



Σύσταση & Διάχυση Τεχνικών Οδηγιών για την Ενίσχυση Κατασκευών με Σύνθετα Υλικά (ΕΝΙΚΑΣ)

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΠΑΤΡΩΝ



Α. Τριανταφύλλου

Αναπλ. Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Πανεπ.
Πατρών (Ανάδοχος Φορέας)

Ε. Βιντζηλαίου

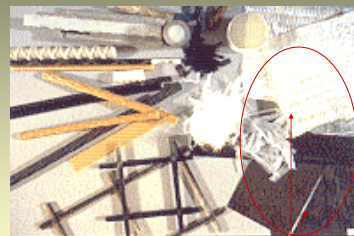
Επικ. Καθηγήτρια, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Ε.Μ.Π.
(Συνεργαζόμενος Φορέας)

Σ. Παναζοπούλου

Καθηγήτρια, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Δ.Π.Θ.
(Συνεργαζόμενος Φορέας)



Σύνθετα Υλικά - FRPs



Ινοπλισμένα Υφάσματα:
Υλικά για Μανδύες



FRP's στις Ενισχύσεις & Επισκευές - Επιλογή Υλικού -

Τύποι Προϊόντων από Ίνες

- Ράβδοι Οπλισμού
- Πλάκες (Ελάσματα)
- Τένοντες Προεντάσεις
- Ευκαμπτα Υφάσματα

- Ανθρακα (Γραφίτη)
- Γυαλιού
- Αραμιδιού

Κριτήριο Επιλογής

- ✓Μορφή Αστοχίας
- ✓Είδος εφαρμογής
- ✓Ευκολία τοποθέτησης
- ✓Ανθεκτικότητα
- ✓Αντοχή
- ✓Δυσκαμψία



Συστατικά των FRPs

Ίνες:

•Γυαλί: Μοριακή δομή πυριτίου (SiO_2)

E-Glass (silica, alumina, Calcium Oxide, Magnesium Oxide, Boric Oxide)

S-Glass (silica, alumina, Magnesium Oxide)

AR-Glass (*Alkali Resistant*): (High silica content & Zirconium Oxide)

•Ανθρακας: (κρυσταλλική δομή ατόμων άνθρακα) :

PAN (polyacrylonitrile) και Pitch-Based.

•Αραμίδιο: (Kevlar, Technora): (Polyethylene terephthalamide polymer)

Ρητίνες (μήτρα):

Πολυεστερικές Εποξειδικές Βινυλεστερικές



Ανθεκτικότητα Συστατικών FRPs: Ίνες

(Banthia, et al.: A=Ανθεκτικά, ΠΜ=Προσβάλλονται Μετρίως, Π=Προσβάλλονται)

	E-G	S-2G	AR-G	Αραμ	C
Απορρόφηση νερού (%/24ώρες) α ($\times 10^{-6}/^\circ\text{C}$)	5.4	1.6	6.5	0.05	1.
Ασθενή Οξείδια	ΠΜ	A	A	A	A
Ισχυρά Οξείδια	Π	ΠΜ	ΠΜ	ΠΜ	A
Ασθενή Αλκαλικά	Π	ΠΜ	A	A	A
Ισχυρά Αλκαλικά	Π	Π	ΠΜ	ΠΜ	A
Θερμοκρασία	A	A	A	Π	A
UV-Rad.	A	A	A	Π	A
Οργανικοί Διαλύτες				A	A
Οξυγόνο (O_2) / Οξόν (O_3)				ΠΜ	A



Ανθεκτικότητα Συστατικών FRPs: μήτρα

	Πολυεστερική ρητίνη	Βινυλεστερική ρητίνη	Εποξειδική ρητίνη
Απορρόφηση νερού (%/24ώρες) α ($\times 10^{-6}/^\circ\text{C}$)	0.15-0.6	0.1-0.2	0.1
Ασθενή Οξείδια	ΠΜ	A	A
Ισχυρά Οξείδια	Π	A	ΠΜ
Ασθενή Αλκαλικά	Π	A	A
Ισχυρά Αλκαλικά	Π	ΠΜ	A
Θερμοκρασία		Π	Π
UV-Rad.	Π	ΠΜ	A
Οργανικοί Διαλύτες	ΠΜ	A	A
Οξυγόνο (O_2) / Οξόν (O_3)	Π		ΠΜ

ΕΝΙΚΑΕ

Συνολική Αξιολόγηση Μανδυνών FRPs

κατά τον U. Meier (1995)

Κριτήριο	Carbon	Αραμίδιο	E-G
Εφελκυστική Αντοχή	Π. Κ.	Π. Κ.	Π. Κ.
Θλιπτική Αντοχή	Π. Κ.	Φ.	Κ.
Μέτρο Ελαστικότητας	Π. Κ.	Κ.	Μ.
Μακροχρόνια Συμπεριφ.	Π. Κ.	Κ.	Μ.
Κόπωση	Ε.	Κ.	Μ.
Αντοχή έναντι Αλκαλικών	Π. Κ.	Κ.	Φ.

