



“Σύνθετα Υλικά και Ενισχύσεις”

καθ. Στέφανος Η. Δρίτσος

Πάτρα, 2015

1

Σύνθετα Υλικά

Ορισμός

$$\Sigma = A + B$$

$$\Sigma = \text{Ίνες} + \text{Ρητίνη}$$

Τα σύνθετα υλικά αποτελούνται από ίνες υψηλής εφελκυστικής αντοχής εμποτισμένες με “θερμοσκληρυνόμενη ρητίνη”

Οι συνήθεις τύποι ινών που χρησιμοποιούνται είναι από **γυαλί** ή **αραμιδίο** ή **άνθρακα**. Νέοι τύποι ινών είναι υπό διερεύνηση (π.χ. βασάλτης).

2

Υλικά



Ίνες Άνθρακα



Ίνες Γυαλιού



Ίνες Αραμιδίου



Ρητίνες



Φίλερ

3

Εφαρμογές

- Ράβδοι ή πλέγματα ως οπλισμός
- Τένοντες προέντασης
- Υφάσματα ή ελάσματα για ενίσχυση στοιχείων
- Ειδικές ολόσωμες κατασκευές

4

Γιατί τα Σύνθετα Υλικά;

- Υψηλή εφελκυστική αντοχή
- Μικρό βάρος
- Υψηλή αντοχή σε διάβρωση
- Ουδέτερα σε ηλεκτρομαγνητικά πεδία

5

Τυπικές Ιδιότητες Ινών Σύνθετων Υλικών

Ινες	Πυκνότητα (kg/m ³ x 10 ³)	Μέτρο Ελαστικότητας (GPa)	Εφελκ.Αντοχή (MPa)	Παραμόρφ.Αστοχίας (%)
Ανθρακα				
Υψηλής αντοχής	1.80	215-235	3500-4800	1.40-2.00
Πολύ υψηλής αντοχής	1.80	215-235	3500-6000	1.50-2.30
Υψηλού μέτρου ελαστικότητας	1.90	350-500	2500-3100	0.50-0.90
Πολύ υψηλού μέτρου ελαστικότητας	1.90	500-700	2100-2400	0.20-0.40
Γυαλιού				
Τύπου E	2.55	70-75	1900-3000	3.00-4.50
Τύπου S	2.45	85-90	3500-4800	4.50-5.50
Αραμιδίου				
Χαμηλού μέτρου ελαστικότητας	1.45	70-80	3500-4100	4.30-5.00
Υψηλού μέτρου ελαστικότητας	1.45	115-130	3500-4000	2.50-3.50
Χάλυβας	7.86	200	400-1700	12.0-25.0

$$E_{FRP} = E_f V_f + E_r V_r \quad f_{FRP} \approx f_f V_f + f_r V_r$$

6

Αδυναμίες Σύνθετων Υλικών

- Παντελής έλλειψη ολκιμότητας
- Χαμηλή αντίσταση σε μέτριες και υψηλές θερμοκρασίες
 - Θερμοκρασία μετάπτωσης υάλου (60°C)
 - Η ρητίνη καίγεται (200-250)°C
- Η εφελκυστική αντοχή των υλικών μειώνεται σημαντικά, όταν βρίσκονται σε μόνιμη τάση
- Ανθεκτικότητα σε διάρκεια;
 - Υπεριώδης ακτινοβολία
 - Αυτομειώσεις της θερμοκρασίας
 - Δράση χημικών

7

Ποιοτική Αξιολόγηση Ινοπλισμένων Πολυμερών

Χαρακτηριστικό	ΙΟΠ-Ανθρακας	ΙΟΠ-Αραμιδίου	ΙΟΠ-Γυαλιού
Ανθεκτικότητα σε διάρκεια	πολύ καλή	καλή	οριακή
Αντοχή σε κόπωση	πολύ καλή	καλή	οριακή
Ανθεκτικότητα σε αλκαλικό περιβάλλον	πολύ καλή	καλή	ακατάλληλο υλικό
Αντοχή σε κρούση	μικρή	πολύ καλή	καλή
Αντοχή σε φθορά λόγω τριβής	μέτρια	πολύ καλή	καλή
Γαλβανικό φαινόμενο	ναι	όχι	όχι
Αντοχή σε υπεριώδεις ακτινοβολίες	καλή	μικρή	καλή
Πυκνότητα (kg/m ³ x10 ³)	~1.80	~2.50	~1.50
Κόστος (συγκριτικά μεταξύ τους)	υψηλό	μέτριο	χαμηλό
Αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες	(800-1600) °C	200°C	(300- 1000) °C

8

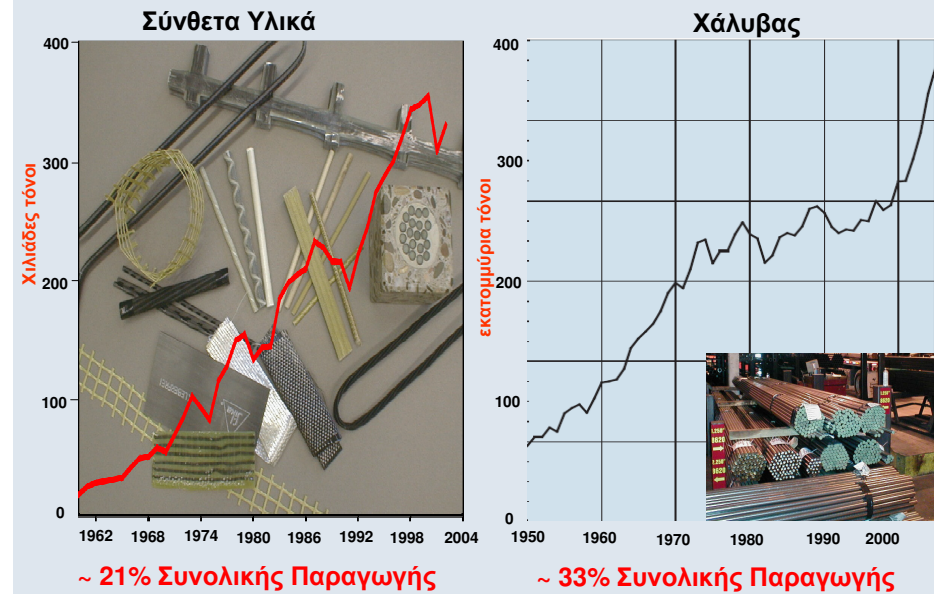
Υλικό	Συντελεστής Θερμικής Διαστολής x 10 ⁻⁶	
	Διαμήκη	Εγκάρσια
Ίνες-Άνθρακα	-0.9 έως +0.7	8 έως 18
Ίνες-Αραμιδίου	-6.0 έως -2.0	55 έως 60
Ίνες-Γυαλιού	5 έως 15	5 έως 15
Ρητίνες	60 έως 140	
ΙΟΠ-Άνθρακας	-0.9 έως 0	74 έως 104
ΙΟΠ-Αραμιδίου	-6.0 έως -2.0	60 έως 80
ΙΟΠ-Γυαλιού	6 έως 10	21 έως 23
Σκυρόδεμα	6 έως 13	
Χάλυβας	12x10 ⁻⁶	

