

## **2.4 ΕΡΓΑΣΙΑ Β – ΤΕΥΧΟΣ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΟΔΗΓΙΩΝ**

## ΤΕΥΧΟΣ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΟΔΗΓΙΩΝ

### ΕΝΙΣΧΥΣΕΙΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΜΕ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ (ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΑ ΠΟΛΥΜΕΡΗ)

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Μία από τις πιο ραγδαίες τεχνολογικές εξελίξεις των τελευταίων δεκαπέντε περίπου ετών στον κατασκευαστικό κλάδο ήταν η χρήση των συνθέτων υλικών (γνωστά και ως ινοπλισμένα πολυμερή - *fiber reinforced polymers* - FRP) στα τεχνικά έργα. Τα σύνθετα υλικά είναι γνωστά σε μία σειρά πεδίων, όπως είναι η αυτοκινητοβιομηχανία, η αεροναυπηγική, η ναυσιπλοΐα και ορισμένες βιομηχανίες καταναλωτικών ειδών (π.χ. είδη σπορ), για τις εξαιρετικές μηχανικές τους ιδιότητες, το χαμηλό τους βάρος και την καλή ανθεκτικότητα σε περιβαλλοντικές επιδράσεις. Τα παραπάνω χαρακτηριστικά είχαν ως αποτέλεσμα την σταδιακή εισαγωγή των συνθέτων υλικών και στα έργα πολιτικού μηχανικού, με κύριο πεδίο εφαρμογής αυτό των ενισχύσεων, όπου τα υλικά εφαρμόζονται στις εξωτερικές επιφάνειες δομικών μελών μέσω επικόλλησης.

Η χρήση των συνθέτων υλικών για την ενίσχυση κατασκευών (οπλισμένου σκυροδέματος, τοιχοποιίας, ξύλινων, ακόμα και μεταλλικών) έχει γνωρίσει πρόσφατα μία τρομακτική άνθηση, τόσο σε παγκόσμια κλίμακα όσο και στη χώρα μας. Παράλληλη αύξηση βέβαια έχει σημειώσει και η ερευνητική δραστηριότητα στο συγκεκριμένο πεδίο, η οποία γνωρίζει πρωτόγνωρους ρυθμούς ανάπτυξης μέσα στα τελευταία 5-10 χρόνια. Η τεχνική των συνθέτων υλικών εξαπλώθηκε στην Ελλάδα ιδιαίτερα μετά το σεισμό των Αθηνών το 1999, ο οποίος σηματοδότησε την έναρξη της ευρείας χρήσης τους για την ενίσχυση του φέροντος οργανισμού κτιρίων που υπέστησαν βλάβες.

Το τεύχος αυτό βασίζεται στο βιβλίο "Ενισχύσεις Κατασκευών Οπλισμένου Σκυροδέματος με Σύνθετα Υλικά (Ινοπλισμένα Πολυμερή)", υπό Αθ. Τριανταφύλλου, και παρήχθη στα πλαίσια του ερευνητικού έργου *ΕΝΙΚΑΣ (Ενίσχυση Κατασκευών με Σύνθετα Υλικά)*, που χρηματοδοτήθηκε από τον Οργανισμό Αντισεισμικού Σχεδιασμού και Προστασίας (Ο.Α.Σ.Π.) στο διάστημα 2001-2003. Κατά την εκπόνηση του έργου αυτού ο συγγραφέας συνεργάστηκε με την καθηγήτρια του τμήματος πολιτικών μηχανικών Δ.Π.Θ. κ. Σ. Πανταζοπούλου (εργασία της οποίας απετέλεσε και τη βάση του Κεφαλαίου 7 του παρόντος τεύχους) και με την αναπληρώτρια καθηγήτρια του τμήματος πολιτικών μηχανικών Ε.Μ.Π. κ. Ε. Βιντζηλαίου.

Αθ. Χ. Τριανταφύλλου

Πάτρα, Ιούνιος 2003



## ΣΥΜΒΟΛΑ

### Λατινικά

|             |   |
|-------------|---|
| $A_b$       | = εμβαδόν ράβδου οπλισμού   |
| $A_g$       | = συνολικό εμβαδόν διατομής   |
| $A_e$       | = εμβαδόν εγκιβωτισμένου σκυροδέματος στη διατομή   |
| $A_f$       | = εμβαδόν διατομής συνθέτων υλικών  |
| $A_s$       | = εμβαδόν διατομής διαμήκους χάλυβα οπλισμού  |
| $A_{s,tot}$ | = συνολικό εμβαδόν χάλυβα σε διατομή υποστυλώματος  |
| $A_{sw}$    | = εμβαδόν συνδετήρων  |
| $A_{s1}$    | = εμβαδόν εφελκυόμενου χάλυβα   |
| $A_{s2}$    | = εμβαδόν θλιβόμενου χάλυβα   |
| $a_\ell$    | = μήκος μετάθεσης διαγράμματος ροπών  |
| $b$         | = πλάτος διατομής σκυροδέματος  |
| $b_f$       | = πλάτος λωρίδων συνθέτων υλικών  |
| $b_w$       | = πλάτος κορμού διατομής σκυροδέματος   |
| $c$         | = πάχος επικάλυψης  |
| $c_1, c_2$  | = σταθερές  |
| $D$         | = διάμετρος κυκλικής διατομής   |
| $D'$        | = διάμετρος στη θέση διαμήκων ράβδων κυκλικού υποστυλώματος                                     |
| $d$         | = στατικό ύψος  |
|             | = πλευρά ορθογωνικής διατομής   |
| $d_b$       | = διάμετρος ράβδων διαμήκους οπλισμού   |
| $d_f$       | = ύψος του μανδύα που διαπερνάται από τη ρωγμή, μετρούμενο από τη στάθμη του διαμήκους οπλισμού |
| $d_1$       | = απόσταση κέντρου βάρους διατομής εφελκυόμενου χάλυβα από την ακραία εφελκυόμενη ίνα           |
| $d_2$       | = απόσταση κέντρου βάρους διατομής θλιβόμενου χάλυβα από την ακραία θλιβόμενη ίνα               |
| $E$         | = φαινόμενο μέτρο ελαστικότητας συνθέτων υλικών (στη διεύθυνση φόρτισης)                        |
|             | = μέτρο ελαστικότητας, γενικά   |
| $E_c$       | = αρχικό μέτρο ελαστικότητας σκυροδέματος   |
| $E_{ds}$    | = “διπλό” μέτρο ελαστικότητας του διαμήκους χάλυβα  |
| $E_f$       | = μέτρο ελαστικότητας συνθέτων υλικών (παράλληλα στις ίνες)                                     |
| $E_{fib}$   | = μέτρο ελαστικότητας ινών  |