Ε= Εξαιρετική συμπεριφορά,
 Π.Κ.= Πολύ καλή, Κ.= Καλή,
 Μ=Μέτρια, Φ=Φτωχή

ΕΝΙΚΑΕ

FRP's στις Ενισχύσεις & Επισκευές
- Κριτήριο επιλογής υλικού-

•Ράβδοι Οπλισμού
 •Ελάσματα

Βασικά Προβλήματα Εφαρμογής:
 •Ανεπαρκής σε Δράση Βλήτρου
 •Έλλειψη Διαρροής
 •Δυσκολίες στην Αγκύρωση
 •Αστοχία στις νευρώσεις των ράβδων, ή φτωχή συνάφεια
 •Αποκόλληση των Ελασμάτων από τα άκρα, => Αναγκαία η χρήση μηχανικών μέσων (βλήτρων - clamps)

Συγκέντρωση τάσεων

τομή

ΕΝΙΚΑΕ

Περισσότερο εύχρηστα: εύκαμπτα Ινο-υφάσματα (Ex-FRPs)

✓ Μονοδιάστατες δέσμες ινών που συγκατούνται χαλαρά στην μορφή υφάσματος, είτε με τη βοήθεια δευτερευουσών ινών είτε με εποξειδική κόλλα
 ✓ Hand lay-up Εφαρμογές
 ✓ Παρακολουθούν ευκολότερα τις παραμορφώσεις και τη γεωμετρία του υποστρώματος

ΕΝΙΚΑΕ

Μανδύες Ex-FRP

Σημαντική Παράμετρος για την λειτουργία ως μανδύα:
 Αξονική Δυσκαμψία και παραμορφωσιμότητα του FRP όσο πιά δύσκαμπτο τόσο μικρότερη η περιοχή παραμόρφωσης που μπορούμε να εκμεταλευθούμε στις εφαρμογές χωρίς μηχανικά μέσα αγκύρωσης

•Κριτήριο για την επιλογή τύπου ινών:
 •Ανθρακας: **HM ; HT**
 •Γυαλί (E-Glass)
 •Αραμίδιο

	C/HT	C/HM	E-G	AR
$f_{FRP}(MPa)$	3500	3000	1500	1500
$E_{FRP}(GPa)$	235	380	75	60
ϵ^u_{FRP}	1.5%	0.8%	2.1%	2.5%

Οι μηχαν. ιδιότητες εξαρτώνται από το % ινών (συνήθως 60%)

ΕΝΙΚΑΕ

Ιδιότητες FRP υφασμάτων - VS - δομικού χάλυβα

Χάλυβας: $f_u=400\text{ MPa}$, $e_y=0.2\%$, $e_u=20\%$
 GFRP & CFRP: $f_u=1300\text{ MPa}$, $e_y=2.2\%$
 CFRP: $f_u=3500\text{ MPa}$, $e_y=1.5\%$

παραμόρφωση

f_{cc}

σ_{lat} (αυξάνεται συνεχώς)

ϵ_c

$f_{cc}=f_c+K\sigma_{lat}$

ΕΝΙΚΑΕ

Περίσφιγξη: αύξηση αντοχής και πλαστιμότητας

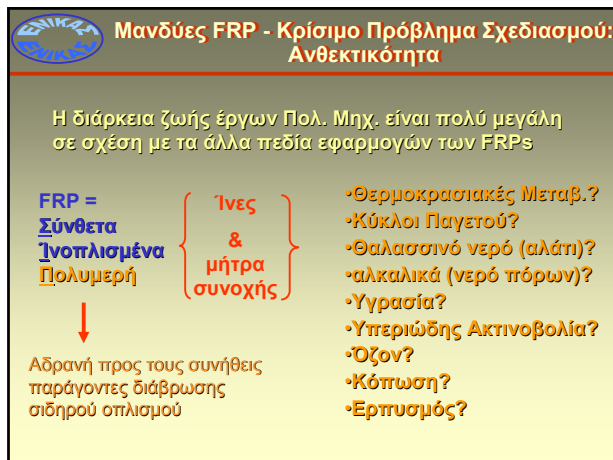
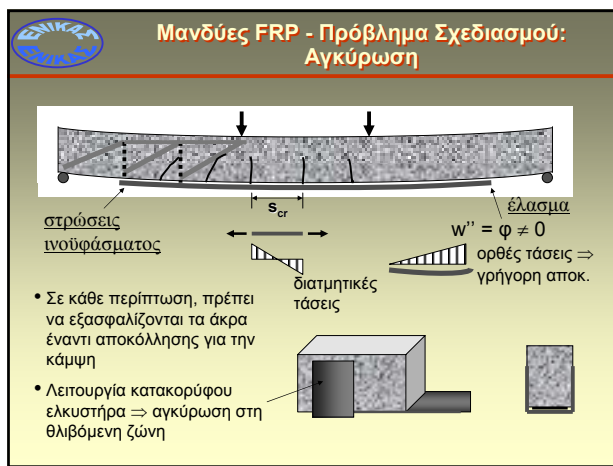
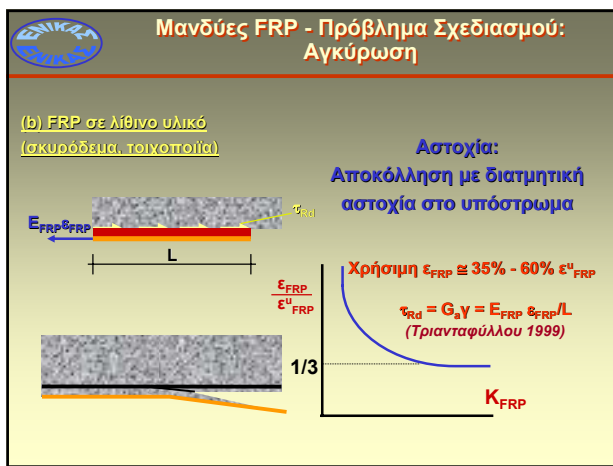
F_w

