ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΜΕ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ

ΑΘ. Χ. ΤΡΙΑΝΤΑΦΥΛΛΟΥ

ΑΝ. ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Ερευνητικό Πρόγραμμα Ο.Α.Σ.Π.

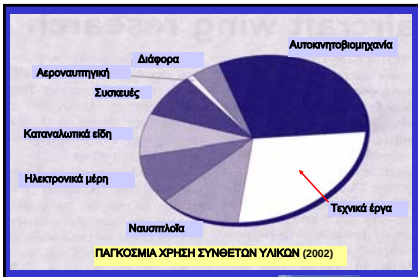
Σύσταση και Διάχυση Τεχνικών Οδηγιών για την Ενίσχυση Κατασκευών με Σύνθετα Υλικά

Τμήματα Πολιτικών Μηχανικών

ΠΑΝ. ΠΑΤΡΩΝ	*Ανάδοχος Φορέας*
Δ.Π.Θ.	*Συνεργαζόμενος Φορέας*
Ε.Μ.Π.	*Συνεργαζόμενος Φορέας*

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

- ΓΕΝΙΚΑ, ΥΛΙΚΑ & ΤΕΧΝΙΚΕΣ
- ΒΑΣΕΙΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ
- ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΣΕ ΚΑΜΨΗ
- ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΣΕ ΔΙΑΤΜΗΣΗ
- ΕΓΚΙΒΩΤΙΣΜΟΣ
- ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤ. ΛΕΠΤΟΜΕΡΕΙΕΣ, ΕΦΑΡΜΟΓΗ
- ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ
- ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ



ΠΑΓΚΟΣΜΙΑ ΧΡΗΣΗ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ (2002)

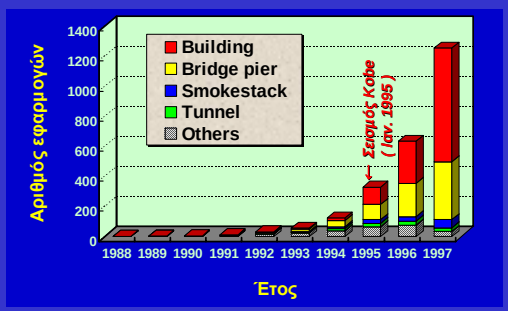
ΣΤΙΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ :

Ετήσιος ρυθμός αύξησης ~4%

Ετήσια κατανάλωση μέχρι το 2007 → 300.000 τόννοι

ΙΑΠΩΝΙΑ

BUILDING RESEARCH INSTITUTE

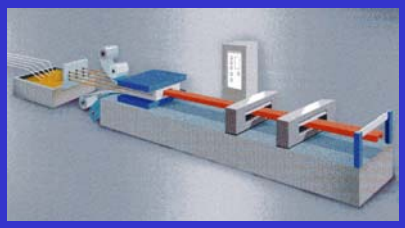


Βασικά Υλικά Ενισχύσεων

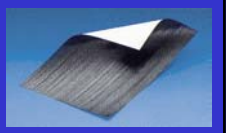
- Ελάσματα CFRP
- Ελάσματα-L CFRP

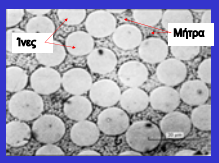
- Υφάσματα μίας διεύθυνσης
- Υφάσματα πολλών διευθύνσεων

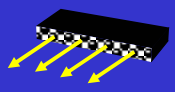
ΕΞΕΛΑΣΗ



Υφάσματα



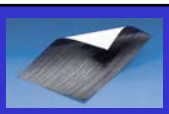




$E_f = E_{fib}V_{fib}+E_mV_m \sim E_{fib}V_{fib}$

$f_f \sim f_{fib}V_{fib}$

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ



Ο προμηθευτής υλικών Χ διαθέτει εύκαμπτα "υφάσματα" ινών άνθρακα με πλάτος 0.70 m και βάρος 260 g/m^2.
Ιδιότητες ινών: E_{fib} = 230 GPa, f_{fib} = 3500 MPa.
Το ονομαστικό πάχος του υφάσματος, t_{fib}, υπολογίζεται με βάση το βάρος του και την (γνωστή) πυκνότητα του υλικού των ινών, ρ_{fib} (ρ_{fib}xt_{fib} = 260, ρ_{fib} σε g/m^2, t_{fib} σε mm), έστω t_{fib} = 0.13 mm.
Υποθέτουμε ότι μετά τον εμποτισμό με την απαιτούμενη ποσότητα ρητίνης το πάχος του συνθέτου υλικού φθάνει τα 0.3 mm, άρα V_{fib} = 0.13/0.3 = 43 % .
Αν μετρηθούν τα f_{fib} και E_{fib} θα προκύψουν τιμές μικρότερες από 0.43x230 GPa και 0.43x3500 MPa, αντίστοιχα, έστω κατά 10% (οπότε r_1 = 0.9): 89 GPa και 1355 MPa. Επομένως, στους υπολογισμούς θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν:

(α) E_f = 89 GPa, f_f = 1355 MPa, t_f = 0.3 mm, **ή**

(β) E_f = **0.9**x230 GPa, f_f = **0.9**x3500 MPa, t_f = 0.13 mm.

Έλασμα για αύξηση καμπτικής αντοχής δοκού

Υφασμα για αύξηση διατμητικής αντοχής δοκού

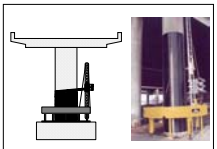
Επικόλληση ελασμάτων για την ενίσχυση καταστρώματος γέφυρας