|              |  |
|--------------|--|
| $E_i$        | = αρχικό μέτρο ελαστικότητας του διαμήκους χάλυβα  |
| $E_m$        | = μέτρο ελαστικότητας μήτρας<br>= μέτρο ελαστικότητας τοιχοπλήρωσης  |
| $E_s$        | = μέτρο ελαστικότητας χάλυβα<br>= τέμνον μέτρο ελαστικότητας του διαμήκους χάλυβα από την τάση $f_s$ στην τάση $f_u$ |
| $F$          | = δύναμη σε ράβδο οπλισμού   |
| $f_c$        | = θλιπτική αντοχή σκυροδέματος   |
| $f_{cc}$     | = θλιπτική αντοχή περισφιγμένου σκυροδέματος   |
| $f_{ccd}$    | = θλιπτική αντοχή σχεδιασμού περισφιγμένου σκυροδέματος  |
| $f_{cd}$     | = θλιπτική αντοχή σχεδιασμού σκυροδέματος  |
| $f_{ck}$     | = χαρακτηριστική θλιπτική αντοχή σκυροδέματος  |
| $f_{ctm}$    | = μέση εφελκυστική αντοχή σκυροδέματος   |
| $f_f$        | = εφελκυστική αντοχή συνθέτων υλικών (παράλληλα στις ίνες)   |
| $f_{fd}$     | = εφελκυστική αντοχή σχεδιασμού συνθέτων υλικών  |
| $f_{fde}$    | = ενεργή εφελκυστική αντοχή σχεδιασμού συνθέτων υλικών   |
| $f_{fib}$    | = εφελκυστική αντοχή ινών  |
| $f_{fk}$     | = χαρακτηριστική εφελκυστική αντοχή συνθέτων υλικών  |
| $f_m$        | = εφελκυστική αντοχή μήτρας  |
| $f_s$        | = τάση σε ράβδο οπλισμού   |
| $f_u$        | = εφελκυστική αντοχή χάλυβα  |
| $f_y$        | = τάση διαρροής διαμήκους χάλυβα   |
| $f_{yd}$     | = τιμή σχεδιασμού τάσης διαρροής χάλυβα  |
| $f_{yk}$     | = χαρακτηριστική τιμή τάσης διαρροής χάλυβα  |
| $f_{ywd}$    | = τάση διαρροής συνδετήρων   |
| $g$          | = επιτάχυνση βαρύτητας   |
| $g_d$        | = τιμή σχεδιασμού μόνιμου φορτίου  |
| $H$          | = συνολικό ύψος κατασκευής   |
| $h$          | = ύψος διατομής<br>= μήκος υποστυλώματος   |
| $h_i$        | = ύψος ορόφου $i$  |
| $I$          | = ροπή αδράνειας   |
| $I_{o2}$     | = ροπή αδράνειας της ρηγματωμένης διατομής πριν την ενίσχυση   |
| $I_1$        | = ροπή αδράνειας της αρηγματώτης διατομής μετά την ενίσχυση  |
| $I_2$        | = ροπή αδράνειας της ρηγματωμένης διατομής μετά την ενίσχυση   |
| $K_i$        | = δυσκαμψία υποστυλώματος $i$  |
| $K_{ορόφου}$ | = δυσκαμψία ορόφου   |

|                      |  |
|----------------------|--|
| $K_{\text{πιλοτής}}$ | = δυσκαμψία πιλοτής  |
| $K_{\text{τοιχ.}}$   | = δυσκαμψία τοιχοπλήρωσης  |
| $\bar{K}$            | = διάνυσμα δυσκαμψιών κατασκευής                                       |
| $k$                  | = δυσκαμψία  |
| $k_b$                | = συντελεστής μεγέθους   |
| $k_c$                | = συντελεστής συμπύκνωσης του σκυροδέματος                             |
| $k_e$                | = συντελεστής αποτελεσματικότητας μανδύα                               |
| $k_i$                | = ανηγμένη δυσκαμψία υποστυλώματος $i$ ως προς συνολ. δυσκαμψία ορόφου |
| $L_p$                | = μήκος πλαστικής άρθρωσης   |
| $L_s$                | = διατμητικό μήκος υποστυλώματος                                       |
| $\ell$               | = μήκος  |
| $\ell_b$             | = μήκος επικόλλησης  |
| $\ell_{b,\max}$      | = μέγιστο μήκος επικόλλησης  |
| $\ell_{mi}$          | = μήκος του κάθε ανοίγματος  |
| $\ell_s$             | = μήκος μάτισης  |
| $M$                  | = μάζα κατασκευής  |
| $M_{cr}$             | = ροπή ρηγμάτωσης  |
| $M_k$                | = χαρακτηριστική τιμή ροπής  |
| $M_o$                | = ροπή στην κρίσιμη διατομή κατά τη φάση ενίσχυσης                     |
| $M_{o,Rd}$           | = ροπή αντοχής πριν από την ενίσχυση                                   |
| $M_{P-\Delta}$       | = ροπή δεύτερης τάξης  |
| $M_{Rd}$             | = ροπή αντοχής σχεδιασμού  |
| $M_{Sd}$             | = δρώσα ροπή σχεδιασμού  |
| $M_y$                | = ροπή διαρροής  |
| $M_{yd}$             | = τιμή σχεδιασμού ροπής διαρροής                                       |
| $\bar{M}$            | = διάνυσμα μαζών   |
| $m_i$                | = μάζα ορόφου $i$  |
| $N$                  | = αριθμός ορόφων   |
| $N_c$                | = δύναμη στο σκυρόδεμα   |
| $N_f$                | = εφελκυστική δύναμη στα σύνθετα υλικά                                 |
| $N_{fa}$             | = δύναμη αγκύρωσης συνθέτων υλικών                                     |
| $N_{fad}$            | = τιμή σχεδιασμού της δύναμης αγκύρωσης συνθέτων υλικών                |
| $N_{fa,\max}$        | = μέγιστη δύναμη αγκύρωσης συνθέτων υλικών                             |
| $N_{fd}$             | = εφελκυστική δύναμη σχεδιασμού στα σύνθετα υλικά                      |
| $N_{Rfd}$            | = τιμή σχεδιασμού μέγιστης εφελκυστικής δύναμης στα σύνθετα υλικά      |
| $N_{Rsd}$            | = τιμή σχεδιασμού μέγιστης δύναμης στον εφελκυσμένο χάλυβα             |
| $N_{Sd}$             | = δρώσα αξονική δύναμη σχεδιασμού                                      |

