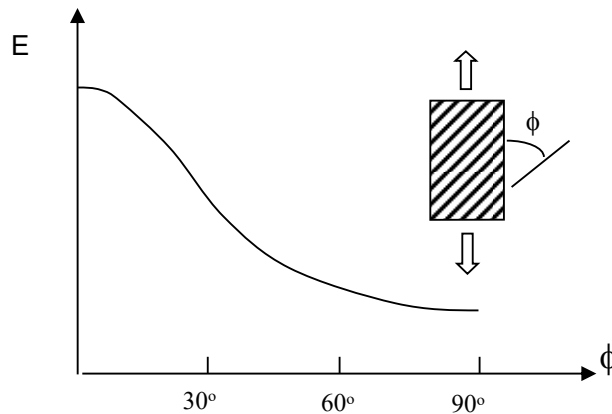


ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

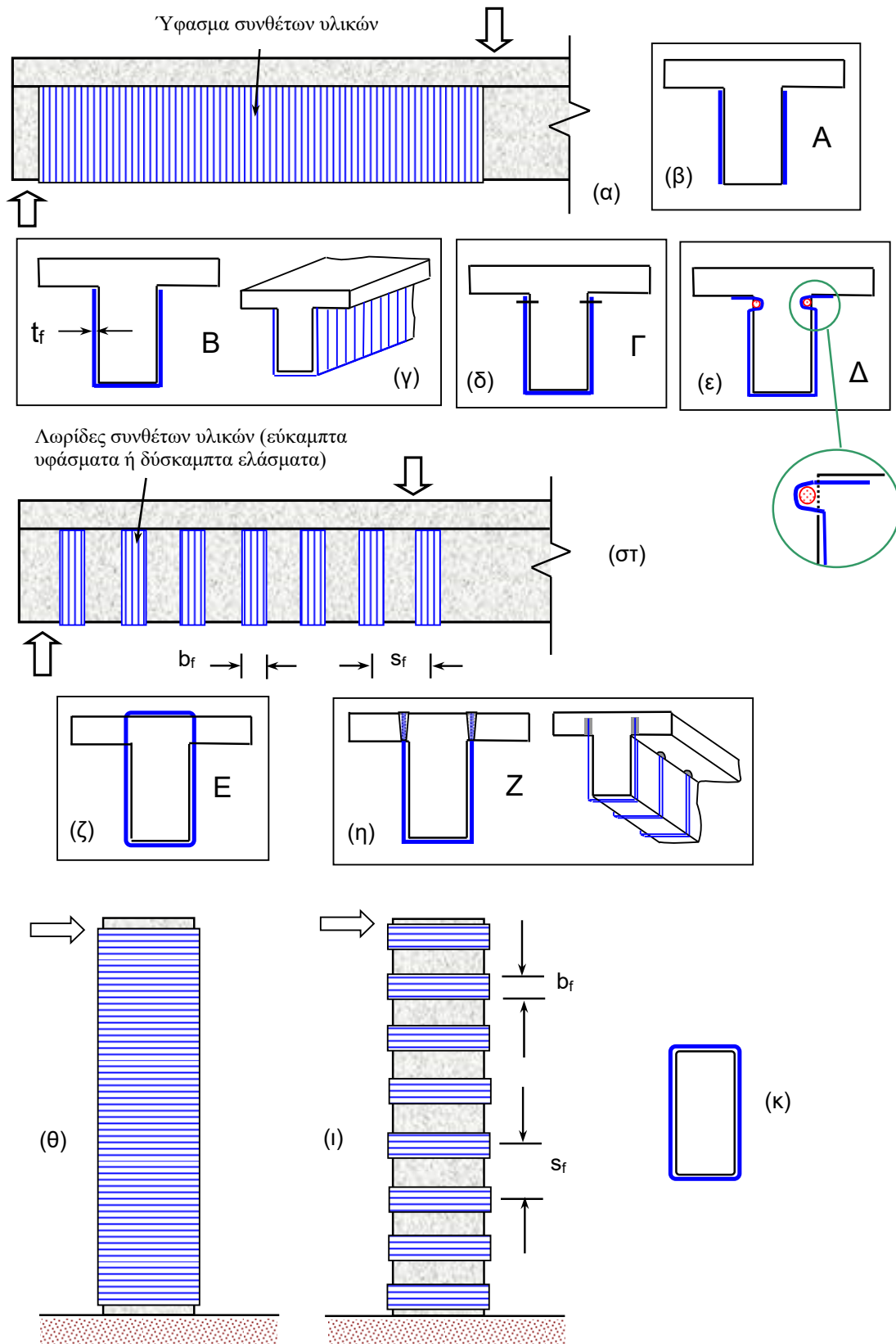
ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΣΕ ΔΙΑΤΜΗΣΗ