fib Bulletin 35, (2006) και ACI 440.1R (2002)

ΔT = ± 25 °C Δεν επηρεάζει την συνάφεια ACI 440.2R-02)

9

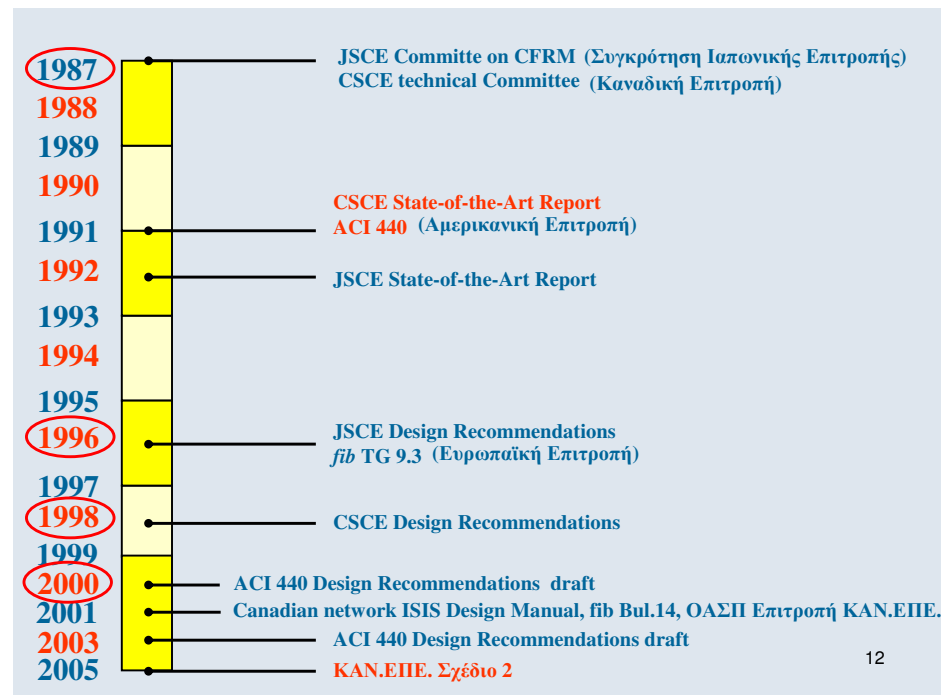
Παραγωγή για Χρήση στις Κατασκευές



Γιατί Τελικά Έχουν Περιορισμένη Εφαρμογή στη Πράξη;

- Υψηλό κόστος
- “Υψηλής Κλάσης” αντίπαλος ο χάλυβας
- Έλλειψη εγκεκριμένων προδιαγραφών & προτύπων (κώδικας για το σχεδιασμό)

11



12

Εφαρμογές

μικρό βάρος

Pedestrian bridge, Kolding (DK) - 1997



13

Εφαρμογές



14

Εφαρμογές

Αντοχή σε διάβρωση



15

Εφαρμογές



Αντοχή σε διάβρωση

16

Εφαρμογές



Αντοχή σε διάβρωση

17

Απαιτήσεις Απουσίας Μαγνητικών Υλικών



Magnetic Levitation Railways (Japan)

18



19

Οπλισμοί

NEFMAC (FRP Grid) Nefcom CO., Ltd.

C-Bar Reinforcing Rods
Marshall Industries Composites Inc.

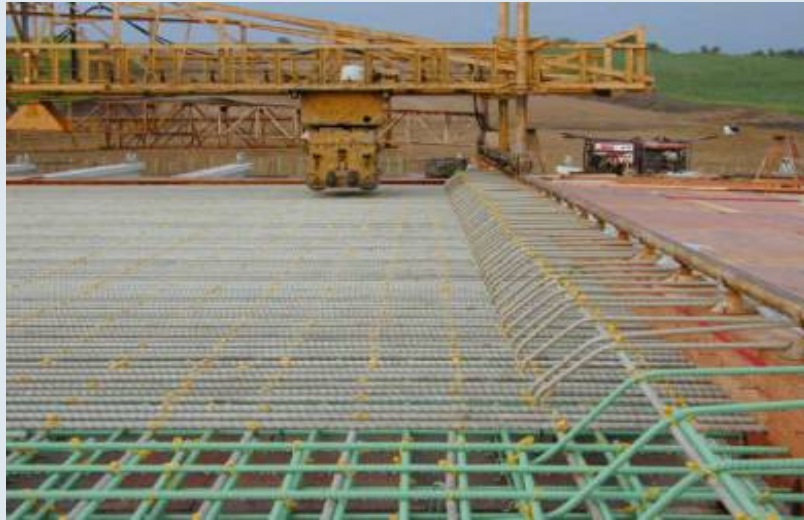
CFRP Rod LEADLINE
Mitsubishi Kasei Corporation

Τένοντες

TECHNORA ROD Teijin Ltd.