|                         |   |
|-------------------------|---|
| $N_{sd}$                | = εφελκυστική δύναμη σχεδιασμού στον χάλυβα                   |
| $N_{s1}$                | = δύναμη στον εφελκούμενο χάλυβα                              |
| $N_{s2}$                | = δύναμη στον θλιβόμενο χάλυβα                                |
| $n$                     | = αριθμός στρώσεων  |
|                         | = αριθμός ματίσεων  |
|                         | = αριθμός διαμήκων ράβδων στη διατομή υποστυλώματος           |
| $P$                     | = φορτίο  |
| $P_u$                   | = φορτίο αστοχίας   |
| $p_c$                   | = διαδρομή ρωγμής   |
| $q_d$                   | = τιμή σχεδιασμού κινητού φορτίου                             |
| $r_c$                   | = ακτίνα καμπυλότητας στις γωνίες ορθογωνικής διατομής        |
| $r_1$                   | = μειωτικός συντελεστής                                       |
| $S_a$                   | = επιτάχυνση  |
| $S_d$                   | = μετατόπιση  |
| $S_d^{el}$              | = ελαστική μετατόπιση μονοβάθμιου συστήματος                  |
| $S_d^{\text{πλαίσιου}}$ | = μετατόπιση πλαισίου   |
| $s$                     | = απόσταση συνδετήρων   |
|                         | = απόσταση διαμήκων ράβδων οπλισμού                           |
| $s_f$                   | = ολίσθηση στα σύνθετα υλικά                                  |
|                         | = απόσταση ελασμάτων ενίσχυσης                                |
| $s_{f,max}$             | = μέγιστη απόσταση μεταξύ ελασμάτων ενίσχυσης                 |
| $s'_f$                  | = καθαρή απόσταση λωρίδων σε περίπτωση μερικής περιτύλιξης    |
| $T$                     | = θεμελιώδης ιδιοπερίοδος κατασκευής                          |
| $T_g$                   | = θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης                             |
| $T_i$                   | = i-οστή περίοδος κατασκευής                                  |
| $t_f$                   | = πάχος συνθέτου υλικού (π.χ. συνολικό πάχος μανδύα)          |
| $t_{fib}$               | = ονομαστικό πάχος μίας στρώσης υφάσματος ινών                |
| $t_m$                   | = πάχος τοιχοπλήρωσης   |
| $\ddot{u}_g$            | = επιτάχυνση εδάφους  |
| $V$                     | = σεισμική τέμνουσα βάσης                                     |
| $V_{cd}$                | = διατμητική αντοχή (σχεδιασμού) σκυροδέματος                 |
| $V_{el}$                | = ελαστική τέμνουσα βάσης                                     |
| $V_{fd}$                | = τέμνουσα σχεδιασμού που παραλαμβάνεται από τα σύνθετα υλικά |
| $V_{fib}$               | = ογκομετρικό ποσοστό ινών                                    |
| $V_m$                   | = ογκομετρικό ποσοστό μήτρας                                  |
| $V_{Rd}$                | = αντοχή σχεδιασμού σε τέμνουσα                               |
| $V_{Rdi}$               | = αντοχή σχεδιασμού σε τέμνουσα υποστυλώματος i               |

|              |  |
|--------------|--|
| $V_{Rd1}$    | = αντοχή σχεδιασμού σε τέμνουσα στοιχείου χωρίς οπλισμό διάτμησης                          |
| $V_{Rd2}$    | = αντοχή σχεδιασμού σε τέμνουσα που αντιστοιχεί σε θραύση των λοξών θλιπτήρων σκυροδέματος |
| $V_{Rd,tot}$ | = συνολική αντοχή σε τέμνουσα δύναμη   |
| $V_{Sd}$     | = δρώσα τέμνουσα σχεδιασμού  |
| $V_{Sd,end}$ | = δρώσα τέμνουσα σχεδιασμού στη διατομή που τερματίζουν τα σύνθετα υλικά                   |
| $V_{Sdi}$    | = δρώσα τέμνουσα σχεδιασμού στο υποστύλωμα $i$   |
| $V_{Sd,tot}$ | = συνολική δρώσα τέμνουσα βάσης  |
| $V_y$        | = τέμνουσα βάσης κατά τη διαρροή   |
| $V_{wd}$     | = τέμνουσα σχεδιασμού που παραλαμβάνεται από τους συνδετήρες                               |
| $x$          | = ύψος θλιβόμενης ζώνης  |
| $x_e$        | = ύψος θλιβόμενης ζώνης από ελαστική ανάλυση ρηγματωμένης διατομής                         |
| $x_{lim}$    | = οριακό ύψος θλιβόμενης ζώνης   |
| $x_o$        | = ύψος θλιβόμενης ζώνης κατά τη φάση ενίσχυσης   |
| $x_u$        | = ύψος θλιβόμενης ζώνης κατά την αστοχία   |
| $x_y$        | = ύψος θλιβόμενης ζώνης κατά την εκκίνηση διαρροής του χάλυβα                              |
| $W$          | = βάρος κατασκευής   |
| $z$          | = μοχλοβραχίονας   |

### Ελληνικά

|                  |   |
|------------------|---|
| $\alpha$         | = γωνία διεύθυνσης ινών ως προς τον άξονα του μέλους<br>= συντελεστής συμμετοχής της μάζας του κτιρίου στην θεμελιώδη ιδιομορφή   |
| $\alpha_f$       | = λόγος μέτρων ελαστικότητας συνθέτων υλικών – σκυροδέματος<br>= γωνία ινών ως προς τον άξονα υποστυλώματος (σπειροειδής μανδύας) |
| $\alpha_{fl}$    | = συντελεστής   |
| $\alpha_{fl-sh}$ | = συντελεστής   |
| $\alpha_s$       | = λόγος μέτρων ελαστικότητας χάλυβα - σκυροδέματος  |
| $\Gamma$         | = συντελεστής συμμετοχής της θεμελιώδους ιδιομορφής στην απόκριση   |
| $\gamma_b$       | = συντελεστής ασφάλειας για τα σύνθετα υλικά στην περίπτωση αποκόλλησης   |
| $\gamma_c$       | = συντελεστής ασφάλειας υλικού για το σκυρόδεμα   |
| $\gamma_f$       | = συντελεστής ασφάλειας υλικού για τα σύνθετα υλικά   |
| $\gamma_s$       | = συντελεστής ασφάλειας υλικού για τον χάλυβα   |
| $\Delta$         | = μετατόπιση  |
| $\Delta_y$       | = μετατόπιση διαρροής   |
| $\Delta_u$       | = μετατόπιση κατά την αστοχία του μέλους  |
| $\Delta_{u,cr}$  | = οριακή μετατόπιση σχεδιασμού  |
| $\delta_G$       | = συντελεστής κέντρου βάρους ορθογωνικής κατανομής τάσεων   |

