

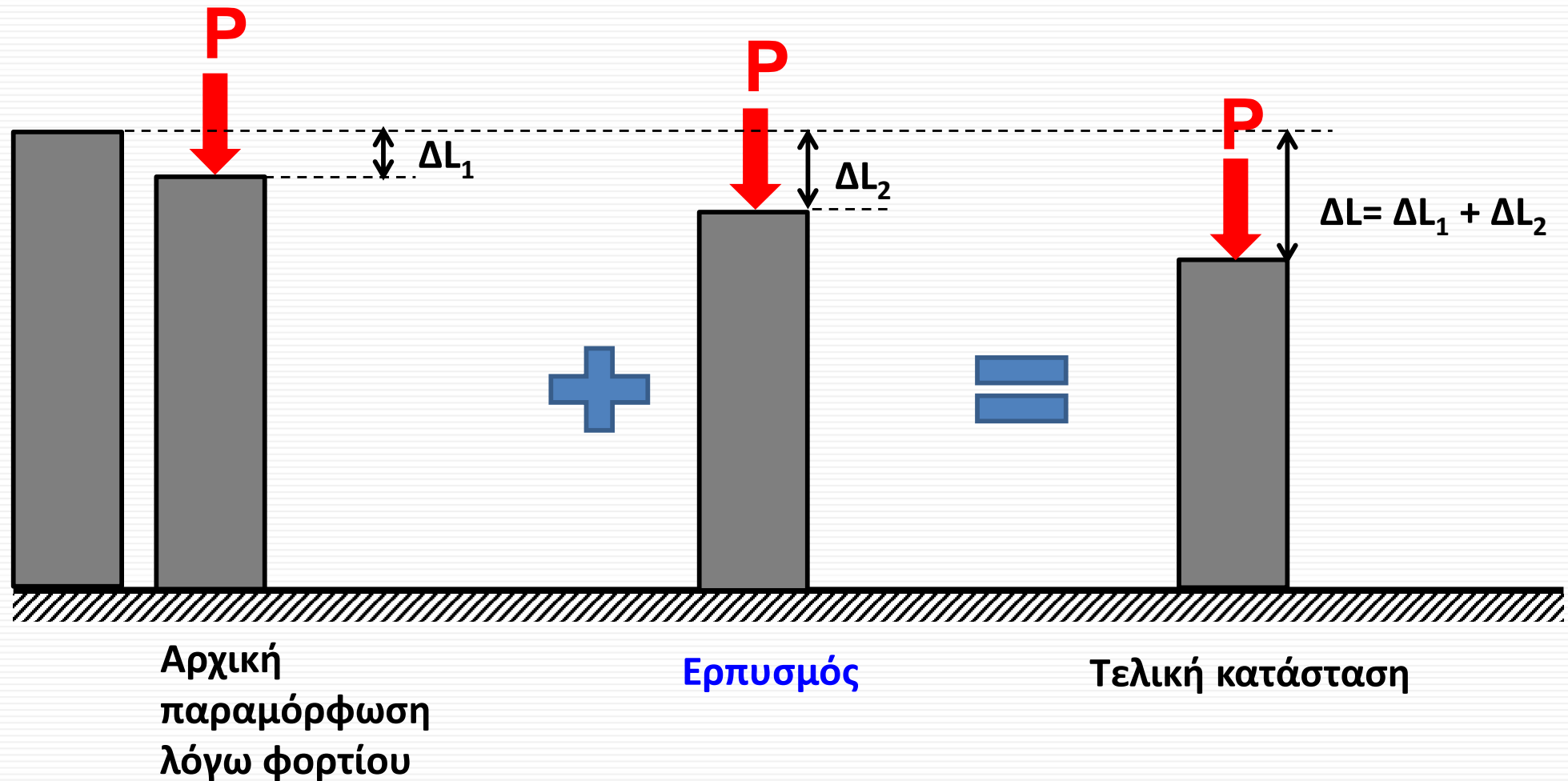
Σύνθετα Ινοπλισμένα Πολυμερή (ΙΟΠ)

8^ο μάθημα

Χρόνιες δράσεις
Ράβδοι ΙΟΠ

χρόνιες παραμορφώσεις

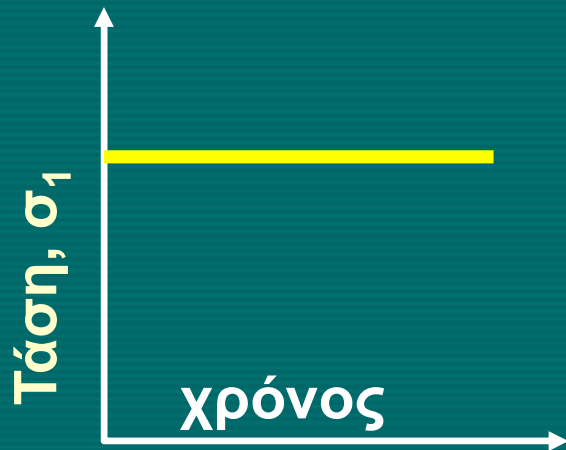
Ερπυσμός & χαλάρωση τάσεων – με χρόνια δράση φορτίου



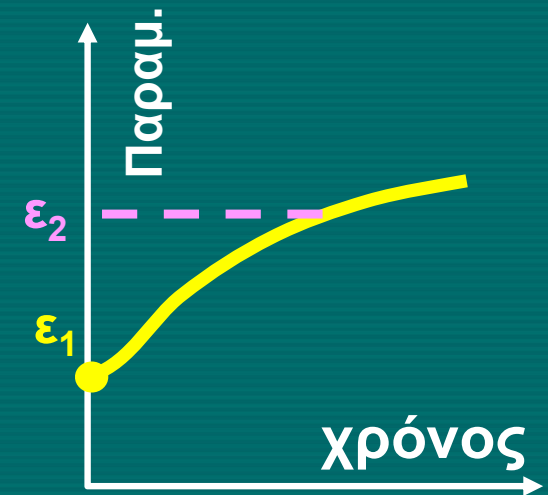
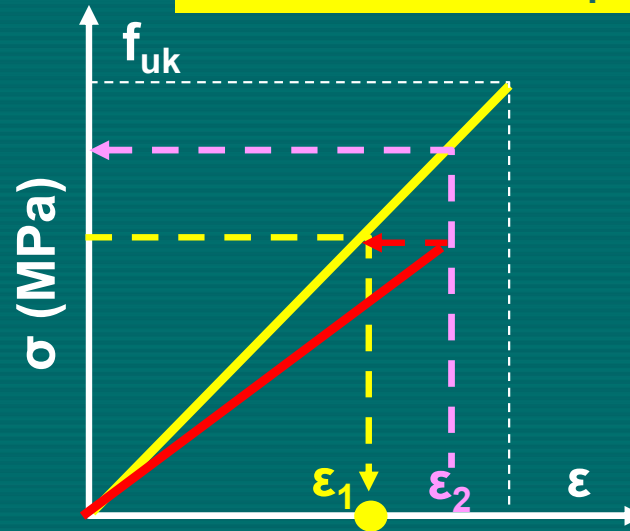
Μακροχρόνια Συμπεριφορά σε φορτίο

- ΕΡΠΥΣΜΟΣ (Creep): παρατεταμένη δράση σταθερού φορτίου → αύξηση παραμόρφωσης

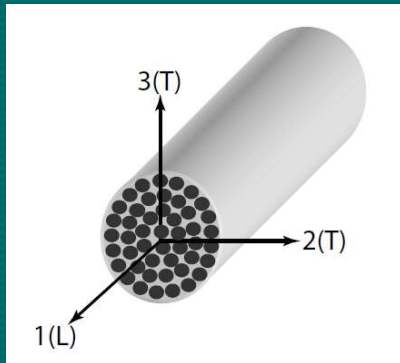
Άνθρακας	0
Γυαλί	Αμελητέα
Αραμίδιο	Μη αμελητέα



$$P/A = \sigma = E \cdot \varepsilon_1$$



Ανακατανομή της έντασης μεταξύ των ινών:

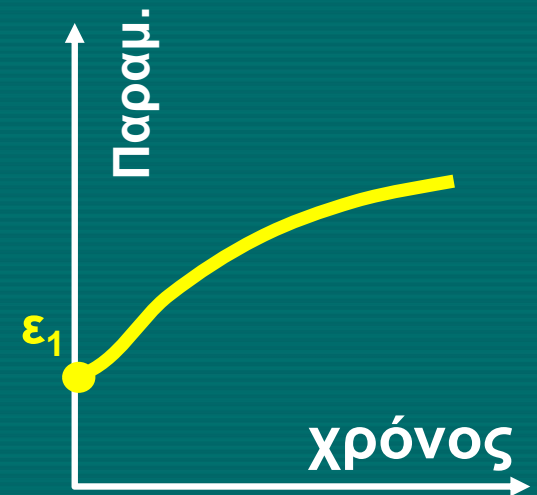


$$\sigma_1 = E_1 \varepsilon_1 = E_2 \varepsilon_2 \Rightarrow \varepsilon_2 > \varepsilon_1 \Rightarrow E_2 < E_1$$

Μακροχρόνια Συμπεριφορά σε φορτίο

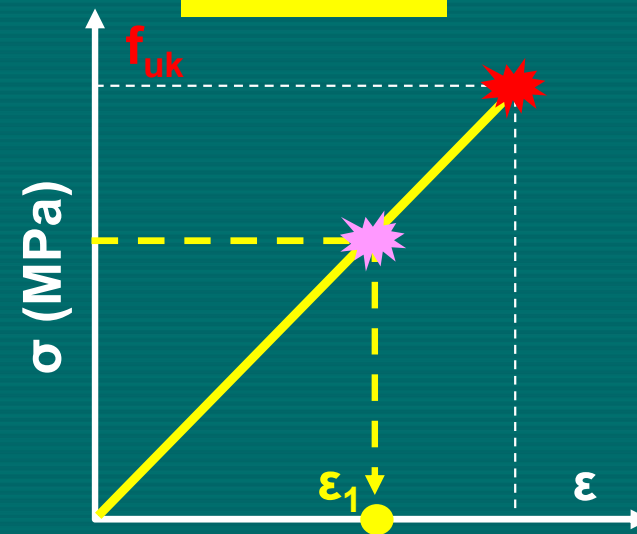
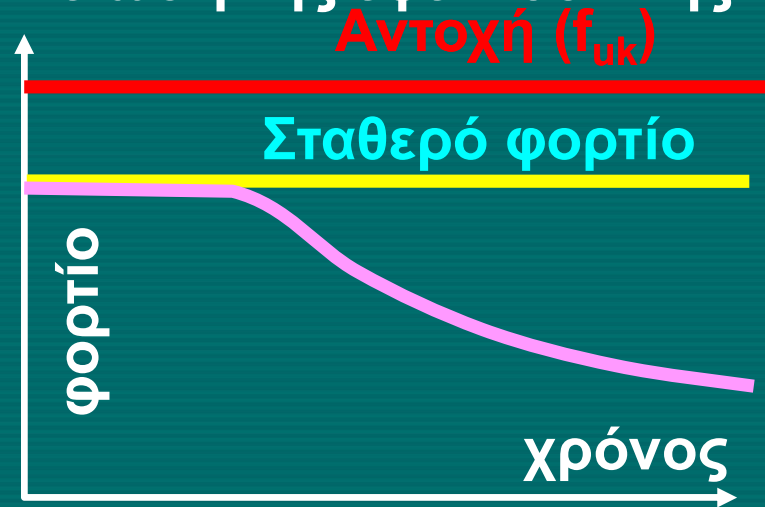
- ΕΡΠΥΣΜΟΣ (Creep): παρατεταμένη δράση σταθερού φορτίου → αύξηση παραμόρφωσης