20

Τα Σύνθετα ως Οπλισμός σε Νέες Κατασκευές



IOWA USA

21

Τα Σύνθετα ως Οπλισμός σε Νέες Κατασκευές



53 rd AVENUE BRIDGE

22

Τα Σύνθετα ως Οπλισμός σε Νέες Κατασκευές

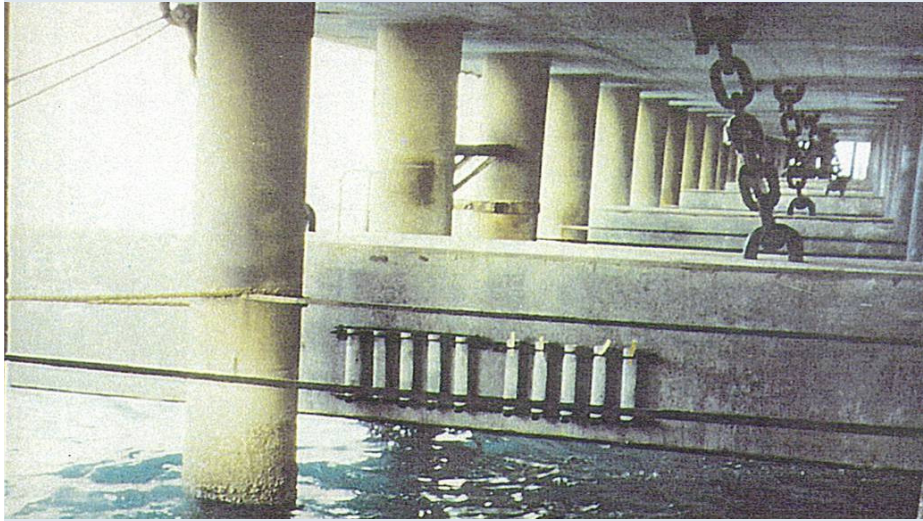


23



24

Τα Σύνθετα ως Οπλισμός σε Νέες Κατασκευές



25

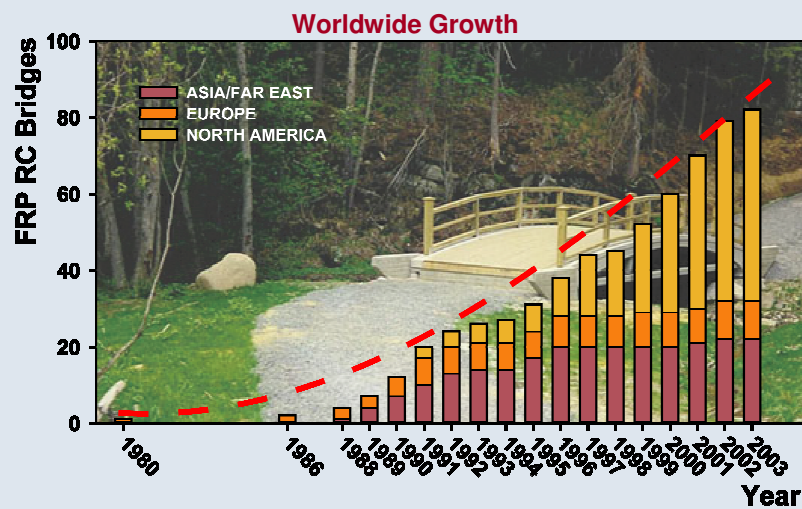
Τα Σύνθετα ως Οπλισμός σε Νέες Κατασκευές



Birdie Bridge - Ibaragi Prefecture, Japan

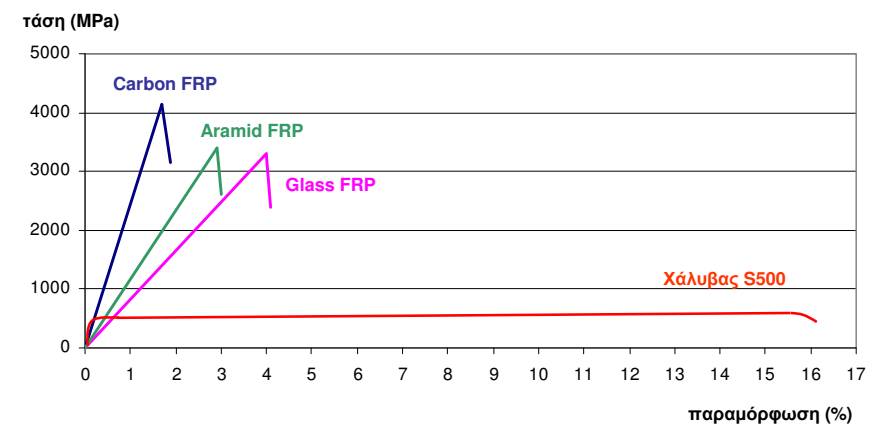
26

Γέφυρες με Οπλισμό από Σύνθετα



27

Σχεδιασμός με Οπλισμό από Σύνθετα Υλικά



*Παρατήρηση: όχι για ανάληψη θλιπτικών δυνάμεων

28

Μείωση Αντοχής

Μειωτικός συντελεστής C_E για διάφορες συνθήκες περιβάλλοντος (ACI- 440)

Συνθήκες Περιβάλλοντος	ΙΟΠ Άνθρακας		ΙΟΠ - Αραμίδιο		ΙΟΠ - Γυαλί	
	Εσ. οπλισμός	ενίσχυση	Εσ. οπλισμός	ενίσχυση	Εσ. οπλισμός	ενίσχυση
Εσωτερικοί χώροι	1.0	0.95	0.9	0.85	0.8	0.75
Εξωτερικοί χώροι	0.9	0.85	0.8	0.75	0.7	0.65
Ιδιαίτερα διαβρωτικό περιβάλλον	n/s	0.85	n/s	0.70	n/s	0.50

$$f'_{fk} = C_E f_{fk}$$

Επιρροή μόνιμης σταθερής τάσης (ερπυσμός)

Στατική κόπωση - Creep Rapture Stress (ACI- 440)

	ΙΟΠ Άνθρακας	ΙΟΠ - Αραμίδιο	ΙΟΠ - Γυαλί
όριο αντοχής	0.55 f_{fk}	0.3 f_{fk}	0.20 f_{fk}