|                           |   |
|---------------------------|---|
| $\varepsilon_c$           | = παραμόρφωση στο σκυρόδεμα   |
| $\varepsilon_{cc}$        | = παραμόρφωση περισφιγμένου σκυροδέματος σε τάση $f_{cc}$ (αντοχή)  |
| $\varepsilon_{ccu}$       | = οριακή παραμόρφωση περισφιγμένου σκυροδέματος   |
| $\varepsilon_{ccud}$      | = οριακή παραμόρφωση σχεδιασμού περισφιγμένου σκυροδέματος  |
| $\varepsilon_{co}$        | = παραμόρφωση στην ακραία θλιβόμενη ίνα σκυροδέματος κατά την ενίσχυση<br>= παραμόρφωση απερίσφιγκτου σκυροδέματος στη μέγιστη τάση |
| $\varepsilon_{cu}$        | = οριακή παραμόρφωση σκυροδέματος   |
| $\varepsilon_f$           | = παραμόρφωση στα σύνθετα υλικά   |
| $\varepsilon_{fbd,fl}$    | = παραμόρφωση σχεδιασμού συνθέτων υλικών για αποκόλληση σε καμπτικές ρωγμές   |
| $\varepsilon_{fbd,fl-sh}$ | = παραμόρφωση σχεδιασμού συνθέτων υλικών για αποκόλληση σε καμπτο-διατμητικές ρωγμές  |
| $\varepsilon_{fd,max}$    | = μέγιστη παραμόρφωση σχεδιασμού συνθέτων υλικών  |
| $\varepsilon_{fe,d}$      | = ενεργή παραμόρφωση σχεδιασμού συνθέτων υλικών   |
| $\varepsilon_{f,lim}$     | = οριακή παραμόρφωση στα σύνθετα υλικά  |
| $\varepsilon_{f,min}$     | = ελάχιστη τιμή παραμόρφωσης συνθέτων υλικών  |
| $\varepsilon_{fu,c}$      | = παραμόρφωση συνθέτων υλικών στην κρίσιμη διατομή κατά την οριακή κατάσταση αντοχής  |
| $\varepsilon_{fud}$       | = οριακή παραμόρφωση σχεδιασμού συνθέτων υλικών   |
| $\varepsilon_{fud,e}$     | = ενεργή παραμόρφωση σχεδιασμού μανδύα συνθέτων υλικών  |
| $\varepsilon_{fue}$       | = ενεργή οριακή παραμόρφωση συνθέτων υλικών   |
| $\varepsilon_{fuk}$       | = χαρακτηριστική τιμή οριακής παραμόρφωσης στα σύνθετα υλικά  |
| $\varepsilon_{fum}$       | = μέση οριακή παραμόρφωση συνθέτων υλικών   |
| $\varepsilon_o$           | = παραμόρφωση στην ακραία εφελκυσόμενη ίνα κατά την ενίσχυση  |
| $\varepsilon_r$           | = παραμόρφωση στον οπλισμό  |
| $\varepsilon_{s1}$        | = παραμόρφωση εφελκυσμένου χάλυβα   |
| $\varepsilon_{s2}$        | = παραμόρφωση θλιβόμενου χάλυβα   |
| $\varepsilon_{yd}$        | = παραμόρφωση σχεδιασμού στη διαρροή του χάλυβα   |
| $\eta$                    | = μειωτικός συντελεστής αντοχής συνθέτων υλικών λόγω μακροχρόνιας φόρτισης  |
| $\eta_e$                  | = λόγος ενεργής προς μέση οριακή παραμόρφωση συνθέτων υλικών  |
| $\theta$                  | = γωνία ρωγμής ως προς τον άξονα του μέλους   |
| $\theta_{cr}$             | = στροφή κατασκευής   |
| $\lambda$                 | = λυγηρότητα υποστυλώματος<br>= συντελεστής συμμετοχής πρώτης ιδιομορφής  |
| $\mu$                     | = συντελεστής τριβής  |
| $\mu_{απαλτ}$             | = απαιτούμενος δείκτης πλαστιμότητας  |

|                    |  |
|--------------------|--|
| $\mu_u$            | = οριακή διαθέσιμη πλαστιμότητα του μονοβάθμιου συστήματος |
| $\mu_\Delta$       | = δείκτης πλαστιμότητας μετατοπίσεων                       |
| $\mu_\phi$         | = δείκτης πλαστιμότητας καμπυλοτήτων                       |
| $v_d$              | = ανηγμένη αξονική δύναμη σχεδιασμού                       |
| $\rho_{eq}$        | = ισοδύναμο ογκομετρικό ποσοστό διαμήκους οπλισμού         |
| $\rho_f$           | = ογκομετρικό ποσοστό διαμήκους οπλισμού συνθέτων υλικών   |
| $\rho_{fib}$       | = πυκνότητα ινών   |
| $\rho_\ell$        | = ογκομετρικό ποσοστό χάλυβα κάτω πέλματος δοκού           |
| $\rho_s$           | = ογκομετρικό ποσοστό διαμήκους χάλυβα                     |
| $\sigma_c$         | = τάση στο σκυρόδεμα                                       |
| $\sigma_{ccu}$     | = τάση περισφιγμένου σκυροδέματος στην οριακή παραμόρφωση  |
| $\sigma_f$         | = τάση στα σύνθετα υλικά                                   |
| $\sigma_{fd}$      | = τάση σχεδιασμού στα σύνθετα υλικά                        |
| $\sigma_\ell$      | = εγκάρσια τάση  |
| $\sigma_{\ell ud}$ | = τάση περίσφιγξης στο σκυρόδεμα (τιμή σχεδιασμού)         |
| $\sigma_r$         | = τάση στον οπλισμό  |
| $\tau_b$           | = διατμητική τάση συνάφειας                                |
| $\Phi_i$           | = στοιχείο $i$ της θεμελιώδους ιδιομορφής                  |
| $\overline{\Phi}$  | = διάνυσμα της θεμελιώδους ιδιομορφής                      |
| $\phi_u$           | = καμπυλότητα διατομής κατά την αστοχία                    |
| $\phi_y$           | = καμπυλότητα διατομής κατά τη διαρροή του οπλισμού        |
| $\phi$             | = γωνία ινών ως προς τη διεύθυνση φόρτισης                 |
| $\psi$             | = συντελεστής επιφάνειας ορθογωνικής κατανομής τάσεων      |



|                    |
|--------------------|
| <b>ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ</b> |
|--------------------|

|  | <u>σελ.</u> |
|--|-------------|
| ΠΡΟΛΟΓΟΣ                                   | i           |
| ΣΥΜΒΟΛΑ                                    | iii         |
| ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ                                | xi          |
| <br><b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 – ΕΙΣΑΓΩΓΗ</b>           | <br>1       |
| 1.1 Γενικά                                 | 1           |
| 1.2 Οργάνωση του τεύχους                   | 3           |
| <br><b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 – ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΤΕΧΝΙΚΕΣ</b> | <br>5       |
| 2.1 Υλικά                                  | 5           |
| 2.1.1 Γενικά                               | 5           |
| 2.1.2 Ίνες                                 | 5           |
| 2.1.3 Μήτρα                                | 7           |
| 2.1.4 Σύνθετα υλικά                        | 8           |
| Παράδειγμα 2.1                             | 9           |
| 2.1.5 Κόλλα                                | 10          |
| 2.2 Συστήματα ενίσχυσης                    | 12          |
| 2.2.1 Συστήματα υγρής εφαρμογής            | 12          |
| 2.2.2 Προκατασκευασμένα υλικά              | 13          |
| 2.3 Τεχνικές εφαρμογής                     | 13          |
| 2.3.1 Βασική τεχνική                       | 13          |
| 2.3.2 Ειδικές τεχνικές                     | 15          |
| 2.3.2.1 Αυτοματοποιημένη περιτύλιξη        | 15          |
| 2.3.2.2 Εφαρμογή με προένταση              | 16          |
| 2.3.2.3 Επιταχυμένη σκλήρυνση με θέρμανση  | 17          |
| 2.3.2.4 Προκατασκευασμένα στοιχεία         | 18          |
| 2.3.2.5 Εφαρμογή σε εγκοπές                | 19          |
| <br><b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 – ΒΑΣΕΙΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ</b>  | <br>21      |
| 3.1 Γενικά                                 | 21          |
| 3.2 Καταστατικοί νόμοι των υλικών          | 21          |