Άνθρακας	$\sigma < 60\% f_u$
Γυαλί	$\sigma < 30\% f_u$
Αραμίδιο	$\sigma < 35\% f_u$



- ΠΡΟΩΡΗ ΤΑΣΗ ΘΡΑΥΣΗΣ - χαλάρωση

Μείωση της εφελκυστικής τους αντοχής $\sigma = E \cdot \epsilon$



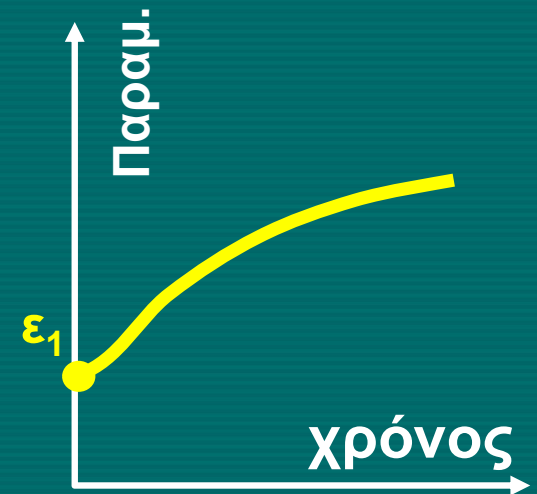
Άνθρακας	ΠΟΛΥ ΚΑΛΗ (80%)
Αραμίδιο	ΚΑΛΗ (50%)
Γυαλί	ΜΕΤΡΙΑ (30%)

Μειωμένη τάση σχεδιασμού

Μακροχρόνια Συμπεριφορά σε φορτίο

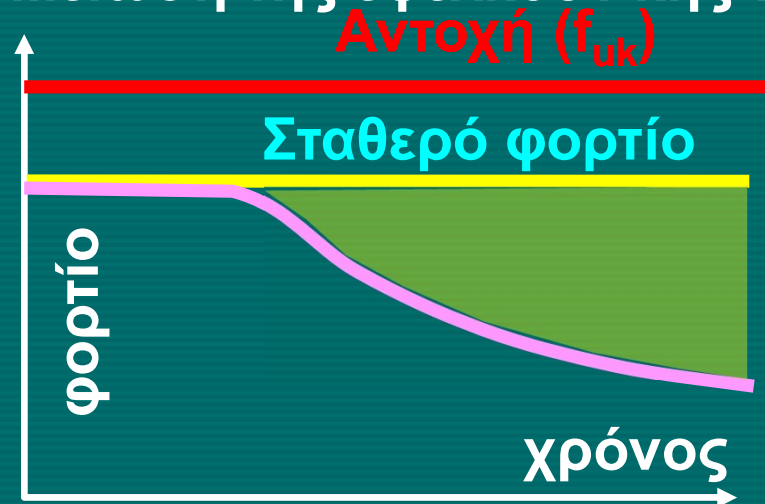
- ΕΡΠΥΣΜΟΣ (Creep): παρατεταμένη δράση σταθερού φορτίου → αύξηση παραμόρφωσης

Άνθρακας	$\sigma < 60\%f_u$
Γυαλί	$\sigma < 30\%f_u$
Αραμίδιο	$\sigma < 35\%f_u$



- ΠΡΟΩΡΗ ΤΑΣΗ ΘΡΑΥΣΗΣ - χαλάρωση

Μείωση της εφελκυστικής τους αντοχής $\sigma = E \cdot \varepsilon$



- Αύξηση φορτίου
- Υψηλή θερμοκρασία
- Υπεριώδης ακτινοβολία
- Ισχυρά αλκάλια

Διαβρωτικό περιβάλλον → **Stress corrosion = f**
(χρόνος, τάσης, περιβάλλον)

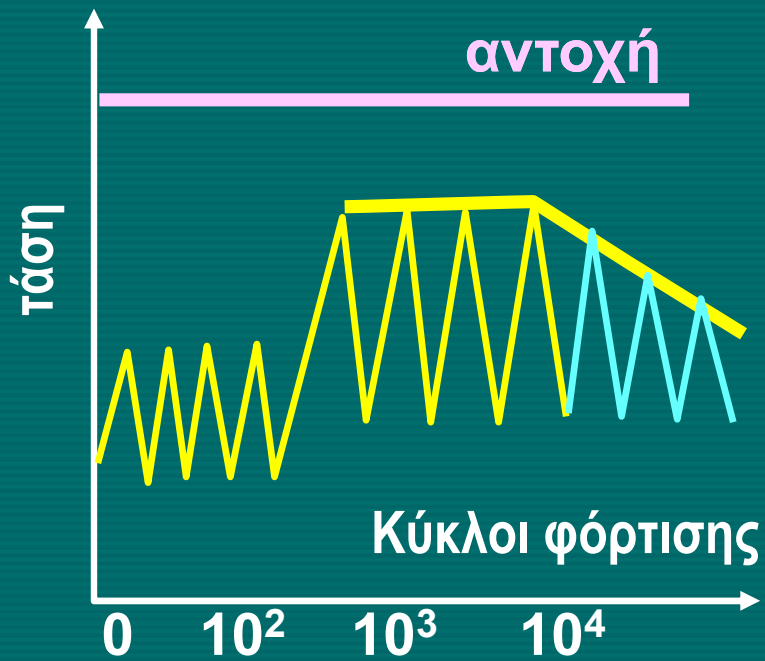
Κύκλοι: ύγρυνσης / ξήρανσης, ψύξης / απόψυξης

Άνθρακας	ΠΟΛΥ ΚΑΛΗ (80%)
Αραμίδιο	ΚΑΛΗ (50%)
Γυαλί	ΜΕΤΡΙΑ (30%)

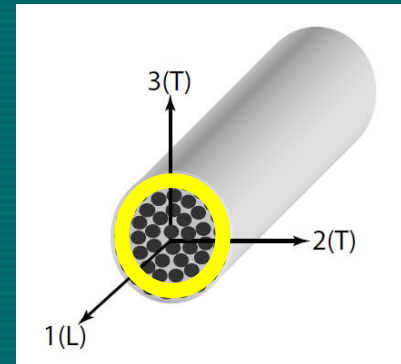
Πρόταση: για εξωτερικές επεμβάσεις σε διαβρωτικό περιβάλλον και παρατεταμένη δράση υψηλών φορτίων (π.χ. γέφυρες) → CFRP

Μακροχρόνια Συμπεριφορά σε φορτίο (ίνες):

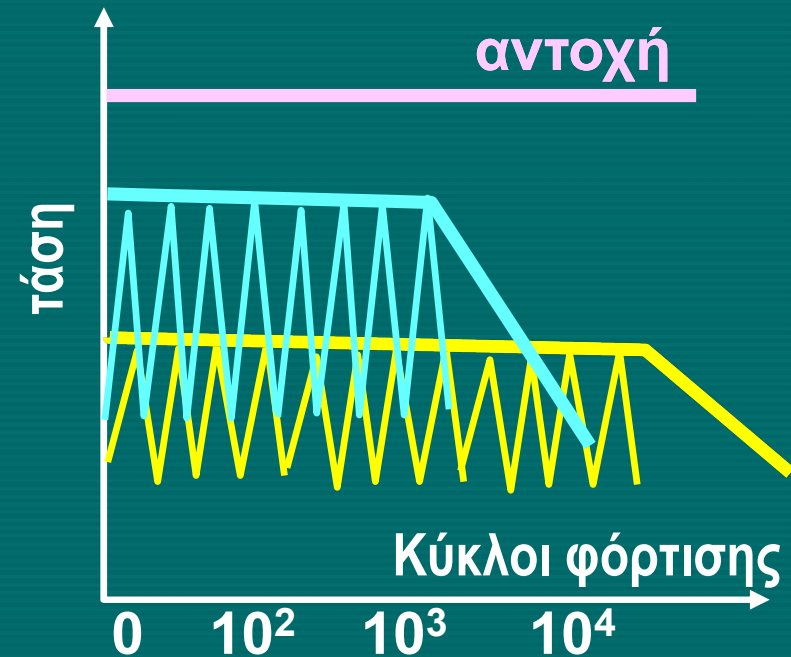
➤ ΚΟΠΩΣΗ (fatigue)



Επιδείνωση εξαιτίας της αποκόλλησης των εξωτερικών ινών από την μήτρα τους (Ανακατανομή της έντασης μεταξύ των ινών)



- Πότε θα ξεκινήσει η επιδείνωση εξαρτάται από το εύρος φόρτισης
- Αποδεκτά όρια εύρους φόρτισης $< 50\%f_u$



Εσωτερικοί οπλισμοί: Παραμόρφωση σχεδιασμού

$$f_{uk} = E \cdot \varepsilon_{uk} \Rightarrow \varepsilon_{u,d} = e * \frac{\varepsilon_{uk}}{\gamma_f}$$

ACI 440: environmental factor $e=0.8$

FIB: $e_{G/A/C}=0.8/0.9/1$ (0.7/0.8/0.9)