29

➔ προβληματική η ανάληψη μονίμων φορτίων

Σχεδιασμός με Οπλισμό από Σύνθετα Υλικά

συντελεστές ασφαλείας

$\gamma_{Rd} = 2.0$ Για αστοχία οπλισμού στην εφ. ζώνη

$\gamma_{Rd} = 1.4$ Για αστοχία σκυροδέματος στην θλιβ. ζώνη

$$\mu_\theta \sim 1.0, \quad q = 1.0$$

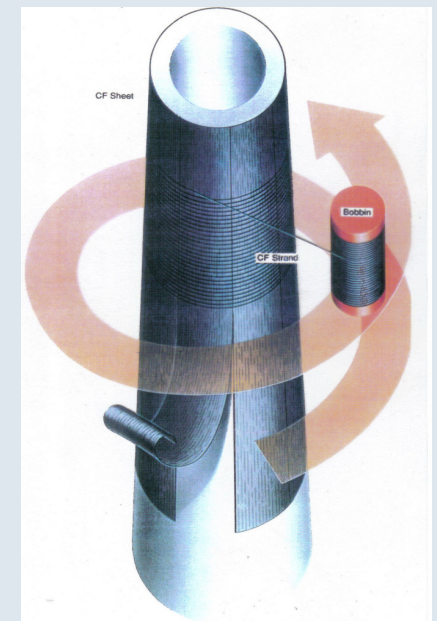
30

Συγκριτικό Κόστος για Ράβδους Οπλισμού

	Συνήθης χάλυβας	Σύνθετα υλικά με ίνες άνθρακα			Ανοξειδωτος χάλυβας	
	Κόστος ανά m	Κόστος ανά m	Σχέση κόστους ανά m	Σχέση κόστους με αναγωγή σε ίση αντοχή	Κόστος ανά m	Σχέση κόστους ανά m
Φ8	0.50€/kgr x 0.40=0.20€/m	12.00 €/m	50:1	12.5 :1	6 €/kgr x 0.40=2.4€/m	12:1
Φ16	0.50€/kgr x 1.58=0.80€/m	25.00 €/m	30:1	7.5 :1	5 €/kgr x 1.58=7.9€/m	10:1

31

ΕΠΙΣΚΕΥΕΣ ΜΕ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ



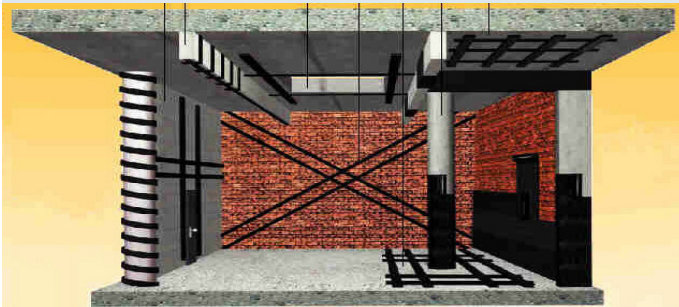
Σ. Η. ΔΡΙΤΣΟΣ

ΕΠΙΣΚΕΥΕΣ ΜΕ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ

➤ Επικουρικός ρόλος παρουσία υφιστάμενου οπλισμού

Προϋπόθεση (ACI. 440-2R):

Ανάληψη φορτίων από την υπάρχουσα κατασκευή: **1.2G + 0.85Q**



- Υφάσματα
- Ελάσματα
- Φύλλα
- Λωρίδες
- Πλέγματα

➤ Μεγιστοποίηση ταχύτητας εκτέλεσης εργασίας

➤ Ελαχιστοποίηση αναστάτωσης

➤ Όχι για καμπτική ενίσχυση υποστυλωμάτων

33

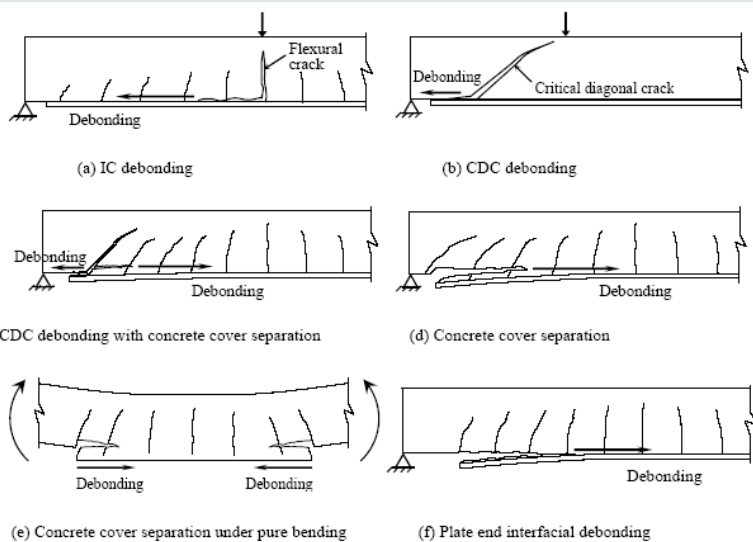
Καμπτική Ενίσχυση

Μικρό βάρος



Building Klinkerstr, Amsterdam

34



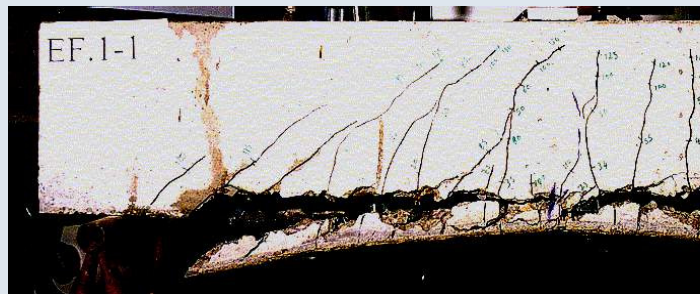
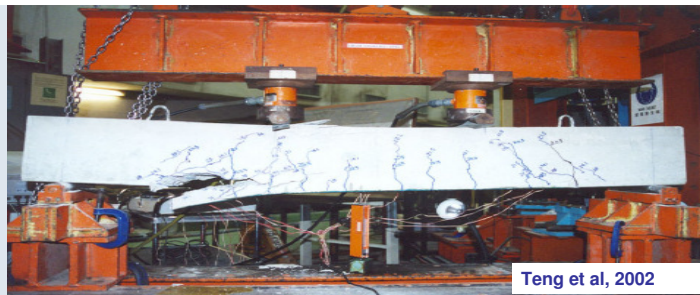
35