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 3.2.1 | Οριακή κατάσταση αντοχής – πλήρης συνεργασία υλικών | 21 |
| 3.2.2 | Οριακή κατάσταση αντοχής – αποκόλληση               | 23 |
| 3.2.3 | Οριακή κατάσταση λειτουργικότητας                   | 23 |
| 3.3   | Συνάφεια συνθέτων υλικών – σκυροδέματος             | 23 |
| 3.3.1 | Γενικά, συμπεριφορά                                 | 24 |
| 3.3.2 | Αναλυτικό προσομοίωμα                               | 26 |
|       | Παράδειγμα 3.1                                      | 27 |

|                                       |   |    |
|---------------------------------------|---|----|
| <b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 – ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΣΕ ΚΑΜΨΗ</b> |   | 29 |
| 4.1                                   | Γενικά  | 29 |
| 4.2                                   | Αρχική κατάσταση  | 30 |
| 4.3                                   | Οριακή κατάσταση αντοχής – μηχανισμοί αστοχίας            | 31 |
| 4.4                                   | Υπολογισμοί για την οριακή κατάσταση αντοχής              | 33 |
| 4.4.1                                 | Μηχανισμοί πλήρους συνεργασίας                            | 33 |
| 4.4.2                                 | Μηχανισμοί με απώλεια της πλήρους συνεργασίας             | 35 |
| 4.5                                   | Απαιτήσεις πλαστιμότητας                                  | 39 |
| 4.6                                   | Σύνοψη διαδικασίας υπολογισμών – οριακή κατάσταση αντοχής | 40 |
| 4.7                                   | Παράδειγμα  | 41 |
| 4.8                                   | Οριακή κατάσταση λειτουργικότητας                         | 43 |
| 4.9                                   | Υποστυλώματα  | 44 |

|  |   |    |
|--|---|----|
| <b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 – ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΣΕ ΔΙΑΤΜΗΣΗ</b> |   | 47 |
| <b>5.1</b>                               | <b>Γενικά</b>                                 | 47 |
| <b>5.2</b>                               | <b>Ανάληψη τέννουσας από τα σύνθετα υλικά</b> | 49 |
| <b>5.3</b>                               | <b>Σύνοψη υπολογισμών</b>                     | 53 |
|  | Παράδειγμα 5.1                                | 53 |
|  | Παράδειγμα 5.2                                | 55 |
|  | Παράδειγμα 5.3                                | 56 |
| <b>5.4</b>                               | <b>Κόμβοι</b>                                 | 56 |

|                                |   |    |
|--------------------------------|---|----|
| <b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 – ΠΕΡΙΣΦΙΓΞΗ</b> |   | 59 |
| 6.1                            | Γενικά  | 59 |
| 6.2                            | Συμπεριφορά και καταστατικός νόμος σκυροδέματος<br>περισφιγμένου μέσω συνθέτων υλικών | 60 |
| 6.2.1                          | Συμπεριφορά   | 60 |
| 6.2.2                          | Αναλυτικό προσομοίωμα σχεδιασμού  | 62 |

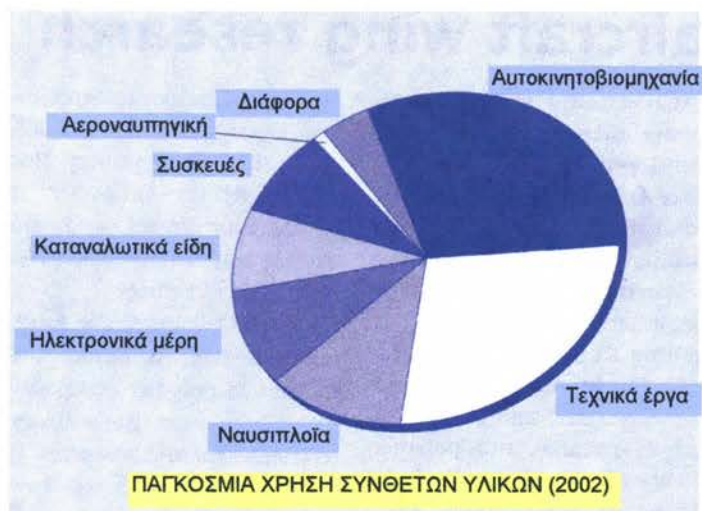
|      |   |    |
|------|---|----|
|      | Παράδειγμα 6.1  | 65 |
| 6.3  | Πλαστιμότητα  | 66 |
|      | Παράδειγμα 6.2  | 69 |
| 6.4  | Ματίσεις  | 70 |
|      | Παράδειγμα 6.3  | 73 |
| 6.5  | Λυγισμός ράβδων   | 75 |
|      | Παράδειγμα 6.4  | 76 |
|      | <b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 – ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΗ ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΕΠΕΜΒΑΣΕΩΝ</b>                                       | 77 |
| 7.1  | Γενικά  | 77 |
| 7.2  | Εκτίμηση επιβαλλόμενης σεισμικής μετακίνησης και διαθέσιμης ικανότητας για οριζόντια μετάθεση | 77 |
| 7.3  | Παράδειγμα  | 81 |
|      | <b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8 – ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΕΣ ΛΕΠΤΟΜΕΡΕΙΕΣ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ</b>                        | 87 |
| 8.1  | Γενικά  | 87 |
| 8.2  | Κατασκευαστικές λεπτομέρειες  | 87 |
|      | 8.2.1 Ενίσχυση σε κάμψη   | 87 |
|      | 8.2.2 Ενίσχυση σε διάτμηση  | 89 |
|      | 8.2.3 Περίσφιγξη  | 90 |
| 8.3  | Μέθοδος εφαρμογής   | 91 |
|      | <b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9 – ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ</b>   | 93 |
| 9.1  | Γενικά  | 93 |
| 9.2  | Θερμοκρασιακές επιδράσεις   | 93 |
| 9.3  | Υγρασία   | 94 |
| 9.4  | Υπεριώδης ακτινοβολία   | 94 |
| 9.5  | Αλκαλικό και όξινο περιβάλλον   | 95 |
| 9.6  | Γαλβανική διάβρωση  | 95 |
| 9.7  | Ερπυσμός, θραύση υπό τάση, διάβρωση υπό τάση  | 95 |
| 9.8  | Κόπωση  | 96 |
| 9.9  | Κρούση  | 96 |
| 9.10 | Αξιολόγηση τύπου ινών   | 96 |
|      | <b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ ΤΕΥΧΟΥΣ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΟΔΗΓΙΩΝ</b>  | 99 |



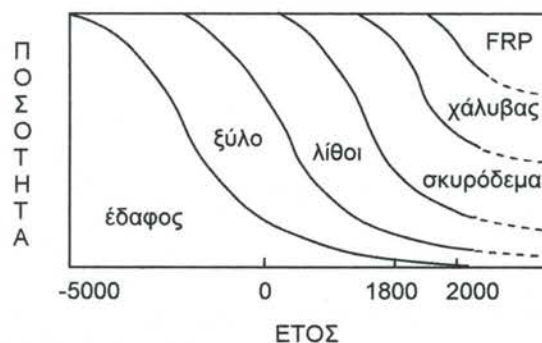
**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1****ΕΙΣΑΓΩΓΗ****1.1 Γενικά**

Το πεδίο των επισκευών και ενισχύσεων κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος έχει αρχίσει να απασχολεί σε σημαντικό βαθμό τον τεχνικό κόσμο της χώρας, για λόγους που σχετίζονται αφενός με τη μείωση της σεισμικής τρωτότητας και αφετέρου με την αναβάθμιση κατασκευών λόγω παλαιότητας, φθοράς, αλλαγής χρήσης κλπ. Τα τελευταία 15 χρόνια (περίπου 10 στη χώρα μας) έχει αναπτυχθεί μία νέα τεχνική ενίσχυσης, η οποία βασίζεται στη χρήση προηγμένων υλικών που αποτελούνται από το συνδυασμό ινών (π.χ. άνθρακα, γυαλιού, αραμιδίου) σε μήτρα εποξειδικής ρητίνης. Τα υλικά αυτά, γνωστά ως **ινοπλισμένα πολυμερή** (Fibre Reinforced Polymers – FRP) ή απλά **σύνθετα υλικά**, χαρακτηρίζονται από εξαιρετικές ιδιότητες, που κάνουν την εφαρμογή τους στα τεχνικά έργα, και ιδιαίτερα στο πεδίο των ενισχύσεων/επισκευών ιδιαίτερα ελκυστική. Η εφαρμογή τους ως οπλισμός ενίσχυσης στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος συνίσταται στην μέσω εποξειδικών ρητινών επικόλλησή τους σε εξωτερικές επιφάνειες δομικών στοιχείων, με προσανατολισμό ινών τέτοιο ώστε να παραλαμβάνουν σημαντικές εφελκυστικές δυνάμεις.