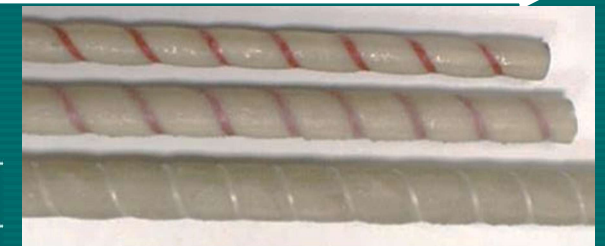
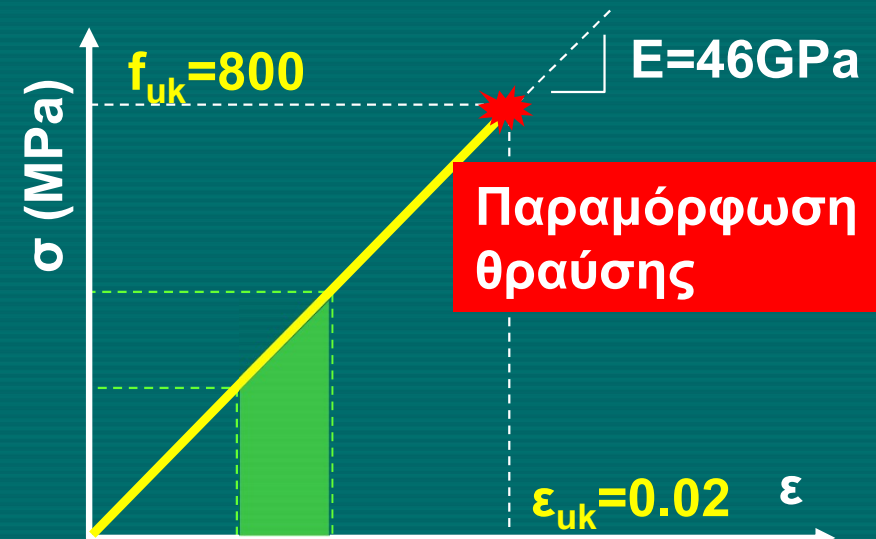
γ_f : συντελεστής ασφάλειας υλικού (ULS)

→ ACI 440: $\gamma_f=1.5$

→ EC2: $\gamma_f=1.3$ ($e=1$) → fib: $\gamma_f=1.25$ ($e=1$)

✓ Χρόνιες δράσεις: $C_{creep} \cdot \varepsilon_{u,d}$ με $C_{creep} \Rightarrow$

Άνθρακας	$\sigma < 60\%f_u$
Γυαλί	$\sigma < 30\%f_u$
Αραμίδιο	$\sigma < 35\%f_u$

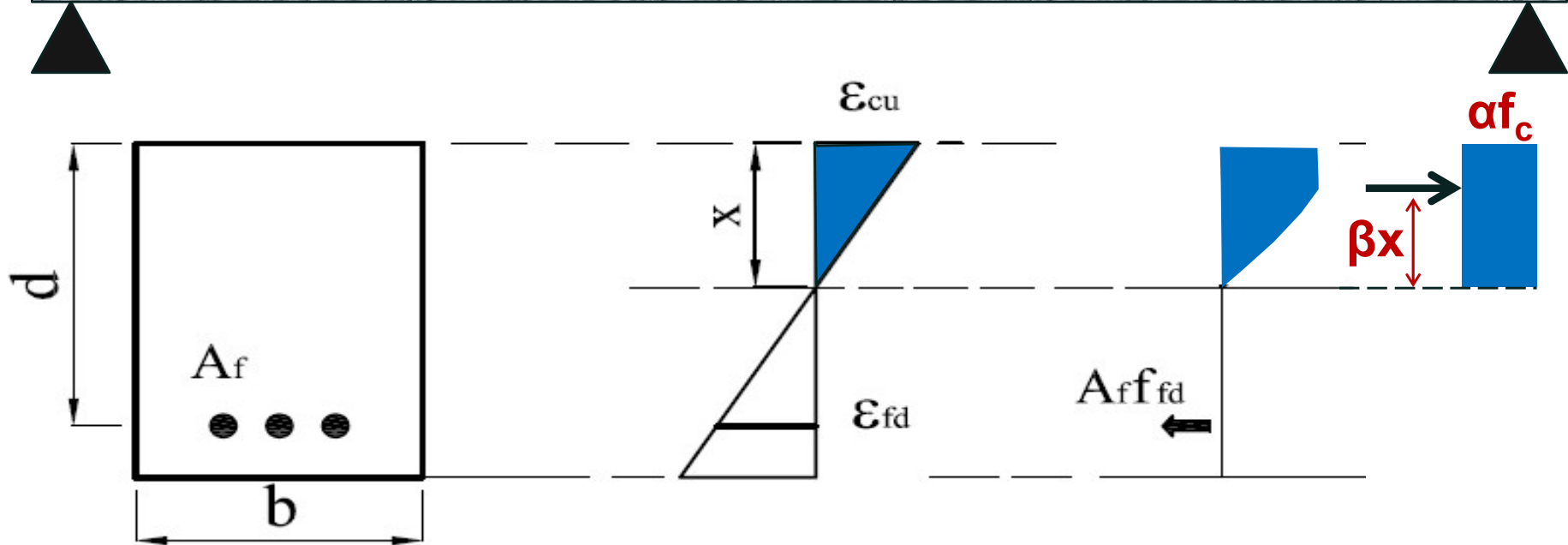


Η παραμόρφωση όμως που μπορεί να αναπτύξει η ΙΟΠ ράβδος εξαρτάται από:

- από την ικανότητα παραμόρφωσης του σκυροδέματος θλιβόμενης ζώνης (ορίζει την αντοχή της διατομής)
- Συνάφεια Ράβδου – Σκυροδέματος (ορίζει την ικανότητα παραμόρφωσης του δομικού στοιχείου, πχ. Δ, Θ)

$$M_{\max} = ql^2 / 8$$

Συμβατικό σκυρόδεμα



Ύψος θλιβόμενης ζώνης

$$\frac{x}{d} = \frac{\epsilon_{cu}}{\epsilon_{fd} + \epsilon_{cu}}$$

Δυνάμεις που δρουν στην κρίσιμη διατομή (M_{\max})

$$F_c = \alpha f_c b x$$

$$F_{fd} = A_f f_{fd}$$

$$F_c = F_{fd}$$

$$f_{fd} = E_f \epsilon_{fd}$$

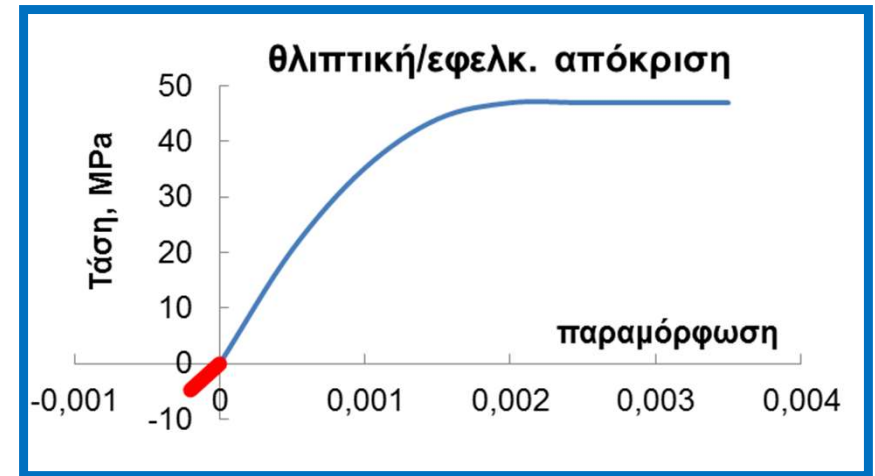
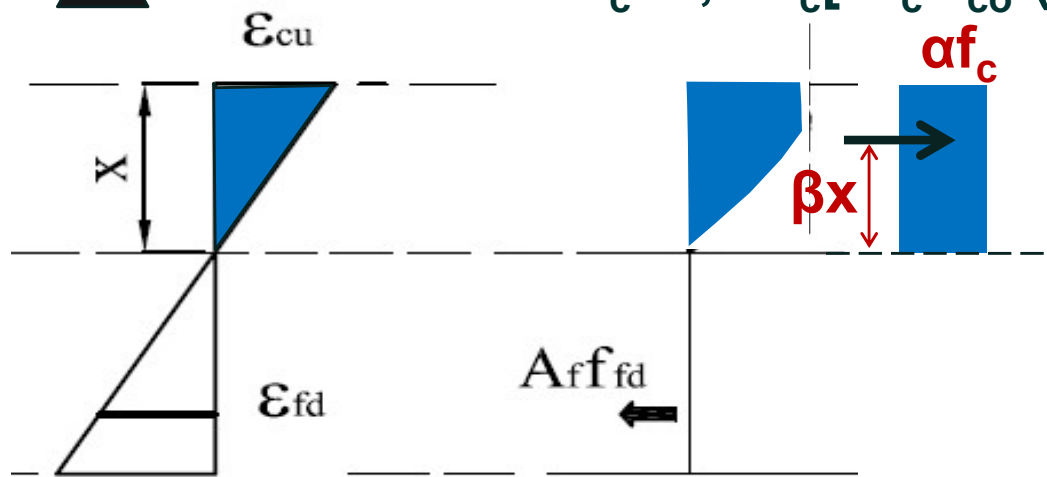
Εξίσωση ροπών:

$$M_R = F_c (\text{or } F_f) \cdot [d - (1 - \beta) x]$$

$$M_{\max} = ql^2 / 8$$

Συμβατικό σκυρόδεμα

$$\sigma_c = 0,85f_c [2\varepsilon_c/\varepsilon_{co} - (\varepsilon_c/\varepsilon_{co})^2]$$

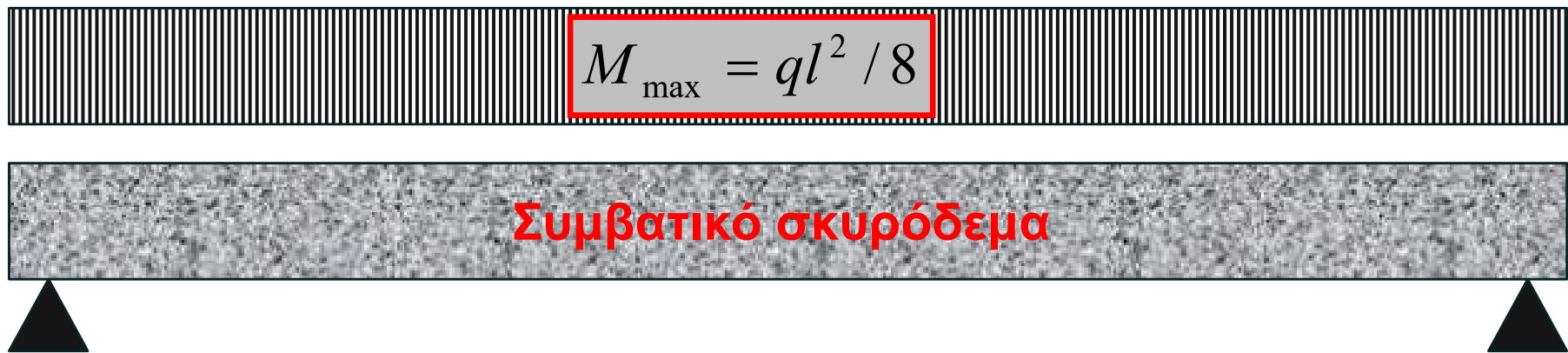


Το ποσοστό των ΙΟΠ ράβδων εξαρτάται από την ικανότητα παραμόρφωσης της θλιβόμενης ζώνης

$$\begin{aligned} \varepsilon_c \leq \varepsilon_{co} & \quad \alpha = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{co}} \left(1 - \frac{\varepsilon_c}{3\varepsilon_{co}} \right) & \quad \beta = \frac{8\varepsilon_{co} - 3\varepsilon_c}{4 \cdot (3\varepsilon_{co} - \varepsilon_c)} \\ \varepsilon_{co} < \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cu} & \quad \alpha = 1 - \frac{\varepsilon_{co}}{3\varepsilon_c} & \quad \beta = \frac{6\varepsilon_c^2 - \varepsilon_{co}^2}{4 \cdot \varepsilon_c (3\varepsilon_c - \varepsilon_{co})} \end{aligned} \quad \Rightarrow$$

