

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΠΕΡΙΣΦΙΓΞΗ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

6.1 Γενικά

Η δράση των συνθέτων υλικών κατά την περίσφιγξη του σκυροδέματος (π.χ. Σχ. 6.1) είναι εξαιρετικά ευνοϊκή και γενικά ευνοϊκότερη σε σχέση με αυτήν μεταλλικών μανδύων ίσης δυσκαμψίας. Κατά την αξονική καταπόνηση υποστυλωμάτων (π.χ. λόγω κάμψης και/ή αξονικού φορτίου) το σκυρόδεμα διογκώνεται εγκάρσια, με αποτέλεσμα ο μανδύας συνθέτων υλικών που το περιβάλλει να ενεργοποιείται (μέσω της ανάπτυξης εφελκυστικών παραμορφώσεων στις ίνες), επιβάλλοντας έτσι εγκάρσιες θλιπτικές τάσεις (περίσφιγξης) κάθετα στον άξονα του μέλους, μέχρις ότου αστοχήσει. Οι τάσεις περίσφιγξης έχουν ως αποτέλεσμα:

1. Αύξηση της θλιπτικής αντοχής και της παραμορφωσιμότητας (δηλαδή της οριακής παραμόρφωσης) του σκυροδέματος.
2. Αύξηση της γωνίας στροφής χορδής ενός μέλους στην (καμπτική) αστοχία, δηλαδή αύξηση της πλαστιμότητας.
3. Βελτίωση των συνθηκών συνάφειας μεταξύ ράβδων οπλισμού και σκυροδέματος σε περιοχές με ματίσεις και άρα παρεμπόδιση της ολίσθησης των διαμήκων ράβδων στις περιοχές αυτές.
4. Καθυστερήση της εμφάνισης λυγισμού των διαμήκων ράβδων σε περιοχές με αραιή διάταξη συνδετήρων.



(α)



(β)

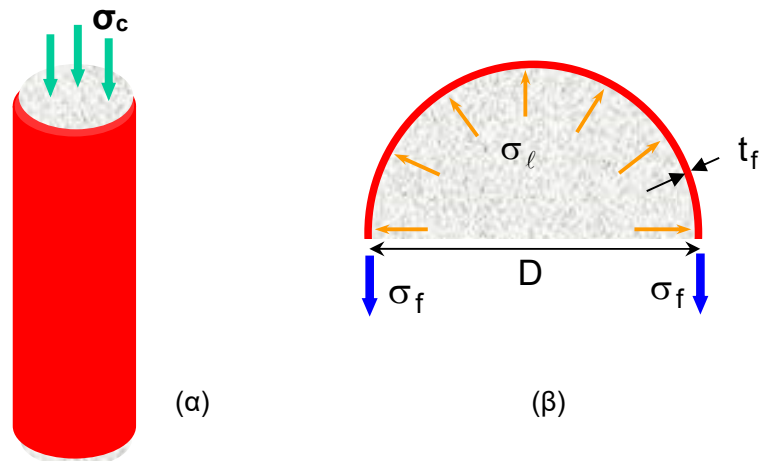
Σχ. 6.1 Περίσφιγξη υποστυλωμάτων με μανδύες συνθέτων υλικών: (α) εφαρμογή υφάσματος με τις ίνες σε οριζόντια διάταξη, (β) εφαρμογή υφάσματος με τις ίνες υπό γωνία ως προς τον άξονα του μέλους.

Κάθε ένα από τα παραπάνω εξετάζεται ακολούθως σε χωριστές ενότητες.

6.2 Συμπεριφορά και καταστατικός νόμος σκυροδέματος περισφιγμένου μέσω συνθέτων υλικών

6.2.1 Συμπεριφορά

Ας θεωρήσουμε ένα κυλινδρικό στοιχείο από σκυρόδεμα (Σχ. 6.2α), με διάμετρο D , το οποίο περιβάλλεται από μανδύα συνθέτων υλικών πάχους t_f και μέτρου ελαστικότητας (παράλληλα στη διεύθυνση των ινών, δηλαδή κατά την έννοια της περιμέτρου) E_f .



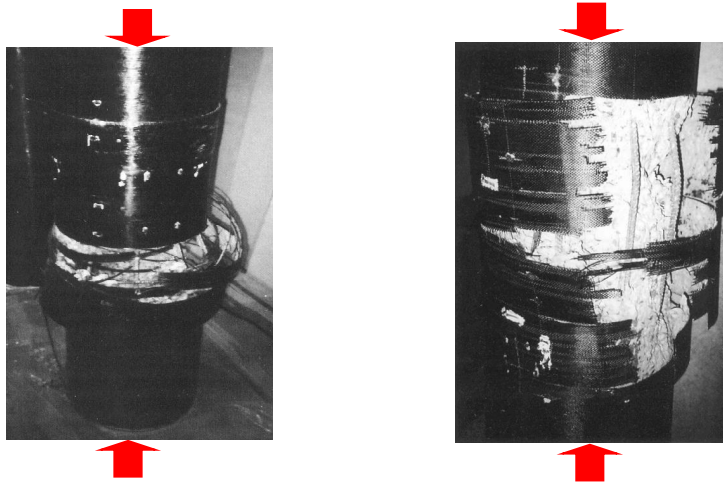
Σχ. 6.2 (α) Αξονική καταπόνηση υποστυλώματος με μανδύα συνθέτων υλικών. (β) Ανάπτυξη εγκάρσιων τάσεων λόγω διόγκωσης.

Οι λόγω διόγκωσης εγκάρσιες (κατά την ακτινική διεύθυνση) τάσεις στο μανδύα (ίσες και αντίθετες ασκούνται στο σκυρόδεμα), σ_ℓ , δίνονται από τη σχέση:

$$\sigma_\ell = \frac{2t_f}{D} \sigma_f = \frac{2t_f}{D} E_f \varepsilon_f = \frac{1}{2} \rho_f E_f \varepsilon_f \quad (6.1)$$

όπου σ_f και ε_f = εφελκυστική τάση και παραμόρφωση στον μανδύα, αντίστοιχα, και ρ_f = γεωμετρικό ποσοστό οπλισμού συνθέτων υλικών. Αποτέλεσμα των τάσεων περισφιγξης σ_ℓ είναι η παρεμπόδιση της ρηγμάτωσης και άρα η αύξηση της αντοχής και της παραμορφωσιμότητας, έως ότου η εφελκυστική τάση σ_f (αντίστοιχη παραμόρφωση ε_f) στον μανδύα φθάσει την αντοχή του, f_{fde} (αντίστοιχη παραμόρφωση ε_{fue}), οπότε θα

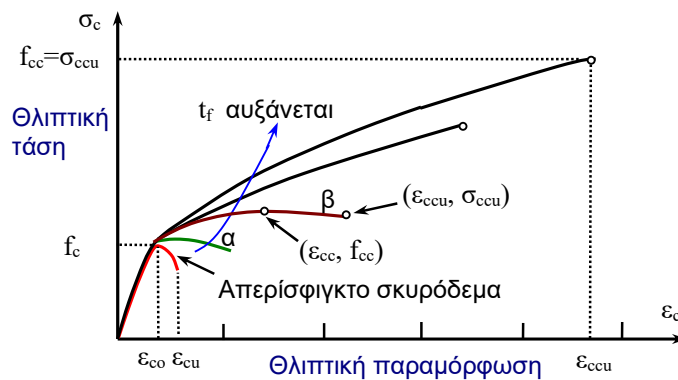
προκληθεί θραύση του μανδύα (Σχ. 6.3) που σηματοδοτεί και την αντοχή του στοιχείου (υπό την προϋπόθεση φυσικά ότι δεν θα προηγηθεί αποκόλληση των συνθέτων υλικών).



Σχ. 6.3 Θραύση μανδύα συνθέτων υλικών κατά τη διεύθυνση της περιμέτρου όταν η εφελκυστική τάση σ_f φθάσει την αντοχή του μανδύα f_{fde} .

Εδώ σημειώνεται και πάλι ότι η εφελκυστική αντοχή του μανδύα κατά την έννοια της περιμέτρου είναι γενικά μικρότερη από την εφελκυστική αντοχή των συνθέτων υλικών όπως αυτή μετράται μέσω δοκιμών εφελκυσμού. Αυτό οφείλεται στην πολυαξονικότητα της εντατικής κατάστασης στον μανδύα, σε τυχόν συγκεντρώσεις τάσεων κοντά σε γωνίες, στην ενδεχόμενη ύπαρξη αρκετών στρώσεων αλλά και στην ποιότητα εφαρμογής του μανδύα. Η διαφορά αυτή μπορεί να ληφθεί υπόψη μέσω ενός μειωτικού συντελεστή η_e , ο οποίος συνήθως λαμβάνει τιμές της τάξης του 0.6-0.9:

$$f_{fde} = \eta_e f_{fd} \tag{6.2}$$



Σχ. 6.4 Καμπύλες θλιπτικής τάσης – παραμόρφωσης για σκυρόδεμα περισφιγμένο με σύνθετα υλικά.

Η σχέση θλιπτικής τάσης – παραμόρφωσης για σκυρόδεμα περισφιγμένο με μανδύα συνθέτων υλικών δίνεται παραστατικά στο Σχ. 6.4.