Teng et al, 2002

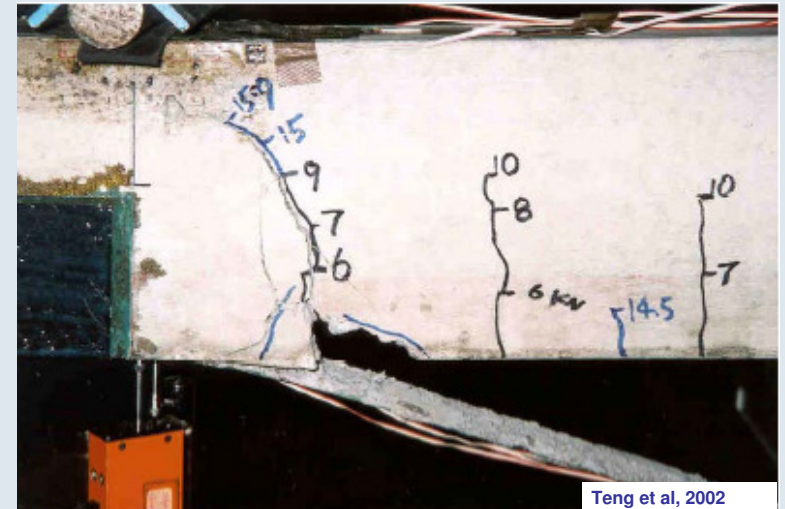


Αναλαμβανόμενη δύναμη επικολλητών φύλλων συναρτήσει του μήκους αγκύρωσης



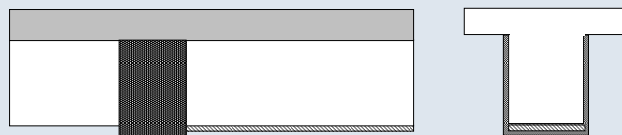
Απόσχιση επικάλυψης σκυροδέματος στο πέρας του σύνθετου υλικού

37



Teng et al, 2002

38



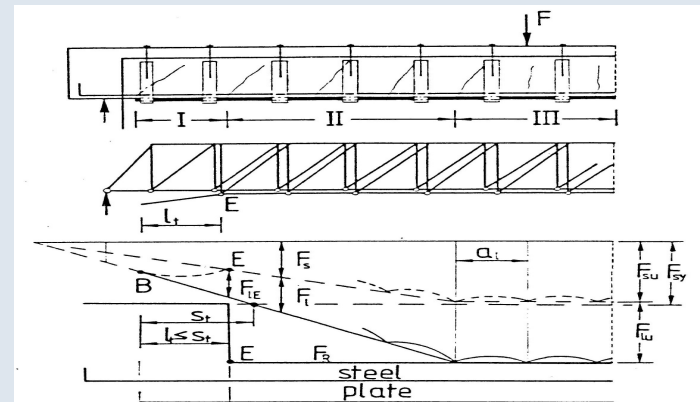
Χρήση στοιχείων αγκύρωσης στα άκρα

39

Έλεγχος Απόσχισης Άκρου

$$V_{sd, \text{απολ.}} \leq V_{cd, \text{απολ.}}$$

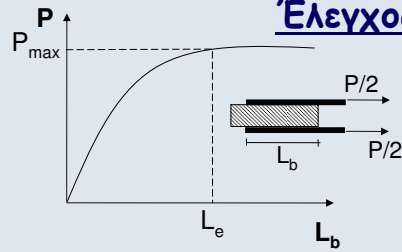
$$M_{sd, \text{απολ.}} \leq 0.67 M_{Rd, \text{απολ.}}$$



Rostasy, 1997

$$V_{sdj} = \frac{A_j \sigma_{jd}}{A_{so} f_{ydo} + A_j \sigma_{jd}} V_{sd, \text{απόλ.}}$$

40

Έλεγχος Αποκόλλησης

$$L_e = \sqrt{\frac{E_j t_j}{2 f_{ctm}}} \quad P_{\max} = \beta f_{ctm} b_j L_e$$

$$\sigma_{\text{crit}} = \frac{P_{\max}}{b_j t_j} \cong \beta \sqrt{\frac{E_j f_{ctm}}{2 t_j}}$$

$$\beta = \beta_w \beta_L \quad \beta_w = \sqrt{\frac{2 - b_j/b_w}{1 + b_j/b_w}}$$

$$\beta_L = 1 \text{ για πλήρη αγκύρωση}$$

ΚΑΝ.ΕΠΕ.

§ 8.2.1.3

$$\sigma_{j,d} = \frac{\sigma_{j,\text{crit}}}{\gamma_{Rd}} = 1,2$$

Ας θεωρηθεί η περίπτωση μίας δοκού από σκυρόδεμα C16/20 που ενισχύεται στο εφελκόμενο πέλας με ένα έλασμα ΙΟΠ-Άνθρακα, πάχους $t_j=1\text{mm}$ και πλάτους $b_j=1/2b_w$. Εξετάζοντας την 2η μορφή αστοχίας λαμβάνεται:

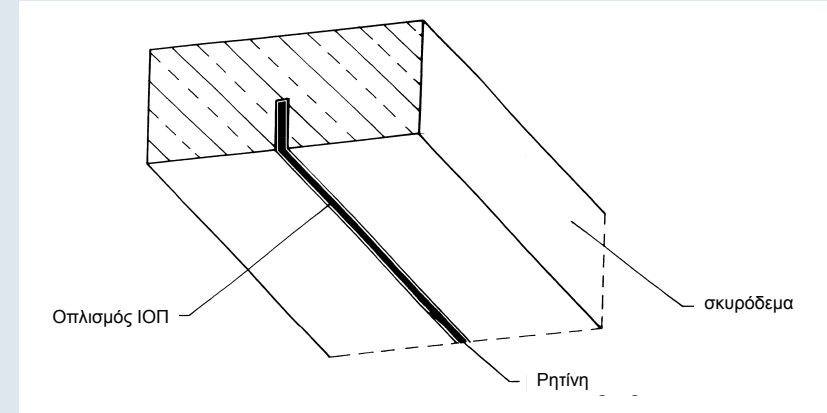
$$f_{ctm} \cong 0.3 f_{ck}^{2/3} = 0.316^{2/3} = 1.92 \text{ MPa}, \quad \beta = 1 \text{ και}$$

$$\sigma_{j,\text{crit}} = \sqrt{\frac{200 \times 1.92 \times 10^3}{2}} = 438 \text{ MPa}, \quad \sigma_{j,d} = \frac{438}{1,2} = 365 \text{ MPa}$$