ΒΑΣΙΚΗ ΤΕΧΝΙΚΗ

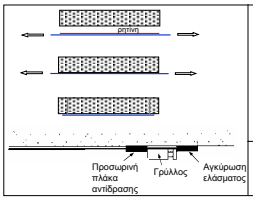
Περιτύλιξη υποστυλώματος με ύφασμα

Εμποτισμός υφάσματος σε ειδική "μπανιέρα" ρητίνης

Εφαρμογή προ-εμποτισμένου υφάσματος σε υποστύλωμα



Αυτοματοποιημένη περιτύλιξη



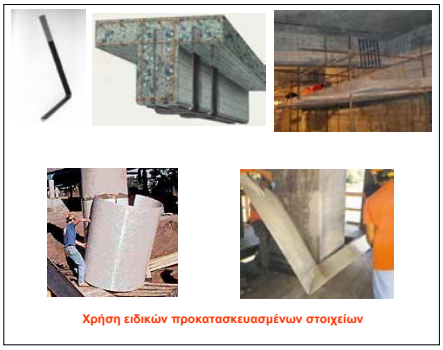
Προένταση

ΕΙΔΙΚΕΣ ΤΕΧΝΙΚΕΣ

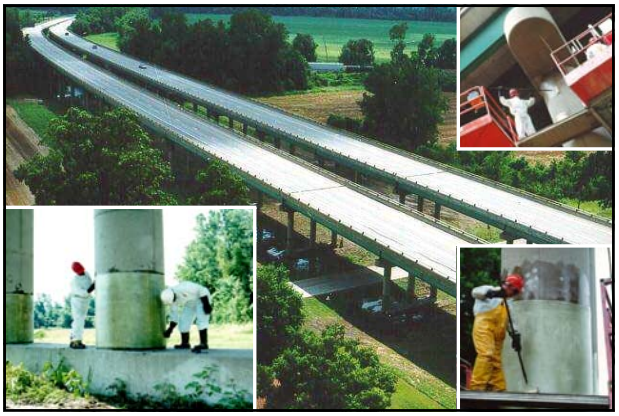
Επιταχυμένη σκλήρυνση με θέρμανση

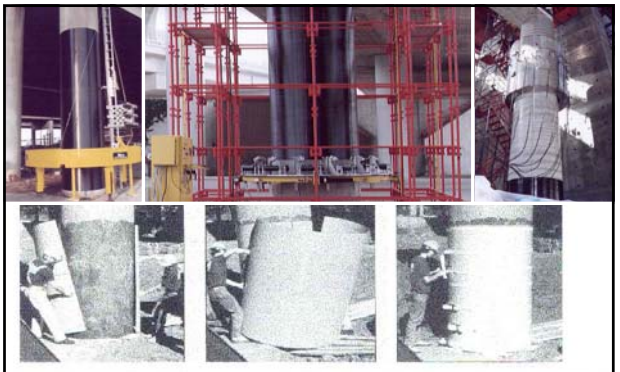
Τοποθέτηση σε εγκοπές

ΕΙΔΙΚΕΣ ΤΕΧΝΙΚΕΣ

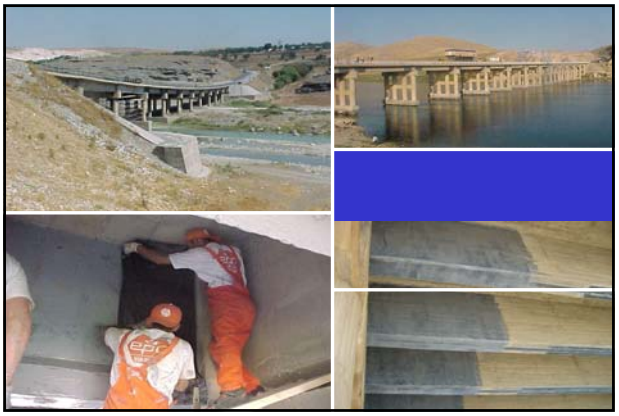


Χρήση ειδικών προκατασκευασμένων στοιχείων





Two men install a Snap Tite jacket set on a 48" column. Typical installation time for a 20' tall column, bottom to top in less than three hours.



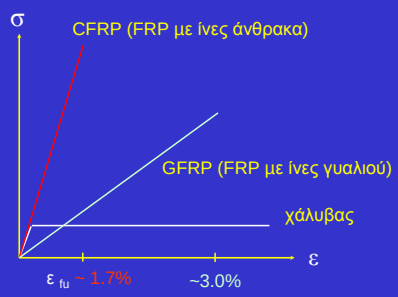
ΚΤΙΡΙΟ Χ.Α.Ν.Θ. – ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ

- Χαμηλό βάρος
- Δεν διαβρώνονται
- Πολύ μεγάλα μήκη
- Ευκολία, μεγάλη ταχύτητα εφαρμογής, μικρή όχληση
- Υψηλή αντοχή
- Δεν αυξάνουν τις διαστάσεις
- Δυνατότητα "μανδύα" χωρίς αύξηση δυσκαμψίας

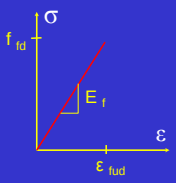
+

- Υψηλό κόστος υλικών (όχι κατ' ανάγκη και επέμβασης !)
- Έλλειψη πλαστιμότητας (όχι παραμορφωσιμότητας !)
- Προστασία έναντι πυρκαϊάς
- Έλλειψη «εκπαίδευσης»

−



ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΟΣ ΝΟΜΟΣ ΓΙΑ ΤΑ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ ΣΕ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟ



$f_{fd} = f_{fk} / \gamma_f$

Ενεργός αντοχή σχεδιασμού
$f_{fde} = \eta_e f_{fd}$

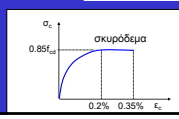
Συντελεστής ασφάλειας υλικού γ_f

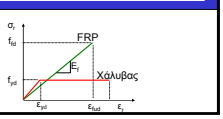
Ίνες	A	B
Άνθρακας	1.20	1.35
Αραμίδιο	1.25	1.45
Γυαλί	1.30	1.50

A : Δύσκαμπτες λωρίδες σε συνήθεις συνθήκες, υφάσματα υπό αυστηρό ποιοτικό έλεγχο.

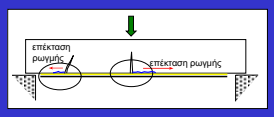
B : Υφάσματα σε συνήθεις συνθήκες, οποιοδήποτε υλικό σε δύσκολες συνθήκες

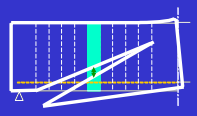
Αστοχία λόγω αποκόλλησης: $\gamma_f = \gamma_b = 1.5$

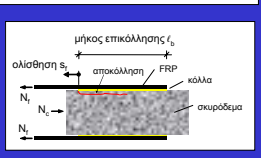


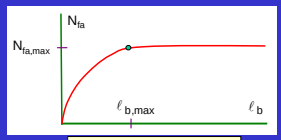


ΣΥΝΑΦΕΙΑ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ - ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ









$\ell_b \geq \ell_{b,max}$ $\quad N_{fa} = N_{fa,max} = c_1 k_c k_b b_f \sqrt{f_{ctm} E_f t_f}$

$\ell_b < \ell_{b,max}$ $\quad N_{fa} = N_{fa,max} \frac{\ell_b}{\ell_{b,max}} \left(2 - \frac{\ell_b}{\ell_{b,max}}\right)$

$\ell_{b,max} = \sqrt{E_f t_f / c_2 f_{ctm}}$

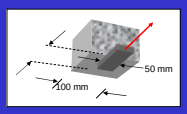
$c_1 = 0.64 \quad c_2 = 2$

$k_b = \sqrt{\frac{1.125\left(2 - b_f/b\right)}{1 + b_f/400}} \geq 1$

$k_c = 1.00$ κανονική συμπύκνωση

$= 0.87$ πτωχή συμπύκνωση

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΔΥΝΑΜΗΣ ΑΠΟΚΟΛΛΗΣΗΣ



ΔΕΔΟΜΕΝΑ

$E_f = 180$ GPa $\quad t_f = 1.2$ mm

$f_f = 3000$ MPa $\quad f_{ctm} = 1.9$ MPa

$\ell_{b,max} = \sqrt{(180000 \times 1.2)/(2 \times 1.9)} = 238$ mm

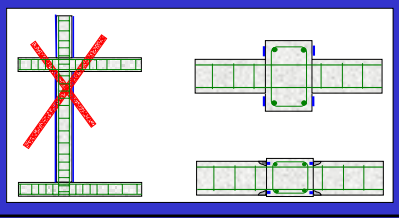
$N_{fa,max} = 0.64 \times 1.0 \times 1.22 \times 50\sqrt{1.9 \times 180000 \times 1.2} = 25.010\,N \approx \boxed{25\,kN}$

Αν το έλασμα εξαντλούσε την αντοχή του: 3000x50x1.2 = **180 kN**

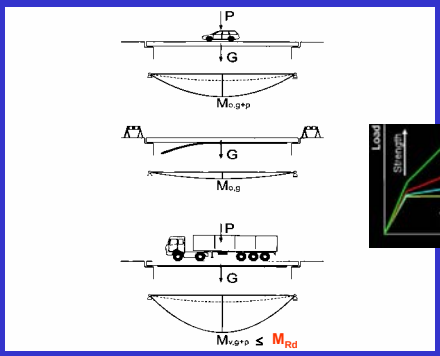
"ΣΥΜΦΕΡΕΙ" : ΑΥΞΗΣΗ ΠΛΑΤΟΥΣ & ΜΕΙΩΣΗ ΠΑΧΟΥΣ

ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΣΕ ΚΑΜΨΗ

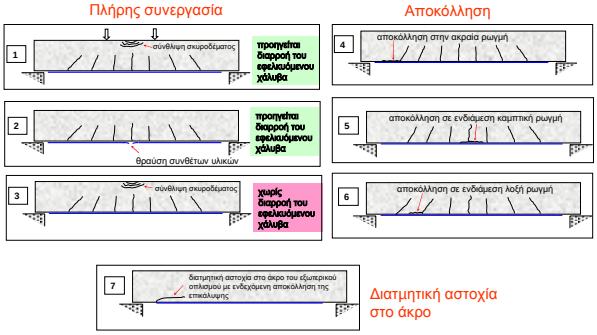
Δοκοί - πλάκες



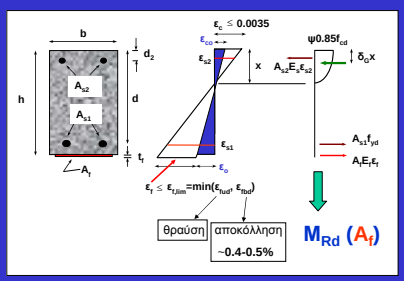
Υποστυλώματα



ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΑΣΤΟΧΙΑΣ



Ανάλυση διατομής για την οριακή κατάσταση αντοχής σε κάμψη



$$M_{Rd} = A_{s1} f_{yd}(d - \delta_G \cdot x) + A_f E_f \varepsilon_f (h - \delta_G \cdot x) + A_2 f_{sd2}(\delta_G \cdot x - d_2) \quad (1)$$

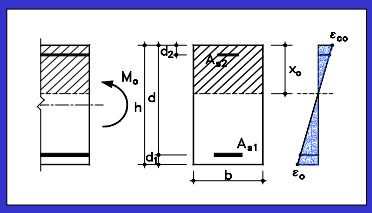
$$\psi \cdot 0.85 f_{cd} b x + A_{s2} f_{sd2} = A_{s1} f_{yd} + A_f E_f \varepsilon_f \quad (2)$$

$$f_{sd2} = \varepsilon_c \frac{x - d_2}{x} E_s \le f_{yd} \qquad \varepsilon_f = \varepsilon_c \frac{h - x}{x} - \varepsilon_o \le \varepsilon_{f,lim} \quad (3)$$

$$\psi = \begin{cases} 1000\varepsilon_c\left(0.5 - \frac{1000}{12}\varepsilon_c\right) \text{ για } \varepsilon_c \le 0.002 \\ 1 - \frac{2}{3000\varepsilon_c} \text{ για } 0.002 \le \varepsilon_c \le 0.0035 \end{cases} \qquad \delta_G = \begin{cases} \frac{8 - 1000\varepsilon_c}{4(6 - 1000\varepsilon_c)} \text{ για } \varepsilon_c \le 0.002 \\ \frac{1000\varepsilon_c(3000\varepsilon_c - 4) + 2}{2000\varepsilon_c(3000\varepsilon_c - 2)} \text{ για } 0.002 \le \varepsilon_c \le 0.0035 \end{cases}$$

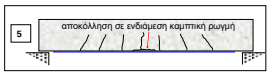
Αρχική κατάσταση

(εντατική κατάσταση στη φάση της ενίσχυσης)



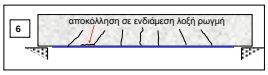
$$\varepsilon_{fbd,fl} \approx \alpha_{fl} \frac{0.5 k_c k_b}{\gamma_b} \sqrt{\frac{f_{ctm}}{E_f t_f}}$$

1.30



$$\varepsilon_{fbd,fl-sh} \approx \alpha_{fl-sh} \frac{0.5 k_c k_b}{\gamma_b} \sqrt{\frac{f_{ctm}}{E_f t_f}}$$

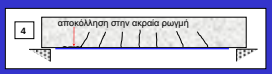
1.25

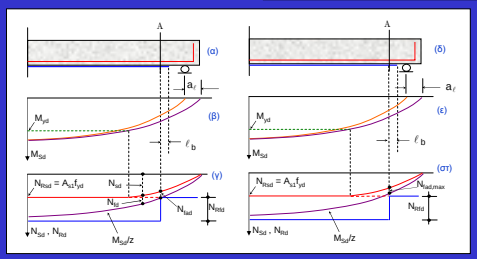


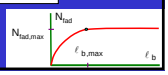
Απλουστευτικά: $\varepsilon_{fbd} \approx 0.8\%$

Αποφυγή αποκόλλησης στο άκρο

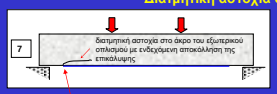
→ Απαιτούμενο μήκος αγκύρωσης







Διατμητική αστοχία στο άκρο

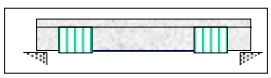


$$V_{Sd,end} \le 1.4 V_{cd}$$

$$M_{Sd,end} \le \frac{2}{3} M_{Rd}$$

Αν δεν ικανοποιούνται :

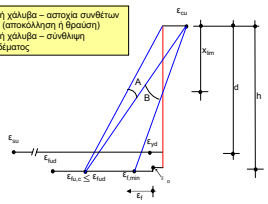
Ενίσχυση άκρων σε τέμνουσα



Απαίτηση πλαστιμότητας

Περιοχή A : διαρροή χάλυβα – αστοχία συνθέτων υλικών (αποκόλληση ή θραύση)

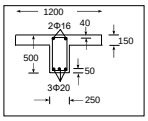
Περιοχή B : διαρροή χάλυβα – σύνθλιψη σκυροδέματος



Ελάχιστη επιτρεπόμενη παραμόρφωση στα σύνθετα υλικά για δεδομένη πλαστιμότητα καμπυλοτήτων μ_ϕ

$$\varepsilon_{f,min} = \varepsilon_{yd} \frac{\mu_\phi}{\left(\frac{d}{h} - \frac{x_y}{h}\right)} \frac{h}{d} - \varepsilon_{cu} - \varepsilon_o$$

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ



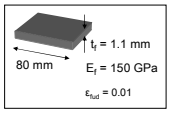
Αμφιέρειστη πλακοδοκός

Άνοιγμα = 5 m C20/25 S500s

g_d = 15 kN/m q_d = ~~30 kN/m~~ → **50 kN/m**

$M_o = 15x5^2/8 = 46.9$ kNm $\varepsilon_o = 0.00066$

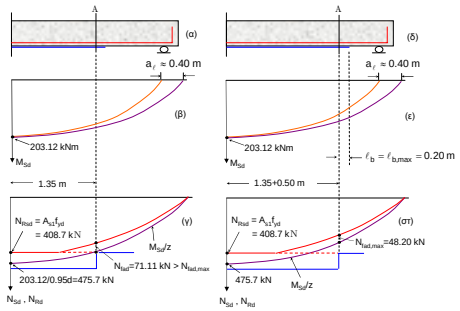
$M_{Sd} = (15+50)x5^2/8 = 203$ kNm



Υπολογισμός παραμόρφωσης για αποκόλληση: $\varepsilon_{fbd} = 0.002$
$\varepsilon_{fdm} = \min(0.002, 0.01) = 0.002$.