Βάσει πειραματικών αποτελεσμάτων μπορεί να διατυπώσει κανείς τις εξής παρατηρήσεις:

- Γενικά η καμπύλη τάσης – παραμόρφωσης είναι περίπου διγραμμική, με αλλαγή κλίσης στην παραμόρφωση ($\varepsilon_{co} \approx 0.002$) που αντιστοιχεί στην αντοχή του απερίσφιγκτου σκυροδέματος (f_c).
- Μανδύες εξαιρετικά μικρού πάχους αυξάνουν μόνο την οριακή παραμόρφωση ε_{ccu} (καμπύλη α στο Σχ. 6.4).
- Για μανδύες σχετικά μικρού πάχους η αντοχή του περισφιγμένου σκυροδέματος f_{cc} αντιστοιχεί σε παραμόρφωση ε_{cc} μικρότερη από την οριακή (ε_{ccu}) (καμπύλη β στο Σχ. 6.4).
- Για δεδομένο τύπο συνθέτων υλικών, η αντοχή f_{cc} και η οριακή παραμόρφωση ε_{ccu} του περισφιγμένου σκυροδέματος αυξάνονται με το πάχος του μανδύα.
- Για μανδύες ίσου πάχους αλλά διαφορετικού τύπου ινών (π.χ. άνθρακας, γυαλί), η αντοχή f_{cc} αυξάνεται με την αντοχή του μανδύα f_{fde} (εδώ πλεονεκτούν οι ίνες άνθρακα), ενώ η οριακή παραμόρφωση του σκυροδέματος ε_{ccu} αυξάνεται με την αντοχή του μανδύα f_{fde} αλλά κυρίως με την οριακή παραμόρφωσή του, ε_{fue} (εδώ πλεονεκτούν οι ίνες γυαλιού).
- Για μανδύες ίσης δυστένειας (εκφράζεται από το γινόμενο $E_f t_f$), η αντοχή f_{cc} αυξάνεται με την οριακή παραμόρφωση του μανδύα ε_{fue} .

6.2.2 Αναλυτικό προσομοίωμα σχεδιασμού

Σε ό,τι αφορά στον σχεδιασμό μανδυών, αυτό που ενδιαφέρει κυρίως είναι ο υπολογισμός του απαιτούμενου πάχους t_f (για γνωστό τύπο συνθέτου υλικού) ώστε να επιτευχθεί η επιθυμητή θλιπτική αντοχή σχεδιασμού f_{ccd} και/ή η επιθυμητή οριακή παραμόρφωση ε_{ccu} . Για τον υπολογισμό των εν λόγω ποσοτήτων η διεθνής βιβλιογραφία έχει να προσφέρει πληθώρα αναλυτικών προσομοιωμάτων, ένα εκ των οποίων παρουσιάζεται ακολούθως για την περισφιγξη ορθογωνικών διατομών πλευρών b και d ($b \geq d$) με ακτίνα καμπυλότητας στις γωνίες R (*fib* 2001):

$$f_{ccd} = E_{sec,ud} \varepsilon_{ccu} \geq f_{cd} \quad (6.3)$$

$$\varepsilon_{ccu} = 0.002 \left[1 + 5(\alpha_{1d} \alpha_{2d} - 1) \right] \left[\frac{E_{sec,Md} (E_c - E_{sec,ud})}{E_{sec,ud} (E_c - E_{sec,Md})} \right]^{1 - \frac{E_{sec,Md}}{E_c}} \quad (6.4)$$

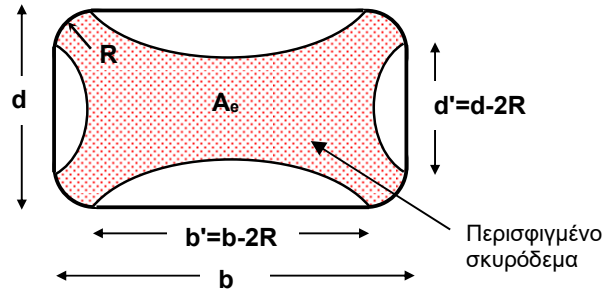
$$E_{\text{sec,ud}} = \frac{E_c}{1 + 2 \left(\frac{E_c}{f_{cd}} - \frac{1}{0.002} \right) \frac{f_{fde}}{E_f}} \quad (6.5)$$

$$E_{\text{sec,Md}} = \frac{\alpha_{1d} \alpha_{2d} f_{cd}}{0.002 [1 + 5(\alpha_{1d} \alpha_{2d} - 1)]} \quad (6.6)$$

$$\alpha_{1d} = 2.254 \sqrt{1 + 7.94 \frac{\sigma_{\ell\text{ud,b}}}{f_{cd}} - 2 \frac{\sigma_{\ell\text{ud,b}}}{f_{cd}} - 1.254} \quad (6.7)$$

$$\alpha_{2d} = 1 - \left[0.6 \left(\frac{d}{b} \right)^2 - 1.4 \frac{d}{b} + 0.8 \right] \sqrt{\frac{\sigma_{\ell\text{ud,b}}}{f_{cd}}} \quad (6.8)$$

$$\sigma_{\ell\text{ud,b}} = \alpha_f \frac{2t_f}{d} f_{fde} \quad (6.9)$$



Σχ. 6.5 Η περίσφιγξη σκυροδέματος (με σύνθετα υλικά) σε ορθογωνικές διατομές επιτυγχάνεται μέσω καμπύλωσης των γωνιών.

Στις παραπάνω σχέσεις E_c = αρχικό μέτρο ελαστικότητας του σκυροδέματος [$E_c = 1.05 \times 9500 \times (f_{ck} + 8)^{1/3}$] και α_f = **συντελεστής αποδοτικότητας** του μανδύα, που εξαρτάται: (α) από τη γεωμετρία της διατομής (λόγος πλευρών, ακτίνα καμπυλότητας στις γωνίες, Σχ. 6.5), (β) από το βαθμό περιτύλιξης (κάλυψης) του σκυροδέματος (Σχ. 6.6α) και (γ) από τη διεύθυνση των ινών σε σχέση με τον άξονα του περισφιγμένου μέλους (Σχ. 6.6β). Συγκεκριμένα, είναι:

$$\alpha_f = \alpha_n \times \alpha_s \times \alpha_a \leq 1 \quad (6.10)$$

Συντελεστής διατομής:
$$\alpha_n = \frac{A_e}{A_g} = 1 - \frac{b'^2 + d'^2}{3A_g \left(1 - \frac{A_s}{A_g} \right)} \approx 1 - \frac{(b - 2R)^2 + (d - 2R)^2}{3bd} \quad (6.11)$$

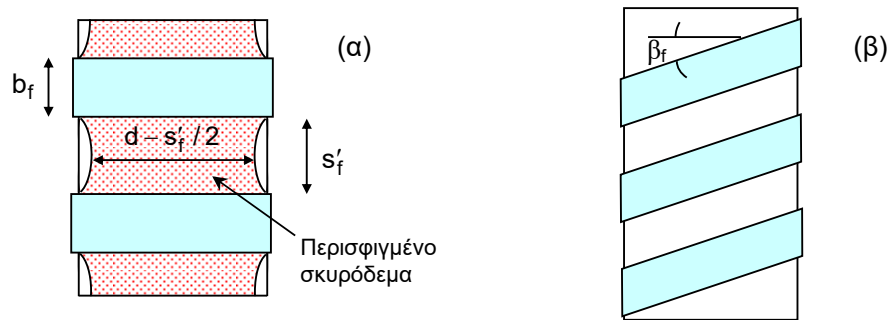
Συντελεστής κάλυψης:

$$\alpha_s = \frac{\left(1 - \frac{s'_f}{2d}\right)^2}{1 - \frac{A_s}{A_g}} \approx \left(1 - \frac{s'_f}{2d}\right)^2 \quad (6.12)$$

Συντελεστής διεύθυνσης:

$$\alpha_a = \frac{1}{1 + (\tan \beta_f)^2} \quad (6.13)$$

όπου A_g = εμβαδόν διατομής, A_s = εμβαδόν διατομής διαμήκους οπλισμού, s'_f = καθαρή απόσταση λωρίδων σε περίπτωση μερικής περιτύλιξης (Σχ. 6.6α), d = μήκος μικρότερης πλευράς (ή διάμετρος, στην περίπτωση κυκλικής διατομής), β_f = γωνία ινών ως προς την κάθετο στον άξονα του μέλους (Σχ. 6.6β). Για κυκλικές διατομές $\alpha_n=1$, για πλήρη κάλυψη του στοιχείου $\alpha_s=1$ και για οριζόντια διάταξη των ινών $\alpha_a=1$.



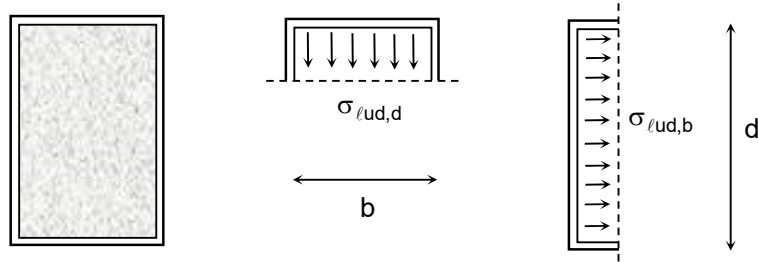
Σχ. 6.6 Περίσφιξη (α) με λωρίδες ανά αποστάσεις, (β) με τις ίνες υπό γωνία (σύνθετα υλικά σε ελικοειδή διάταξη).

Πλέον του παραπάνω σχετικά περίπλοκου στην εφαρμογή προσομοιώματος περίσφιξης, τα διαθέσιμα στην διεθνή βιβλιογραφία προσομοιώματα με απλούστερη μορφή είναι πάρα πολλά, συνήθως του τύπου:

$$\frac{f_{ccd}}{f_{cd}} = 1 + k_1 \left(\frac{\sigma_{\ell ud}}{f_{cd}} \right)^m \quad (6.14)$$

$$\varepsilon_{ccu} = \varepsilon_{cu} + k_2 \left(\frac{\sigma_{\ell ud}}{f_{cd}} \right)^n \quad (6.15)$$

Στις παραπάνω σχέσεις $\sigma_{\ell ud}$ είναι η μέση τάση περίσφιξης (κατά τη θραύση του μανδύα), προσεγγιστικά ίση με (Σχ. 6.7):



Σχ. 6.7 Προσεγγιστική κατανομή μέσων τάσεων περίσφιγξης σε κάθε πλευρά ορθογωνικής διατομής.

$$\begin{aligned}\sigma_{lud} &= \frac{\sigma_{lud,b} + \sigma_{lud,d}}{2} = \frac{1}{2} \left(\alpha_f \frac{2t_f}{d} f_{fde} + \alpha_f \frac{2t_f}{b} f_{fde} \right) \\ &= \frac{1}{2} \alpha_f (\rho_{f,b} + \rho_{f,d}) f_{fde} = \alpha_f \frac{(b+d)}{bd} t_f f_{fde}\end{aligned}\quad (6.16)$$

όπου $\sigma_{lud,b}$ και $\sigma_{lud,d}$ οι μέσες τάσεις περίσφιγξης παράλληλα στις πλευρές b και d , αντίστοιχα. Στην εξ. (6.16) $\rho_{f,b}$ και $\rho_{f,d}$ είναι τα γεωμετρικά ποσοστά συνθέτων υλικών ανά διεύθυνση: $\rho_{f,b} = 2t_f / d$ και $\rho_{f,d} = 2t_f / b$.