σ_{lat}

F_w

ΕΠΙΣΚΕΥΗ

ΧΩΡΙΣ ΕΠΙΣΚΕΥΗ



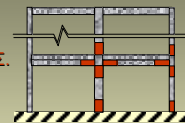
- Δεν επηρεάζει την αρχική δυσκαμψία του στοιχείου (δηλ. δεν δημιουργεί ασυνέχειες δυσκαμψίας στο στοιχείο)
- Δεν απαιτεί αλλαγή της γεωμετρίας του στοιχείου
- Η αύξηση της ικανότητας για παραμόρφωση είναι θεαματική
- Η αύξηση της αντοχής έχει την μορφή κράτυνσης

Χαρακτηριστικά που προσδίδουν οι συνήθεις συνδετήρες



• Αντικείμενο:

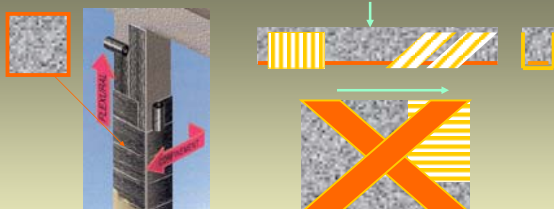
Χρήση μανδύων FRP στην ενίσχυση / επισκευή κρίσιμων περιοχών σε στοιχεία Ο.Σ. με ανεπαρκή ικανότητα παραμόρφωσης (παραμορφωσιμότητα).



Κύριο Χαρακτηριστικό Συμπεριφοράς Μανδύων: Δράση περισφιγξέως, για συμπλήρωση ελλειπών συνδετήρων ως μέσον αύξησης της πλαστιμότητας και παραμορφωσιμότητας

• Πεδίο Εφαρμογής:

Κατασκευές Ο.Σ. δομημένες προ της εισαγωγής σύγχρονων αντισεισμικών απαιτήσεων διαστασιολόγησης στον Κανονισμό Θέμα επίκαιρο λόγω της εκτεταμένης χρήσης επισκευών με περιτύλιξη βλαβέντων δομικών στοιχείων Ο.Σ. μετά τον σεισμό (9/1999) των Αθηνών.



π.χ. αίρονται οι συνήθεις ανεπάρκειες υφιστάμενων κτιρίων:

αραιοί συνδετήρες με ανεπαρκείς αγκυρώσεις ($\geq 6/300\text{mm}$), απερίσφιγκτοι κόμβοι και ματίσεις οπλισμών, ματίσεις κύριου οπλισμού υποσταλωμάτων σε περιοχές αναμενόμενων πλαστικών αρθρώσεων, υλικά χαμηλής ή ανομοιόμορφης ποιότητας, λείες ράβδοι με άγκιστρα, συσσωρευμένη επίδραση διάβρωσης οπλισμών.

- Η δυσκαμψία των στοιχείων που επισκευάζονται ή ενισχύονται με μανδύες σύνθετων ινοπλισμένων πολυμερών δεν επηρεάζεται από την προσθήκη των μανδύων, εκτός αν προκύπτουν θεμελιώδεις αλλαγές στην ελαστική συμπεριφορά (προ της διαρροής) λόγω της περισφιγξής (π.χ. αποτροπή ελαστικού λυγισμού των θλιβόμενων διαμήκων ράβδων).

πρέπει να συνυπολογισθούν θέματα λυγρότητας, στροφής (drift), κλπ.

Προσοχή: Στα εύκαμπτα κτίρια (π.χ. μαλακοί όροφοι) είναι πλέον κρίσιμο να ελεγχθεί το μέγεθος της σεισμικής μετακίνησης

Απαιτείται ολική στρατηγική για να εξασφαλισθεί ότι άλλες αστοχίες / φαινόμενα δεν θα υπερισχύσουν λόγω υπερβολικών μετατοπίσεων:

π.χ. θραύση κυρίων οπλισμών στην κρίσιμη παρειά εκτός του μανδύα, αστοχία κόμβων λόγω αυξημένης επιβαλλόμενης διατμητικής τάσης, φαινόμενα δευτέρας τάξεως σε μαλακούς ορόφους.

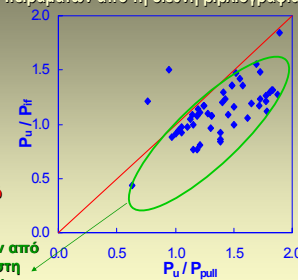
• Μέθοδοι διαστασιολόγησης μεμονωμένων στοιχείων, που θα συσχετίζουν ποσοτικά τα χαρακτηριστικά του μανδύα με την απαιτούμενη παραμορφωσιμότητα

• Απλά εργαλεία αποτίμησης που θα προσδιορίσουν αν η επισκευή/ενίσχυση στοιχείων Ο.Σ. με μανδύες χρειάζεται να συμπληρωθεί με άλλες δράσεις «ενίσχυσης δυσκαμψίας»

αποτίμηση παραμορφωσιμότητας εγγενώς ψαθυρών στοιχείων Ο.Σ. εγκιβωτισμένων σε μανδύες από σύνθετα ινοπλ. πολυμερή