Τα σύνθετα υλικά έχουν τύχει ευρείας εφαρμογής κατά τις τελευταίες δεκαετίες στην παραγωγή τεράστιας ποικιλίας προϊόντων, που σχετίζονταν σε μεγάλο ποσοστό με την αυτοκινητοβιομηχανία, τη ναυσιπλοΐα, την αεροναυπηγική, τα είδη σπορ, μέρη ηλεκτρονικών συσκευών κλπ. Γι' αυτό και, παραδοσιακά, η μελέτη των συνθέτων υλικών αποτελούσε ένα από τα γνωστικά πεδία μηχανολόγων μηχανικών, αεροναυπηγών, χημικών μηχανικών, ηλεκτρολόγων κλπ. Η εικόνα αυτή έχει αλλάξει δραματικά τα τελευταία λίγα χρόνια, κατά τα οποία ένα μεγάλο τμήμα της παγκόσμιας παραγωγής συνθέτων υλικών (το 25% περίπου το έτος 2002, Σχ. 1.1) απορροφάται στο πεδίο των τεχνικών έργων. Οι εκτιμήσεις για την παγκόσμια χρήση των συνθέτων υλικών στο πεδίο των τεχνικών έργων προβλέπουν ετήσιο ρυθμό αύξησης της τάξης του 3%, με την ετήσια κατανάλωση στο έτος 2007 να ξεπερνά τους 300.000 τόννους (Business Communications Co., Inc. 2002). Μάλιστα, ορισμένα από τα πιο αισιόδοξα (αλλά με σημαντική δόση υπερβολής, κατά την απόψη του συγγραφέα) σενάρια προβλέπουν ότι η χρησιμοποιούμενες ποσότητες συνθέτων υλικών στα τεχνικά έργα θα είναι στο μακρινό μέλλον συγκρίσιμες με αυτές άλλων υλικών, όπως είναι ο χάλυβας και το σκυρόδεμα (Σχ. 1.2).



Σχ. 1.1 Η παγκόσμια χρήση συνθέτων υλικών το έτος 2002.



Σχ. 1.2 Μία ιδιαίτερα αισιόδοξη άποψη για το μέλλον των συνθέτων υλικών στο πεδίο των τεχνικών έργων.

Τα σύνθετα υλικά έχουν χρησιμοποιηθεί από 20ετίας περίπου για την παραγωγή ράβδων οπλισμού ή τενόντων προέντασης σκυροδέματος, αγκυρίων εδάφους, για την κατασκευή κτιρίων ειδικής χρήσης, ελαφρών γεφυρών, δεξαμενών, σιλό, και γενικά σε εφαρμογές όπου βασικό κριτήριο επιλογής υλικών είναι η ανθεκτικότητα σε διάρκεια, το χαμηλό βάρος και η υψηλή αντοχή (ή συνδυασμός αυτών). Το πεδίο όμως στο οποίο τα σύνθετα υλικά έχουν τύχει εξαιρετικά ευρείας χρήσης σε όλο τον κόσμο σήμερα είναι αυτό των ενισχύσεων (οι εφαρμογές ανά τον κόσμο αριθμούν ήδη μερικές δεκάδες χιλιάδες). Στο πεδίο αυτό, βασικά πλεονεκτήματα των συνθέτων υλικών είναι: η ανθεκτικότητα σε διάβρωση, το χαμηλό βάρος (περίπου 1/4 - 1/5 του χάλυβα), η εξαιρετικά υψηλή (εφελκυστική) αντοχή (πολλαπλάσια του κοινού χάλυβα), η διαθεσιμότητα των υλικών σε πολύ μεγάλα μήκη και η μεγάλη “ευκαμψία” τους, με αποτέλεσμα η αντίστοιχη τεχνική ενίσχυσης να χαρακτηρίζεται από εξαιρετική ευκολία και ταχύτητα εφαρμογής, ακόμα και σε δύσκολα προσβάσιμα τμήματα κατασκευών.

Μειονεκτήματά τους είναι η πτωχή συμπεριφορά σε υψηλές θερμοκρασίες, το σχετικά υψηλό κόστος (το οποίο μειώνεται όμως δραματικά χρόνο με το χρόνο) και η έλλειψη πλαστιμότητας (όχι όμως και παραμορφωσιμότητας, αποτέλεσμα της οποίας είναι η σημαντική αύξηση της πλαστιμότητας στοιχείων σκυροδέματος σε πολλές περιπτώσεις).

Βασικό μειονέκτημα επίσης σχετικά με την εφαρμογή των συνθέτων υλικών στο πεδίο των ενισχύσεων είναι η σημαντική (αλλά δικαιολογημένη) έλλειψη “παιδείας” που διακρίνει τον τεχνικό κόσμο της χώρας, λόγω της σχετικά πρόσφατης (και ραγδαίας) ανάπτυξης της συγκεκριμένης τεχνικής. Το γεγονός αυτό ήταν και το βασικό κίνητρο συγγραφής του παρόντος βοηθήματος. Είναι γεγονός ότι η τεχνική της ενίσχυσης κατασκευών μέσω συνθέτων υλικών έτυχε εξαιρετικά ευρείας εφαρμογής στη χώρα μας τα τελευταία χρόνια, κυρίως μετά το σεισμό των Αθηνών το 1999. Άποψη μάλιστα του συγγραφέα είναι ότι οι εφαρμογές της τεχνικής ήταν πολύ περισσότερες από αυτές που δικαιολογούσε η διαθέσιμη γνώση και εμπειρία, και σε κάποιες περιπτώσεις εσφαλμένες. Κλασσικά σφάλματα εφαρμογής ήταν η χρήση μανδύα (όχι συνεχούς μέσω των κόμβων!) σε υποστρώματα με στόχο την αύξηση της καμπτικής αντοχής, η καθολική εφαρμογή “υφασμάτων” με τις ίνες σε μη ευθύγραμμη διάταξη σε φέρουσες τοιχοποιίες κ.ά. Έτσι λοιπόν, το βοήθημα αυτό γράφτηκε με την ελπίδα να καλύψει σε σημαντικό βαθμό το κενό που υπάρχει σήμερα στο πεδίο της εφαρμογής των συνθέτων υλικών, παρουσιάζοντας τις βασικές αρχές διαστασιολόγησης ενισχύσεων σε συνδυασμό με απλά παραδείγματα. Παράλληλα, με την ευκαιρία αυτή ο συγγραφέας κρίνει σκόπιμο να τονίσει ότι η τεχνική των συνθέτων υλικών δεν αποτελεί πανάκεια: σίγουρα δίνει ενδιαφέρουσες λύσεις σε πληθώρα περιπτώσεων, σε κάποιες άλλες όμως δεν προσφέρεται ως η πλέον δόκιμη, και γι’ αυτό θα πρέπει να θεωρείται ως μία ακόμα τεχνική ενίσχυσης, η οποία συμπληρώνει τις υφιστάμενες, χωρίς να τις υποκαθιστά αδιακρίτως.