Στις ευρέως αποδεκτές (στη διεθνή βιβλιογραφία) τιμές για τις εμπειρικές σταθερές των εξ. (6.14) – (6.15) περιλαμβάνονται οι εξής: $k_1 = 2.15$, $m = 1$, $k_2 = 0.02$ ή 0.04 για υλικά ινών άνθρακα ή γυαλιού, αντίστοιχα, και $n = 1$. Εναλλακτικά, $k_1 = 2.6$, $m = 2/3$, $k_2 = 0.015$ (ανεξαρτήτως του τύπου ινών) και $n = 0.5$. Σημειώνεται ότι η οριακή παραμόρφωση του απερίσφιγκτου σκυροδέματος λαμβάνεται ίση με $\varepsilon_{cu} = 0.0035$.

Αν οι υπολογισμοί απαιτούν, πλέον της αντοχής και οριακής παραμόρφωσης, τον πλήρη **κατασταστικό νόμο** για σκυρόδεμα περισφιγμένο μέσω συνθέτων υλικών (π.χ. για την ανάλυση διατομής υποστυλώματος για συνδυασμό κάμψης και αξονικού φορτίου), τότε μπορεί να γίνει χρήση του παρακάτω απλού προσομοιώματος των Lam and Teng (2003), το οποίο περιγράφεται και στο Σχ. 6.8:

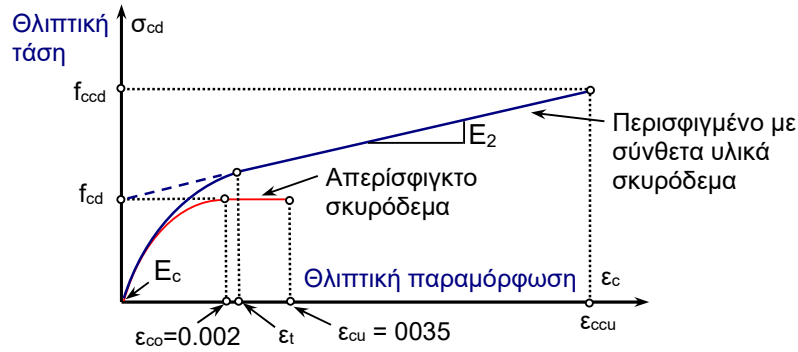
$$\sigma_{cd} = E_c \varepsilon_c - \frac{(E_c - E_2)^2}{4f_{cd}} \varepsilon_c^2 \quad \text{για } 0 \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_t \quad (6.17\alpha)$$

$$\sigma_{cd} = f_{cd} + E_2 \varepsilon_c \quad \text{για } \varepsilon_t \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{ccu} \quad (6.17\beta)$$

όπου

$$\varepsilon_t = \frac{2f_{cd}}{(E_c - E_2)} \quad (6.18)$$

$$E_2 = \frac{f_{ccd} - f_{cd}}{\varepsilon_{ccu}} \quad (6.19)$$



Σχ. 6.8 Καμπύλες τάσης – παραμόρφωσης για απερίσφιγκτο και περισφιγμένο μέσω συνθέτων υλικών σκυρόδεμα.

Τέλος, μπορεί να χρησιμοποιηθεί και το απλούστερο, αλλά κάπως μειωμένης ακρίβειας, για την περίπτωση περίσφιγξης σκυροδέματος μέσω συνθέτων υλικών, προσομοίωμα περίσφιγξης του Ευρωκωδίκων 2 και 8.


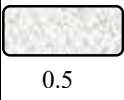
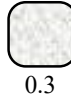
Παράδειγμα 6.1

Θεωρούμε ορθογωνική διατομή σκυροδέματος αντοχής $f_{cd} = 20 \text{ N/mm}^2$ και μέτρου ελαστικότητας $E_c = 33.5 \text{ kN/mm}^2$. Έστω ότι διαθέτουμε δύο διαφορετικούς τύπους υλικών, προκειμένου να τα χρησιμοποιήσουμε για την κατασκευή μανδύα με στόχο την αύξηση της θλιπτικής αντοχής σε $f_{ccd} = 35 \text{ N/mm}^2$ και της οριακής παραμόρφωσης σε $\varepsilon_{ccu} = 0.025$: (α) Σύνθετα υλικά ινών άνθρακα με μέτρο ελαστικότητας $E_f = 230 \text{ kN/mm}^2$, εφελκυστική αντοχή $f_{fd} = 2895 \text{ N/mm}^2$, πάχος υφάσματος 0.12 mm . (β) Υφάσματα ινών γυαλιού με $E_f = 70 \text{ kN/mm}^2$, $f_{fd} = 1565 \text{ N/mm}^2$, πάχος υφάσματος 0.17 mm . Τέλος θεωρούμε ότι η εφελκυστική αντοχή του μανδύα είναι κατά 15% μειωμένη σε σχέση με τις αντίστοιχες ιδιότητες ευθύγραμμων δοκιμίων (δηλαδή $\eta_e = 0.85$).

Για τα σύνθετα υλικά ινών άνθρακα είναι $f_{fde} = \eta_e f_{fd} = 0.85 \times 2895 = 2460 \text{ N/mm}^2$ ενώ για τα σύνθετα υλικά ινών γυαλιού $f_{fde} = 0.85 \times 1565 = 1330 \text{ N/mm}^2$. Τα αποτελέσματα για το απαιτούμενο πάχος υφάσματος και τον αντίστοιχο αριθμό στρώσεων βάσει του προσομοιώματος της *fib* (2001), εξ. (6.3) – (6.9), δίνονται στον Πίνακα 6.1, για τρεις διαφορετικές περιπτώσεις διατομών.

Τα αποτελέσματα του Πίνακα 6.1 δείχνουν ότι για τις τιμές ιδιοτήτων υλικών που επελέγησαν: (α) Υλικά με ίνες άνθρακα υπερέχουν έναντι αυτών με ίνες γυαλιού όταν στόχος της περίσφιγξης είναι η αύξηση της αντοχής (στα παραπάνω παραδείγματα χρειαζόμαστε περίπου διπλάσιο πάχος υλικού με ίνες γυαλιού για την ίδια θλιπτική αντοχή σκυροδέματος). (β) Υλικά με ίνες γυαλιού υπερέχουν έναντι αυτών με ίνες άνθρακα όταν στόχος της περίσφιγξης είναι η αύξηση της παραμορφωσιμότητας (στα παραπάνω παραδείγματα χρειαζόμαστε κάτι παραπάνω από διπλάσιο πάχος υλικού με ίνες άνθρακα για την ίδια παραμορφωσιμότητα).

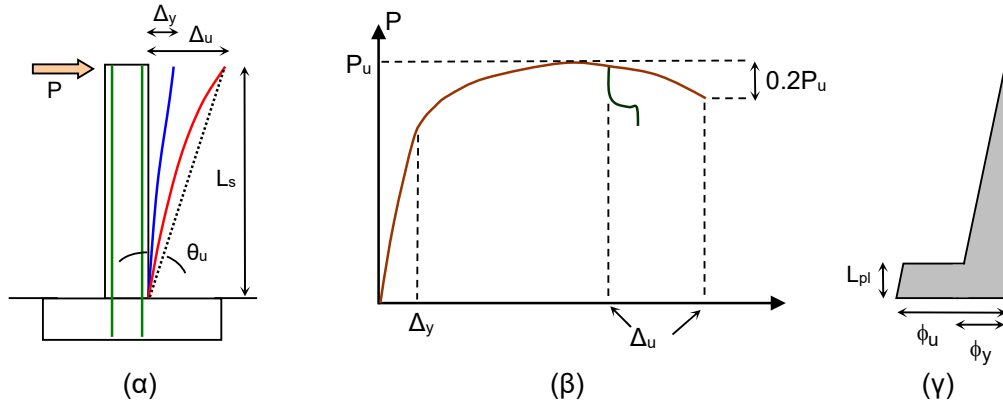
Πίνακας 6.1 Απαιτούμενο πάχος υφάσματος για διάφορους τύπους διατομών.

Διατομή (b, d σε m)	R (cm)	A _g (cm ²)	α _f (αποδοτικότητα)	Απαιτούμενο πάχος υφάσματος t _f (mm) [και σε () ο αντίστοιχος αριθμός στρώσεων]			
				Ίνες άνθρακα		Ίνες γυαλιού	
				για f _{ccd} = 35 N/mm ²	για ε _{ccu} = 0.025	για f _{ccd} = 35 N/mm ²	για ε _{ccu} = 0.025
 d=0.3 b=0.3	2	896.5	0.50	0.39 (4)	0.31 (3)	0.82 (7)	0.12 (1)
 0.25 0.5	2	1246.5	0.32	0.74 (7)	0.56 (5)	1.56 (13)	0.22 (2)
 0.3 0.3	4	886.2	0.64	0.31 (3)	0.24 (2)	0.64 (6)	0.10 (1)

6.3 Γωνία στροφής χορδής και πλαστιμότητα

Συχνά ένας από τους βασικούς στόχους αντισεισμικών ενισχύσεων σε υφιστάμενα δομικά στοιχεία είναι η αύξηση της γωνίας στροφής χορδής στην αστοχία θ_u (Σχ. 6.9α), κάτι που (περίπου) ισοδυναμεί με την αύξηση της πλαστιμότητας. Η τελευταία μπορεί να ποσοτικοποιηθεί μέσω του δείκτη πλαστιμότητας της γωνίας στροφής χορδής του μέλους, $\mu_\theta = \theta_u / \theta_y$, ή μέσω του δείκτη πλαστιμότητας καμπυλοτήτων, $\mu_\phi = \phi_u / \phi_y$, όπου: θ_y = γωνία στροφής χορδής στην διαρροή, ϕ_u = καμπυλότητα διατομής στην αστοχία και ϕ_y = καμπυλότητα διατομής στην διαρροή. Αξίζει να επισημανθεί ότι ουσιαστικά ο δείκτης μ_θ ισούται με τον δείκτη πλαστιμότητας σχετικής μετακίνησης των άκρων του μέλους, $\mu_\Delta = \Delta_u / \Delta_y$, όπου Δ_u και Δ_y η σχετική μετακίνηση των άκρων του μέλους στην αστοχία και στη διαρροή, αντίστοιχα (Σχ. 6.9). Σημειώνεται ότι η αστοχία

ορίζεται στο σημείο της καμπύλης εντατικού μεγέθους (π.χ. δύναμη) – παραμόρφωσης (π.χ. μετακίνηση) όπου το εντατικό μέγεθος είτε εμφανίζει εμφανή πτώση είτε έχει μειωθεί κατά 20% έναντι της μέγιστης τιμής του (Σχ. 6.9β).