Οριακή παραμόρφωση σκυρ. $\varepsilon_{cu}=0,0035$ ($\varepsilon_{co}=0,002$)

► $\alpha=0,81$ και $\beta=0,584$



$$F_c = \alpha f_c b x$$

$$F_{fd} = A_f f_{fd}$$

$$F_c = F_{fd}$$

$$\frac{x}{d} = \frac{\epsilon_{cu}}{\epsilon_{fd} + \epsilon_{cu}}$$

$\epsilon_{cu} = 0,0035$
 $\alpha = 0,81$
 $\beta = 0,584$

$$M = F_c (\text{ or } F_f) \cdot [d - (1 - \beta)x]$$

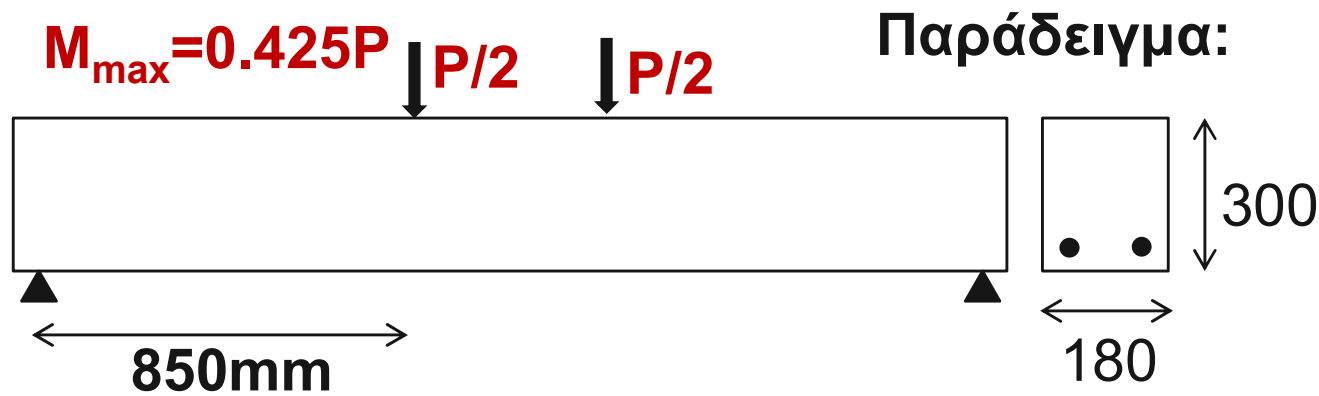
$$f_{fd} = E_f \epsilon_{fd}$$

Από ισορροπία δυνάμεων:

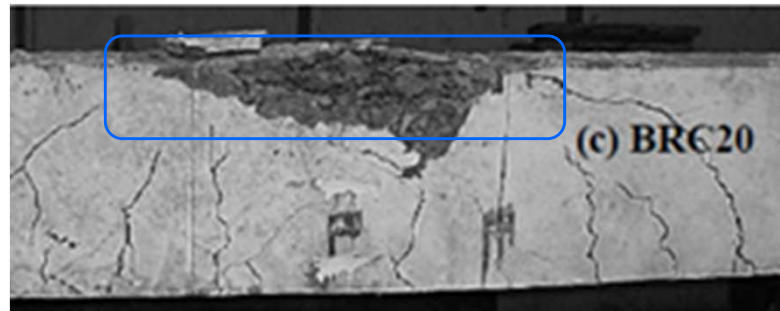
$$\rho_f = \frac{A_f}{bd} = 0.81 \frac{f_c}{f_{fd}} \frac{0.0035}{0.0035 + \epsilon_{fd}}$$

Η φέρουσα ικανότητα (σε ροπή) είναι:

$$M_R = \rho_f f_{fd} \left(1 - 0.52 \frac{\rho_f f_{fd}}{f_c} \right) b d^2 > M_{\max}$$



θραύση
θλιβόμενης ζώνης



Υλικά:

Σκυρόδεμα: $f_c = 47\text{MPa}$

Ράβδοι:

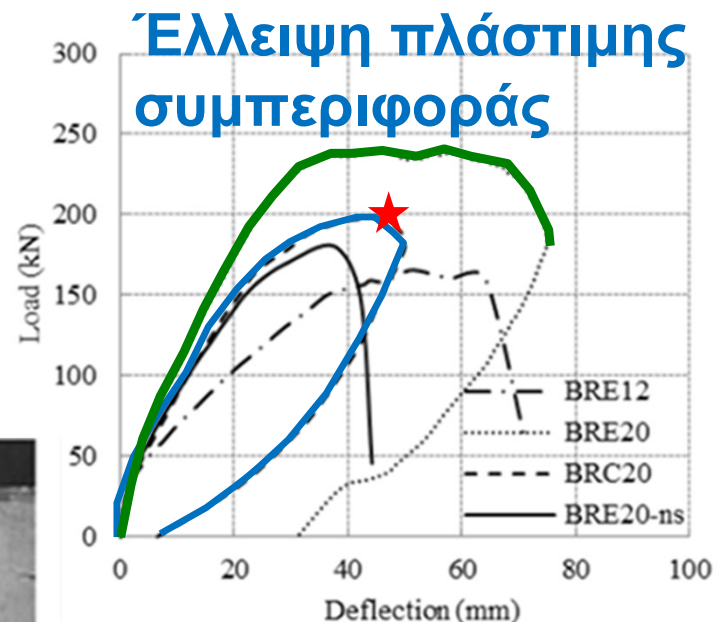
BFRP, $D_b = 20\text{mm}$, $E_B = 46\text{GPa}$, $f_{u,B} = 900\text{MPa}$, $\varepsilon_{u,B} = 0.0196$

Φορτίο αστοχίας $P = 200\text{kN} \Rightarrow M_{\max} = 85\text{kNm}$

$d = 300 - 45 = 255\text{mm}$, $\rho_f = 2 * \pi * 20^2 / (4 * 180 * 255) = 1.37\%$

$$\rho_f = \frac{A_f}{bd} = 0.81 \frac{f_c}{f_f} \frac{0.0035}{0.0035 + \varepsilon_f}$$

$$M_R = \rho_f f_f \left(1 - 0.52 \frac{\rho_f f_f}{f_c} \right) b d^2 = 86.5\text{kNm}$$



Πως μπορούμε να αναπτύξουμε πιο πλάστιμη συμπεριφορά;