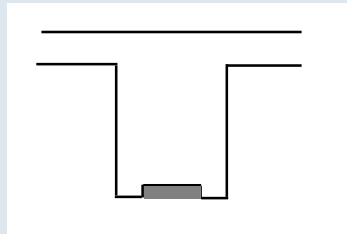
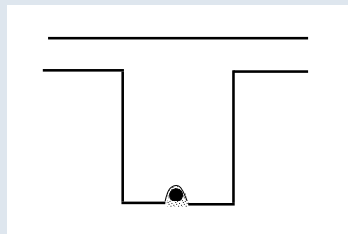
$$t_j \uparrow \Rightarrow \sigma_{j,\text{crit}} \downarrow$$

41

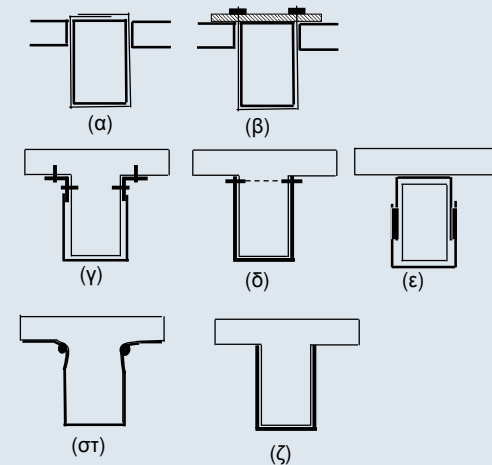
■ Χρήσιμη τεχνική για ενισχύσεις γύρω από νέα ανοίγματα σε πλάκες, τοιχώματα

Καμπτική Ενίσχυση με Οπλισμούς εντός “Αυλακιών”

42



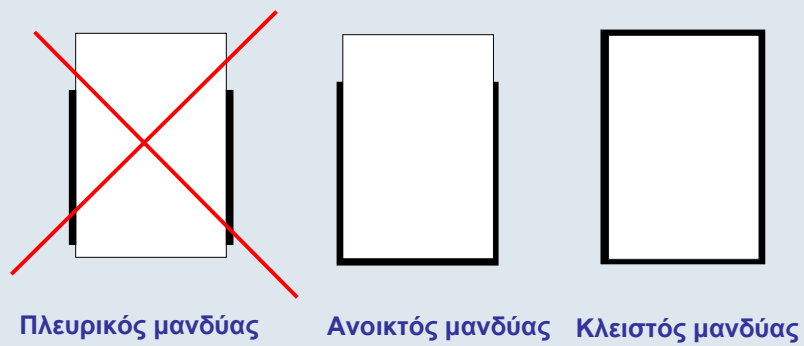
43



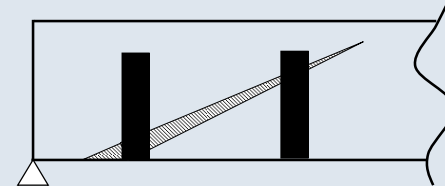
Ενδεικτικοί τρόποι ενίσχυσης σε διάτμηση έναντι ανεπάρκειας οπλισμού διάτμησης :
(α), (β) “κλειστή” ενίσχυση, (γ), (δ), (ε), (στ) “ανοικτή” ενίσχυση με αγκυρωμένα άκρα και
(ζ) “ανοικτή” ενίσχυση αποδεκτή κατά παρέκκλιση

44

Διατμητική Ενίσχυση



45



Απόσχιση επικάλυψης σκυροδέματος στο πέρας του σύνθετου υλικού

46

Διατμητική Ενίσχυση



47



48

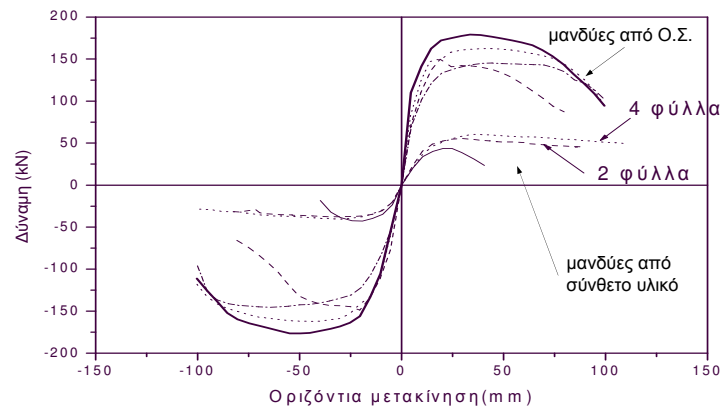


49

Γιατί Περίσφιγξη;

- Αύξηση της πλαστιμότητας του υποστυλώματος
- Αύξηση της θλιπτικής αντοχής του υποστυλώματος
- Αποφυγή αστοχίας συνάφειας των κατακόρυφων ράβδων του υποστυλώματος, στην περιοχή της υπερκάλυψής τους
- Αύξηση της διατμητικής αντοχής του υποστυλώματος
- Ικανοποίηση απαιτήσεων ικανοτικού σχεδιασμού

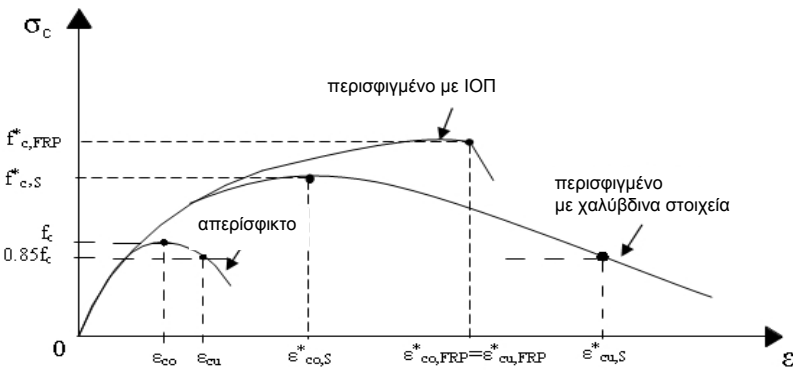
50



Διαγράμματα φορτίου-οριζόντιας μετακίνησης υποστυλωμάτων ενισχυμένων με μανδύες από σύνθετα υλικά και Ο.Σ.