Σχ. 6.9 (α) Φόρτιση στοιχείου. (β) Διάγραμμα δύναμης – μετατόπισης. (γ) Διάγραμμα καμπυλοτήτων.

Για τον υπολογισμό της θ_u μπορεί να χρησιμοποιηθεί η απλή σχέση:

$$\theta_u = \theta_y + (\phi_u - \phi_y) L_{pl} \left(1 - 0.5 \frac{L_{pl}}{L_s} \right) \quad (6.20)$$

όπου L_s = μήκος διάτμησης (απόσταση από τη βάση του υποστυλώματος μέχρι το σημείο μηδενισμού ροπών, ίση με το λόγο ροπής προς τέμνουσα στην ακραία διατομή) και L_{pl} = μήκος πλαστικής άρθρωσης. Η θ_y , η οποία δεν επηρεάζεται από την ύπαρξη συνθέτων υλικών, είναι:

Για υποστυλώματα ή δοκούς:

$$\theta_y = \phi_y \frac{L_s + a_v Z}{3} + 0.0013 \left(1 + 1.5 \frac{h}{L_s} \right) + 0.13 \phi_y \frac{f_y}{\sqrt{f_c}} d_b \quad (6.21)$$

Για τοιχώματα:

$$\theta_y = \phi_y \frac{L_s + a_v Z}{3} + 0.002 \left(1 - 1.125 \frac{L_s}{h} \right) + 0.13 \phi_y \frac{f_y}{\sqrt{f_c}} d_b \quad (6.22)$$

όπου d_b = μέση διάμετρος ράβδων των εφελκόμενων διαμήκων ράβδων, h = ύψος της διατομής, f_y = τάση διαρροής διαμήκους οπλισμού (N/mm^2) και f_c = θλιπτική αντοχή σκυροδέματος (N/mm^2). Οι παραπάνω τιμές για τα υλικά είναι οι μέσες τιμές, όπως αυτές

προκύπτουν από επιτόπου αποτίμηση, διαιρεμένες (σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 8) με τον συντελεστή αξιοπιστίας (1.0, 1.2, 1.35). Ο όρος $a_v z$ είναι το μήκος μετάθεσης a_ℓ για διατμητική ρηγμάτωση κατά 45° και εκφράζει την επιρροή της επέκτασης των δυνάμεων του εφελκυσμένου πέλματος κατά a_ℓ στις καμπτικές παραμορφώσεις του μέλους. Ο συντελεστής a_v που πολλαπλασιάζει τον μοχλοβραχίονα εσωτερικών δυνάμεων στην ακραία διατομή, z , στον 1^ο όρο και λαμβάνει την τιμή 0 αν η τέμνουσα στην καμπτική διαρροή, $V_{My} = M_y / L_s$, είναι μικρότερη της τέμνουσας που προκαλεί ρηγμάτωση, V_{cr} . Σε αντίθετη περίπτωση $a_v = 1$. Σημειώνεται ότι η τιμή της V_{cr} μπορεί να ληφθεί ίση με την τέμνουσα αντοχής χωρίς σπλισμό διάτμησης, $V_{R,c}$, όπως αυτή υπολογίζεται κατά τον Ευρωκώδικα 2 με επιμέρους συντελεστή $\gamma_c = 1$.

Το μήκος L_{pl} μπορεί να εκτιμηθεί από τη σχέση:

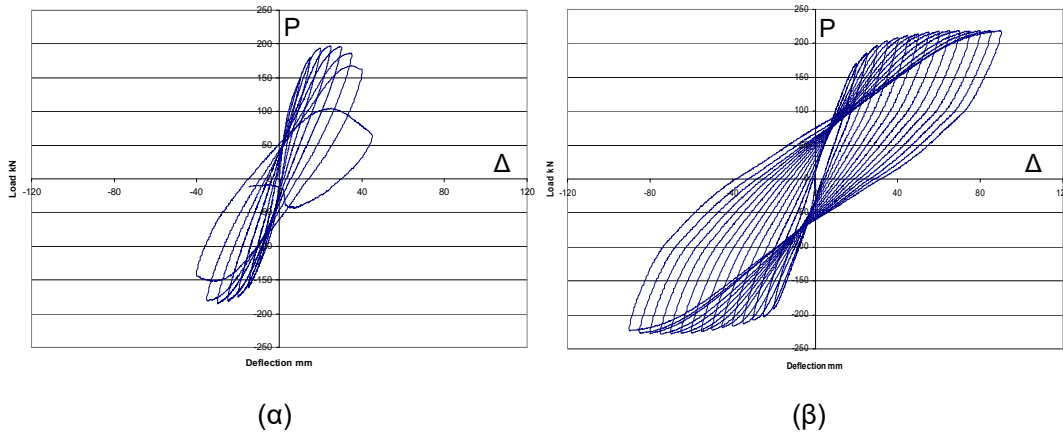
$$L_{pl} = 0.1L_s + 0.17h + \frac{0.24f_y}{\sqrt{f_c}} d_b \quad (6.23)$$

στην οποία f_y και f_c είναι σε N/mm^2 . Οι καμπυλότητες ϕ_y και ϕ_u υπολογίζονται βάσει ανάλυσης της διατομής στη διαρροή και στην αστοχία. Για την ϕ_u ισχύει $\phi_u = \varepsilon_{ccu} / x_u$, όπου x_u = ύψος θλιβόμενης ζώνης στην αστοχία και ε_{ccu} = οριακή παραμόρφωση βάσει του προσομοιώματος περίσφιγξης (αυτός είναι ο όρος στον οποίο υπεισέρχονται τα χαρακτηριστικά του μανδύα!).

Η γωνία στροφής χορδής θ_u (ή η ϕ_u) μπορεί να αυξηθεί μέσω της κατασκευής μανδύα συνθέτων υλικών στις κρίσιμες περιοχές (Σχ. 6.10), εκεί δηλαδή όπου ενδέχεται να αναπτυχθούν σημαντικές παραμορφώσεις στον χάλυβα και στο σκυρόδεμα. Η περίσφιγξη του σκυροδέματος στις περιοχές αυτές αυξάνει τη μέγιστη παραμόρφωσή του (πλέον του ότι ενδέχεται να παρεμποδίσει τον λυγισμό ράβδων και/ή την απώλεια συνάφειας σε περιοχές με ματίσεις) και άρα την πλαστιμότητα (Σχ. 6.11).



Σχ. 6.10 Ενίσχυση κρίσιμων περιοχών με στόχο την αύξηση της πλαστιμότητας.



Σχ. 6.11 Καμπύλες δύναμης – μετατόπισης για υποστύλωμα οπλισμένου σκυροδέματος (διατομής 0.25x0.50 m) σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση. (α) Στοιχείο χωρίς ενίσχυση. (β) Στοιχείο με μανδύα συνθέτων υλικών (δύο στρώσεις υφάσματος με ίνες άνθρακα, πάχος στρώσης 0.12 mm) στην κρίσιμη περιοχή (ύψος μανδύα 0.6 m).

Ο σχεδιασμός μανδύα συνθέτων υλικών για την επίτευξη δεδομένης γωνίας στροφής χορδής στην αστοχία (η γωνία αυτή υπεισέρχεται στα κριτήρια ελέγχου των σταθμών επιτελεστικότητας !) προϋποθέτει τη συσχέτιση του θ_u με τα χαρακτηριστικά του μανδύα. Τούτο μπορεί να γίνει βάσει των παρακάτω βημάτων:

- Υπολογισμός του μήκους πλαστικής άρθρωσης L_{pl} από την εξ. (6.23).
- Υπολογισμός της καμπυλότητας στη διαρροή ϕ_y , βάσει ανάλυσης διατομής.
- Υπολογισμός της γωνίας στροφής χορδής στη διαρροή από την εξ. (6.21) ή (6.22).
- Επίλυση της εξ. (6.20) για τα απαιτούμενα χαρακτηριστικά του μανδύα.