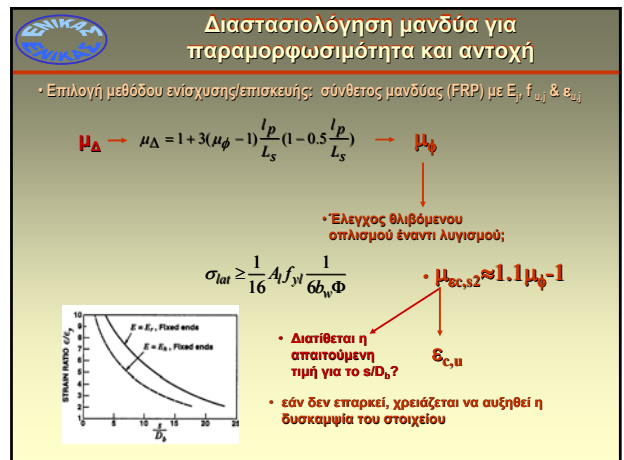
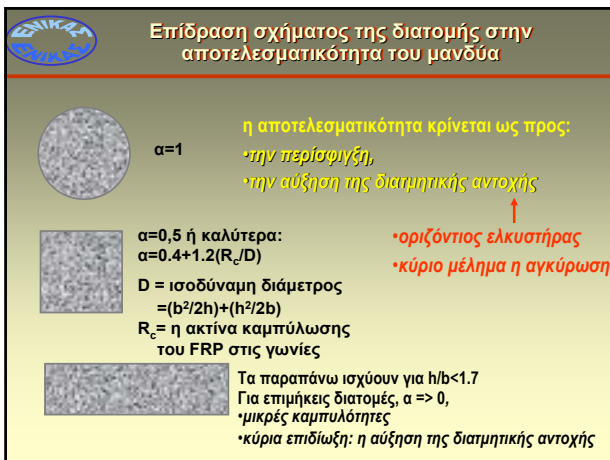
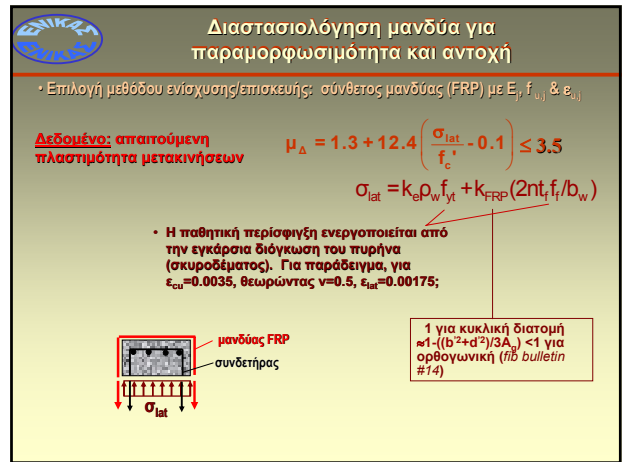
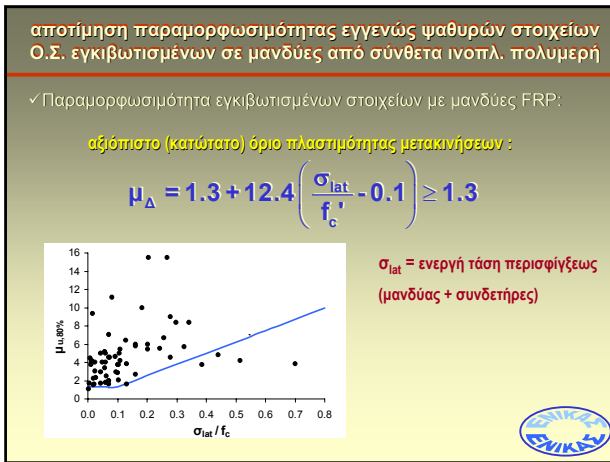
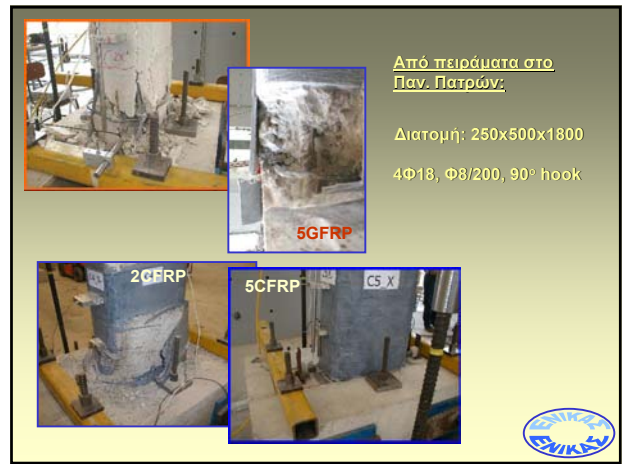
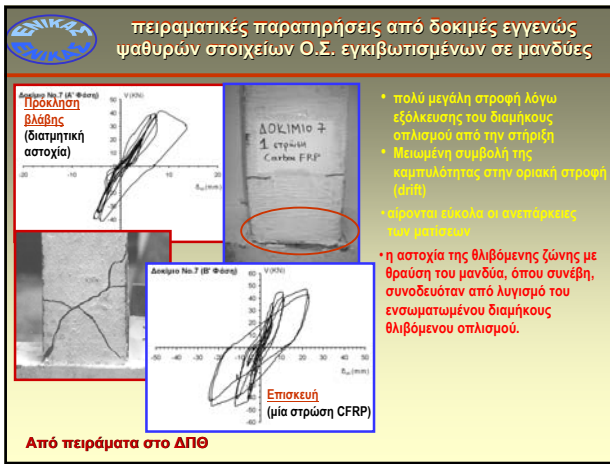
✓ Συνολική επεξεργασία δημοσιευμένων πειραμάτων από τη διεθνή βιβλιογραφία

- Πρισματικά στοιχεία Ο.Σ., με "παλαιού-τύπου" λεπτομέρειες οπλισμών (σύνολο 65 δοκίμια)
- Ενίσχυση / επισκευή (μετά από πρότερη βλάβη) πλαστικών αρθρώσεων με μανδύες FRP
- Ανακυκλιζόμενη εναλλασσόμενη φόρτιση (καμπτοδιάτμηση) & σταθερό αξονικό θλιπτικό φορτίο.