51





(α) για κυκλικές διατομές

$$f_c^* = \frac{1}{Y_{Rd,1}} (1 + 1.4 a w_w) f_c \quad Y_{Rd,1} = 1.4 \quad \varepsilon_{cu}^* = \frac{1}{Y_{Rd,2}} [0.003 (1 + 1.4 a w_w)^2]$$

(β) για ορθογωνικές διατομές

$$f_c^* = \frac{1}{Y_{Rd,3}} (1 + 1.4 a w_w) f_c \quad Y_{Rd,3} = 1.7$$

$$\varepsilon_{cu}^* = \frac{1}{Y_{Rd,4}} [0.003 (1 + 1.4 a w_w)^2] \quad Y_{Rd,4} = 3.1$$

53

Αποκατάσταση περιοχών με ανεπαρκή μήκη μάτισης

Γενικώς

$$t_j = Y_{Rd} \frac{(1 - \lambda_s) \frac{1}{\beta} \frac{f_{yk}}{\mu \sigma_{jd}} \frac{A_b}{l_s}}{Y_{Rd} = 1.5}$$

Για γωνιακές ράβδους

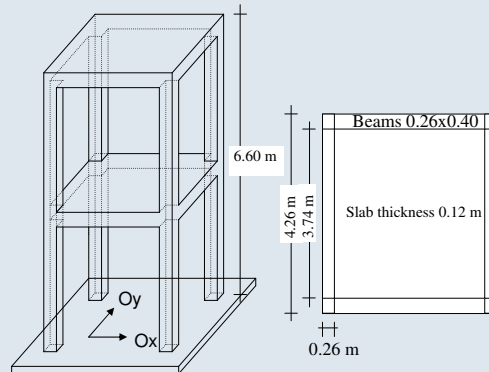
$$t_j \geq \frac{7}{\delta^{5/3}} [(1 - \lambda_s) d_s / l_s]^3 \frac{f_{yk}^3}{E_j f_{ck}^2} \bar{b} (c + d_s) \quad (N, mm)$$

(ΚΑΝ.ΕΠΕ., 2005)

54

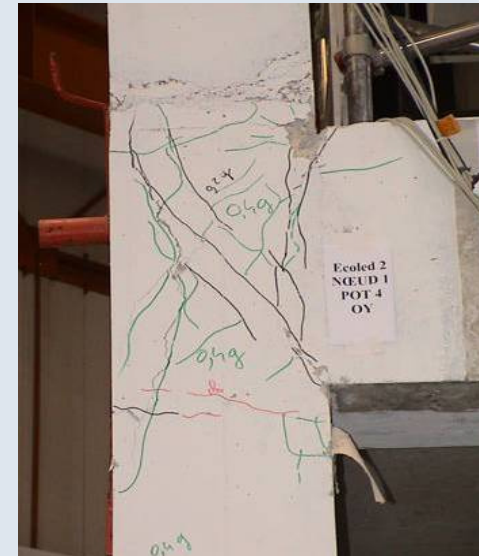
Ecoleader Project

Πειράματα στην Σεισμική Τράπεζα σε Διώροφο Κτίριο



CEA Laboratories, Sacley, France

55



CEA, Sacley

56



CEA, Sacley

57



CEA, Sacley

58

Επισκευή με ρητινενέσεις



CEA, Sacley

59

Ενίσχυση κόμβων



CEA, Sacley

60



CEA, Sacley

61



CEA, Sacley

Σ. Η. ΔΡΙΤΣΟΣ

Σ. Η. ΔΡΙΤΣΟΣ

62



CEA, Sacley



Πειράματα στο Εργαστήριο Κατασκευών του Πανεπιστημίου Πατρών



Fardis and Bousias

64

Σ. Η. ΔΡΙΤΣΟΣ

Συνήθη Προβλήματα Εφαρμογής

- Δεν ελέγχεται η κατάσταση και η αντοχή των επιφανειακών στιβάδων σκυροδέματος
- Δεν προετοιμάζεται επιμελώς η επιφάνεια βάσης
- Δεν γίνονται κατάλληλες στρογγυλεύσεις των ακμών του στοιχείου
- Δεν χρησιμοποιούνται οι κατάλληλες κόλλες για το συγκεκριμένο υπόβαθρο
- Χρήση ρητινών πέραν των αποδεκτών χρονικών ορίων χρήσης τους
- Συνεργεία με μικρή εμπειρία:
 - Εσφαλμένη ή πρόχειρη διαδικασία εφαρμογής
 - Έλλειψη κατάλληλων βοηθητικών μέσων
 - Εγκλωβισμός αέρα

65

Μερικά Ερωτήματα από την Πράξη

- Προστασία από φωτιά ?
- Όταν έχουν χρησιμοποιηθεί φαλτσογωνιές, χρειάζεται στρογγύλευση στις ακμές ?



- Επιτρέπεται να “τρυπηθεί” το ύφασμα ή το έλασμα?
- Επιτρέπεται να υπάρχει επαφή του σύνθετου υλικού με στοιχεία χάλυβα?
- Η πλήρης κάλυψη στοιχείων βοηθά την προστασία σε διάβρωση ?
 - Σε στοιχεία από σκυρόδεμα ?
 - Σε στοιχεία τοιχοποιίας ?

66

Τι Καινούριο Έρχεται ?

Οπλισμοί σε Νέες Κατασκευές

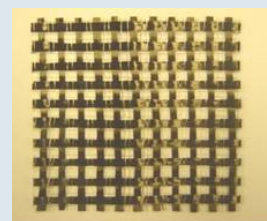
- Από νέα μητρικά υλικά (π.χ. βασάλτης-Ρωσία και Ουκρανία)