Μία εναλλακτική προσέγγιση για την συσχέτιση των χαρακτηριστικών του μανδύα συνθέτων υλικών στις κρίσιμες περιοχές με την γωνία στροφής χορδής (μέση τιμή) κατά την καμπτική αστοχία ενός μέλους τύπου *δοκού ή υποστυλώματος* υπό ανακυκλιζόμενη ένταση, το οποίο έχει κατασκευασθεί με τις πριν του 1985 αντιλήψεις για αντισεισμικότητα, έγκειται στην χρήση της παρακάτω εμπειρικής σχέσης (Ευρωκώδικας 8 και ΚΑΝΕΠΕ):

$$\theta_{um} = 0.016(0.3^v) \left[\frac{\max(0.01, \omega')}{\max(0.01, \omega)} f_c \right]^{0.225} \left(\frac{L_s}{h} \right)^{0.35} 25^{\left(\alpha \rho_{sx} \frac{f_{yw}}{f_c} + \alpha_f \rho_{fx} \frac{f_{fe}}{f_c} \right)} (1.25^{100 \rho_d}) \quad (6.24)$$

όπου:

ω = μηχανικό ποσοστό εφελκόμενου οπλισμού (περιλαμβάνει και τυχόν διαμήκη οπλισμό κορμού μεταξύ εφελκόμενου και θλιβόμενου πέλματος),

ω' = μηχανικό ποσοστό θλιβόμενου οπλισμού,

$v = N/bhf_c =$ ανηγμένη στη διατομή αξονική δύναμη ($b =$ πλάτος θλιβόμενης ζώνης, $h =$ πλευρά διατομής παράλληλα στη διεύθυνση φόρτισης),

$\rho_{sx} = A_{sw}/b_w s_h =$ γεωμετρικό ποσοστό εγκάρσιου οπλισμού συνδετήρων παράλληλα στη διεύθυνση φόρτισης x ,

$\rho_{fx} =$ γεωμετρικό ποσοστό συνθέτων υλικών παράλληλα στη διεύθυνση φόρτισης x ,

$s_h =$ απόσταση συνδετήρων,

$f_{yw} =$ τάση διαρροής συνδετήρων,

$f_{fe} =$ ενεργή αντοχή μανδύα συνθέτων υλικών,

$\rho_d =$ γεωμετρικό ποσοστό τυχόν δισδιαγώνιου οπλισμού,

$\alpha_f =$ συντελεστής αποδοτικότητας της περίσφιγξης με σύνθετα υλικά, και

$\alpha =$ συντελεστής αποδοτικότητας της περίσφιγξης με συνδετήρες, ίσος με

$$\alpha = \left(1 - \frac{s_h}{2b_o}\right) \left(1 - \frac{s_h}{2h_o}\right) \left(1 - \frac{\sum b_i^2}{6b_o h_o}\right) \quad (6.25)$$

Στην παραπάνω εξ. (6.25) b_o και h_o είναι οι διαστάσεις του περισφιγμένου πυρήνα (μέχρι τον άξονα του συνδετήρα) και b_i είναι οι αποστάσεις μεταξύ διαμήκων ράβδων που συγκρατούνται από συνδετήρα στην περίμετρο της διατομής. Πάντως τονίζεται ότι αν οι συνδετήρες δεν κλείνουν με άγκιστρο προς το εσωτερικό του σκυροδέματος ($\geq 135^\circ$ στις γωνίες, $\geq 90^\circ$ στο ενδιάμεσο των πλευρών), συνιστάται να αμελείται η περίσφιγξη λόγω συνδετήρων ($\alpha = 0$).

Η αντίστοιχη της εξ. (6.24) για την μέση τιμή του πλαστικού τμήματος της γωνίας στροφής χορδής στην αστοχία ($\theta_u^{pl} = \theta_u - \theta_y$) είναι:

$$\theta_{um}^{pl} = 0.0145(0.25^v) \left[\frac{\max(0.01, \omega')}{\max(0.01, \omega)} \right]^{0.3} (f_c)^{0.2} \left(\frac{L_s}{h} \right)^{0.35} 25^{\left(\alpha \rho_{sx} \frac{f_{yw}}{f_c} + \alpha_f \rho_{fx} \frac{f_{fe}}{f_c} \right)} (1.275^{100\rho_d}) \quad (6.26)$$

Για *τοιχώματα* σύμφωνα με τις πριν το 1985 αντιλήψεις για αντισεισμικότητα, το δεξιά μέλος των εξ. (6.24) και (6.26) πρέπει να πολλαπλασιασθεί επί 0.625 και 0.6, αντίστοιχα (οι συντελεστές 0.016 και 0.0145 γίνονται 0.01 και 0.0087).

Παρατηρώντας τις εξ. (6.24) και (6.26) διαπιστώνουμε ότι η συμβολή των συνθέτων υλικών έγκειται στο δεξιά μέλος του εκθέτη του 25. Στον Ευρωκώδικα 8 προτείνεται ο υπολογισμός της ενεργής αντοχής του μανδύα συνθέτων υλικών από την εξής εμπειρική σχέση:

$$f_{fe} = \min(f_f, \varepsilon_{fu} E_f) \left[1 - 0.7 \min(f_f, \varepsilon_{fu} E_f) \frac{\rho_{fx}}{f_c} \right] \quad (6.27)$$

όπου f_f , ε_{fu} και E_f η εφελκυστική αντοχή, η οριακή παραμόρφωση και το μέτρο ελαστικότητας του συνθέτου υλικού, αντίστοιχα. Η συνιστώμενη τιμή του ε_{fu} είναι 0.015 για σύνθετα υλικά με ίνες άνθρακα ή αραμιδίου (πάντως η τιμή αυτή είναι μικρή για τις ίνες αραμιδίου) και 0.020 για ίνες γυαλιού.

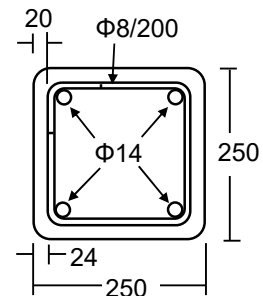
Μία άλλη εναλλακτική προσέγγιση βασίζεται στη χρήση της παρακάτω απλής αλλά εξαιρετικά συντηρητικής σχέσης των Tastani and Pantazopoulou (2002), η οποία δίνει:

$$\mu_{\Delta} = \mu_{\theta} = 1.3 + 12.4 \left(\frac{\sigma_{fu}}{f_c} - 0.1 \right) \geq 1.3 \quad (6.28)$$

Στην εξ. (6.28) σ_{fu} είναι η τάση περίσφιγξης στο σκυρόδεμα κατά την οριακή κατάσταση αστοχίας, η οποία (αγνοώντας, επί το συντηρητικότερον, την περίσφιγξη μέσω υφισταμένων συνδετήρων) μπορεί να λαμβάνεται από την εξ. (6.9). Εδώ σημειώνεται ότι για τη χρήση της εξ. (6.9) σε ορθογωνικά υποστυλώματα ως d θα πρέπει να ληφθεί η πλευρά του υποστυλώματος που είναι κάθετη στη διεύθυνση εφαρμογής της οριζόντιας δύναμης. Η εφαρμογή της τελευταίας σχέσης γίνεται κατανοητή μέσω του παραδείγματος που ακολουθεί.

Παράδειγμα 6.2

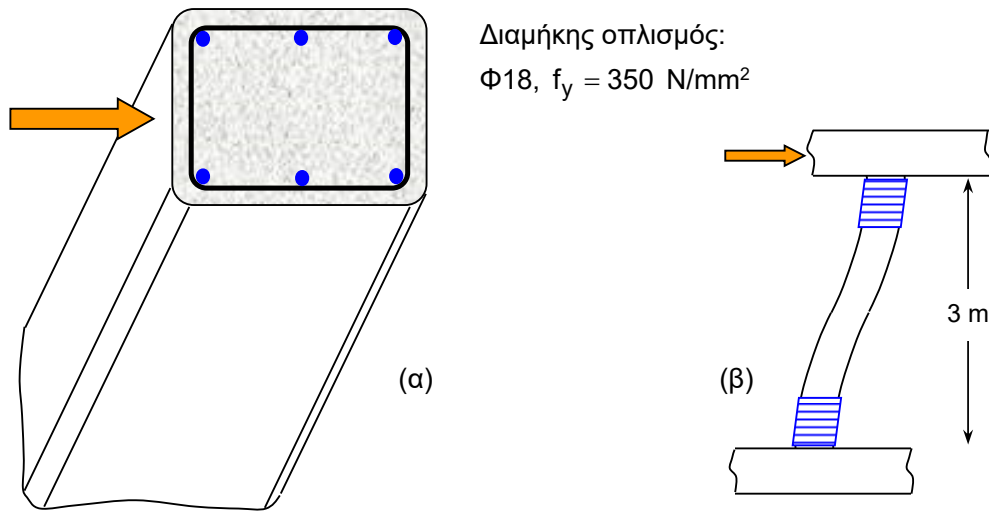
Θεωρούμε αμφίπακτο υποστυλώμα ορθογωνικής διατομής όπως στο Σχ. 6.12. Το υποστυλώμα έχει ύψος 3.2 m και θεωρείται ότι καταπονείται σε επιβαλλόμενη μετατόπιση στο ένα άκρο και αξονική δύναμη $N = 300$ kN. Ιδιότητες υλικών: $f_c = 28$ N/mm², οπλισμός με νευρώσεις $f_y = 450$ N/mm², $f_{yw} = 460$ N/mm². Στα άκρα του υποστυλώματος κατασκευάζεται μανδύας συνθέτων υλικών με $E_f = 225$ kN/mm² και εφελκυστική αντοχή $f_f = 3500$ N/mm². Το χρησιμοποιούμενο ύφασμα ινών άνθρακα έχει ονομαστικό πάχος 0.12 mm και εφαρμόζεται σε δύο στρώσεις. Να υπολογισθεί η μέση τιμή της γωνίας στροφής χορδής στην αστοχία [εξ. (6.24)].



Σχ. 6.12

Βάσει των παραπάνω δεδομένων είναι $\rho_{fx} = 0.00192$, οπότε από την εξ. (6.27) είναι $f_{fe} = 2828$ N/mm². Για $b_o = h_o = 202$ mm, $b_i = 180$ mm και $s_h = 200$ mm είναι $\alpha = 0.12$. Επίσης είναι $\alpha_f = 0.57$, $\rho_{sx} = 0.002$, $\omega = \omega' = 0.092$, $\nu = 0.17$, $L_s = 1600$ mm και $h = 250$ mm, οπότε από την εξ. (6.24) προκύπτει $\theta_{um} = 4.3\%$.

Παράδειγμα 6.3



Διαμήκης οπλισμός:
 $\Phi 18, f_y = 350 \text{ N/mm}^2$

Σχ. 6.13 (α) Φόρτιση υποστυλώματος και (β) διάταξη ενίσχυσης με στόχο την αύξηση της πλαστιμότητας μετατοπίσεων.