Ανάλυση διατομής → x=105 mm, $\varepsilon_o = 0.00071$, $A_f = 247$ mm²
3 ελάσματα → $A_f = 247$ mm² → $M_{Rd} = 206$ kNm

Υπολογισμός αγκύρωσης



Διατμητική αστοχία στο άκρο

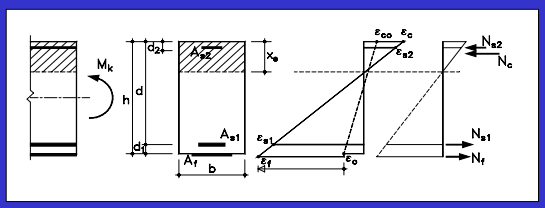
$$M_{Sd,end} = 65 \times 0.45 \times \left(\frac{5}{2} - \frac{0.45}{2}\right) = 66.54 \text{ kNm} < \frac{2}{3} M_{Rd} \quad \text{OK}$$

$$V_{Sd,end} = 65\left(\frac{5}{2} - 0.45\right) = 133.25 \text{ kN}$$

$$1.4V_{cd} = 1.4\tau_{Rd}\max(1, 1.6 - d)\min(2, 1.2 + 1.4\rho_\ell)b_w d =$$
$$= 1.4 \times 0.26 \times 1.15 \times 1.2024 \times 0.25 \times 0.25 \times 0.45 \times 10^3$$
$$= 55.62 \text{ kN}$$

ΑΠΑΙΤΕΙΤΑΙ ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΣΕ ΔΙΑΤΜΗΣΗ

Οριακή κατάσταση λειτουργικότητας

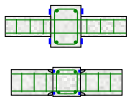


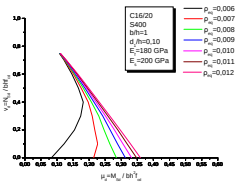
Πρόσθετος έλεγχος τάσεων στα σύνθετα υλικά:

$$\sigma_f = E_f\left(\varepsilon_c \frac{h - x_e}{x_e} - \varepsilon_o\right) \le \eta f_{fk}$$

η = 0.8 (άνθρακας)
0.5 (αραμίδιο)
0.3 (γυαλί)

ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΑ



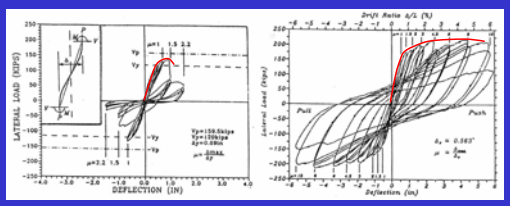


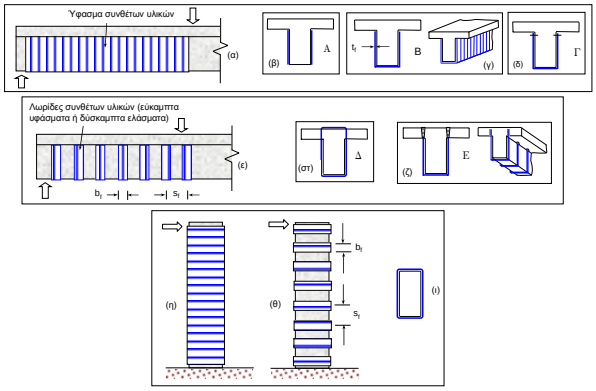
→ Αγνοείται η συνεισφορά των συνθέτων υλικών σε θλίψη

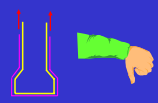
→ Ο βαθμός ενίσχυσης αυξάνεται όσο μειώνεται το αξονικό φορτίο

$$\rho_{eq} = \rho_s + \rho_f \frac{E_f}{E_s} = \frac{A_{s,tot}}{bd} + \frac{A_{f,tot}}{bd}\frac{E_f}{E_s}$$

ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΣΕ ΔΙΑΤΜΗΣΗ

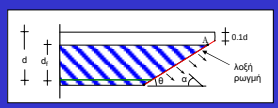






VIDEO 3

ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΑΠΑΙΤΟΥΜΕΝΟΥ ΠΑΧΟΥΣ ΜΑΝΔΥΑ t_f



$$V_{Rd} = \min\left(V_{cd} + V_{wd} + V_{fd}, V_{Rd2}\right)$$

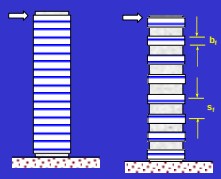
Λωρίδες πλάτους b_f και πάχους t_f ανά αποστάσεις s_f

$$V_{fd} = \frac{2t_f b_f}{s_f} d_f \left(\varepsilon_{fe,d} E_f\right)(\cot\theta + \cot\alpha)\sin\alpha$$

Συνεχής μανδύας πάχους t_f

$$V_{fd} = 2t_f d_f \left(\varepsilon_{fe,d} E_f\right)(\cot\theta + \cot\alpha)\sin^2\alpha$$

d_f = ύψος μανδύα που διαπερνάται από τη ρωγμή, μετρούμενο από τη στάθμη του διαμήκους οπλισμού = 0.9d για κλειστό μανδύα

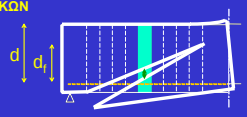


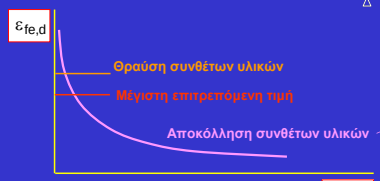
Μέγιστη απόσταση λωρίδων

$$s_f \le \min\left(\frac{d_f}{2}, \frac{0.9d}{2}\right)$$

"ΕΝΕΡΓΗ" ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

$$\varepsilon_{fe,d} = D_f \varepsilon_{fd,max} = \left(1 - \frac{0.5d_f}{0.9d}\right)\varepsilon_{fd,max}$$





$$\sqrt{\frac{E_f t_f}{f_{ctm}}}$$

$$\varepsilon_{fd,max} = \frac{f_{fde}}{E_f}$$ Θραύση συνθέτων υλικών

$$\varepsilon_{fd,max} = 0.006$$ Μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή

για $\ell_b \ge \ell_{b,max}$ $\quad \varepsilon_{fd,max} = \alpha_{sh}\frac{0.5}{\gamma_b}\sqrt{\frac{f_{ctm}}{E_f t_f}}$

για $\ell_b < \ell_{b,max}$ $\quad \varepsilon_{fd,max} = \alpha_{sh}\frac{0.5}{\gamma_b}\sqrt{\frac{f_{ctm}}{E_f t_f}}\frac{\ell_b}{\ell_{b,max}}\left(2 - \frac{\ell_b}{\ell_{b,max}}\right)$

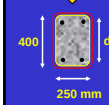
Αποκόλληση συνθέτων υλικών

$$\ell_{b,max} = \sqrt{E_f t_f / c_2 f_{ctm}}$$

$\ell_b = d_f / \sin\alpha$ για μανδύα **U**

$\ell_b = d_f / 2\sin\alpha$ για μανδύα **I I**

V_{fd} (πρόσθετη τέμνουσα, παραλαμβάνεται από μανδύα)



ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ

Δεδομένα :

Έστω μανδύας με E_f = 230 GPa, f_{fde}= 2560 MPa, πάχος στρώσης 0.12 mm

Να υπολογισθεί ο απαιτούμενος αριθμός στρώσεων για V_{fd} = 100 kN

Για αστοχία μανδύα λόγω θραύσης: $\varepsilon_{fd,max}$ = 2560/230000 = 0.0111

Λαμβάνεται $\varepsilon_{fd,max}$ = min(0.0111, 0.006) = 0.006

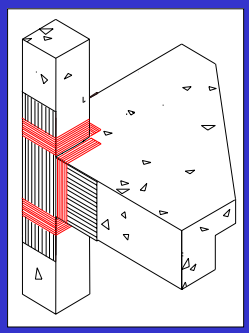
Ενεργή παραμόρφωση μανδύα: $\varepsilon_{fe,d}$ = 0.5x0.006 = 0.003

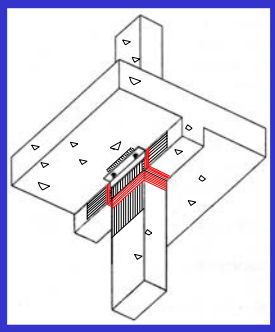
Υπολογισμός απαιτούμενου αριθμού στρώσεων n :