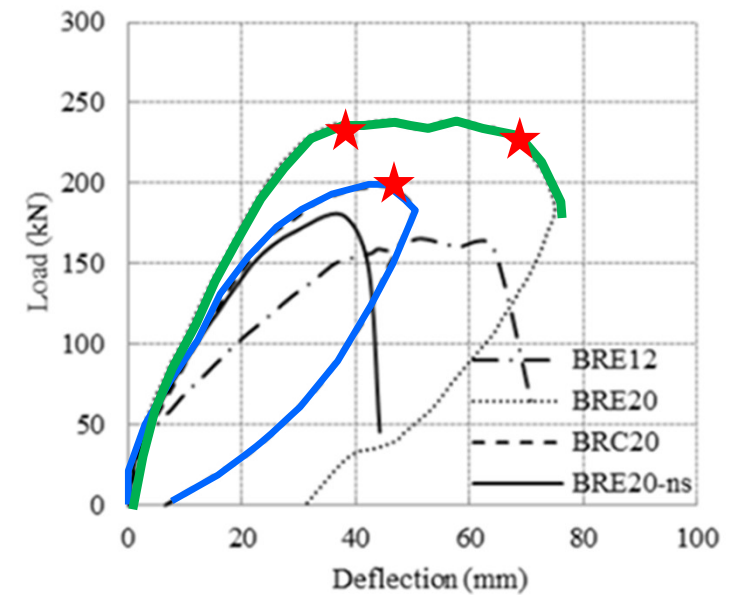
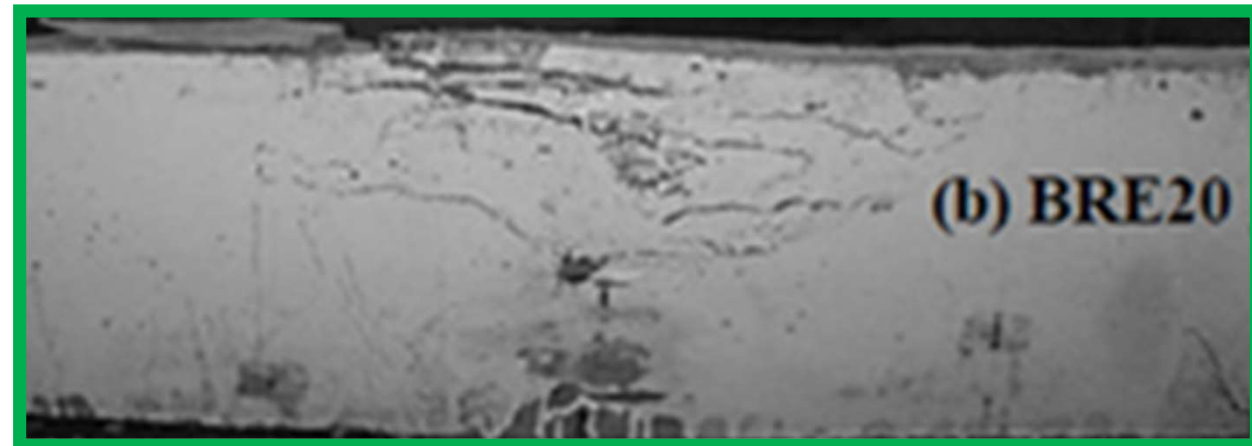
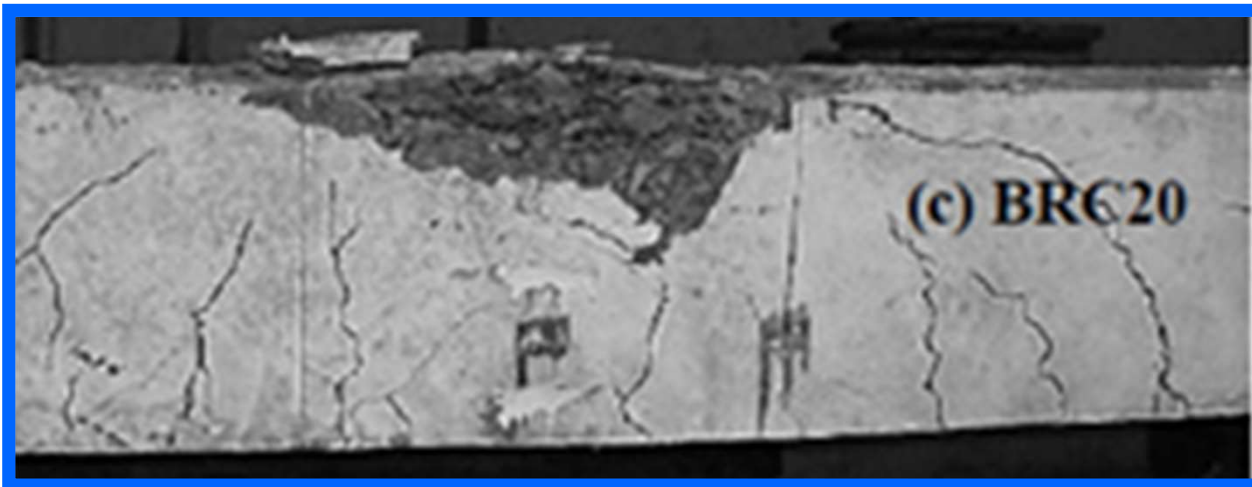
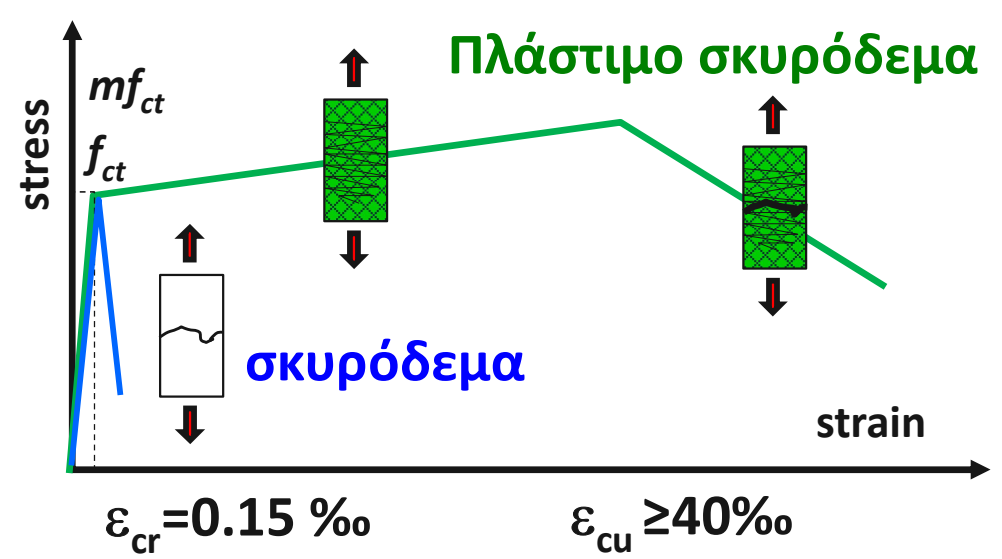
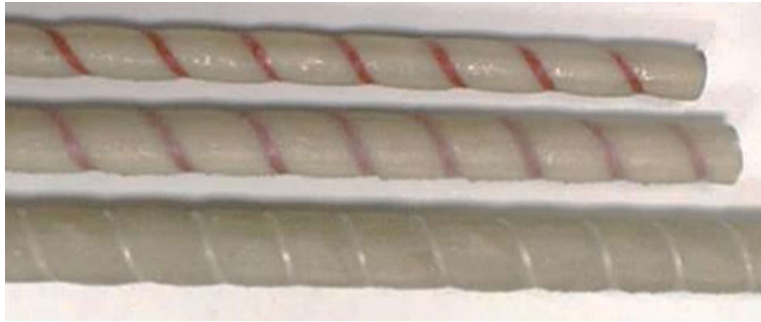
το πείραμα δεν λαμβάνει υπόψη την μακροχρόνια συμπεριφορά: αναμένεται το τοποθετημένο ποσοστό όπλισης να μην μπορεί να αναπτύξει την παραμόρφωση $66\% \varepsilon_{u,B}$, οπότε η φιλοσοφία σχεδιασμού βασίζεται σε υπερόπλιση (π.χ. εδώ $\rho > 1.37\%$)

Με επαναλήψεις:

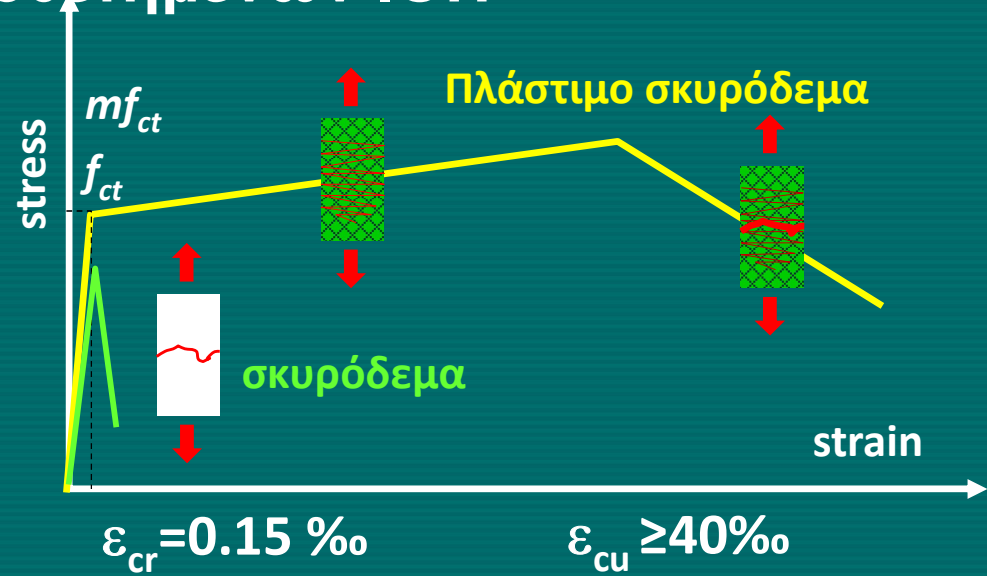
$\varepsilon_f = 0,0129 \Rightarrow 66\% \varepsilon_{u,B}$

Η θεωρ. αντοχή M_R , βάσει των θεωρήσεων, προσεγγίζει την πραγματική αντοχή M_{\max}

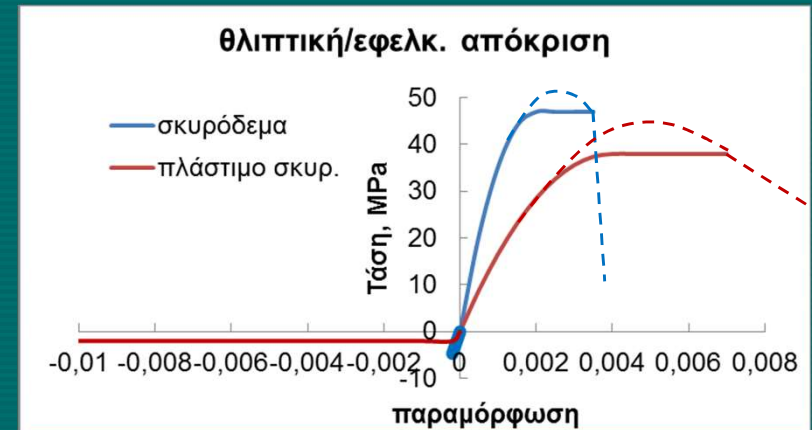
Καινοτόμες τεχνικές: Βελτιστοποίηση Απόδοσης των εσωτερικώς τοποθετημένων ΙΟΠ



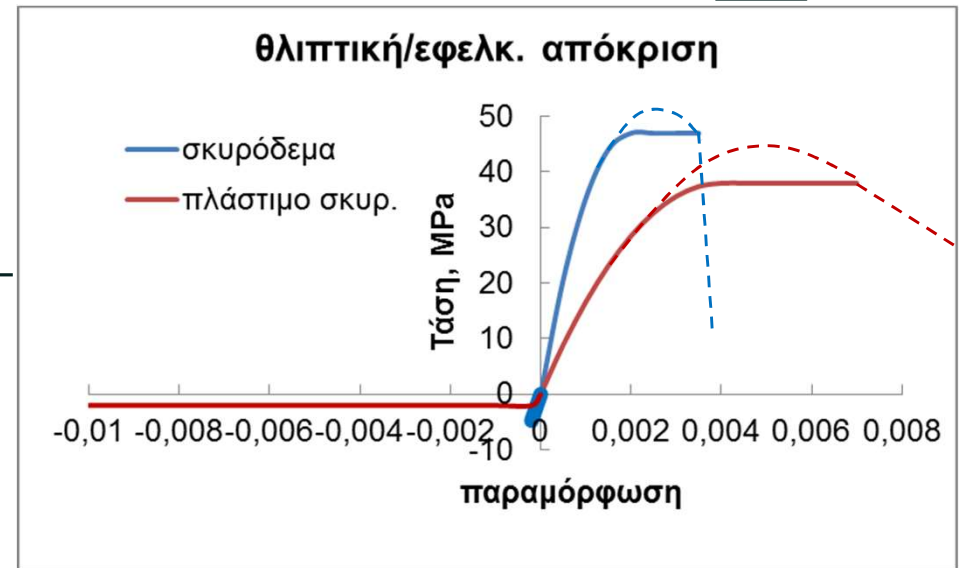
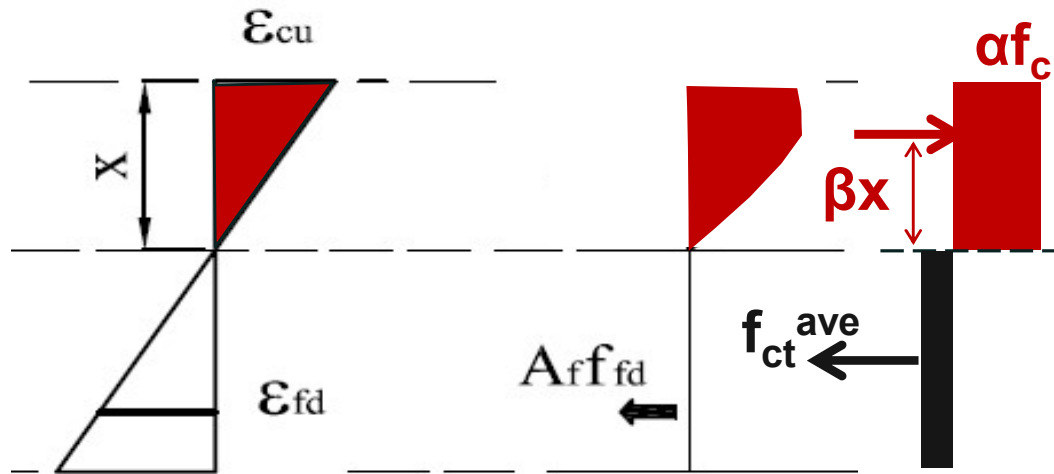
Καινοτόμες τεχνικές: Βελτιστοποίηση Απόδοσης των εσωτερικώς τοποθετημένων ΙΟΠ