Θεωρούμε υποστύλωμα ορθογωνικής διατομής $0.30 \times 0.40 \text{ m}$, για το οποίο η σεισμική φόρτιση (οριζόντια δύναμη - επιβαλλόμενη μετατόπιση) δρα παράλληλα στη μεγάλη πλευρά (Σχ. 6.13). Υποθέτουμε ότι οι γωνίες του υποστυλώματος έχουν στρογγυλευθεί ώστε να είναι $R = 25 \text{ mm}$. Το σκυρόδεμα έχει αντοχή 11 N/mm^2 . Έστω ότι διαθέτουμε ύφασμα ινών άνθρακα με μέτρο ελαστικότητας 230 kN/mm^2 , εφελκυστική αντοχή 3500 N/mm^2 και πάχος 0.12 mm , προκειμένου να το χρησιμοποιήσουμε για την κατασκευή μανδύα στις κρίσιμες περιοχές με στόχο την επίτευξη δείκτη πλαστιμότητας μετατοπίσεων (ή γωνιών στροφής χορδής) $\mu_{\Delta} (= \mu_{\theta}) = 4$. Τέλος θεωρούμε ότι η εφελκυστική αντοχή του μανδύα είναι κατά 10% μειωμένη σε σχέση με τις αντίστοιχες ιδιότητες ευθύγραμμων δοκιμών (δηλαδή $\eta_e = 0.90$). Ζητούμενο του προβλήματος είναι ο προσεγγιστικός (και συντηρητικός !) υπολογισμός του απαιτούμενου αριθμού στρώσεων βάσει της εξ. (6.28).

Εφελκυστική αντοχή μανδύα $= 0.90 \times 3500 = 3150 \text{ N/mm}^2$.

Εύρεση συντελεστή αποδοτικότητας από την εξ. (6.11): $A_g = 1195 \text{ cm}^2$, $A_s = 15.25 \text{ cm}^2$.

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

Από την εξ. (6.28) έχουμε:

$$4 = 1.3 + 12.4 \left(\frac{0.48 \times \frac{2t_f}{300} \times 3150}{11} - 0.1 \right) \quad \text{άρα} \quad t_f = 0.35 \text{ mm}$$

Δηλαδή απαιτούνται $0.35/0.12 = 2.9 \rightarrow 3$ στρώσεις (επανάληψη των υπολογισμών με $t_f = 3 \times 0.12 \text{ mm}$ δίνει $\mu_\theta = 4.15$).

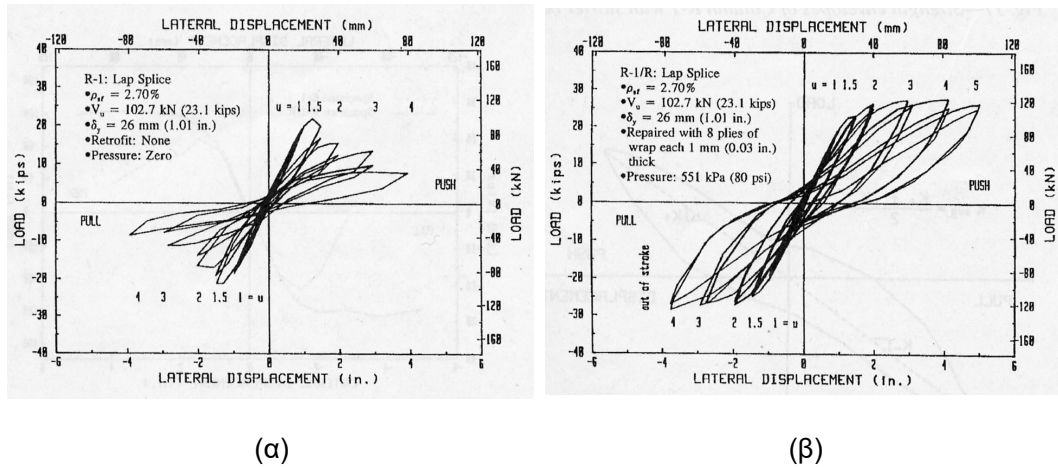
6.4 Ένωση ράβδων με παράθεση άκρων (ματίσεις)

Τα προαναφερθέντα στην παραπάνω ενότητα αφορούν στην διαστασιολόγηση μανδύων συνθέτων υλικών σε περιοχές χωρίς ένωση ράβδων με παράθεση (ματίσεις). Όμως σε υφιστάμενες κατασκευές πολλά προβλήματα πτωχής αντισεισμικής συμπεριφοράς άπτονται του μηχανισμού συνάφειας μεταξύ ράβδων οπλισμού και σκυροδέματος σε περιοχές ματίσεων των διαμήκων οπλισμών (π.χ. ακριβώς πάνω από την βάση του κάθε ορόφου, όπου σύμφωνα με τις σύγχρονες αντιλήψεις αντισεισμικού σχεδιασμού προβλέπεται η πραγματοποίηση πλαστικών αρθρώσεων, χωρίς όμως την πρόβλεψη περίσφιγξης μέσω εγκάρσιου οπλισμού). Συνηθισμένα αίτια αστοχιών σε περιοχές ματίσεων είναι το μικρό μήκος μάτισης και/ή η χρήση λείων ράβδων χωρίς επαρκή άγκιστρα (σπανιότερα), οπότε η αντοχή σε συνάφεια εξαρτάται κυρίως από τον μηχανισμό τριβής στο διάστημα που αναπτύσσεται η αγκύρωση.

Θα πρέπει πάντως να επισημάνουμε ότι σε περιπτώσεις ματίσεων λείων ράβδων με άγκιστρα 180° η ολίσθηση των οπλισμών λόγω απώλειας συνάφειας κατά κανόνα αποτρέπεται, οπότε τα στοιχεία που δόθηκαν στην προηγούμενη ενότητα για την διαστασιολόγηση μανδύων ισχύουν χωρίς καμία τροποποίηση. Τα παρακάτω αφορούν σε ματίσεις ευθύγραμμων άκρων ράβδων με νευρώσεις.

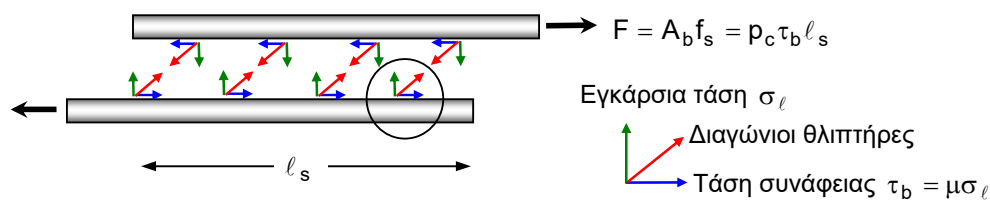
6.4.1 Συμπεριφορά και αναλυτικό προσομοίωμα

Η ευνοϊκή δράση της περίσφιγξης που παρέχουν οι μανδύες συνθέτων υλικών σε περιοχές ματίσεων έχει καταδειχθεί σε αρκετές ερευνητικές εργασίες (π.χ. Ma and Xiao 1997, Saadatmanesh et al. 1997, Seible et al. 1997, Restrepo et al. 1998, Osada et al. 1999, Chang et al. 2001, Haroun et al. 2001). Ενδεικτικά πειραματικά αποτελέσματα δίνονται στο Σχ. 6.14.

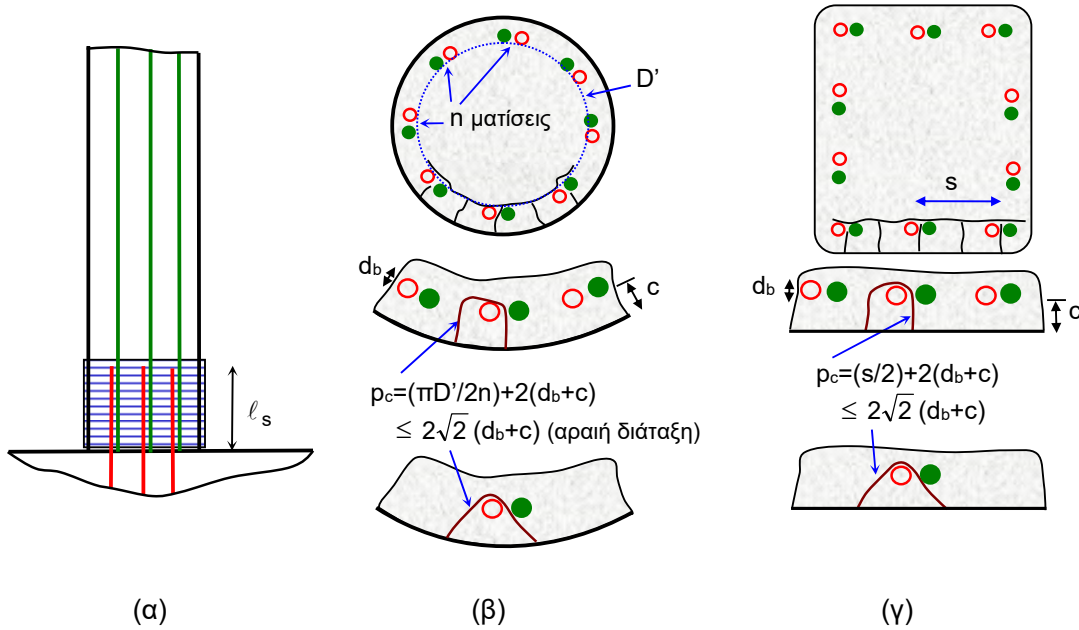


Σχ. 6.14 Συμπεριφορά (α) μη ενισχυμένου και (β) ενισχυμένου στην περιοχή μάτισης υποστυλώματος ορθογωνικής διατομής υπό οριζόντια ανακυκλιζόμενη φόρτιση (Saadatmanesh et al. 1997).

Η δύναμη F που μπορεί να αναπτυχθεί σε ράβδο οπλισμού εμβαδού A_b στην περιοχή μάτισης μήκους ℓ_s εξισορροπείται από την διατμητική τάση συνάφειας τ_b που αναπτύσσεται στην περιφέρεια της ράβδου. Η τάση αυτή λαμβάνεται από θεώρηση προσομοιώματος τριβής, είναι δηλαδή ανάλογη με την εγκάρσια τάση σ_ℓ μέσω συντελεστή μ (Σχ. 6.15), ο οποίος κυμαίνεται από 0.5 – 2 και βαίνει μειούμενος με την ανακύκλιση επιβαλλόμενων ολισθήσεων. Απουσία εγκάρσιου οπλισμού στο μήκος μάτισης, η εγκάρσια τάση αναλαμβάνεται μόνον από την εφελκυστική αντοχή της επικάλυψης (πάχους c) του οπλισμού, αναπτύσσοντας ρωγμή διαδρομής ρ_c (Σχ. 6.16β,γ). Η δύναμη F που μπορεί να αναπτυχθεί σε αυτή την περίπτωση είναι ίση με $\rho_c (\mu f_{ctm}) \ell_s$.