V_{fd} = $2t_f d_f(\varepsilon_{fe,d}E_f)$ = 2x(nx0.12)x(0.9x365)x(0.003x230) > 100 kN

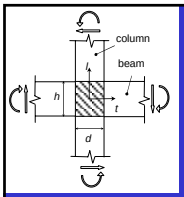
→ n > 1.84 άρα n = 2 (αντιστοιχούν σε V_{fd} = 108.8 kN)

ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗ ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΚΟΜΒΩΝ





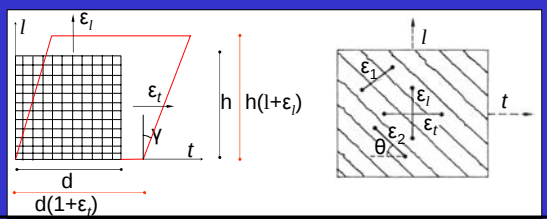
Αντωνόπουλος 2001 (Διδακτ. Διατριβή)



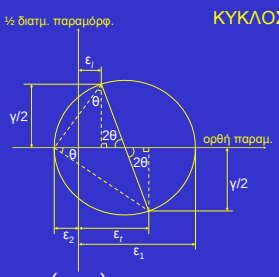
1η αναλλοίωτη τάσεων και παραμορφώσεων:

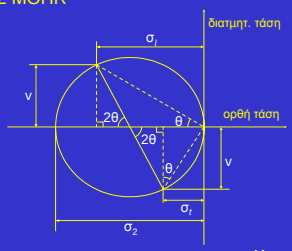
$$\varepsilon_1 + \varepsilon_2 = \varepsilon_t + \varepsilon_l$$

$$\sigma_2 = \sigma_t + \sigma_l \quad \text{διότι} \quad \sigma_1 = 0$$



ΚΥΚΛΟΣ MOHR





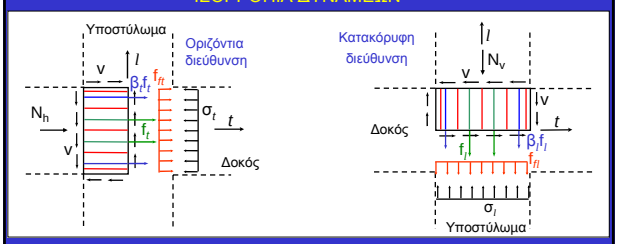
$$\gamma = \frac{2(\varepsilon_1 - \varepsilon_t)}{\tan\theta} = 2(\varepsilon_1 - \varepsilon_l)\tan\theta$$

$$\tan^2\theta = \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_t}{\varepsilon_1 - \varepsilon_l} = \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_l}{\varepsilon_2 - \varepsilon_t}$$

$$\sigma_t = -v\tan\theta \qquad \sigma_l = -\frac{v}{\tan\theta}$$

$$\sigma_2 = -v\left(\tan\theta + \frac{1}{\tan\theta}\right)$$

ΙΣΟΡΡΟΠΙΑ ΔΥΝΑΜΕΩΝ



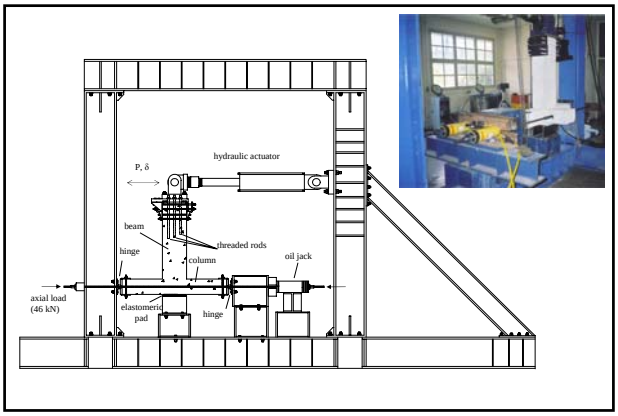
$$\sigma_t = -\rho_t f_t - \rho_{ft} f_{ft} - \frac{N_h}{bh} \qquad \sigma_l = -\rho_l f_l - \rho_{fl} f_{fl} - \frac{N_v}{bd}$$

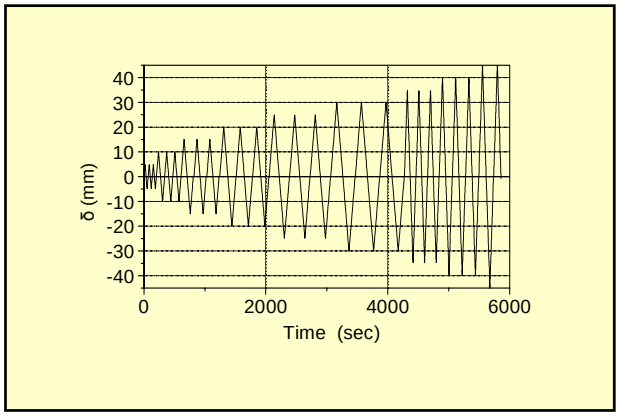
$$\rho_t = \rho_s + \beta_l \rho_b$$
$$\rho_l = \rho_{c,in} + \beta_l \rho_c$$

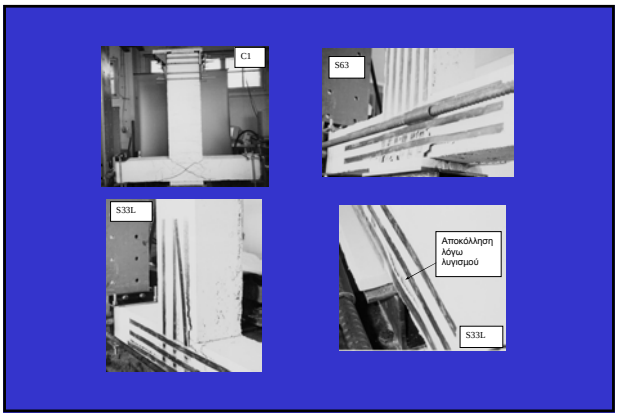
Τέλεια συνάφεια: $\beta_t = \beta_l = 0$