5.1 Γενικά

Η ενίσχυση στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος σε διάτμηση με σύνθετα υλικά επιτυγχάνεται μέσω της επικόλλησης υφασμάτων ή, σπανιότερα, ελασμάτων, τα οποία επικολλούνται στις εξωτερικές επιφάνειες με τις ίνες κατά το δυνατόν παράλληλες στις τροχιές των κυρίων τάσεων, δηλαδή περίπου κάθετα σε πιθανές ρωγμές. Τούτο βέβαια δεν είναι γενικά εφικτό, γι' αυτό, όπως και στην περίπτωση της χρήσης συνδετήρων για την ανάληψη τέμνουσας, οι ίνες εφαρμόζονται στις πιο πολλές περιπτώσεις με διεύθυνση κάθετη στον άξονα των δομικών μελών. Για σύνθετα υλικά με ίνες μίας διεύθυνσης, η σχέση διεύθυνσης ινών – αποτελεσματικότητας ως προς την ανάληψη φορτίων καταδεικνύεται στο Σχ. 5.1, ενώ ενδεικτικές διατάξεις ενίσχυσης δομικών στοιχείων σε τέμνουσα δίνονται στο Σχ. 5.2. Φωτογραφίες εφαρμογών δίνονται στο Σχ. 5.3.



Σχ. 5.1 “Φαινόμενο” μέτρο ελαστικότητας (παράλληλα στη διεύθυνση φόρτισης) συνθέτων υλικών με ίνες μίας διεύθυνσης συναρτήσει της γωνίας των ινών ως προς τη διεύθυνση φόρτισης.



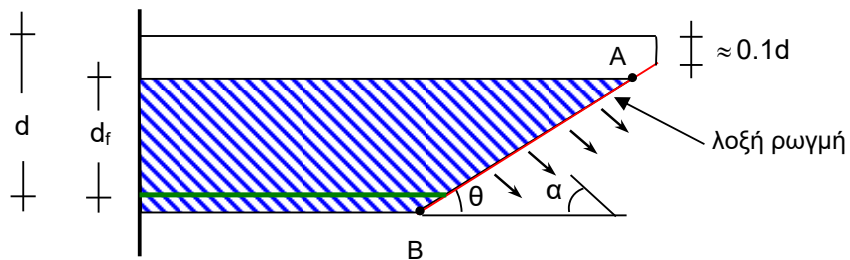
Σχ. 5.2 Ενδεικτικές διατάξεις ενίσχυσης: (α)-(η) δοκού, (θ)-(κ) υποστυλώματος.



Σχ. 5.3 Ενίσχυση (α) κρίσιμης περιοχής δοκού και (β) υποστυλώματος σε διάτμηση.

5.2 Ανάλυση τέμνουσας από τα σύνθετα υλικά

Κατά την οριακή κατάσταση διατμητικής αστοχίας οι ίνες που διαπερνούν μία λοξή (διατμητικού τύπου) ρωγμή “ενεργοποιούνται” και παραλαμβάνουν δυνάμεις **κατ’ αντιστοιχία με τους εσωτερικούς συνδετήρες**, Σχ. 5.4, βάσει του προσομοιώματος του ισοδύναμου δικτυώματος Mörsch-Ritter.



Σχ. 5.4 Μηχανισμός ανάληψης τέμνουσας από τα σύνθετα υλικά σε λοξή ρωγμή (Triantafyllou 1998).

Για την περίπτωση χρήσης λωρίδων πάχους t_f και πλάτους b_f (κάθετα στον άξονα κάθε λωρίδας, δηλαδή κάθετα στις ίνες), ανά αποστάσεις s_f (παράλληλα στον άξονα του μέλους), η τέμνουσα δύναμη σχεδιασμού που παραλαμβάνεται από τα σύνθετα υλικά, $V_{Rd,f}$, δίνεται από τη σχέση:

$$V_{Rd,f} = \frac{2t_f b_f}{s_f} d_f \sigma_{fed} (\cot \theta + \cot \alpha) \sin \alpha \quad (5.1)$$

όπου d_f = ύψος του μανδύα που διαπερνάται από τη ρωγμή, μετρούμενο από τη στάθμη του διαμήκους οπλισμού (και ίσο με $0.9d$ στην περίπτωση που ο οπλισμός διάτμησης καλύπτει πλήρως τις πλευρές, π.χ. Σχ. 5.2ζ, η, κ), θ = γωνία ρωγμής ως προς τον άξονα του μέλους (μπορεί να ληφθεί ίση με 45° , βάσει του κλασικού δικτυώματος Mörsch-Ritter), α = γωνία διεύθυνσης ινών ως προς τον άξονα του μέλους, σ_{fed} = μέση τιμή, κατά μήκος της ρωγμής, της ορθής τάσης στα σύνθετα υλικά παράλληλα στη διεύθυνση των ινών, κατά την οριακή κατάσταση αστοχίας λόγω τέμνουσας (“ενεργή” τάση).

Εδώ αξίζει να επισημανθεί ότι οι μόνες διαφορές της εξ. (5.1) με την αντίστοιχη για τη συμβολή $V_{Rd,s}$ του συμβατικού οπλισμού διάτμησης (συνδετήρες), είναι: $2t_f b_f$ αντί A_{sw} (εμβασμόν διατομής συνδετήρων), s_f αντί s_h (απόσταση συνδετήρων) και σ_{fed} αντί f_{ywd} (τάση διαρροής συνδετήρων).