Αστοχίες: έντονη εξόγκωση οπλισμών από την πάκτωση, ή θραύση του σκυροδ. στη θλιβόμενη ζώνη (διάρρηξη του μανδύα).

P_u = Μέγιστο πειραματικό φορτίο; P_{II} = θεωρητική καμπτική αντοχή;
 P_{pull} = Φορτίο εξολκέυσης



Υπολογισμός Ενισχύσεως Ματίσματος

υπολογισμός απαιτούμενης τάσης περιαφίξεως για αποφυγή αστοχίας ματίσματος:

$T_t = A_s f_s = f_t \rho_s$

45°

διαγώνιοι θλιπτήρες

απόσταση μεταξύ ζευγών ματίσμ. ράβδων

αραιή διάταξη

κυκλική διατομή

ορθογ. διατομή

• Σχεδιασμός μανδύα για την αντοχή ματίσεως διαμήκων οπλισμών:

$f_u = 1.4 F_{lat} / \rho_s A_p$

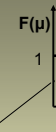
εμβρόνι οφελυκόμενου οπλισμού που ματίζεται συνολική δύναμη περιαφίξεως κατά μήκος της μάτισης = $\rho_{st} A_{st} l_m + 2 \pi f_t L_b$

μήκος παράθεσης

Σχεδιασμός μανδύα για Ικανοτική Τέννουσα:

$$V_{Rd} = \min \{V_{cd} + V_{wd} + V_{fd}, V_{Rd2}\}$$

για να ληφθεί υπόψη η απομείωση της διατμητικής αντοχής με αυξανόμενη πλαστικότητα μετακινήσεων



$$V_{Rd} \leq 0.7(V_w + V_c) + V_f = 0.7 \left(\frac{A_{sw}}{s} 0.9d \cdot f_{yd} + 0.3V_{Rd1} \right) + 2f_{td} \cdot n \cdot t_f \cdot 0.9d(1 + \cot \alpha) \sin \alpha$$

καθώς αυξάνει το πάχος t_f η αποκόλληση γίνεται περισσότερο πιθανή σε σχέση με την θραύση του FRP, συνεπώς η ϵ_{td} μειώνεται

$$\epsilon_{td} = k_y \epsilon_{tk} \leq 0.004 \quad (\text{συντελεστής μείωσης } k_y \text{ για μανδύα } U \text{ ή } II \approx 0.75)$$

0.85 για U ή II

• Υπολογισμός απαιτούμενων στρώσεων μανδύα, n

Υπολογισμός Καμπτικής Ενισχύσεως

Υφιστάμενη Διατομή: $\rho_{s1}, \rho_{s2}, M^u_o$

Επιδιώκεται: $M^u_f = M^u_o + \Delta M^u$

Λύση: Ενίσχυση με ExFRPs (διάτμηση επικαλύψεως), δηλ. $\epsilon_f \approx 1/3\epsilon_{cu} = 0.0035-0.0075$

• Στην Ο.Κ.Α. πρέπει, $\xi = \chi/d < \xi_{bal} = 0.64$ (για διαρροή του υφιστάμενου εφελκ. οπλισμού προ της θραύσεως του σκυροδ.)

• Επίσης πρέπει, $\xi > \xi_y^f = 0.0035h/d/(\epsilon_f + 0.0035)$ (για αποφυγή διατμ. αστοχίας στην επικάλυψη)

• Άρα, κριτήριο σχεδιασμού είναι $\xi_y^f < \xi < \xi_{bal}$

Ισορροπία Δυνάμεων: $\alpha_1 \beta_1 f_{cd} \xi_c h d + \rho_{s2} f_{yd} b d - \rho_{s1} f_{yd} b d - \epsilon_f E_f \rho_f b d = 0$

για $d_2/d \approx 0.05-0.15$, & $\epsilon_f < 0.0075 \rightarrow \epsilon_{s2} > \epsilon_{yd}$

Σχέσεις Διαστασιολόγησης

από την ισορροπία υπολογίζεται το ρ_f συναρτήσει του ξ :

$$0.8 \cdot 0.85 f_{cd} \cdot \xi + (\rho_{s2} - \rho_{s1}) f_{yd} = \rho_f f_f \quad \text{για } \xi = 0.64 \rightarrow \rho_{f,max}$$

• Εφικτή ενίσχυση όταν $\rho_f > 0$

$$\rho_f = \frac{E_f}{f_{cd}} \cdot \frac{0.0035}{\xi} \cdot \left(1 + \frac{d'}{d} - \xi \right) \quad f_{cd} = f_{ck} / \gamma_c, \quad f_{yd} = f_{yk} / \gamma_s$$