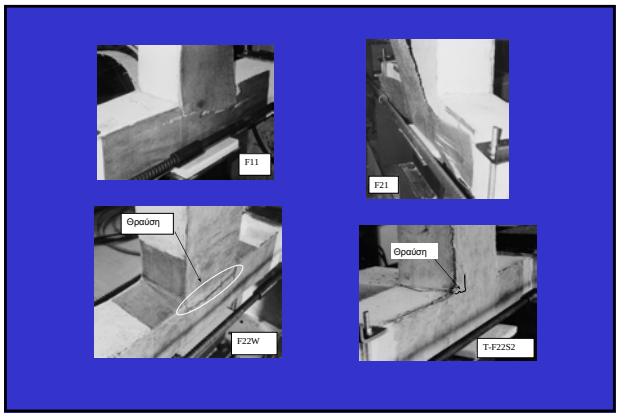
Χωρίς συνάφεια: $\beta_t = \beta_l = 1$

$$\rho_{ft} = \rho_{fl} = \rho_f = \frac{n\, t_f}{b}$$

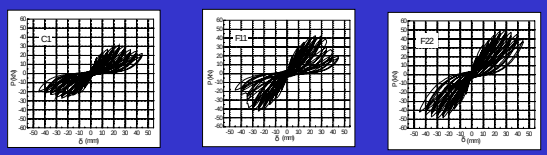








ΕΝΔΕΙΚΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

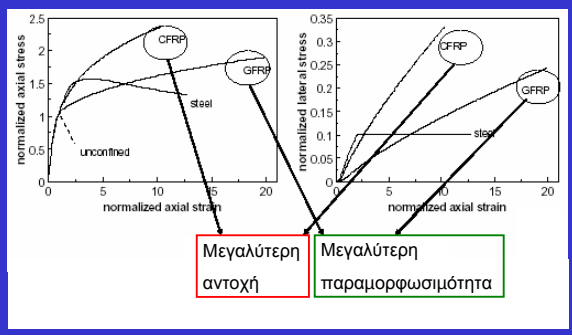


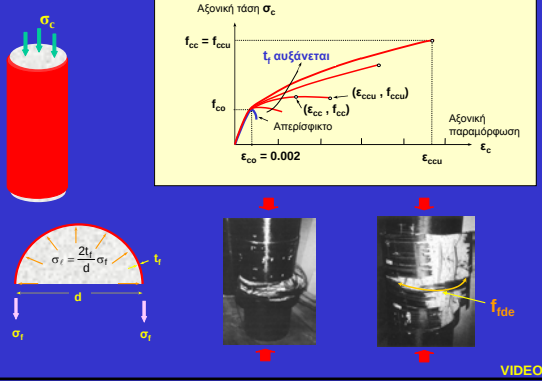
	$\rho_{fb} = \rho_{fc} = 0.0013$	$\rho_{fb} = \rho_{fc} = 0.0026$
ΑΝΤΟΧΗ	40%	65%
ΕΝΕΡΓΕΙΑ	30%	50%

ΕΓΚΙΒΩΤΙΣΜΟΣ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΩΝ

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΠΑΡΚΟΥΣ ΕΓΚΙΒΩΤΙΣΜΟΥ ΜΕ ΜΑΝΔΥΑ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

- Αύξηση θλιπτικής αντοχής
- Αύξηση πλαστιμότητας
- Αποφυγή αστοχίας σε ματίσεις
- Παρεμπόδιση λυγισμού διαμήκων ράβδων





VIDEO 4

Αντοχή & παραμορφωσιμότητα περισφιγμένου σκυροδέματος

$$f_{ccd} = E_{sec,ud}\,\varepsilon_{ccud} \geq f_{cd}$$

$$\varepsilon_{ccud} = 0.002\left[1+5(\alpha_{1d}\alpha_{2d}-1)\right]\left[\frac{E_{sec,Md}(E_c - E_{sec,ud})}{E_{sec,ud}(E_c - E_{sec,Md})}\right]^{1-\frac{E_{sec,Md}}{E_c}}$$

$$E_{sec,ud} = \frac{E_c}{1+2\left(\frac{E_c}{f_{cd}} - \frac{1}{0.002}\right)\frac{f_{fde}}{E_f}} \qquad E_{sec,Md} = \frac{\alpha_{1d}\alpha_{2d} f_{cd}}{0.002\left[1+5(\alpha_{1d}\alpha_{2d}-1)\right]}$$

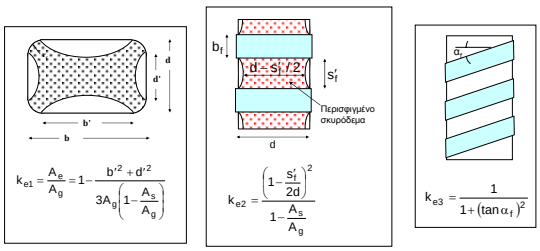
$$\alpha_{1d} = 2.254\sqrt{1+7.94\frac{\sigma_{/udb}}{f_{cd}}} - 2\frac{\sigma_{/udb}}{f_{cd}} - 1.254$$

$$\alpha_{2d} = 1-\left[0.6\left(\frac{d}{b}\right)^2 - 1.4\frac{d}{b} + 0.8\right]\sqrt{\frac{\sigma_{/ud,b}}{f_{cd}}} \qquad \sigma_{/udb} = \frac{t_f}{d}\, k_e\, f_{fde}$$

$$k_e = k_{e1}\times k_{e2}\times k_{e3} \leq 1$$

Συντελεστής αποτελεσματικότητας

$$k_e = k_{e1}\times k_{e2}\times k_{e3} \leq 1$$



$$k_{e1} = \frac{A_e}{A_g} = 1 - \frac{b'^2 + d'^2}{3A_g\left(1-\frac{A_s}{A_g}\right)}$$

$$k_{e2} = \frac{\left(1-\frac{s_f'}{2d}\right)^2}{1-\frac{A_s}{A_g}}$$

$$k_{e3} = \frac{1}{1+(\tan\alpha_f)^2}$$

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ

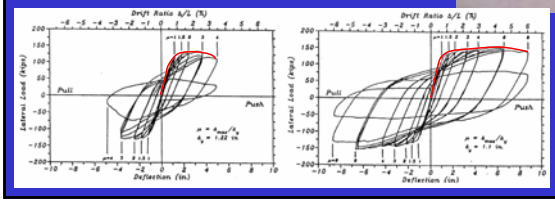
Αντοχή σκυροδέματος f_{cd} = 20 MPa, μέτρο ελαστικότητας E_c = 33.5 GPa

Στόχος : Αύξηση αντοχής σε 35 MPa, μέγιστης παραμόρφωσης σε ε_{cu} = 0.025

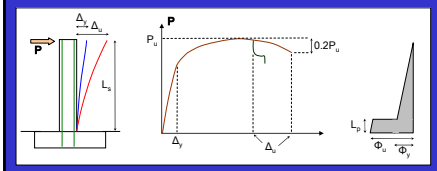
Ανθρακοϋφάσματα, E_f = 230 GPa, f_{fde} = 2465 MPa. Υαλοϋφάσματα, E_f = 70 GPa, f_{fde} = 1330 MPa

Διατομή	r_c (mm)	A_g (cm²)	k_e (αποτελεσματικότητα)	Απαιτούμενο πάχος υφάσματος t_f (mm)			
				Ίνες άνθρακα		Ίνες γυαλιού	
				για f_{cu} = 35 MPa	*για ε_{cu} = 0.025*	για f_{cu} = 35 MPa	*για ε_{cu} = 0.025*
300 / 300	20	896.5	*0.50*	0.39	*0.31*	0.82	*0.12*
250 / 500	20	1246.5	*0.32*	0.74	*0.56*	1.56	*0.22*
300 / 300	40	886.2	*0.64*	0.31	*0.24*	0.64	*0.10*

ΑΥΞΗΣΗ ΔΕΙΚΤΗ ΠΛΑΣΤΙΜΟΤΗΤΑΣ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΕΩΝ



ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ ΜΑΝΔΥΑ ΓΙΑ ΠΛΑΣΤΙΜΟΤΗΤΑ



Δείκτης πλαστιμότητας μετατοπίσεων

$$\mu_\Delta = \frac{\Delta_u}{\Delta_y}$$

Συσχετίζεται με το πάχος του μανδύα, βάσει του μοντέλου εγκιβωτισμού

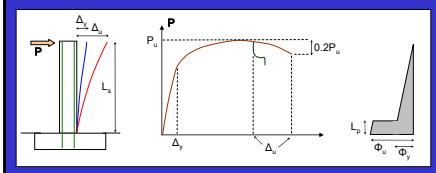
$$\mu_\Delta = 1 + 3\left(\frac{\varepsilon_{ccud} / x_u}{\phi_y} - 1\right)\frac{L_p}{L_s}\left(1 - 0.5\frac{L_p}{L_s}\right)$$

$$L_p = 0.08L_s + 0.022 f_y d_b \geq 0.044 f_y d_b$$

x_u = ύψος θλιβόμενης ζώνης κατά την αστοχία

ϕ_y = καμπυλότητα διατομής κατά τη διαρροή

ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ ΜΑΝΔΥΑ ΓΙΑ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΙΜΟΤΗΤΑ



Δείκτης πλαστιμότητας μετατοπίσεων

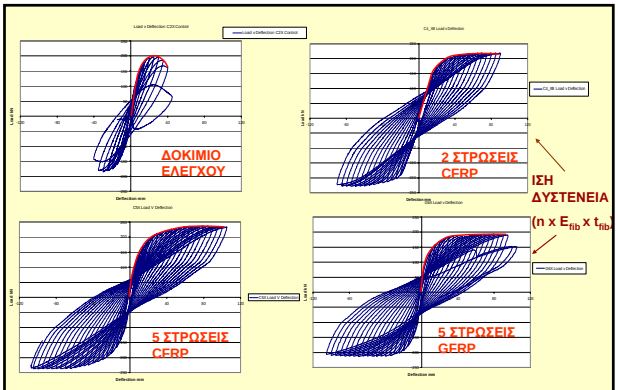
$$\mu_\Delta = \frac{\Delta_u}{\Delta_y}$$

Tastani & Pantazopoulou (2002)

Εναλλακτική / συντηρητική προσέγγιση

$$\mu_\Delta = 1.3 + 12.4\left(\frac{\sigma_{\ell ud}}{f_{cd}} - 0.1\right) \geq 1.3$$

$$\sigma_{\ell ud,b} = k_e \frac{2t_f}{d} f_{fde}$$



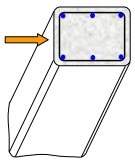
Bousias/Triantafillou/Fardis/Spathis/O'Regan (2002)

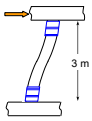
ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ

0.30x0.40 m

Ακτίνα καμπυλότητας στις γωνίες r_c = 25 mm

C16/20, διαμήκης οπλισμός: 6Φ18, S400





Ανθρακοϋφάσματα,
E_f = 230 GPa ,
f_{fde} = 2625 MPa ,
t_{fib} = 0.12 mm

Συντελεστής αποδοτικότητας

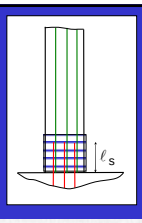
$$k_{e1} = 1 - \frac{35^2 + 25^2}{3 \times 1195 \times \left(1 - \frac{15.25}{1195}\right)} = 0.48$$

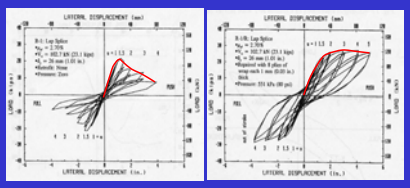
Απαιτούμενο πάχος μανδύα t_f για μ_Δ = 4

$$4 = 1.3 + 12.4\left(\frac{0.48 \times \frac{2t_f}{300} \times 2625}{(16/1.5)} - 0.1\right)$$

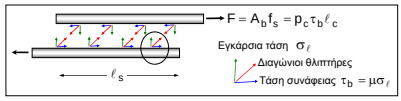
t_f = 0.40 mm → 4 στρώσεις → μ_Δ = 4.75

ΕΓΚΙΒΩΤΙΣΜΟΣ ΣΕ ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΜΕ ΜΑΤΙΣΕΙΣ

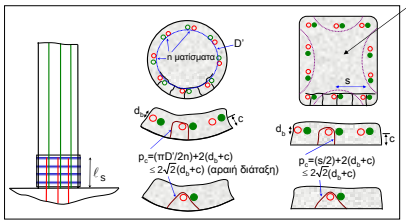


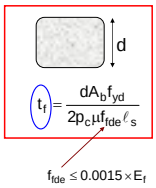


ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ ΜΑΝΔΥΑ ΓΙΑ ΑΠΟΦΥΓΗ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΣΕ ΜΑΤΙΣΗ



Αποφυγή αστοχίας μόνο σε ράβδους εντός της ζώνης επαρκώς εγκιβωτισμένου σκυροδέματος



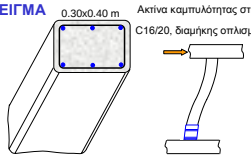


ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ

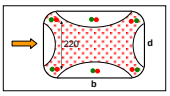
0.30x0.40 m

Ακτίνα καμπυλότητας στις γωνίες r_c = 25 mm , επικάλυψη c = 30 mm

C16/20, διαμήκης οπλισμός: 6Φ18, S400, μήκος ματίσματος 0.60 m



Ανθρακοϋφάσματα,
E_f = 230 GPa ,
f_{fde} = 2625 MPa ,
t_{fb} = 0.12 mm

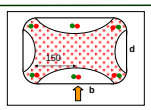


$$p_c = \min\left(\left((220/2)+2(18+30)\right), 2\sqrt{2}(18+30)\right) = 136 \text{ mm}$$

$$A_b = \left(\pi \times 18^2\right)/4 = 255 \text{ mm}^2$$

$$f_{fde} = \min(2625, 0.0015 \times 230000) = \min(2625, 345) = 345 \text{ MPa}$$

$$t_f = \frac{300 \times 255 \times (400/1.15)}{2 \times 136 \times 1.4 \times 345 \times 600} = 0.34 \text{ mm} \rightarrow \text{3 στρώσεις}$$



$$p_c = \min\left(\left((150/2)+2(18+30)\right), 2\sqrt{2}(18+30)\right) = 136 \text{ mm}$$

$$t_f = \frac{300 \times 255 \times (400/1.15)}{2 \times 136 \times 1.4 \times 345 \times 600} = 0.34 \text{ mm} \rightarrow \text{3 στρώσεις}$$

Επαρκής εγκιβωτισμός μόνο στις γωνιακές ράβδους !

ΠΑΡΕΜΠΟΔΙΣΗ ΛΥΓΙΣΜΟΥ ΡΑΒΔΩΝ

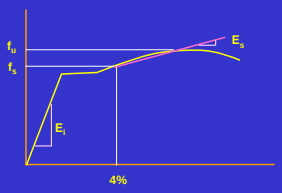
$$t_f = \frac{0.45 n f_s^2 d}{4 E_{ds} E_f k_e} \approx \frac{10 n d}{E_f k_e}$$

n = Συνολικός αριθμός διαμήκων ράβδων

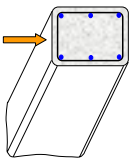
d = Μήκος πλευράς παράλληλα στο επίπεδο κάμψης

$$E_{ds} = \frac{4 E_s E_i}{\left(\sqrt{E_s} + \sqrt{E_i}\right)^2}$$

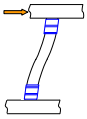
"Διπλό" μέτρο ελαστικότητας



0.30x0.40 m



6Φ18, S400



Ανθρακοϋφάσματα,
E_f = 230 GPa ,
t_{fb} = 0.12 mm

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ

Απαιτούμενο πάχος μανδύα

$$t_f = \frac{10 \times 6 \times 400}{230000 \times 0.48} = 0.22 \text{ mm}$$

2 στρώσεις

ΑΠΛΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΜΑΝΔΥΑ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΩΝ

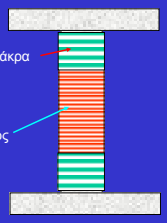
Υπό την προϋπόθεση ότι η επέμβαση δεν αποσκοπεί σε αύξηση της δυσκαμψίας, με δεδομένη την επιβαλλόμενη σεισμική καταπόνηση θα πρέπει να υπολογισθεί για κάθε υποστύλωμα:

(α) η τιμή του επιθυμητού δείκτη πλαστιμότητας μετατοπίσεων,
(β) η τέμνουσα σχεδιασμού (η οποία, ανάλογα με τη δυσκαμψία κάθε υποστυλώματος, θα πρέπει να είναι τέτοια ώστε η διαρροή του διαμήκους οπλισμού να προηγείται της διατμητικής αστοχίας - ικανοτική τέμνουσα).