Στην πιο συνηθισμένη περίπτωση εφαρμογής συνεχούς υφάσματος αντί λωρίδων (οπότε $b_f = s_f \sin \alpha$), η εξ. (5.1) γράφεται:

$$V_{Rd,f} = 2t_f d_f \sigma_{fed} (\cot \theta + \cot \alpha) \sin^2 \alpha \quad (5.2)$$

Επίσης, κατά κανόνα τα σύνθετα υλικά εφαρμόζονται με τις ίνες κάθετα στον άξονα του μέλους ($\alpha = 90^\circ$), οπότε

$$V_{Rd,f} = 2t_f d_f \sigma_{fed} \cot \theta \quad (5.3)$$

Παραπάνω αναφέρθηκε ότι κατά την οριακή κατάσταση αστοχίας του μέλους σε τέμνουσα, στα σύνθετα υλικά έχει αναπτυχθεί μία “ενεργή” τάση σ_{fed} . Ο υπολογισμός της πραγματικής κατανομής των ορθών τάσεων (και παραμορφώσεων) στα σύνθετα υλικά κατά μήκος της λοξής ρωγμής είναι σχετικά περίπλοκος. Η τάση αυτή εξαρτάται από τον τύπο του μανδύα ενίσχυσης (κλειστός, τρίπλευρος, δίπλευρος) και από το προσομοίωμα αποκόλλησης των συνθέτων υλικών. Βασισμένος στο προσομοίωμα των Monti et al. (2004), ο Ευρωκώδικας 8 δίνει:

Μανδύες κλειστού τύπου ή επαρκώς αγκυρωμένοι στη θλιβόμενη ζώνη

$$\sigma_{fed} = f_{fbd} \left[1 - \left(1 - \frac{2}{\pi} \right) \frac{\ell_{b,max} \sin \alpha}{2d_f} \right] + \frac{1}{2} [f_{fu,W}(R) - f_{fbd}] \left[1 - \frac{\ell_{b,max} \sin \alpha}{d_f} \right] \quad (5.4a)$$

όπου $f_{fu,W}(R)$ = εφελκυστική αντοχή κλειστού μανδύα ο οποίος έχει εφαρμοσθεί σε μέλος πλάτους b_w με στρογγυλεμένες τις γωνίες σε ακτίνα καμπυλότητας R :

$$f_{fu,W}(R) = f_{fbd} + \langle \eta_R f_{fd} - f_{fbd} \rangle \quad (5.5)$$

Στην εξ. (5.5) αν η ποσότητα εντός των $\langle \rangle$ είναι αρνητική, τότε ο δεύτερος όρος λαμβάνεται ίσος με το μηδέν. Ο συντελεστής η_R είναι (Campione and Miraglia 2003):

$$\eta_R = 0.2 + 1.6 \frac{R}{b_w} \quad 0 \leq \frac{R}{b_w} \leq 0.5 \quad (5.6)$$

Μανδύες τύπου U (τρίπλευροι)

$$\sigma_{fed} = f_{fbd} \left[1 - \left(1 - \frac{2}{\pi} \right) \frac{\ell_{b,max} \sin \alpha}{d_f} \right] \quad (5.4\beta)$$

Μανδύες τύπου // (δίπλευροι)

$$\sigma_{fed} = f_{fbd} \frac{d_f - \ell_{b,max} \sin \alpha + \frac{k_b E_f}{3f_{fbd}} \sin \alpha}{d_f} \left[1 - \sqrt{\frac{\left(1 - \frac{2}{\pi} \right) k_b E_f \sin \alpha}{3f_{fbd} \left(d_f - \ell_{b,max} \sin \alpha + \frac{k_b E_f}{3f_{fbd}} \sin \alpha \right)}} \right]^2 \quad (5.4\gamma)$$

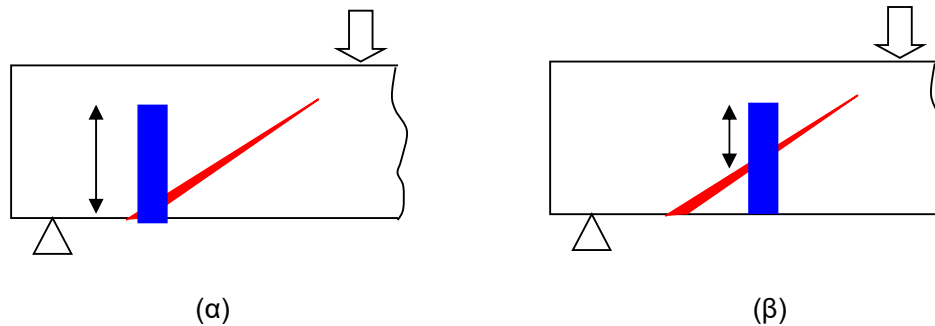
Σημειώνεται ότι τα $\ell_{b,max}$, k_b και f_{fbd} στις παραπάνω σχέσεις δίνονται από τις εξ. (3.4), (3.5) και (3.6α), αντίστοιχα, θέτοντας $b = s_f \sin \alpha$. Επίσης, αν τα σύνθετα υλικά καλύπτουν πλήρως τις πλευρές του μέλους, το d_f θα λαμβάνεται ίσο με $0.9d$. Η εξ. (5.4γ) εφαρμόζεται με μονάδα μήκους σε όλα τα μεγέθη το mm.