Παράδειγμα: συνέχεια



Πλάστιμο σκυρόδεμα



$$F_c = \alpha f_c b x$$

$$F_{fd} = A_f f_{fd}$$

$$F_{ct} = f_{ct}^{ave} b (h - x)$$

$$F_c = F_{fd} + F_{ct}$$

$$\varepsilon_c \leq \varepsilon_{co} \quad \alpha = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{co}} \left(1 - \frac{\varepsilon_c}{3\varepsilon_{co}} \right) \quad \beta = \frac{8\varepsilon_{co} - 3\varepsilon_c}{4 \cdot (3\varepsilon_{co} - \varepsilon_c)}$$

$$\varepsilon_{co} < \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cu} \quad \alpha = 1 - \frac{\varepsilon_{co}}{3\varepsilon_c} \quad \beta = \frac{6\varepsilon_c^2 - \varepsilon_{co}^2}{4 \cdot \varepsilon_c (3\varepsilon_c - \varepsilon_{co})}$$

Έστω: $\varepsilon_{cu}=0,007$ ($\varepsilon_{co}=0,004$) $\Rightarrow \alpha=0,81$ και $\beta=0,584$

Από ισορροπία δυνάμεων ($f_{ct}^{ave}=2\text{MPa}$, $f_c=38\text{MPa}$, $\rho_f=1.37\%$):

$$\rho_f = \frac{0.81 f_c + f_{ct}^{ave}}{f_{fd}} \cdot \frac{0.007}{0.007 + \varepsilon_{fd}} - \frac{f_{ct}^{ave}}{f_{fd}} \cdot \frac{h}{d}$$

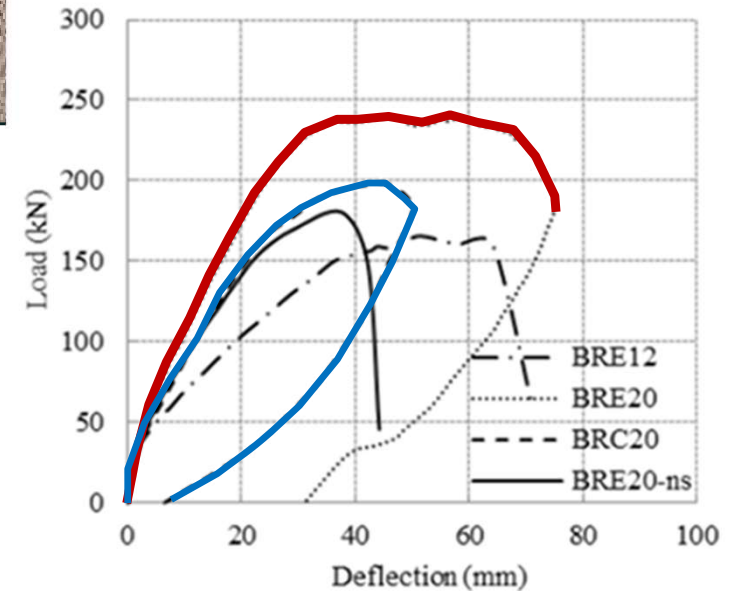
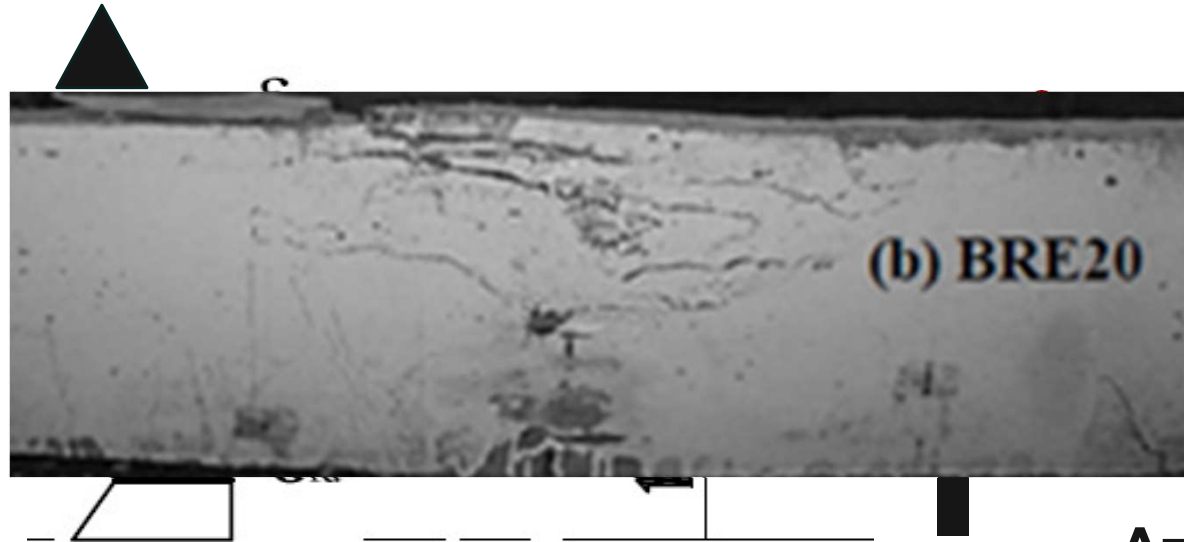
Με

επαναλήψεις:

$\varepsilon_f=0,0138 \Rightarrow$

70% $\varepsilon_{u,B}$

Πλάστιμο σκυρόδεμα



Από ισορροπία δυνάμεων:

$$F_c = \alpha f_c b x$$

$$F_{fd} = A_f f_{fd}$$

$$F_{ct} = f_{ct}^{ave} b (h - x)$$

$$F_c = F_{fd} + F_{ct}$$

$$\epsilon_f = 0,0138$$

$$x = \frac{A_f f_f + b h f_{ct}^{ave}}{(0.81 f_c + f_{ct}^{ave}) b}$$

$$\epsilon_{cu} = 0,007 \quad (\epsilon_{co} = 0,004) \Rightarrow \alpha = 0,81 \text{ και } \beta = 0,584$$

$$M_R = F_f \cdot [d - (1 - \beta)x] + f_{ct}^{ave} b (h - x) [0.5h + (\beta - 0.5)x]$$

$$\Rightarrow M_R = 99.5 \text{ kNm}$$

$$\text{Φορτίο αστοχίας } P = 235 \text{ kN} \Rightarrow M_{max} = 235 \times 0,425 = 100 \text{ kNm}$$

2 Ράβδοι BFRP, $D_b=20\text{mm}$, $E_B=46\text{GPa}$, $f_{u,B}=900\text{MPa}$, $\varepsilon_{u,B}=0.0196$

Σκυρόδεμα: $f_c=47\text{MPa}$

$\varepsilon_{cu}=0,0035$ ($\varepsilon_{co}=0,002$)

► $\alpha=0,81$ και $\beta=0,584$

$\varepsilon_f=0,0129 \Rightarrow 66\%\varepsilon_{u,B}$

$x=0,0035/(0,0035+0,0129)*255=54\text{mm}$

$M_R=86.5\text{kNm}$ ($M_{\text{πειρ.}}=85\text{kNm}$)

Πλάστιμο σκυρόδεμα : $f_c=38\text{MPa}$

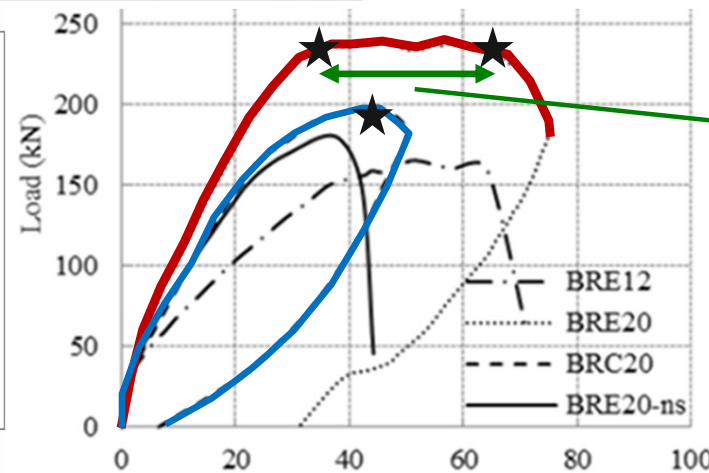
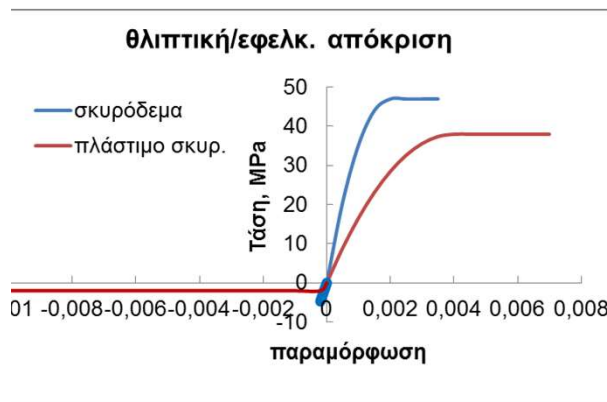
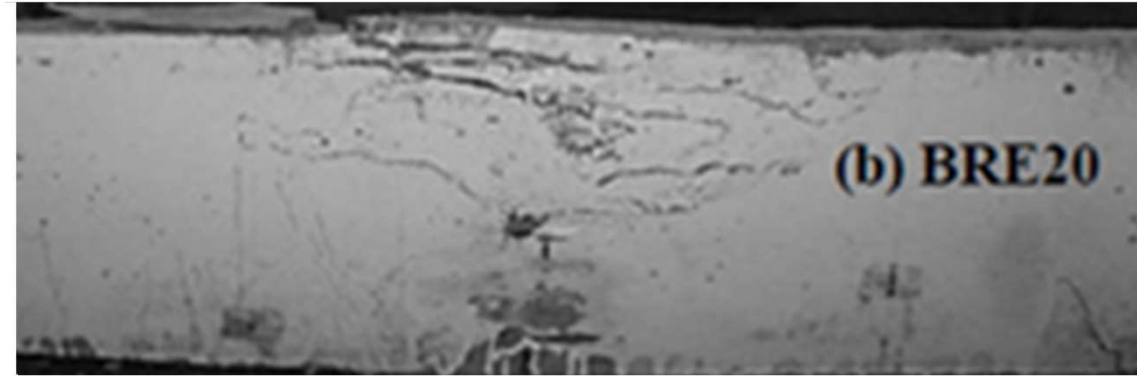
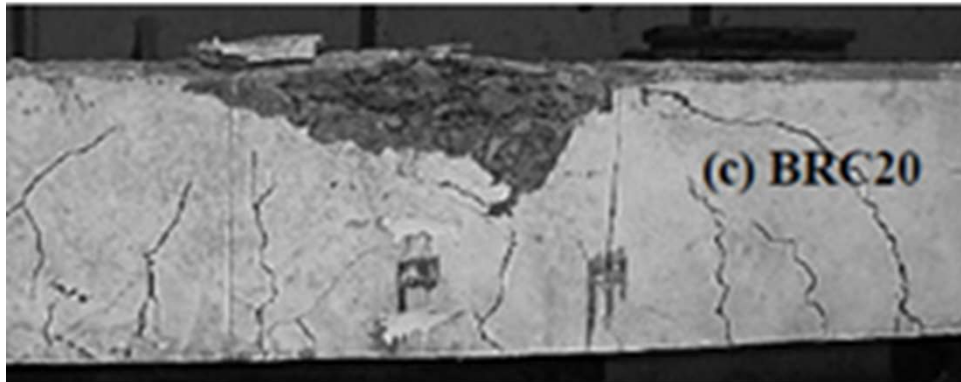
$\varepsilon_{cu}=0,007$ ($\varepsilon_{co}=0,004$)