Το πάχος του μανδύα συνθέτων υλικών είναι το μέγιστο των παχών που απαιτούνται για την εξασφάλιση του απαιτούμενου δείκτη πλαστιμότητας, της τέμνουσας σχεδιασμού, της αποφυγής λυγισμού των διαμήκων ράβδων και της αποφυγής αστοχίας σε περιοχές με ματίσματα (αν υπάρχουν).

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΜΑΝΔΥΑ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΟΣ

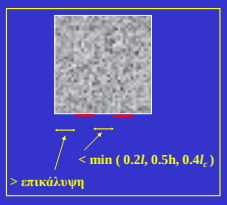
	Απαιτ. αρ. στρώσεων
Πλαστιμότητα μετατοπίσεων	4
Μάτιση	3
Λυγισμός	2
Διάτμηση	2

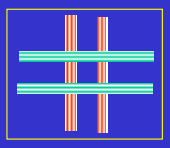


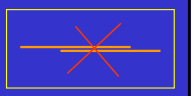
ΔΕΝ ΚΑΛΥΠΤΟΝΤΑΙ

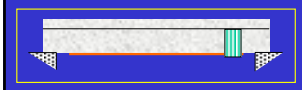
- Αύξηση δυσκαμψίας
- Μείωση λυγηρότητας (φαινόμενα P-Δ)
- Αύξηση καμπτικής αντοχής

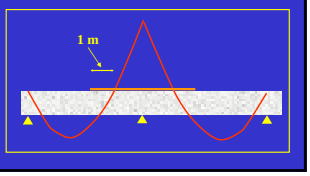
ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΕΣ ΛΕΠΤΟΜΕΡΕΙΕΣ ΚΑΜΨΗ



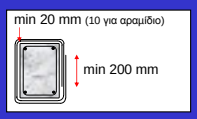


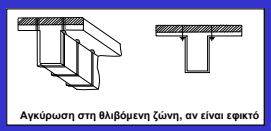


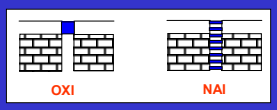


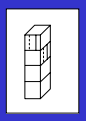


ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΕΣ ΛΕΠΤΟΜΕΡΕΙΕΣ ΔΙΑΤΜΗΣΗ

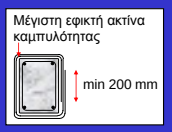


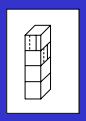


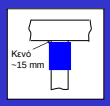


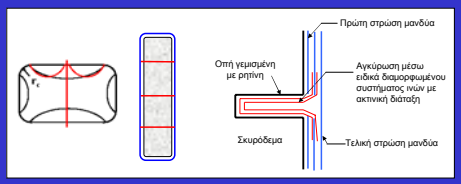


ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΕΣ ΛΕΠΤΟΜΕΡΕΙΕΣ ΠΕΡΙΣΦΙΓΞΗ



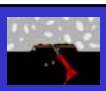






ΠΡΟΣΟΧΗ ΣΤΗΝ ΕΦΑΡΜΟΓΗ !!

Απομάκρυνση σαθρού σκυροδέματος



Επιμελημένος καθαρισμός

Επισκευή

Οι ίνες σε ευθύγραμμη διάταξη

Προσεκτικός εμποτισμός των ινών, "στρώσιμο" με κύλινδρο, απεγκλωβισμός αέρα

Έλεγχος πρόσφυσης

ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ

ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ

Ραγδαία μείωση αντοχής ρητίνης για T > 60-80 °C.

Αστοχία ινών: άνθρακας 650 °C, γυαλί 1000 °C, αραμίδιο 200 °C

ΥΓΡΑΣΙΑ

Σε ακραίες περιπτώσεις (π.χ. διαρκής διαβροχή) εμφανίζεται απομείωση της αντοχής των ρητινών και κάποιων τύπων ινών. Ιδιαίτερα ευπαθείς είναι οι ίνες αραμιδίου, οι ίνες γυαλιού υφίστανται μείωση της εφελκυστικής αντοχής, οι ίνες άνθρακα είναι απρόσβλητες.

ΥΠΕΡΙΩΔΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ

Η επίδραση περιορίζεται στην επιφανειακή στρώση ρητίνης (χρωματική αλλοίωση, μικρορηγμάτωση). Οι ίνες άνθρακα και γυαλιού είναι πρακτικά απρόσβλητες, στις ίνες αραμιδίου εμφανίζεται μικρή υποβάθμιση των μηχανικών ιδιοτήτων.

ΑΛΚΑΛΙΚΟ Ή ΟΞΙΝΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ

Ευπαθείς οι ίνες γυαλιού (πρέπει να «απομονώνονται» μέσω προστατευτικού στρώματος ρητίνης). Συνιστάται η χρήση ινών άνθρακα.

ΔΙΑΒΡΩΣΗ ΥΠΟ ΤΑΣΗ

Μείωση εφελκυστικής αντοχής ινών γυαλιού όταν βρίσκονται συνεχώς υπό τάση.

Αξιολόγηση ινών με βάση την ανθεκτικότητα

Κριτήριο	Ίνες Άνθρακα	Ίνες Γυαλιού	Ίνες Αραμιδίου
Υψηλές θερμοκρασίες	+	++	-
Υγρασία	+	-	-
Υπεριώδης ακτινοβολία	++	+	-
Αλκαλικό και όξινο περιβάλλον	++	–	+
Γαλβανική διάβρωση	–	+	+
Ερπυσμός	++	–	-
Θραύση υπό τάση, διάβρωση υπό τάση	++	–	+
Κόπωση	++	-	+
Κρούση	-	+	++

ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΕΠΙΛΟΓΗ ΥΛΙΚΟΥ ΙΝΩΝ ??

ΒΑΣΙΚΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ ΕΠΙΛΟΓΗΣ : ΚΟΣΤΟΣ ΓΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΟ $E_f t_f$

π.χ. 5 στρώσεις υφάσματος γυαλιού με E_{fib}=70 GPa και t_{fib}=0.16 mm ισοδυναμούν (μηχανικά) με 2 στρώσεις υφάσματος άνθρακα με E_{fib}=230 GPa και t_{fib}=0.16 mm.

Κόστος : υλικά + εργατικά (δυσκολότερη η εφαρμογή και ο εμποτισμός πολλαπλών στρώσεων).

Πρόσθετη παράμετρος : ανθεκτικότητα !

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

- **ΕΥΚΟΛΙΑ – ΤΑΧΥΤΗΤΑ - ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑ**
- **ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΔΟΚΩΝ+ΠΛΑΚΩΝ ΣΕ ΚΑΜΨΗ**
  ΔΟΚΩΝ ΣΕ ΔΙΑΤΜΗΣΗ
- **ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΩΝ ΓΙΑ**
  ΑΥΞΗΣΗ ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ, ΘΛΙΠΤΙΚΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ, ΠΛΑΣΤΙΜΟΤΗΤΑΣ, ΑΠΟΦΥΓΗ ΑΣΤΟΧΙΩΝ ΣΕ ΜΑΤΙΣΕΙΣ, ΑΠΟΦΥΓΗ ΛΥΓΙΣΜΟΥ ΡΑΒΔΩΝ
  ΑΥΞΗΣΗ ΚΑΜΠΤΙΚΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ (υπό προϋποθέσεις)
- **ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ**
  - ΑΝΑΛΗΨΗ ΔΥΝΑΜΕΩΝ ΣΤΗ ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ ΤΩΝ ΙΝΩΝ
  - ΕΛΑΣΤΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ
  - ΑΠΟΦΥΓΗ ΑΠΟΚΟΛΛΗΣΕΩΝ
- **ΙΔΙΑΙΤΕΡΗ ΠΡΟΣΟΧΗ ΣΤΗΝ ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ**
- **ΟΧΙ ΑΔΙΑΚΡΙΤΩΣ !**