Επισημαίνεται ότι κατά κανόνα στην περίπτωση μανδύα κλειστού τύπου (π.χ. Σχ. 5.2ζ, θ, ι) η αστοχία του μανδύα επέρχεται μέσω θραύσης των ινών, ενώ στην περίπτωση τρίπλευρου ή δίπλευρου μανδύα (Σχ. 5.2β-ε) η αστοχία οφείλεται σε αποκόλληση (Σχ. 5.5).



Σχ. 5.5 Αποκόλληση οπλισμών διάτμησης.

Επίσης σημειώνεται ότι στην περίπτωση τρίπλευρου μανδύα το καλύτερα αγκυρωμένο τμήμα συνθέτων υλικών είναι αυτό στο κάτω τμήμα (Σχ. 5.6α), ενώ στην περίπτωση δίπλευρου μανδύα το μήκος αγκύρωσης είναι μικρότερο (γίνεται μέγιστο στο μέσον της ρωγμής, Σχ. 5.6β). Αυτό εξηγεί την μειωμένη αποτελεσματικότητα δίπλευρων μανδύων, οι οποίοι θα πρέπει εν γένει να αποφεύγονται.



Σχ. 5.6 Μήκος αγκύρωσης μανδύα (α) που καλύπτει και το κάτω πέλμα, (β) μόνο στις δύο πλευρές.

Η βελτίωση των συνθηκών αγκύρωσης τρίπλευρου μανδύα όπως δείχνει το Σχ. 5.2ε, δηλαδή μέσω της δημιουργίας εσοχής στο άνω τμήμα του κορμού, στην οποία γίνεται “έμπηξη” του υφάσματος μέσω ράβδου (η οποία μπορεί να είναι και αυτή από σύνθετα υλικά) αποτελεί ενδιαφέρουσα λύση, με αποτελεσματικότητα (π.χ. σε όρους ενεργής παραμόρφωσης) ενδιάμεση αυτής του κλειστού (Σχ. 5.2ζ-η) και του ανοικτού (Σχ. 5.2γ) μανδύα. Για την περίπτωση αυτή θα μπορούσε να γίνει χρήση των σχέσεων για ανοικτό μανδύα, με προσαύξηση της σ_{fed} , όπως αυτή προκύπτει από την εξ. (5.4β), κατά περίπου 30%.

Τέλος, η ανάπτυξη μεγάλου ανοίγματος ρωγμής ενδέχεται να μειώσει σημαντικά την συμβολή των μηχανισμών ανάληψης τέμνουσας που εκφράζονται μέσω του όρου $V_{Rd,c}$ (λόγω σημαντικής μείωσης της αλληλεμπλοκής των αδρανών και/ή της θλιβόμενης ζώνης), με αποτέλεσμα να βρεθεί το μέλος στην οριακή κατάσταση αστοχίας λόγω τέμνουσας πριν αστοχήσουν (λόγω θραύσης ή αποκόλλησης) τα σύνθετα υλικά. Γι’ αυτό είναι σκόπιμο να περιορίζεται η σ_{fed} σε μία μέγιστη τιμή, της τάξης του $0.004 E_f$.

5.3 Σύνοψη υπολογισμών

Η συμβολή των συνθέτων υλικών στην ανάληψη τέμνουσας υπολογίζεται μέσω του όρου $V_{Rd,f}$ στη γνωστή σχέση για την τέμνουσα σχεδιασμού:

$$V_{Rd} = \frac{1}{\gamma_{Rd}} \min(V_{Rd,c} + V_{Rd,s} + V_{Rd,f}, V_{Rd,max}) \quad (5.7)$$

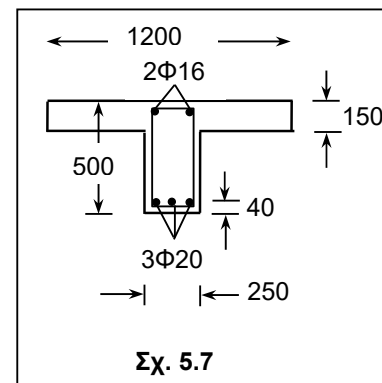
όπου $V_{Rd,c}$ η “συμβολή του σκυροδέματος” στη διατμητική αντίσταση, $V_{Rd,max}$ η μέγιστη τέμνουσα, όπως αυτή καθορίζεται από τη θραύση των λοξών θλιπτήρων σκυροδέματος και γ_{Rd} = συντελεστής ασφάλειας για τον υπολογισμό της διατμητικής αντίστασης σχεδιασμού σε υφιστάμενο δομικό στοιχείο ($\gamma_{Rd} > 1$). Η $V_{Rd,f}$ στην εξ. (5.7) δίνεται από την εξ. (5.1) ή (5.2) για σύνθετα υλικά μορφής λωρίδων ανά αποστάσεις ή συνεχούς υφάσματος, αντίστοιχα, με σ_{fed} αυτό που δίνει η εξ. (5.4).