► $\alpha=0,81$ και $\beta=0,584$

$\varepsilon_f=0,0138 \Rightarrow 70\%\varepsilon_{u,B}$

$x=0,007/(0,007+0,0138)*255=86\text{mm}$

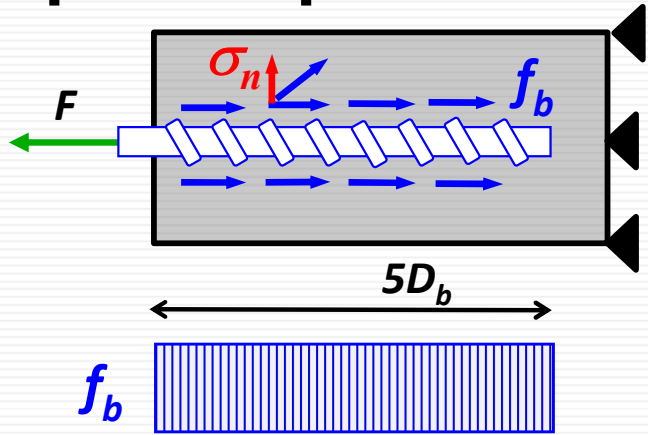
$M_R=99.5\text{kNm}$ ($M_{\text{πειρ.}}=100\text{kNm}$)



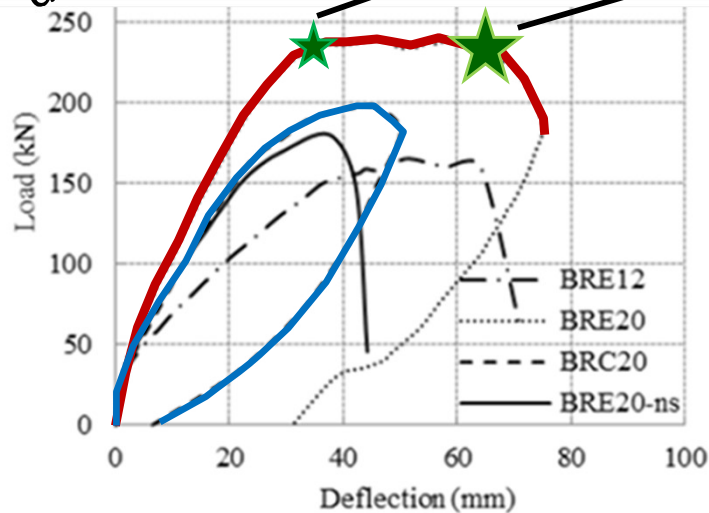
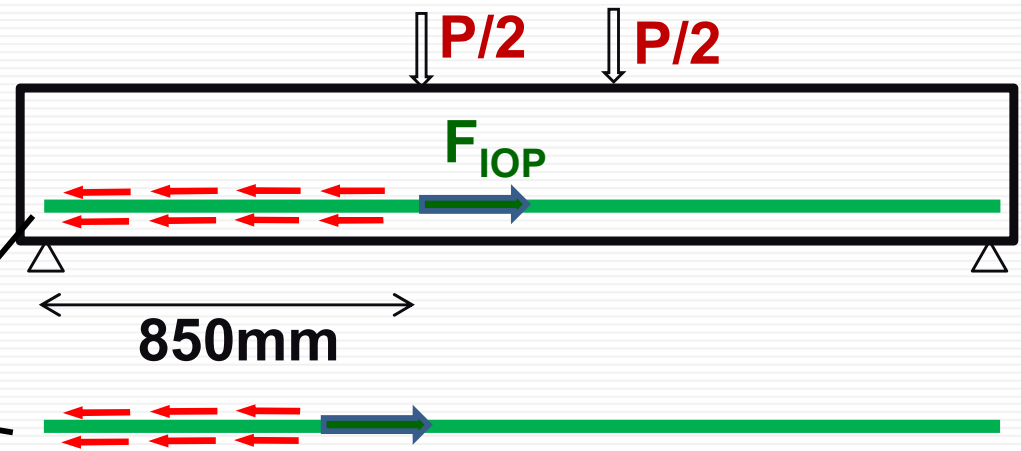
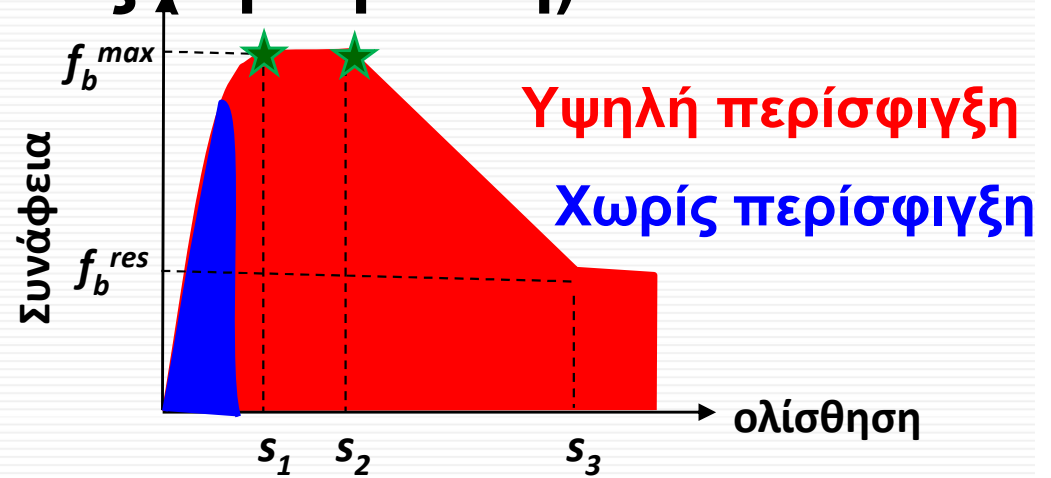
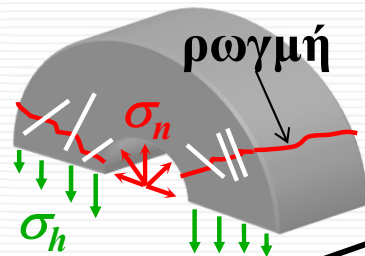
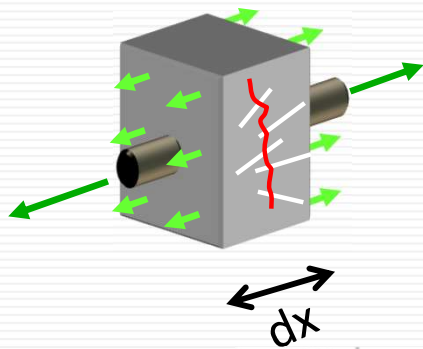
Από που έρχεται η «πλαστιμότητα» όταν οι ράβδοι είναι ελαστικές;

- 1) Ικανότητα παραμόρφωσης θλιβόμενης ζώνης
- 2) Συνάφεια ράβδων – σκυροδ.

Συνάφεια Ράβδου – Σκυροδέματος (αγκύρωση)