Ενισχύσεις

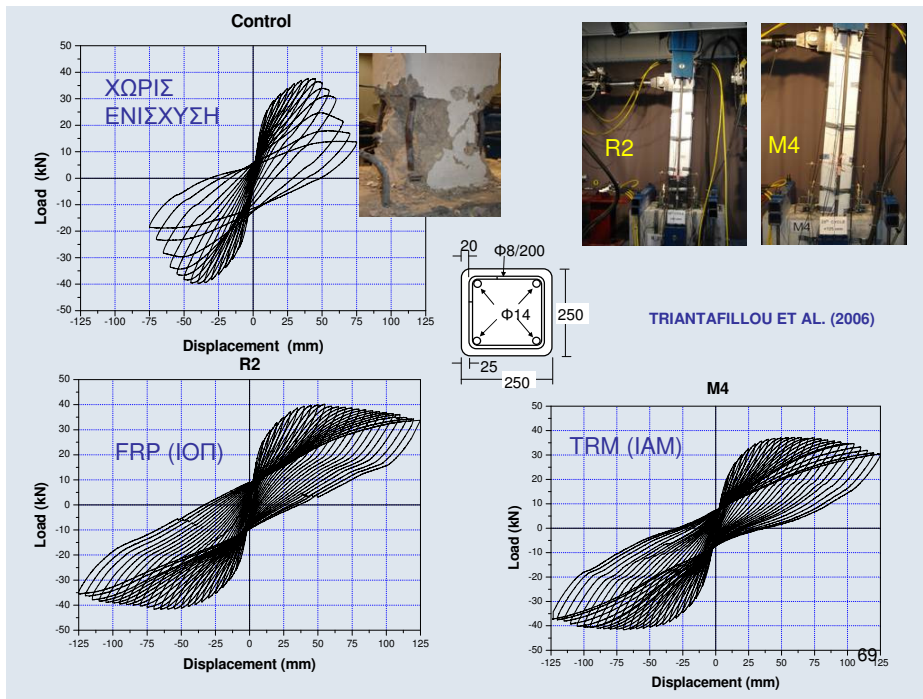
- Αντικατάσταση συνδετικού μέσου ρητίνης με κονίαμα
 - Πλέγματα με βροχίδες από δέσμες συνήθων ινών (για στοιχεία από Ο.Σ. και για τοιχοποιία – Πανεπιστήμιο Πατρών, Εργαστήριο Μηχανικής)
 - Πλέγματα με βροχίδες από δέσμες χαλύβδινων συρμάτων (ψαθυρών) (μανδύες σε στοιχεία Ο.Σ.– Πανεπιστήμιο Θεσ/κης, Δ.Π.Θ.)
- Κατάργηση συνδετικού μέσου (Πανεπιστήμιο Πατρών, Εργαστήριο Μηχανικής)
- Χρήση σύνθετων ελασμάτων σε επιφανειακές εγχοπές
- Αγκύρια από θύσανο ινών
- Χρήση για αναβάθμιση διαβρωμένων στοιχείων

67

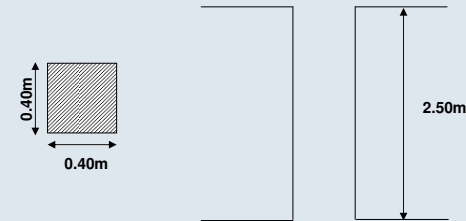
- Μανδύες νέου τύπου: Ινοπλέγματα σε Ανόργανη Μήτρα (IAM)
- [Textile-Reinforced Mortars – TRM (fib Bul.35, Triantafyllou et al. 2006)]



68



Εκτίμηση Κόστους Ενίσχυσης με Σύνθετα Υλικά



- Εστω ανθρακονήματα C200 ($t_f=0.11\text{mm}$)

$$2 \times 5\text{m}^2 \times 21 \frac{\text{€}}{\text{m}^2} = 210 \text{ €}$$

Αν ανθρακονήματα C300 ($t_f=0.165\text{mm}$)

$$2 \times 5\text{m}^2 \times 28 \frac{\text{€}}{\text{m}^2} = 280 \text{ €}$$

Αν υαλοφάσματα G60 AR ($t_g=0.23\text{mm}$)

$$t_g = 0.23 \rightarrow 0.23 \frac{E_g}{E_c} = 0.062 \rightarrow \frac{110}{62} = 1.77$$

2 φύλλα CFRP $\approx 2 \times 1.77 = 3.5$ φύλλα GFRP

$$3.5 \times 5\text{m}^2 \times 14.4 \frac{\text{€}}{\text{m}^2} = 252 \text{ €}$$

$\approx 250 \text{ €}$ έως 300 €

70

ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ

$\approx 250 \text{ €}$ έως 300 €

ΥΠΟΛΟΙΠΑ ΥΛΙΚΑ

$$1.6\text{m} \times 2.5\text{m} \times 25 \frac{\text{€}}{\text{m}^2} = 100 \text{ €}$$

έως 150 €

ΕΡΓΑΤΙΚΑ

$$1.6\text{m} \times 2.5\text{m} \times 60 \frac{\text{€}}{\text{m}^2} = 240 \text{ €}$$

έως 350 €

$\approx 600 \text{ €}$ έως 800 €

ΕΠΙΣΚΕΥΗ ΜΕ ΜΕΤΑΛΛΙΚΟ ΚΛΩΒΟ

περίπου 350 € έως 400 €

71

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

➤ Ως εσωτερικός οπλισμός σε νέες κατασκευές:

- Δεν ενδιαφέρει για κτιριακά έργα
- Ενδιαφέρει για έργα υποδομής
π.χ. σε έντονο διαβρωτικό περιβάλλον (π.χ. λιμενικά έργα)
- Ναι για εξειδικευμένες απαιτήσεις
π.χ.
 - κατασκευές που απαιτούν χαμηλή ηλεκτρική ή θερμική αγωγιμότητα
 - κατασκευές για τις οποίες δεν είναι αποδεκτή η χρήση μαγνητικών υλικών (π.χ. ιατρικός εξοπλισμός)

➤ Ως τένοντες προέντασης:

- Αισιόδοξες προοπτικές

72

➤ **Σε ενισχύσεις κατασκευών**

κυρίως για μεμονωμένα μέλη

προϋπόθεση: ικανοποιητική αντοχή σκυροδέματος

- Ελάχιστη η προσφορά “ανοικτών” ενισχύσεων
- Μικρή βελτίωση καμπτικής ικανότητας πλακών και δοκών
- Υποσχόμενη τεχνική η τοποθέτηση ράβδων ή ελασμάτων εντός αυλακιών (υπό έρευνα)
- Μικρή βελτίωση διατμητικής αντοχής δοκών
- Ενδιαφέρουσα εφαρμογή για ενισχύσεις κόμβων
- Χρήσιμη εφαρμογή ως εγκάρσιος οπλισμός σε υποστυλώματα (κυρίως) και τοιχώματα
 - ✓ Πλαστιμότητα
 - ✓ Διατμητική αντοχή
 - ✓ “Κοντές” αναμονές
- Χρήσιμη εφαρμογή για ειδικές απαιτήσεις
Π.χ. ελαχιστοποίηση χρόνου επέμβασης, ενίσχυση καμινάδων

73