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να αναφερθεί ότι η διατμητική αντίσταση υφιστάμενων δομικών μελών τα οποία υποβάλλονται σε ανακυκλιζόμενη ανελαστική ένταση εξαρτάται από το μέγεθος του επιθυμητού δείκτη πλαστιμότητας. Για μεγάλες τιμές πλαστιμότητας η διατμητική αντίσταση βαίνει μειούμενη (π.χ. Moehle et al. 2001), κάτι που βεβαίως επηρεάζει (μειώνει) τους όρους της εξ. (5.7), όχι όμως αυτόν που αφορά στη συμβολή των συνθέτων υλικών ($V_{Rd,f}$).

Τέλος επισημαίνεται ότι στην περίπτωση χρήσης λωρίδων ανά αποστάσεις, οι αποστάσεις αυτές θα πρέπει να εξασφαλίζουν ότι κάθε λοξή ρωγμή τέμνει τουλάχιστον δύο λωρίδες, δηλαδή $s_f \leq s_{f,max} = 0.5 \min(d_f, 0.9d)$ (για $\theta = 45^\circ$ και $\alpha = 90^\circ$).

Παράδειγμα 5.1

Θεωρούμε πλακοδοκό, όπως αυτή του Σχ. 5.2α, με πλάτος κορμού 250 mm, ύψος 500 mm και στατικό ύψος 460 mm. Η εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος εκτιμάται $f_{ctm} = 2 \text{ N/mm}^2$. Ζητείται ο σχεδιασμός συνεχούς μανδύα συνθέτων υλικών με τις ίνες κάθετα στον άξονα του μέλους ($\alpha = 90^\circ$) για πρόσθετη τέμνουσα $V_{Rd,f} = 75 \text{ kN}$. Λαμβάνεται $\theta = 45^\circ$.



Σχ. 5.7

Θεωρούμε ότι έχουμε στη διάθεσή μας ύφασμα συνθέτων υλικών πάχους 0.12 mm, με ίνες άνθρακα, μέτρο ελαστικότητας $E_f = 230 \text{ kN/mm}^2$ και εφελκυστική αντοχή σχεδιασμού $f_{fd} = 3200 \text{ N/mm}^2$. Ο μανδύας θα εφαρμοσθεί σύμφωνα με τη διάταξη του Σχ. 5.2γ (τρίπλευρος). Για συνεχή μανδύα είναι $k_b = 1.0$. Επίσης $d_f = 310 \text{ mm}$.

Το πρόβλημα θα επιλυθεί δοκιμάζοντας διαφορετικούς αριθμούς στρώσεων, ώστε να γίνει παράλληλα κατανοητή η επίδραση του αριθμού των στρώσεων στην ανάληψη τέμνουσας.

Για μία στρώση:
$$\ell_{b,max} = 0.6 \sqrt{\frac{230000 \times 0.12}{\sqrt{2.0 \times 1.0}}} = 84 \text{ mm}$$

$$f_{fbd} = \frac{1}{1.5} \sqrt{\frac{0.6 \times 230000 \times 2.0 \times 1.0}{0.12}} = 1010 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{fed} = 1010 \left[1 - \left(1 - \frac{2}{\pi} \right) \frac{84}{310} \right] = 910 \text{ N/mm}^2$$

$$(0.004 E_f = 0.004 \times 230000 = 920 \text{ N/mm}^2 > 910 \text{ N/mm}^2)$$

$$V_{Rd,f} = 2 \times 0.12 \times 310 \times 910 \times 10^{-3} = 67.7 \text{ kN}$$

Για δύο στρώσεις:
$$\ell_{b,max} = 0.6 \sqrt{\frac{230000 \times 2 \times 0.12}{\sqrt{2.0 \times 1.0}}} = 100 \text{ mm}$$

$$f_{fbd} = \frac{1}{1.5} \sqrt{\frac{0.6 \times 230000 \times 2.0 \times 1.0}{2 \times 0.12}} = 715 \text{ N/mm}^2$$

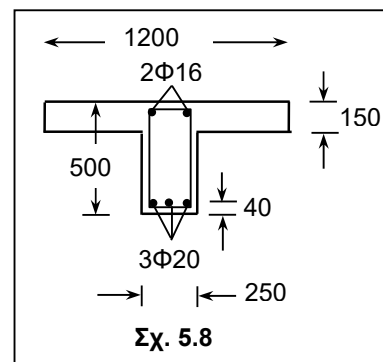
$$\sigma_{fed} = 715 \left[1 - \left(1 - \frac{2}{\pi} \right) \frac{100}{310} \right] = 630 \text{ N/mm}^2$$

$$(0.004 E_f = 0.004 \times 230000 = 920 \text{ N/mm}^2 > 630 \text{ N/mm}^2)$$

$$V_{Rd,f} = 2 \times (2 \times 0.12) \times 310 \times 630 \times 10^{-3} = \underline{93.7 \text{ kN} > 75 \text{ kN}} \text{ OK}$$

Παράδειγμα 5.2

Θεωρούμε την πλακοδοκό του παραδείγματος 5.1. Ζητείται ο σχεδιασμός συστήματος διατμητικής ενίσχυσης, το οποίο θα βασίζεται στη χρήση ελασμάτων (ανά αποστάσεις), επαρκώς αγκυρωμένων στη θλιβόμενη ζώνη (Σχ. 5.2η). Η ενίσχυση στοχεύει σε πρόσθετη τέμνουσα 80 kN.



