόρφωση) κάθε δοκιμίου, και να δικαιολογηθούν οι διαφορές που προκύπτουν.
- 4 Να υπολογιστεί το επιβατικό (τέμνον) μέτρο Ελαστικότητας  $E_{sz}$  του απερίσφιγκτου δοκιμίου.

31

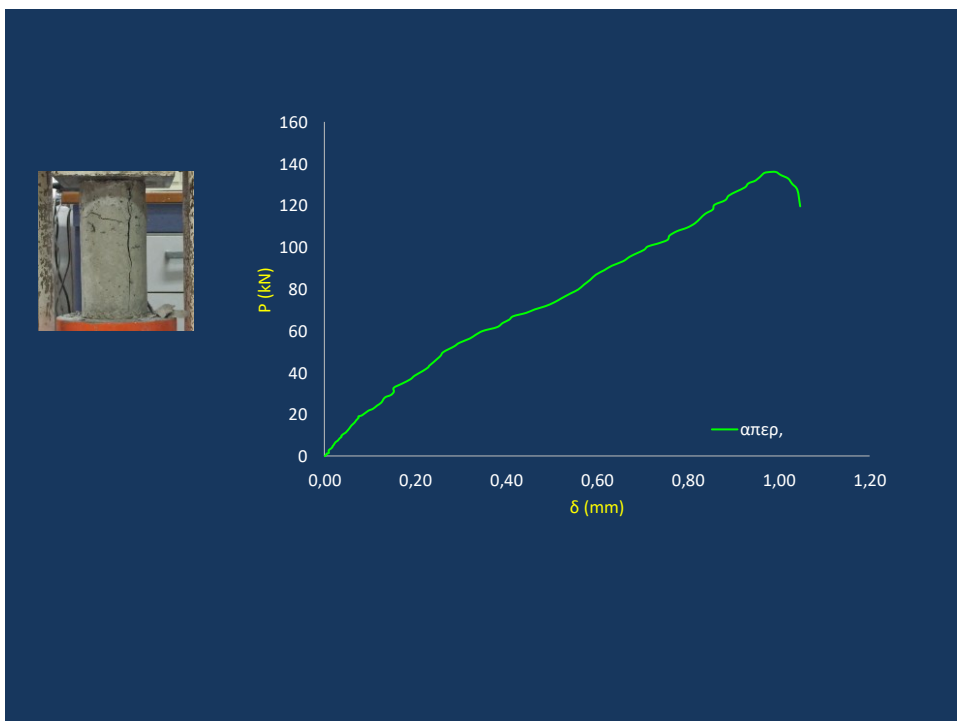


32





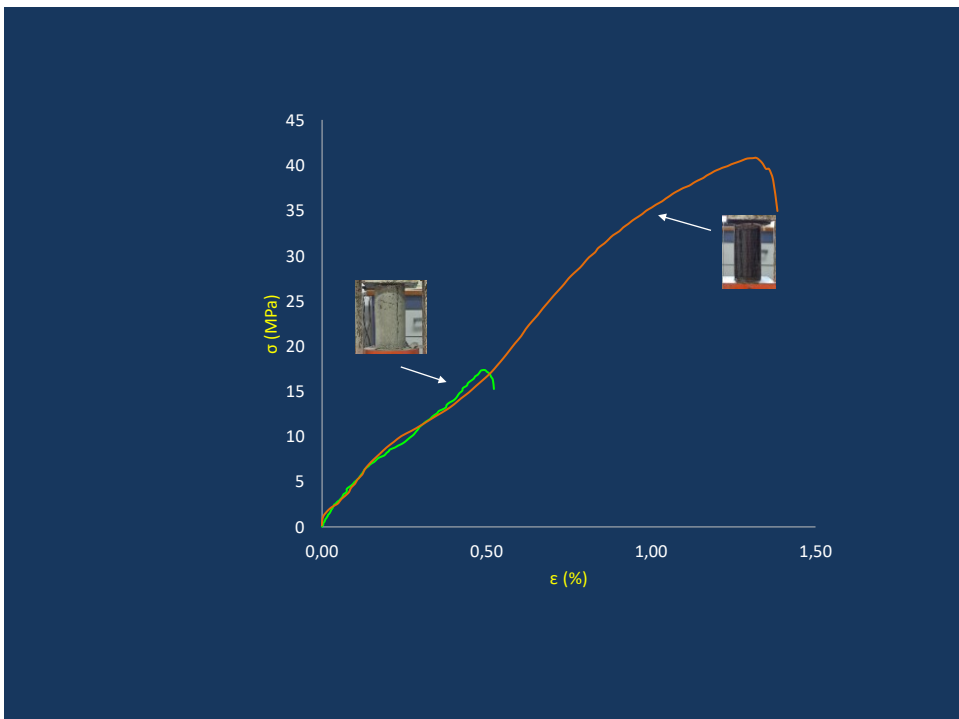
33



34



35

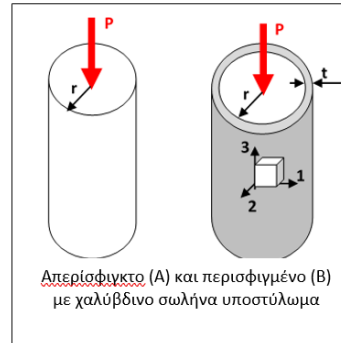


36

## Εργαστηριακή Άσκηση

**Θέμα 2<sup>ο</sup>:** Δύο υποστυλώματα σκυροδέματος (με αντοχή σε μονοαξονική θλίψη  $f_c$ , μέτρο ελαστικότητας  $E_c$  και λόγο Poisson  $\nu_c$ ) Α και Β, κυκλικής διατομής (με ακτίνα  $r$ ) υποβάλλονται σε αξονικό θλιπτικό φορτίο  $P$  (Σχήμα 2). Το υποστυλώμα Β είναι πανομοιότυπο με το υποστυλώμα Α, αλλά περιβάλλεται από έναν κυλινδρικό χαλύβδινο σωλήνα (με μέτρο ελαστικότητας χάλυβα  $E_s$ ), εσωτερικής ακτίνας  $r$  και πάχους  $t_s$ . Με βάση και τα δεδομένα του Πίνακα 1, ζητούνται:

1. Να υπολογιστεί η μέγιστη τιμή του φορτίου  $P$  που μπορεί με ασφάλεια να φέρει το υποστυλώμα Α, θεωρώντας συντελεστή ασφαλείας για την αντοχή του σκυροδέματος ίσο με 1.5.

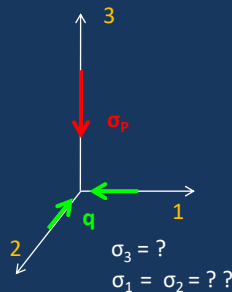
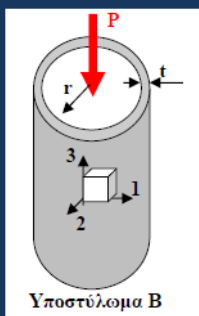


Πίνακας 1. Δεδομένα εργαστηριακής άσκησης με βάση το τελευταίο ψηφίο του Αριθμού Μητρώου.

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$f_c$ (MPa)										
$E_c$ (GPa)										
$\nu_c$										
$r$ (m)										
$E_s$ (GPa)										
$t_s$ (mm)										
$P$ (kN)										

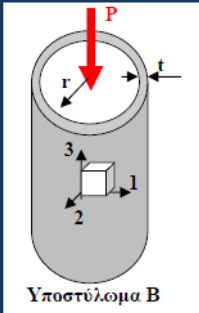
37

2. Έστω  $q$ , η ακτινική τάση που αναπτύσσεται μεταξύ του σκυροδέματος του υποστυλώματος Β και του χαλύβδινου σωλήνα.
  - 2.1. να περιγράψει η εντατική κατάσταση ( $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ ) σε οποιοδήποτε σημείο του σκυροδέματος του υποστυλώματος Β,



38

2.2. να δοθεί η έκφραση της ακτινικής παραμόρφωσης του σκυροδέματος ( $\epsilon_1, \epsilon_2$ ) του υποστύλωματος Β,

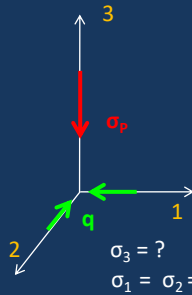


$$\epsilon_1 = \frac{\sigma_1}{E} - \nu \frac{\sigma_2}{E} - \nu \frac{\sigma_3}{E}$$

$$\epsilon_2 = \frac{\sigma_2}{E} - \nu \frac{\sigma_1}{E} - \nu \frac{\sigma_3}{E}$$

$$\epsilon_3 = \frac{\sigma_3}{E} - \nu \frac{\sigma_1}{E} - \nu \frac{\sigma_2}{E}$$

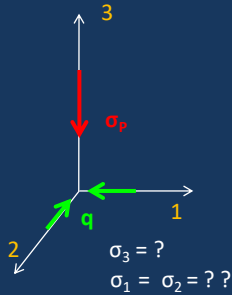
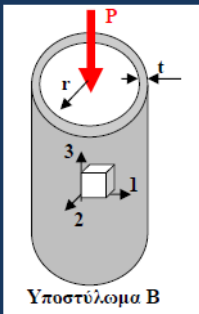
Προσοχή στα πρόσημα των τάσεων



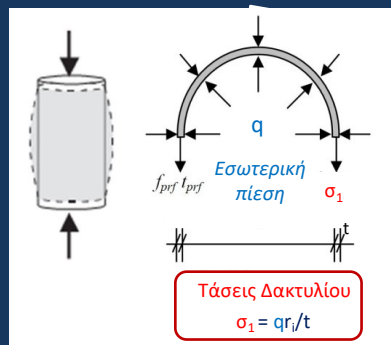
$\sigma_3 = ?$   
 $\sigma_1 = \sigma_2 = ??$   
Άρα,  $\epsilon_2 = \epsilon_1 = \dots$

39

- 2.3. Εάν η περιφερειακή τάση (τάση δακτυλίου,  $\sigma_s$ ) που αναπτύσσεται στο χαλύβδινο σωλήνα, δίνεται από τον τύπο  $\sigma_s = q \cdot r / t_s$ , (όπου τα μεγέθη  $q, r, t_s$  έχουν οριστεί προηγουμένως), να δοθεί η έκφραση της παραμόρφωσής του στην ίδια διεύθυνση,
- 2.4. να υπολογιστεί η ακτινική τάση  $q$  για την τιμή του φορτίου  $P$  σύμφωνα με τα δεδομένα του Πίνακα 1.



$\sigma_3 = ?$   
 $\sigma_1 = \sigma_2 = ??$   
Άρα,  $\epsilon_2 = \epsilon_1 = \dots$



Άρα,  $\sigma_s = qr/t_s$   
 $\epsilon_s = \dots$

$\epsilon_2 = \epsilon_1 = \dots$

$\epsilon_s = \dots$

40



**Τρίτη 9:00 – 11:00 & Παρασκευή 10:00 – 12:00**  
(γραφείο στο χώρο εργαστηρίου)

[sdemis@upatras.gr](mailto:sdemis@upatras.gr)