## 1.2 Οργάνωση του τεύχους

Η καλυπτόμενη ύλη παρουσιάζεται συνοπτικά (αλλά περιεκτικά), με έμφαση σε αποδεκτές από την επιστημονική κοινότητα προσεγγίσεις των διαφόρων θεμάτων και όχι κατ’ ανάγκη στις πλέον σύγχρονες εξελίξεις της τεχνικής των συνθέτων υλικών. Αρχικά, στο Κεφ. 2, παρουσιάζονται γενικές πληροφορίες για τα σύνθετα υλικά και τις τεχνικές εφαρμογής τους στο πεδίο των ενισχύσεων κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος. Στο Κεφ. 3 περιγράφονται οι βάσεις του “σχεδιασμού” (δηλαδή των υπολογισμών για τη διαστασιολόγηση) ενισχύσεων με σύνθετα υλικά. Στα επόμενα τρία κεφάλαια, 4, 5 και 6, δίνεται η διαδικασία των υπολογισμών για την ενίσχυση σε κάμψη, σε διάτμηση και για την περίσφιγξη, αντιστοίχως. Το Κεφ. 7 δίνει τη γενική στρατηγική αντισεισμικών

ενισχύσεων (μέσω συνθέτων υλικών) και το Κεφ. 8 παραθέτει μία σειρά από κατασκευαστικές λεπτομέρειες και κανόνες εφαρμογής. Τέλος, στο Κεφ. 9 παρουσιάζονται βασικά στοιχεία που αφορούν στη μακροχρόνια συμπεριφορά των συνθέτων υλικών, δηλαδή στην ανθεκτικότητά τους έναντι διαφόρων επιδράσεων. Στο τέλος του τεύχους δίνεται ο κατάλογος των βιβλιογραφικών αναφορών.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

### ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΤΕΧΝΙΚΕΣ

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται γενικά στοιχεία για τα σύνθετα υλικά (και τα επί μέρους συστατικά αυτών), για τα συστήματα ενίσχυσης και για τις διάφορες τεχνικές εφαρμογής.

#### 2.1 Υλικά

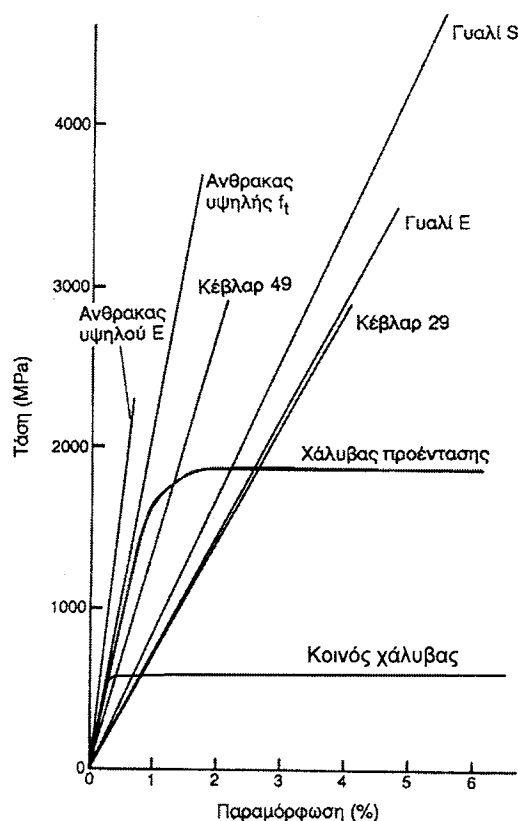
##### 2.1.1 Γενικά

Η επιλογή του τύπου, της μορφής και της μεθόδου εφαρμογής των συνθέτων υλικών εξαρτώνται κάθε φορά από πολλούς παράγοντες όπως: η γεωμετρία και οι διαστάσεις των προς ενίσχυση στοιχείων, το είδος της εντατικής τους καταπόνησης, οι περιβαλλοντικές συνθήκες (π.χ. σε θερμοκρασίες κάτω των 10 °C περίπου η σκλήρυνση των ρητινών είναι δύσκολη), η εμπειρία του μηχανικού και του διατιθέμενου εργατοτεχνικού προσωπικού και, τέλος, ο προϋπολογισμός της επέμβασης. Βεβαίως, εκτός από την προσεκτική επιλογή των συνθέτων υλικών και την επιμελημένη εφαρμογή τους, ένας παράγοντας που καθορίζει αν η επέμβαση θα είναι επιτυχής είναι η αντοχή και η ποιότητα του υποστρώματος (σκυρόδεμα) στο οποίο θα γίνει η επικόλληση. Πολύ χαμηλή εφελκυστική αντοχή ή επιφάνεια τραχειά, γεμάτη με σκόνη, λάδια κ.τ.λ. δεν θα εξασφαλίσουν καλή ποιότητα δεσμού μεταξύ σκυροδέματος-συνθέτων υλικών, με αποτέλεσμα πρόωρη αστοχία του οπλισμού ενίσχυσης. Πρόσθετα στοιχεία για την πρακτική εφαρμογή των συνθέτων υλικών θα δοθούν σε άλλες ενότητες του τεύχους (π.χ. Κεφ. 8). Ακολούθως επιχειρείται μία συνοπτική περιγραφή των βασικών συστατικών ενός συστήματος ενίσχυσης: τα **σύνθετα υλικά**, που αποτελούνται από **ίνες** σε πολυμερική **μήτρα**, και η **κόλλα** εφαρμογής τους σε επιφάνειες σκυροδέματος.

##### 2.1.2 Ίνες

Οι ίνες στα σύνθετα υλικά, διαμέτρου 5-25  $\mu\text{m}$ , αποτελούν τον φορέα ανάληψης δυνάμεων (κατά κανόνα εφελκυστικών), παράλληλα στη διεύθυνσή τους. Κύριο χαρακτηριστικό τους είναι η εξαιρετικά υψηλή εφελκυστική αντοχή και η γραμμικά ελαστική συμπεριφορά μέχρι τη θραύση τους (Σχ. 2.1). Οι κυριότεροι τύποι ινών που χρησιμοποιούνται στο πεδίο των ενισχύσεων είναι οι ίνες άνθρακα (ανθρακονήματα), οι

ίνες γυαλιού (υαλονήματα) και οι ίνες αραμιδίου, με βασικές ιδιότητες που δίνονται στον Πίνακα 2.1 (Feldman 1989, Kim 1995). Επισημαίνεται ότι οι ιδιότητες αυτές αναφέρονται στις ίνες υπό μονοτονική φόρτιση, χωρίς να έχει ληφθεί υπόψη η επίδραση μακροχρόνιας φόρτισης και τυχόν δυσμενών περιβαλλοντικών παραγόντων (βλ. Κεφ. 9).



**Σχ. 2.1** Τυπικές καμπύλες εφελκυστικής τάσης-παραμόρφωσης για διάφορους τύπους ινών και σύγκριση με απλοποιημένες καμπύλες για χάλυβα.