Σχ. 6.15 Εντατική κατάσταση στην περιοχή μάτισης (μηχανισμός τριβής).



Σχ. 6.16 (α) Περίσφιγξη υποστυλώματος σε περιοχή μάτισης. (β) Ανάπτυξη ρωγμών στην εφελκυστική περιοχή κυκλικού υποστυλώματος λόγω αστοχίας συνάφειας και ορισμός της κρίσιμης διαδρομής ρηγμάτωσης. (γ) Ομοίως για ορθογωνικά υποστυλώματα.

Για τον σχεδιασμό μανδύα συνθέτων υλικών σε περιοχές μάτισεων αρκεί να εξασφαλισθεί ότι η διαρροή του διαμήκους οπλισμού θα αναπτυχθεί πριν από την απώλεια συνάφειας, δηλαδή ότι:

$$A_b f_y = \rho_c \mu \sigma_\ell \ell_s \tag{6.29}$$

όπου σ_ℓ η τάση περίσφιγξης που παρέχει ο μανδύας των συνθέτων υλικών (αγνοώντας, επί το συντηρητικότερον, τη συνεισφορά συνδετήρων) κατά την οριακή κατάσταση αστοχίας ($\sigma_\ell = \sigma_{\ell u}$). Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, για υποστυλώματα ορθογωνικής διατομής, η τάση αυτή μπορεί, προσεγγιστικά, να ληφθεί ίση με τη μέση τιμή των τάσεων περίσφιγξης στις διευθύνσεις των δύο πλευρών, βλ. εξ. (6.16).

Συνδυάζοντας τις εξ. (6.29) και (6.16), θεωρώντας ότι η απαίτηση για μανδύα αυξάνεται γραμμικά όσο μειώνεται ο λόγος του διατιθέμενου μήκους μάτισης ℓ_s προς το απαιτούμενο μήκος $\ell_{s,min}$ για αποφυγή αστοχίας μάτισης απουσία μανδύα και εισάγοντας τον συντελεστή ασφάλειας για την αβεβαιότητα του προσομοιώματος, καταλήγουμε στην παρακάτω σχέση για το απαιτούμενο πάχος μανδύα ώστε να αποφεύγεται η απώλεια συνάφειας σε περιοχές μάτισεων:

$$t_f = \gamma_{Rd} \frac{bd \left(1 - \frac{\ell_s}{\ell_{s,min}} \right) A_b f_y}{\alpha_f (b+d) \rho_c \mu f_{fe} \ell_s} \tag{6.30}$$

Στην παραπάνω σχέση A_b είναι το εμβαδόν διατομής μίας ματιζόμενης εφελκόμενης ράβδου οπλισμού (με διάμετρο d_b) και ρ_c είναι η διαδρομή ρηγμάτωσης που αντιστοιχεί στη ράβδο αυτή (Σχ. 6.16γ).

Οι Seible et al. (1997), βασισμένοι σε πειραματικά αποτελέσματα, διέτυπωσαν μία επί πλέον συνθήκη, σύμφωνα με την οποία για να εξασφαλισθεί η συνάφεια ράβδου – σκυροδέματος θα πρέπει η εγκάρσια παραμόρφωση (διόγκωση του σκυροδέματος) να μην ξεπερνά μία κρίσιμη τιμή, γύρω στο 0.001. Έτσι, στην εξ. (6.30) για το σχεδιασμό του πάχους μανδύα, η ενεργή τάση σχεδιασμού των συνθέτων υλικών f_{fe} θα πρέπει να περιορίζεται σε:

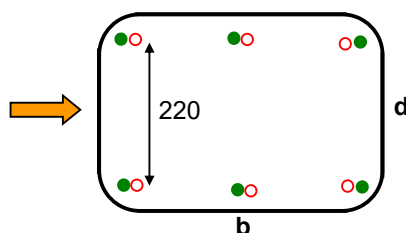
$$f_{fe} \leq 0.001 \times E_f \quad (6.31)$$

Στο σημείο αυτό επισημαίνεται ότι κατά την επικρατούσα άποψη σήμερα σχετικά με την δράση των συνθέτων υλικών σε περιοχές με ματίσεις, σε ορθογωνικές διατομές η εύνοια της περίσφιγξης περιορίζεται κατά βάση μόνο στις γωνιακές ράβδους.

Παράδειγμα 6.4

Θεωρούμε το υποστύλωμα του Σχ. 6.13α (ορθογωνική διατομή 0.30x0.40 m) με διαμήκη οπλισμό Φ16 και $f_y = 230 \text{ N/mm}^2$, το οποίο καταπονείται σε σεισμική φόρτιση η οποία ενδέχεται να δρα παράλληλα είτε στη μεγάλη είτε στη μικρή πλευρά. Υποθέτουμε ότι οι γωνίες του υποστυλώματος έχουν στρογγυλευθεί ώστε να είναι $R = 25 \text{ mm}$ και ότι η επικάλυψη του σκυροδέματος είναι $c = 30 \text{ mm}$. Το σκυρόδεμα έχει αντοχή $f_c = 11 \text{ N/mm}^2$. Οι διαμήκεις ράβδοι του υποστυλώματος θεωρούνται ματισμένες στη βάση, σε μήκος $\ell_s = 0.25 \text{ m}$ και το απαιτούμενο μήκος ματίσματος για την αποφυγή αστοχίας θεωρείται $\ell_{s,\min} = 0.35 \text{ m}$. Έστω ότι διαθέτουμε ύφασμα ινών άνθρακα με μέτρο ελαστικότητας $E_f = 240 \text{ kN/mm}^2$, $f_{fe} = 2600 \text{ N/mm}^2$ και πάχος 0.13 mm, προκειμένου να το χρησιμοποιήσουμε για την κατασκευή μανδύα στην περιοχή της μάτισης με στόχο την αποτροπή απώλειας συνάφειας. Ο συντελεστής τριβής μ λαμβάνεται ίσος με 1.4. Θεωρώντας ότι $\gamma_{Rd} = 1.5$, να γίνει προσεγγιστικός υπολογισμός του απαιτούμενου αριθμού στρώσεων.

(α) Σεισμική φόρτιση παράλληλα στη μεγάλη πλευρά



Σχ. 6.17α

Κρίσιμη διαδρομή ρηγμάτωσης: $p_c = \min\left\{\left[\left(\frac{220}{2}\right) + 2(16 + 30)\right], 2\sqrt{2}(16 + 30)\right\} = 130 \text{ mm}$

Εμβαδόν διατομής ράβδου: $A_b = (\pi \times 16^2) / 4 = 200 \text{ mm}^2$.

$f_{fe} = \min(2600, 0.001 \times 240000) = \min(2600, 240) = 240 \text{ N/mm}^2$.

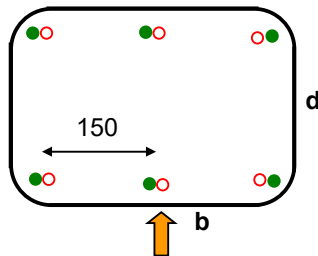
Βάσει του Παραδείγματος 6.3, $\alpha_f = 0.48 \text{ mm}$.

Απαιτούμενο πάχος μανδύα: $t_f = \frac{1.5 \times 300 \times 400 \times \left(1 - \frac{0.25}{0.35}\right) \times 200 \times 230}{0.48 \times (300 + 400) \times 130 \times 1.4 \times 240 \times 250} = 0.64 \text{ mm}$.

Απαιτούμενος αριθμός στρώσεων: $0.64/0.13 = 4.92 \rightarrow 5 \text{ στρώσεις}$.

Ο μανδύας των συνθέτων υλικών θα αποτρέψει την ολίσθηση και των δύο γωνιακών ράβδων.

(β) Σεισμική φόρτιση παράλληλα στη μικρή πλευρά



Σχ. 6.17β

Κρίσιμη διαδρομή ρηγμάτωσης: $p_c = \min\left\{\left[\left(\frac{150}{2}\right) + 2(16 + 30)\right], 2\sqrt{2}(16 + 30)\right\} = 130 \text{ mm}$

Εμβαδόν διατομής ράβδου: $A_b = 200 \text{ mm}^2$, $f_{fe} = 240 \text{ N/mm}^2$. Το απαιτούμενο πάχος μανδύα είναι ίσο με αυτό της παραπάνω περίπτωσης. Εδώ όμως η αποτελεσματικότητα του μανδύα είναι εξασφαλισμένη ως προς τις δύο γωνιακές ράβδους μόνον, όχι όμως και ως προς την μεσαία.

Τέλος, επ' ευκαιρία του παραδείγματος αυτού επισημαίνεται ότι ο υπολογισμός του απαιτούμενου πάχους μανδύα για τον συνδυασμό αύξησης της γωνίας στροφής χορδής (δηλ. της πλαστιμότητας) και αποτροπής αστοχίας συνάφειας σε ματίσεις δεν θα πρέπει να έχει αθροιστικό χαρακτήρα, διότι για μεν την πλαστιμότητα ενδιαφέρει το τμήμα του μανδύα που περισφίγγει το σκυρόδεμα στη θλιβόμενη περιοχή, για δε τις ματίσεις ενδιαφέρει το τμήμα του μανδύα στην εφελκυσόμενη. Συνεπώς, οι 5 στρώσεις μανδύα που υπολογίσθηκαν καλύπτουν και τις απαιτήσεις πλαστιμότητας.