Θεωρούμε ότι έχουμε στη διάθεσή μας ελάσματα πλάτους 40 mm, πάχους 1.4 mm, με ίνες άνθρακα, μέτρου ελαστικότητας $E_f = 120 \text{ kN/mm}^2$ και εφελκυστική αντοχή σχεδιασμού $f_{fd} = 1700 \text{ N/mm}^2$. Τα ελάσματα θα τοποθετηθούν κάθετα στον άξονα του

μέλους, με μέγιστη απόσταση $0.5 \times 0.9 \times 460 = 207$ mm. Η ακτίνα καμπυλότητας στις (κάτω) γωνίες της διατομής του μέλους θεωρείται ίση με $R = 15$ mm.

$$\text{Είναι } \eta_R = 0.2 + 1.6 \frac{15}{250} = 0.3 \quad \text{και} \quad 0 < \frac{15}{250} < 0.5$$

Έστω απόσταση μεταξύ των ελασμάτων $s_f = 150$ mm.

$$\text{Είναι: } k_b = \sqrt{\frac{1.5 \left(2 - \frac{40}{150}\right)}{1 + \frac{40}{100}}} = 1.36 \quad \ell_{b,\max} = 0.6 \sqrt{\frac{120000 \times 1.4}{\sqrt{2.0 \times 1.36}}} = 191 \text{ mm}$$

$$f_{\text{bd}} = \frac{1}{1.5} \sqrt{\frac{0.6 \times 120000 \times 2.0 \times 1.36}{1.4}} = 250 \text{ N/mm}^2$$

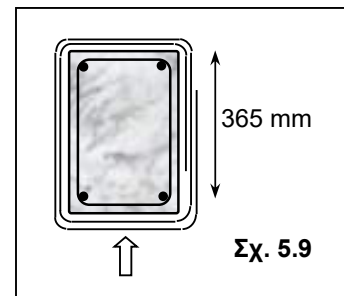
$$f_{\text{tu,W}}(R) = 250 + (0.3 \times 1700 - 250) = 510 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{\text{fed}} = 250 \left[1 - \left(1 - \frac{2}{\pi}\right) \frac{191 \times 1.0}{2 \times 0.9 \times 460} \right] + \frac{1}{2} [510 - 250] \left[1 - \frac{191 \times 1.0}{0.9 \times 460} \right] = 299 \text{ N/mm}^2$$

$$V_{\text{Rd,f}} = \frac{2 \times 1.4 \times 40}{150} 0.9 \times 460 \times 299 \times 10^{-3} = \underline{92.4 \text{ kN} > 80 \text{ kN}} \quad \text{OK}$$

Παράδειγμα 5.3

Θεωρούμε υποστύλωμα ορθογωνικής διατομής 250×400 mm, με στατικό ύψος 365 mm. Η εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος εκτιμάται $f_{\text{ctm}} = 2$ N/mm². Ζητείται ο σχεδιασμός συνεχούς μανδύα συνθέτων υλικών με τις ίνες κάθετα στον άξονα του μέλους ($\alpha = 90^\circ$) για πρόσθετη τέμνουσα $V_{\text{Rd,f}} = 100$ kN παράλληλα στη μεγάλη πλευρά. Λαμβάνεται $\theta = 45^\circ$.



Θεωρούμε ότι έχουμε στη διάθεσή μας ύφασμα συνθέτων υλικών πάχους 0.12 mm, με ίνες άνθρακα, μέτρο ελαστικότητας $E_f = 230$ kN/mm² και εφελκυστική αντοχή σχεδιασμού $f_{\text{fd}} = 3200$ N/mm². Ο μανδύας θα εφαρμοσθεί σύμφωνα με τη διάταξη του Σχ. 5.2κ (πλήρης περιτύλιξη). Η ακτίνα καμπυλότητας στις γωνίες της διατομής θεωρείται ίση με $R = 15$ mm. Για συνεχή μανδύα είναι $k_b = 1.0$.

$$\text{Είναι } \eta_R = 0.2 + 1.6 \frac{15}{250} = 0.3 \quad \text{και} \quad 0 < \frac{15}{250} < 0.5$$

Και αυτό το πρόβλημα θα επιλυθεί δοκιμάζοντας διαφορετικούς αριθμούς στρώσεων, ώστε να γίνει παράλληλα κατανοητή η επίδραση του αριθμού των στρώσεων στην ανάληψη τέμνουσας.