Ροπές ως προς το Κ.Β. της στρώσης FRP; με αναγωγή προς $bd^2 f_{cd}$ προκύπτει:

$$\mu_{Rd,f} = 0.68 \xi \left(1 + \frac{d'}{d} - 0.4 \xi \right) + (\rho_{s2} - \rho_{s1}) \cdot \frac{d'}{d} \cdot \frac{f_{yd}}{f_{cd}} = 0.68 \xi \left(1 + \frac{d'}{d} - 0.4 \xi \right) + \mu_{R0}$$

Διακριτοποίηση για εφαρμογή

Πίνακας: Τιμές του $\Delta \mu_{Rd,f}$ για διάφορες τιμές της παραμόρφωσης του FRP

$d'/d =$	0.05			0.1			0.15		
ϵ_f	ξ	$\Delta \mu_{Rd,f}$	ξ	$\Delta \mu_{Rd,f}$	ξ	$\Delta \mu_{Rd,f}$	ξ	$\Delta \mu_{Rd,f}$	
0.0022	0.644737	0.347276	0.675439	0.381137	0.70614	0.416573			
0.0025	0.6125	0.335283	0.641667	0.367974	0.670833	0.402187			
0.003	0.586923	0.341329	0.592308	0.347621	0.619231	0.379941			
0.0035	0.545	0.323163	0.55	0.32912	0.575	0.35972			
0.004	0.508667	0.306646	0.513333	0.312298	0.536667	0.341334			
0.0045	0.476875	0.291604	0.48125	0.296979	0.503125	0.324591			
0.005	0.448824	0.277876	0.452941	0.282998	0.473529	0.309309			
0.0055	0.423889	0.265313	0.427778	0.270203	0.447222	0.295326			
0.006	0.401579	0.253786	0.405263	0.258464	0.423684	0.282495			
0.0065	0.3815	0.24318	0.385	0.247663	0.4025	0.270689			
0.007	0.363333	0.233396	0.366667	0.237698	0.383333	0.259798			
0.0075	0.346818	0.224345	0.35	0.22848	0.365909	0.249723			

• για τιμές $\Delta \mu_{Rd,f}$ εκτός πίνακα δεν είναι δυνατή η αύξηση αντοχής. Είναι όμως εφικτή η ενίσχυση σε χαμηλότερο επίπεδο.

βήματα υπολογισμού του ρ_f :

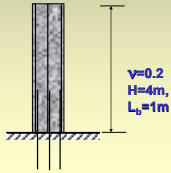
- (1) από τα δεδομένα της διατομής υπολογίζεται η ανηγμένη ροπή μ_{R0}
- (2) Δίδεται η απαιτούμενη $M_{Rd,f}$. Υπολογίζεται η ανηγμένη $\mu_{Rd,f}$
- (3) Είναι εφικτή η ενίσχυση? $(\rho_{s1} - \rho_{s2}) f_{yd} / f_{cd} < ? 0.68 - 0.64 = 0.435?$
- (4) Υπολογίζεται η διαφορά $\Delta \mu_{Rd,f} = \mu_{Rd,f} - \mu_{R0}$
- (5) Από τον Πίνακα, με δεδομένο το d'/d και την $\Delta \mu_{Rd,f}$ λαμβάνεται το ξ και ϵ_f . Από την σχέση (ρ_f, ξ) , υπολογίζεται το απαιτούμενο ρ_f

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ

Διατομή Δοκού: $h=600$ mm, $b=300$ mm (ορθογωνική), $d'=50$ mm, $d=550$ mm, $f_{yk}=400/1.15$, $f_{cd}=16/1.5$, $A_{s1}=5\Phi 20$, $A_{s2}=3\Phi 18 \Rightarrow \rho_{s1}=1\%$, $\rho_{s2}=0.5\%$, $d'/d=0.09$. Εκτιμώμενη αρχική αντοχή διατομής, $M_{R0}=268$ kN-m. Υπολογισμός $\mu_{R0}=0.133$. Επιδιωκόμενη Αντοχή: 400 kN-m. Ανηγμένη τιμή: $\mu_{Rd,f}=0.413$. $\Delta \mu_{Rd,f}=0.413-0.133=0.279$. Έλεγχος: $(\rho_{s1}-\rho_{s2}) f_{yd} / f_{cd} = 0.163 < 0.435$ (Ο.Κ.). Απαιτούμενο $\xi=0.45$, $\epsilon_f=0.005$ (από τον πίνακα, για $d'/d \leq 0.1$, και $\Delta \mu_{Rd,f}=0.279$). Απαιτούμενο ρ_f (για CFRP, $E_f=235$ GPa): $= (0.68-0.45-0.163) / (0.0035-235-1.5 / (16-0.45)) / (1+0.09-0.45) = 0.0013 \Rightarrow$ για πλάτος ταινίας $b=300$ mm, απαιτούνται 0.7 mm πάχος FRP.

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ: σχεδιασμός μανδύα για υποστύλωμα με «παλαιού τύπου» οπλισμούς

Διατμητική αντοχή υποστυλώματος & μετακίνηση $V_{y1}=130\text{ kN}$; $V_{u0}=70\text{ kN}$; $\Delta_y=20\text{ mm}$ διαρροής:



- Διαθέσιμη πλαστικότητα = 0.5 (αμελητέα περίσφιγξη + πρώιμη διατμητική αστοχία)
- Ιδανική μέγιστη σκοπούμενη πλαστικότητα $\mu_{\text{ισοφθ}}$ < 3.5
- Με βάση τον λυγισμό του διαμήκους θλιβόμενου οπλισμού ($s/D_s=15$), διαθέσιμη πλαστικότητα αζονικών θλιπτικών παραμορφώσεων = 4
- Διαθέσιμη μέγιστη πλαστικότητα καμπυλότητας (για ανακυκλιζόμενη φόρτιση) = 4.5
- Διαθέσιμη πλαστικότητα μετατοπίσεων = 2 (λαμβάνοντας ως μήκος πλαστ. άρθρ. 0.5d)

$$\mu_{\Delta} = 1 + 3(\mu_{\phi} - 1) \frac{l_p}{L_s} (1 - 0.5 \frac{l_p}{L_s})$$