6.4.2 Επιρροή της ένωσης ράβδων με παράθεση στη γωνία στροφής χορδής

Για να ληφθεί υπόψη η επιρροή των ματίσεων θα πρέπει η γωνία στροφής χορδής στη διαρροή θ_y και το πλαστικό τμήμα της γωνίας στροφής χορδής στην αστοχία θ_u^{pl} να υπολογίζονται με ποσοστό θλιβόμενου σπλισμού ω' διπλάσιο αυτού που ισχύει εκτός της περιοχής μάτισης. Το ίδιο ισχύει φυσικά για την καμπυλότητα διαρροής ϕ_y και την ροπή διαρροής M_y . Επίσης αν η μάτιση γίνεται σε μήκος $l_s < l_{s,min}$, ο υπολογισμός των θ_u^{pl} , θ_u , M_y και ϕ_y θα γίνεται πολλαπλασιάζοντας την τάση διαρροής του διαμήκουσ χάλυβα επί $l_s / l_{s,min}$. Ακόμα θα πρέπει να πολλαπλασιάζεται ο 2^{ος} όρος των εξ. (6.21) – (6.22) επί το λόγο της τροποποιημένης λόγω μάτισης ροπής διαρροής προς την τιμή της εκτός της μάτισης. Τέλος, από στοιχεία που προκύπτουν βάσει πειραματικών δεδομένων, το δεξιά μέλος της εξ. (6.26) θα πρέπει να πολλαπλασιάζεται επί $l_s / l_{su,min}$.

Για ματίσεις χωρίς μανδύα συνθέτων υλικών είναι:

$$l_{s,min} = \frac{0.3f_y}{\sqrt{f_c}} d_b \quad (6.32)$$

$$l_{su,min} = \frac{f_y}{\left(1.05 + 14.5\alpha_{\ell} \rho_{sx} \frac{f_{yw}}{f_c}\right) \sqrt{f_c}} d_b \quad (6.33)$$

όπου

$$\alpha_{\ell} = \left(1 - \frac{s_h}{2b_o}\right) \left(1 - \frac{s_h}{2h_o}\right) \frac{n_{restr}}{n} \quad (6.34)$$

n = συνολικός αριθμός διαμήκων ράβδων στην περίμετρο της διατομής και n_{restr} = αριθμός διαμήκων ράβδων που στηρίζονται εγκάρσια σε γωνία συνδετήρα ή σιγμοειδή σπλισμό.

Για ματίσεις με μανδύα συνθέτων υλικών σε ύψος τουλάχιστον ίσο με $1.25 l_s$ είναι:

$$l_{s,min} = \frac{0.2f_y}{\sqrt{f_c}} d_b \quad (6.35)$$

$$l_{su,min} = \frac{f_y}{\left(1.05 + 14.5\alpha_{\ell,f} \rho_{fx} \frac{f_{fe}}{f_c}\right) \sqrt{f_c}} d_b \quad (6.36)$$

όπου $\alpha_{\ell,f} = 4/n$, δεδομένου ότι οι τάσεις περίσφιγξης δρουν μόνο στις 4 γωνιακές διαμήκεις ράβδους. Θα πρέπει να επισημάνουμε στο σημείο αυτό ότι για να αποφύγουμε

την εισαγωγή της συμβολής των συνθέτων υλικών δύο φορές στην διόρθωση για την θ_u^{pl} , το α_f στον εκθέτη του 25 στην εξ. (6.26) θα πρέπει να ληφθεί ίσο με μηδέν. Τέλος τα μεγέθη αντοχής στις παραπάνω εξισώσεις έχουν μονάδες N/mm².

6.5 Λυγισμός ράβδων

Σύμφωνα με τους Priestley et al. (1996), σε υποστυλώματα για τα οποία ο λόγος $M/Vd > 4$ (M και V είναι η μέγιστη δρώσα ροπή κάμψης και τέμνουσα, αντίστοιχα, και d είναι το μήκος της πλευράς της διατομής που είναι παράλληλη με το επίπεδο κάμψης) και ο λόγος της απόστασης συνδετήρων προς τη διάμετρο των διαμήκων ράβδων, s_h/d_b , ξεπερνά μία κρίσιμη τιμή, τότε υπάρχει ενδεχόμενο λυγισμού των διαμήκων ράβδων λόγω υψηλής τιμής του αξονικού φορτίου. Ο λυγισμός αυτός καθυστερεί σημαντικά όταν ο μανδύας συνθέτων υλικών ο οποίος επιβάλλει τάσεις περίσφιγξης στο υποστύλωμα έχει πάχος τουλάχιστον ίσο με:

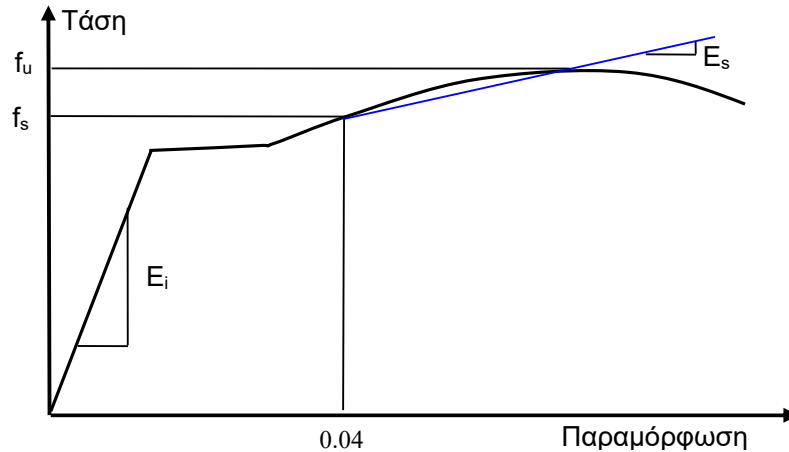
$$t_f = \frac{0.45nf_s^2d}{4E_{ds}E_f\alpha_f} \quad (6.37)$$

όπου n = συνολικός αριθμός διαμήκων ράβδων στη διατομή, f_s = τάση στον διαμήκη οπλισμό για παραμόρφωση ίση με 0.04 και E_{ds} = “διπλό” μέτρο ελαστικότητας του διαμήκους οπλισμού, το οποίο ορίζεται ως εξής (Σχ. 6.18):

$$E_{ds} = \frac{4E_sE_i}{(\sqrt{E_s} + \sqrt{E_i})^2} \quad (6.38)$$

Στην εξ. (6.38) E_s = τέμνον μέτρο ελαστικότητας του διαμήκους χάλυβα από την τάση f_s στην τάση f_u (αντοχή του χάλυβα) και E_i = αρχικό μέτρο ελαστικότητας του διαμήκους χάλυβα. Στην εξ. (6.37) η ποσότητα $0.45f_s^2/E_{ds}$ μπορεί να ληφθεί προσεγγιστικά (και συντηρητικά) ίση με 40 N/mm², οπότε, λαμβάνοντας υπόψη και τον συντελεστή ασφάλειας, έχουμε:

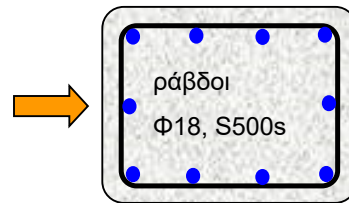
$$t_f = \gamma_{Rd} \frac{10nd}{E_f\alpha_f} \quad (E_f \text{ σε N/mm}^2) \quad (6.39)$$



Σχ. 6.18 Ορισμός μέτρων ελαστικότητας χάλυβα.

Παράδειγμα 6.5

Θεωρούμε υποστύλωμα ορθογωνικής διατομής 0.30×0.40 m (Σχ. 6.19) με 10 διαμήκειες ράβδους $\Phi 18$. Υποθέτουμε ότι οι γωνίες του υποστυλώματος έχουν στρογγυλευθεί ώστε να είναι $R = 25$ mm και λαμβάνουμε $\gamma_{Rd} = 1.5$.



Σχ. 6.19

Για σύνθετα υλικά με $E_f = 230$ kN/mm² και πάχος υφάσματος 0.12 mm, το απαιτούμενο πάχος μανδύα για την καθυστέρηση του λυγισμού είναι:

$$t_f = \frac{1.5 \times 10 \times 10 \times 400}{230000 \times 0.48} = 0.54 \text{ mm}$$

δηλαδή $0.54/0.12 = 4.5 \rightarrow$ 5 στρώσεις.

6.6 Γενικές παρατηρήσεις για μανδύες συνθέτων υλικών σε υποστυλώματα

Θα πρέπει να καταστεί σαφές ότι η χρήση μανδύα συνθέτων υλικών σε υποστυλώματα προσδίδει: (α) Για την περίπτωση κατακόρυφων φορτίων (π.χ. αναβάθμιση υποστυλωμάτων γεφυρών ή προσθήκη μόνιμων φορτίων σε υφιστάμενα κτίρια) αυξημένη αξονική αντοχή. (β) Για την περίπτωση σεισμικών φορτίων μεγάλη παραμορφωσιμότητα (σημαντική αύξηση των γωνιών στροφής χορδής) και/ή αυξημένη διατμητική αντίσταση **χωρίς να αυξάνει την δυσκαμψία** των ενισχυμένων στοιχείων

(όπως συμβαίνει στην περίπτωση συμβατικού μανδύα οπλισμένου σκυροδέματος). Σε ιδιαίτερα εύκαμπτες κατασκευές (π.χ. κτίρια με πιλοτή) τούτο θα πρέπει να λαμβάνεται σοβαρά υπόψη, διότι αν η οριζόντια μετάθεση ορόφου αποτελεί παράμετρο ελέγχου στο σχεδιασμό της ενίσχυσης των επιμέρους κατακόρυφων στοιχείων, τότε η βελτίωση μόνον της ικανότητας για παραμόρφωση μέσω μανδύα συνθέτων υλικών μπορεί να αποδειχθεί ανεπαρκής λύση σε σχέση με τις σύγχρονες απαιτήσεις αντισεισμικότητας (οι οποίες μπορεί να περιλαμβάνουν και αύξηση της δυσκαμψίας).

Υπό την προϋπόθεση λοιπόν ότι η επέμβαση δεν στοχεύει σε αύξηση της δυσκαμψίας (αλλά ούτε και της καμπτικής αντίστασης), με δεδομένη την επιβαλλόμενη σεισμική καταπόνηση θα πρέπει αρχικά να υπολογίζεται για κάθε υποστυλώμα (α) η απαιτούμενη τιμή της γωνίας στροφής χορδής (ή του δείκτη πλαστιμότητας μετατοπίσεων ή γωνιών στροφής χορδής) και (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 της απαιτούμενης γωνίας στροφής χορδής (ή πλαστιμότητας), της τέμνουσας σχεδιασμού, της καθυστέρησης λυγισμού των διαμήκων ράβδων και της αποφυγής αστοχίας σε περιοχές με ματίσεις (αν υπάρχουν).