$$\text{Για μια στρώση: } \ell_{b,max} = 0.6 \sqrt{\frac{230000 \times 0.12}{\sqrt{2.0 \times 1.0}}} = 84 \text{ mm}$$

$$f_{fbd} = \frac{1}{1.5} \sqrt{\frac{0.6 \times 230000 \times 2.0 \times 1.0}{0.12}} = 1010 \text{ N/mm}^2$$

$$f_{fu,W}(R) = 1010 + \langle 0.3 \times 3200 - 1010 \rangle = 1010 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{fed} = 1010 \left[1 - \left(1 - \frac{2}{\pi} \right) \frac{84 \times 1.0}{2 \times 0.9 \times 365} \right] + \frac{1}{2} [1010 - 1010] \left[1 - \frac{84 \times 1.0}{0.9 \times 365} \right] = 963 \text{ N/mm}^2$$

$$(0.004 E_f = 0.004 \times 230000 = 920 \text{ N/mm}^2 < 963 \text{ N/mm}^2)$$

$$V_{Rd,f} = 2 \times 0.12 \times 0.9 \times 365 \times 920 \times 10^{-3} = 72.5 \text{ kN} < 100 \text{ kN}$$

$$\text{Για δύο στρώσεις: } \ell_{b,max} = 0.6 \sqrt{\frac{230000 \times 2 \times 0.12}{\sqrt{2.0 \times 1.0}}} = 118.5 \text{ mm}$$

$$f_{fbd} = \frac{1}{1.5} \sqrt{\frac{0.6 \times 230000 \times 2.0 \times 1.0}{2 \times 0.12}} = 715 \text{ N/mm}^2$$

$$f_{fu,W}(R) = 715 + \langle 0.3 \times 3200 - 715 \rangle = 960 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{fed} = 715 \left[1 - \left(1 - \frac{2}{\pi} \right) \frac{118.5 \times 1.0}{2 \times 0.9 \times 365} \right] + \frac{1}{2} [960 - 715] \left[1 - \frac{118.5 \times 1.0}{0.9 \times 365} \right] = 746.5 \text{ N/mm}^2$$

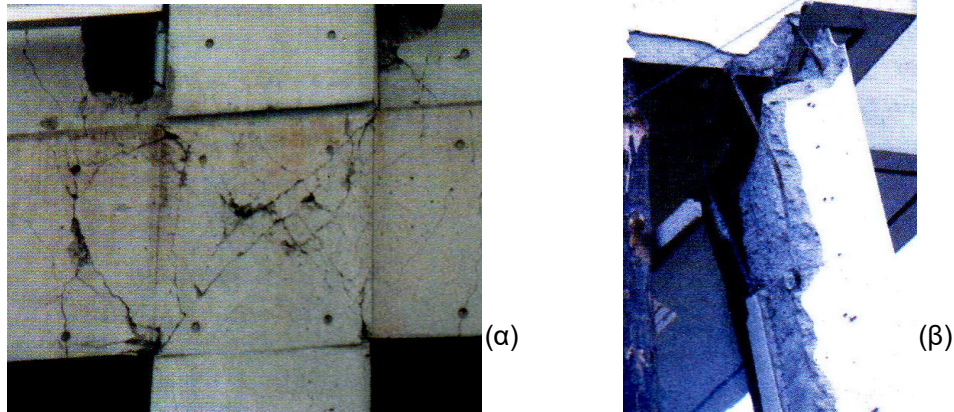
$$(0.004 E_f = 0.004 \times 230000 = 920 \text{ N/mm}^2 > 746.5 \text{ N/mm}^2)$$

$$V_{Rd,f} = 2 \times (2 \times 0.12) \times 0.9 \times 365 \times 746.5 \times 10^{-3} = \underline{118 \text{ kN} > 100 \text{ kN}} \text{ OK}$$