$\sigma_{u0}=0.8\text{ MPa}$ (για αποφυγή πρώιμου λυγισμού σε μήκος ράβδου μεγαλύτερο του s)

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ: σχεδιασμός μανδύα για υποστύλωμα με «παλαιού τύπου» οπλισμούς

υπόθεση εργασίας: CFRP, $f_{tk}=3500\text{ MPa}$, $t=0.11\text{ mm}$, $E_t=230\text{ GPa}$, $f_{tk}=1/3f_{tk}$

απαιτούμενες στρώσεις μανδύα (FRP):

μηχανισμός αντοχής:	$\sigma_{u0}(\text{MPa})$	k_{FRP} :	N_t :
περίσφιγξη	3.9	0.5	4
λυγισμός	0.8		1.25
μάσηση	1.03		1.6
διάτμηση	0.55		0.9

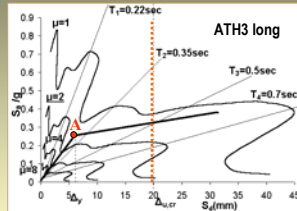
στις ακραίες διατομές (1/4 του ύψους του στοιχείου για να καλυφθεί και η μάσηση) απαιτείται καθ' ύψος (χρησ. 1 στρώση)

- Το παράδειγμα αυτό υπογραμμίζει την ανάγκη συνδυασμένου ελέγχου όλων των πιθανών μορφών αστοχίας που μπορούν να παρεμποδίσουν / προηγηθούν της πλήρους ανελαστικής καμπτικής λειτουργίας.

Αποτίμηση απαιτούμενης πλαστικότητας μετακινήσεων (για το σεισμό σχεδιασμού): η βάση της διαστασιολόγησης ενισχύσεων & επισκευών με μανδύες

I: Υπολογισμός συνολικής απαιτούμενης μετακίνησης

- Κατασκευή υπερρωθιτικής καμπύλης
- Μετασχηματισμός σε Ισοδύναμο Μονοβάθμιο Ταλαντωτή (ESDOF)
- Κατασκευή YPS από το ελαστικό ADRS



- Προσδιορισμός απαιτούμενης πλαστικότητας από την τομή του YPS με την υπερρωθιτική καμπύλη: $\mu_{u,cr}$
- Απαιτούμενη μετακίνηση ESDOF: $\Delta_{u,cr} = \mu_{u,cr} \cdot \Delta_y$

Αποτίμηση απαιτούμενης πλαστικότητας μετακινήσεων

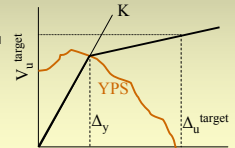
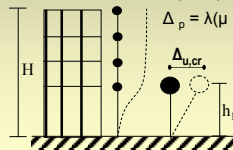
II: μετασχηματισμός από το ESDOF -> MDOF: υπολογισμός μετακίνησης ορόφων προς ενίσχυση / έλεγχο: π.χ. $\Delta_{u,cr}$ στον Nth όροφο

-από την θεμελιώδη ιδιομορφή, & YPS (μ_u, Δ_y)

$$\Delta_{u,cr}^{MDOF} = \Delta_y + \Delta_p$$

$$\Delta_y = \lambda \cdot \theta_y \cdot H / \varphi_{1,1}$$

$$\Delta_p = \lambda(\mu_u - 1) \cdot \theta_y \cdot H / \varphi_{1,1}$$



μονοσήμαντος προσδιορισμός της σκοπούμενης πλαστικότητας για δεδομένη στροφή π.χ. 1% ή 2% του ύψους

III: Αξιολόγηση προτεινόμενης λύσης με κριτήρια που αποσκοπούν στον έλεγχο της δυσκαμψίας:

(τιμή μ λυγρότητας στοιχείων, μέγεθος στροφής βάσης, ιδιοπερίοδος κατασκευής, κλπ.)?

πολύ εύκαμπτο

απαιτείται αύξηση δυσκαμψίας επιπλέον της προσθήκης μανδύων

χωρίς πρόβλημα δυσκαμψίας

η λύση με μανδύες είναι αποδεκτή

Μεθοδολογία Εφαρμογής

Από το ελαστικό φάσμα σχεδιασμού (απόσβεση 5%) εξάγονται: S_d , S_a & V_u (ελαστική σεισμική τέμνουσα βάσης)

Έλεγχος: Ελαστική σεισμική τέμνουσα vs. αντοχή σε οριζόντια φόρτιση

Παρεμβολή YPS για το δεδομένο $q \rightarrow$ προσδιορισμός του αντίστοιχου μ

Έλεγχος: Διαθέσιμη πλαστικότητα vs. απαιτούμενη: δεν επαρκεί:

Υιοθετώντας την μέθοδο ενίσχυσης με μανδύες διερευνάται η συμπεριφορά του πλαισίου:

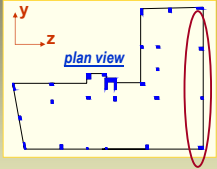
- αύξηση της διατμητικής αντοχής πέραν της ικανοτικής τέμνουσας: $V_n < V_{Rds} \Rightarrow q_n = V_n / V_n$
- Για τον νέο (διαθέσιμο) δείκτη συμπεριφοράς q_n , προσδιορίζεται εκ νέου η ανελαστική μετακίνηση $\Delta_{u,cr}^{\text{target}}$ και η απαιτούμενη πλαστικότητα σχεδιασμού για τα επιμέρους στοιχεία (υποστυλώματα)

- διαστασιολόγηση μανδύα

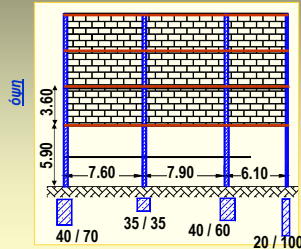


Παράδειγμα: 4όροφο πλαίσιο με pilotis (υποστυλώματα με ανεπαρκείς συνδετήρες)

Γεωμετρία δομήματος (κατάρρευση):



υλικά (από δειγματοληψίες): Σκυρόδεμα C25; Χάλυβας S400 ($f_{yk}=900\text{MPa}$ - $\varepsilon_{yk}=10\%$) & S220 ($\varnothing 6 / 300\text{mm}$)



Ποσοστά εμβαδά κατακόρυφων στοιχείων:

σύνολο κατακόρυφων: 1.35%

τοιχεία στην z κατ.: 0.12%

τοιχεία στην y κατ.: 0.31%

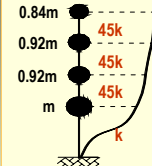
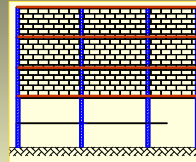
όλα τα υποστυλώματα έχουν μεγάλη λυγνρότητα στο επίπεδο του πλαισίου (ιδιαίτερα το τελευταίο)



Παράδειγμα: 4όροφο πλαίσιο με pilotis (υποστυλώματα με ανεπαρκείς συνδετήρες)

θεμελιώδης ιδιομορφή:

$$T_1=0.93\text{sec}; \quad \Phi_1=\{0.969, 0.985, 0.995, 1.00\}$$



$$m=98.4\text{kN}\cdot\text{sec}^2/\text{m}$$

$$k=16900\text{kN/m}$$

αρχική δυσκαμψία υποστυλωμάτων:

$$12EI/h^3 \quad (EI=M_y/\varphi_y)$$

δυσκαμψία τοιχοπληρώσεων:

$$E_m t_m / [4(h_i/l_{mi})^3 + 3(h_i/l_{mi})]$$

$$\text{συντελεστής συμμετοχής: } \lambda = \sum_{i=1,N} m_i \Phi_i^2 / \sum_{j=1,N} \Phi_j m_j = 0.98$$

$$\text{Από το A.D.R.S.: } S_d=0.163g \quad \& \quad S_a=S_d/\omega^2=35\text{mm}$$

$$\text{Ελαστική μετακίνηση πλαισίου: } S_d^* = 35/\lambda = 35.7\text{mm}$$

$$\text{Ελαστική τέμνουσα βάσης: } V_{pil} = K_{pil} \cdot (S_d/\lambda) \cdot \Phi_{1,1} \approx 612\text{kN}$$

Διαθέσιμη διατμητική αντοχή pilotής:

$$V_{Rd} = 30\% V_{Rd1} + V_s = 160\text{kN} \quad (\text{φτωχή περίπτωση})$$



Παράδειγμα: 4όροφο πλαίσιο με pilotis (υποστυλώματα με ανεπαρκείς συνδετήρες)

Με τέμνουσα δυσκαμψία

υποστυλωμάτων:

$$12EI/h^3 \quad (EI=M_y/\varphi_y)$$

$$\Rightarrow T_1=1.6\text{sec};$$

$$m=98.4\text{kN}\cdot\text{sec}^2/\text{m}$$

$$k=5612\text{kN/m}$$

Εξαιρετικά εύκαμπτο κτίριο

$$\text{Από το A.D.R.S.: } S_d=0.05g \quad \& \quad S_a=S_d/\omega^2=36\text{mm}$$

$$\text{Ελαστική Τέμνουσα Βάσης: } V_{pil}=197\text{kN}$$

απαιτείται αύξηση της δυσκαμψίας των υποστυλωμάτων της pilotής για μείωση της λυγνρότητας.

Εναλλακτικά, με προσθήκη άλλων στοιχείων (π.χ. τοιχεία, τοιχοπληρώσεις), επιδιώκεται μείωση των μετακινήσεων ώστε οι ροπές δευτέρας τάξεως να είναι $< 10\% M_y$.

(δηλ., $\Delta_{target} = 0.1/0.35 \Delta_y \rightarrow$ προσδιορισμός S_d , προσδιορισμός απαιτούμενης δυσκαμψίας. Σχεδιασμός ενίσχυσης υποστυλωμάτων για την απαιτούμενη πλαστικότητα μετακινήσεων)

Με δεδομένη την διαθέσιμη διατμητική αντοχή (160 kN) \rightarrow Διατμητική αστοχία

Οι ροπές δευτέρας τάξεως κυμαίνονται μεταξύ 11% και 35% του M_y

• Η ενίσχυση με FRPs δεν μπορεί να γίνεται αδιακρίτως. Είναι αναγκαίος ο συνδυασμένος έλεγχος των απαιτήσεων δυσκαμψίας για να αποφευχθούν άλλα φαινόμενα.