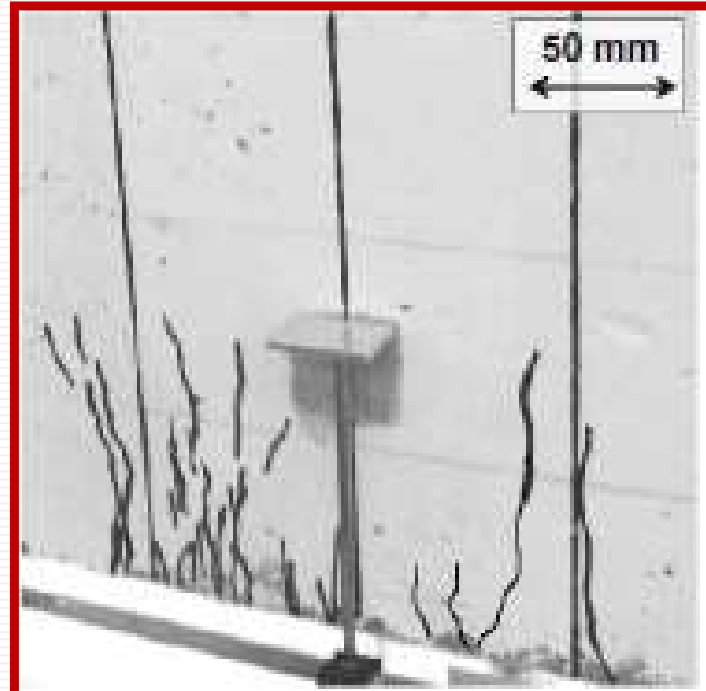
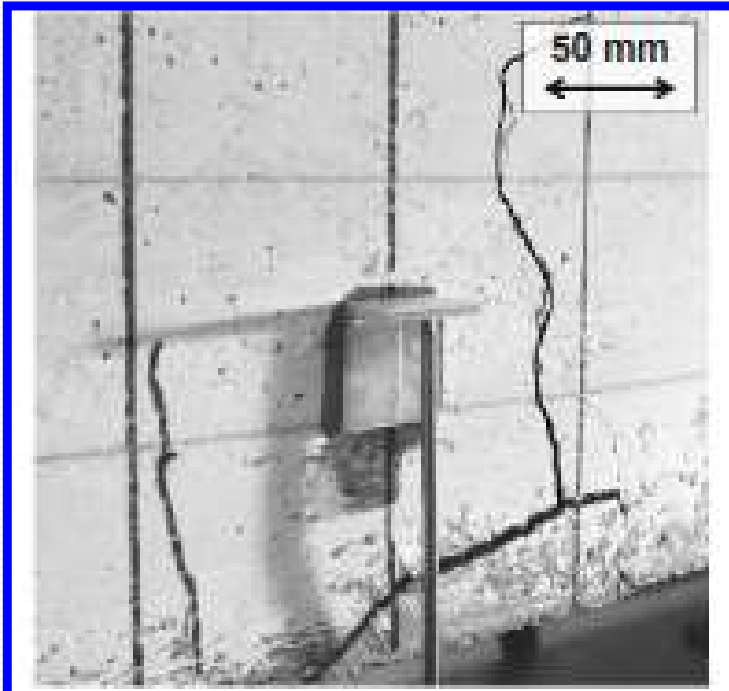
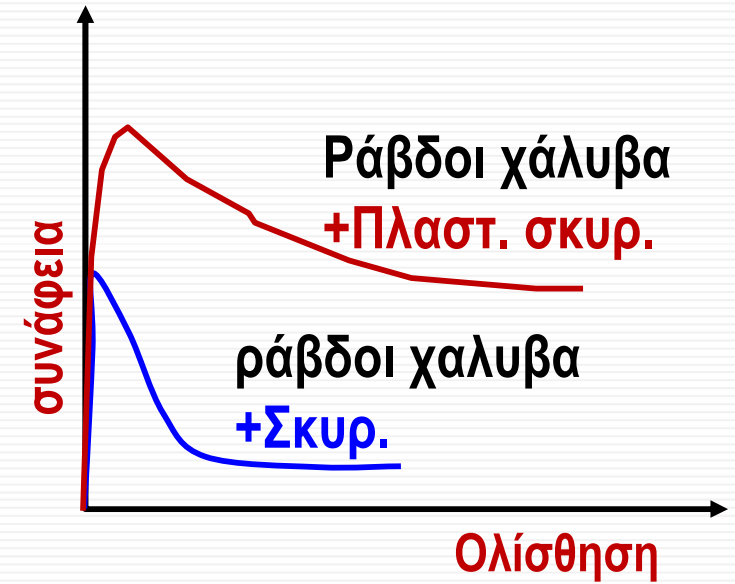
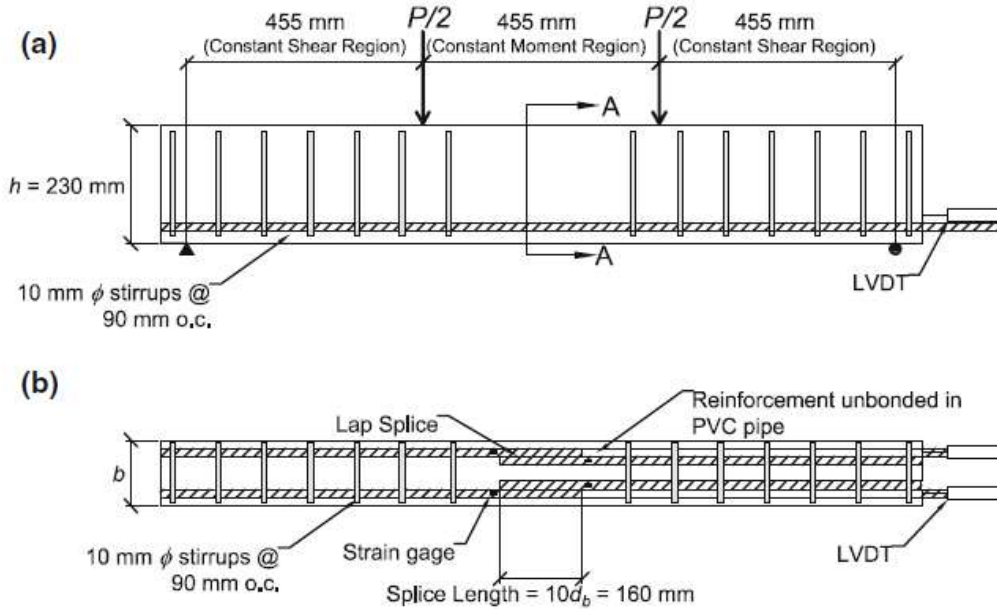


Διαμήκειες & περιφερειακές εφελκυστικές τάσεις στην μήτρα



Η αυξημένη ικανότητα παραμόρφωσης της ECC μήτρας αποδίδεται στον νόμο συνάφειας – ολίσθησης ως να υπήρχε περίσφιγξη (άρα αυξημένη ενέργεια που συσσωρεύεται μέχρι την ανεμπόδιστη ολίσθηση του οπλισμού)

Αντοχή μάτισης (μελέτη συνάφειας στο διάστημα σταθερής ροπής)

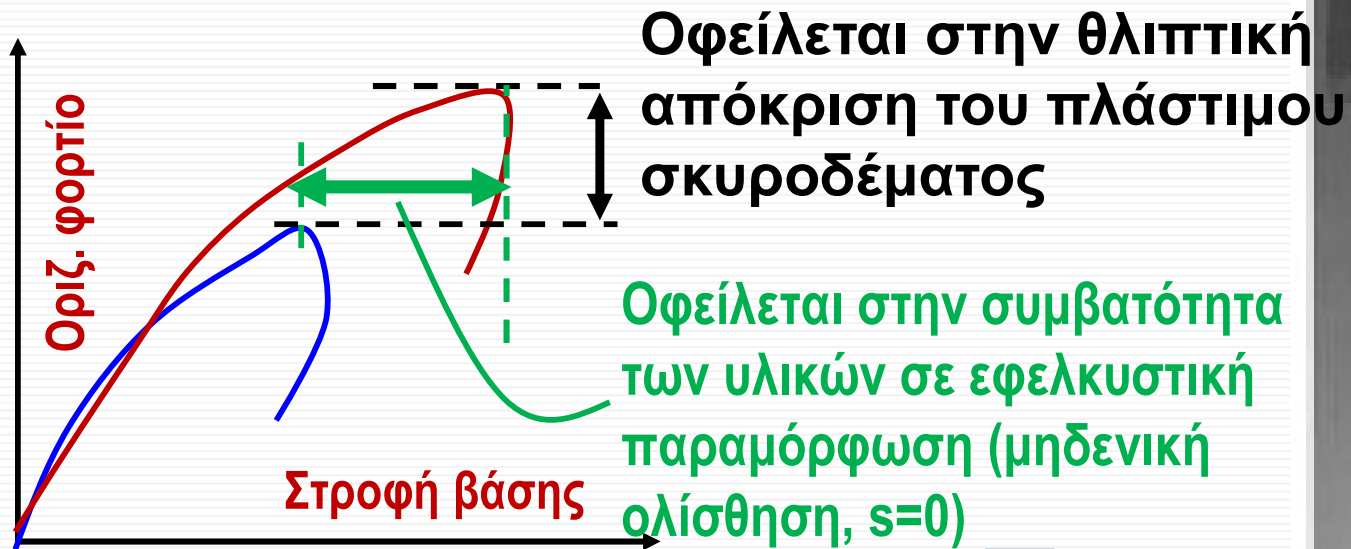


R/C



R/ECC

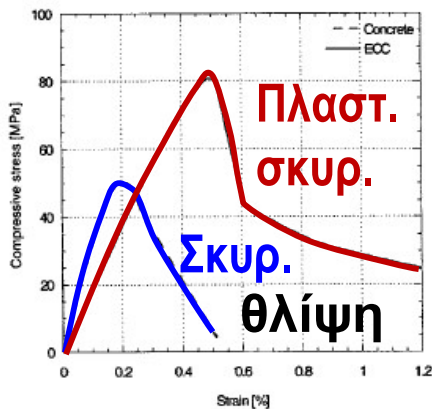
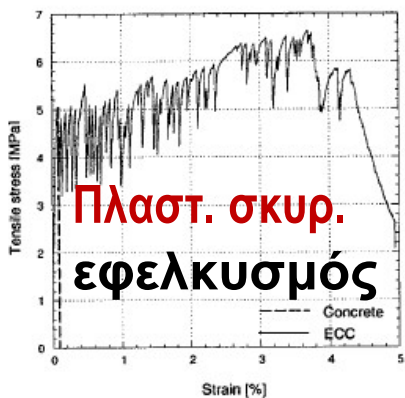




Εφελκυστική ικανότητα παραμόρφωσης, ϵ_t σκυροδέματος: 0.015%
 Πλάστιμου σκυροδέματος: 4%
 Ράβδων ΙΟΠ: 3.8%

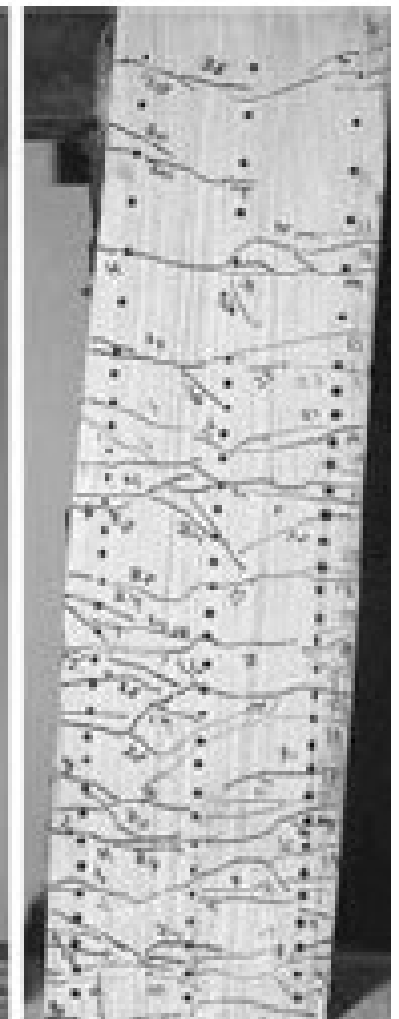
Ολίσθηση:

$$ds = [\epsilon_s - \epsilon_c] \cdot dx$$



S-1

ΙΟΠ ράβδοι
 +Σκυρ.



S-2

ΙΟΠ ράβδοι
 +Πλαστ. σκυρ.