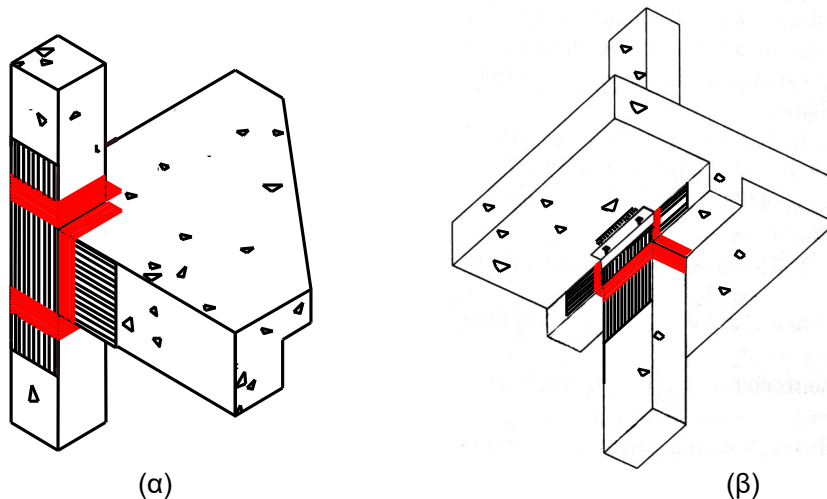
5.4 Κόμβοι

Τυπικές διατμητικές αστοχίες (εξωτερικών) κόμβων δοκών-υποστυλωμάτων δίνονται στο Σχ. 5.10. Η μελέτη της ενίσχυσης κόμβων σε διάτμηση με σύνθετα υλικά ξεκίνησε σχετικά πρόσφατα (π.χ. Αντωνόπουλος 2001, Antonopoulos and Triantafyllou 2002, Antonopoulos and Triantafyllou 2003) και κατέδειξε ότι ακόμα και σχετικά μικρά ποσοστά

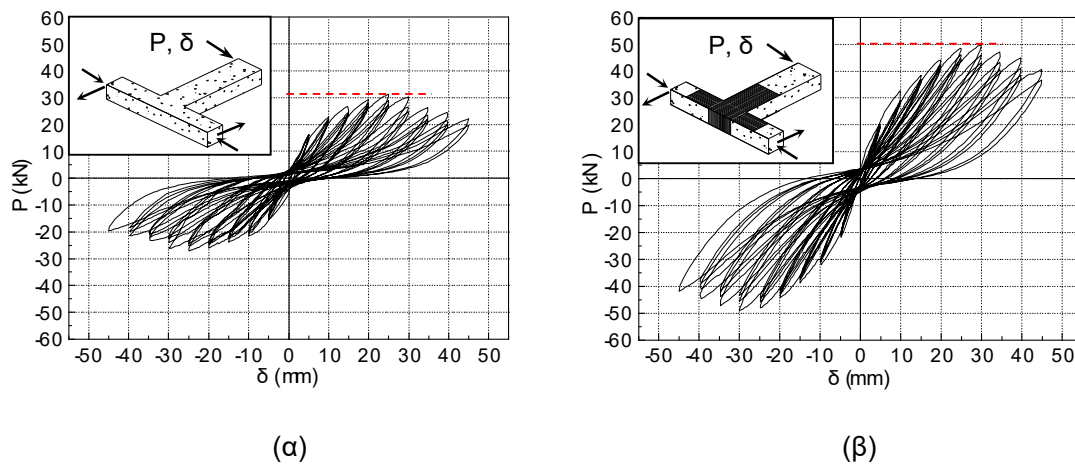
συνθέτων υλικών (π.χ. 2-3 στρώσεις υφάσματος με ίνες άνθρακα, συνολικού πάχους της τάξης των 0.25-0.3 mm) επαρκώς αγκυρωμένων έξω από τις περιοχές των κόμβων αρκούν για την αύξηση της διατμητικής αντοχής των κόμβων σε ποσοστά μέχρι και 80-100%. Για να καταστεί τούτο εφικτό θα πρέπει η διάταξη των συνθέτων υλικών να περιλαμβάνει υφάσματα τοποθετημένα με τη διεύθυνση των ινών παράλληλη κατά προτεραιότητα στις δοκούς, αλλά όπου είναι δυνατόν και στα υποστυλώματα (π.χ. Σχ. 5.11).



Σχ. 5.10 Διατμητική αστοχία εξωτερικών κόμβων: (α) Σεισμός Hyogo-ken Nanbu, Ιαπωνία, 1995. (β) Σεισμός Καλαμάτας, 1986 (*fib* 2003).



Σχ. 5.11 Ενδεικτικές διατάξεις ενίσχυσης κόμβων με σύνθετα υλικά σε δύο διευθύνσεις (δοκού, υποστυλώματος) και αγκύρωση των υλικών εκτός περιοχής κόμβου. (α) Εξωτερικός κόμβος, (β) εσωτερικός κόμβος.



Σχ. 5.12 Καμπύλες δύναμης-μετατόπισης για κόμβο οπλισμένου σκυροδέματος με ανεπαρκή οπλισμό διάτμησης (έλλειψη συνδετήρων στην περιοχή του κόμβου). (α) Μη ενισχυμένο δοκίμιο. (β) Αύξηση διατμητικής αντοχής της τάξης του 70% για το ενισχυμένο δοκίμιο.

Η σημαντική αύξηση της διατμητικής αντοχής κόμβων μέσω της ενίσχυσης με σύνθετα υλικά καταδεικνύεται μέσω των αποτελεσμάτων του Σχ. 5.12, το οποίο δίνει την καμπύλη φορτίου-μετατόπισης μη ενισχυμένου και ενισχυμένου (με δύο στρώσεις υφάσματος ινών άνθρακα) δοκιμίου μορφής κόμβου σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση (Antonopoulos and Triantafyllou 2003).

Η συμβολή των συνθέτων υλικών στην διατμητική αντίσταση κόμβων μπορεί (κατά προσέγγιση) να ληφθεί υπόψη λαμβάνοντας την παραμόρφωση των συνθέτων υλικών στη διεύθυνση της δοκού περίπου ίση με 0.004.