Οι ίνες **άνθρακα** (πυκνότητα  $1800-1900 \text{ kg/m}^3$ ) παρασκευάζονται είτε από θερμική κατεργασία του πολυακρυλονιτριλίου (PAN) είτε μέσω απόσταξης κάρβουνου (pitch). Οι πρώτες χαρακτηρίζονται γενικά από μεγαλύτερες αντοχές και μέτρα ελαστικότητας σε σύγκριση με τις δεύτερες. Οι ίνες **γυαλιού** (παρασκευάζονται από λειωμένο γυαλί, πυκνότητα  $2300-2500 \text{ kg/m}^3$ ) μπορεί να είναι: (α) τύπου E, που είναι ο κοινός και πλέον συνηθισμένος τύπος γυαλιού (με βασικό μειονέκτημα την μείωση της αντοχής σε αλκαλικό περιβάλλον, όπως είναι αυτό του σκυροδέματος)· (β) τύπου Z (ή AR), με μεγάλη αντοχή στο αλκαλικό περιβάλλον· και (γ) τύπου S, με κύρια χαρακτηριστικά την υψηλή αντοχή και το υψηλό μέτρο ελαστικότητας. Ένα πλεονέκτημα των ινών γυαλιού (έναντι των άλλων τύπων) είναι το αρκετά χαμηλότερο κόστος. Τέλος, οι ίνες **αραμιδίου** (πυκνότητα  $1450 \text{ kg/m}^3$ ) που διατίθενται στη διεθνή αγορά διακρίνονται σε αυτές οι οποίες προέρχονται από αρωματικό πολυαμίδιο (Κέβλαρ, Twaron) και σε εκείνες οι οποίες προέρχονται από αρωματικό πολυαιθεραμίδιο (Technora). Κύριο πλεονέκτημά τους είναι η πολύ καλή συμπεριφορά σε κρουστικά φορτία, γι' αυτό και τα τελευταία

χρόνια προτιμούνται (π.χ. στη Μ. Βρετανία) για την κατασκευή μανδύων σε υποστυλώματα γεφυρών, όπου υπάρχει κίνδυνος πρόσκρουσης οχημάτων.

**Πίνακας 2.1** Ενδεικτικές ιδιότητες ινών (Feldman 1989, Kim 1995).

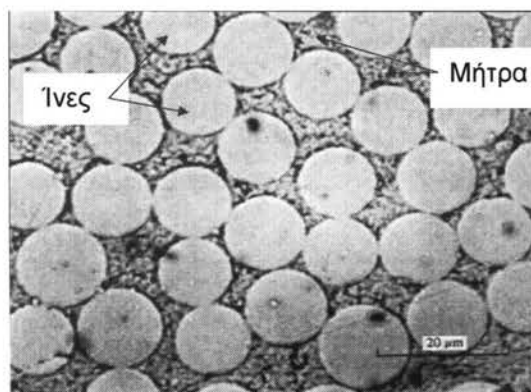
| Υλικό   | Μέτρο ελαστικότητας (GPa) | Εφελκυστική αντοχή (MPa) | Οριακή παραμόρφωση εφελκυστικής αστοχίας (%) |
|---|---------------------------|--------------------------|--|
| <i>Άνθρακας</i>                                 |                           |                          |  |
| Υψηλής αντοχής                                  | 215-235                   | 3500-4800                | 1.4-2.0                                      |
| Υπερ-υψηλής αντοχής                             | 215-235                   | 3500-6000                | 1.5-2.3                                      |
| Υψηλού μέτρου ελαστικότητας                     | 350-500                   | 2500-3100                | 0.5-0.9                                      |
| Υπερ-υψηλού μέτρου ελαστικ.                     | 500-700                   | 2100-2400                | 0.2-0.4                                      |
| <i>Γυαλί</i>                                    |                           |                          |  |
| E   | 70-75                     | 1900-3000                | 3.0-4.5                                      |
| Z   | 70-75                     | 1900-3000                | 3.0-4.5                                      |
| S   | 85-90                     | 3500-4800                | 4.5-5.5                                      |
| <i>Αραμίδιο</i>                                 |                           |                          |  |
| Χαμηλού μέτρου ελαστικότητας (Κέβλαρ 29)        | 70-80                     | 3500-4100                | 4.3-5.0                                      |
| Υψηλού μέτρου ελαστικότητας (Κέβλαρ 49, Twaron) | 115-130                   | 3500-4000                | 2.5-3.5                                      |

### 2.1.3 Μήτρα

Η μήτρα στα σύνθετα υλικά αποτελεί τη συγκολλητική ύλη μεταξύ των ινών. Συνήθως είναι ένα θερμοσκληρυνόμενο πολυμερές, το οποίο συνδέει τις ίνες μεταξύ τους, τις προστατεύει, εξασφαλίζει την μεταφορά δυνάμεων σε αυτές, αλλά καθορίζει και αρκετές μηχανικές ιδιότητες των συνθέτων υλικών, όπως είναι η αντοχή κάθετα στη διεύθυνση των ινών, η διατμητική και η θλιπτική αντοχή. Ο πλέον συνηθισμένος (καίτοι ακριβότερος) τύπος μήτρας είναι οι εποξειδικές ρητίνες, σπανιότερα όμως χρησιμοποιείται πολυεστέρας ή βινυλεστέρας. Οι εποξειδικές ρητίνες υπερέχουν των άλλων τύπων μήτρας λόγω των εξαιρετικών μηχανικών χαρακτηριστικών και της μεγάλης ανθεκτικότητας σε δυσμενείς περιβαλλοντικές επιδράσεις.

### 2.1.4 Σύνθετα υλικά

Τα σύνθετα υλικά που εφαρμόζονται στο πεδίο των ενισχύσεων προκύπτουν από τον συνδυασμό συνεχών ινών, συνήθως μίας διεύθυνσης, και πολυμερικής μήτρας (γι' αυτό ονομάζονται και ινοπλισμένα πολυμερή). Στην περίπτωση ελασμάτων συνθέτων υλικών (π.χ. για την καμπτική ενίσχυση δοκών) οι ίνες καταλαμβάνουν περίπου το 50-70% του συνολικού όγκου υλικού (Σχ. 2.2), ενώ το αντίστοιχο ποσοστό για μανδύες που κατασκευάζονται με επί τόπου εφαρμογή της ρητίνης είναι 20-35%.



Σχ. 2.2 Τομή ελάσματος συνθέτου υλικού σε μεγέθυνση.

Οι βασικές μηχανικές ιδιότητες των συνθέτων υλικών με ίνες σε μία κυρίως διεύθυνση μπορούν είτε να μετρηθούν πειραματικά (αυτός είναι ο ορθότερος τρόπος εύρεσης των ιδιοτήτων αυτών), είτε να εκτιμηθούν βάσει των αντιστοιχών για τις ίνες και τη μήτρα, μέσω της σχέσης που είναι γνωστή και ως “κανόνας ανάμιξης”:

$$E_f \approx E_{fib} V_{fib} + E_m V_m \quad (2.1)$$

$$f_f \approx f_{fib} V_{fib} + f_m V_m \quad (2.2)$$

όπου:

- $E_f$  = μέτρο ελαστικότητας συνθέτων υλικών παράλληλα στις ίνες
- $E_{fib}$  = μέτρο ελαστικότητας ινών
- $E_m$  = μέτρο ελαστικότητας μήτρας
- $V_{fib}$  = ογκομετρικό ποσοστό ινών
- $V_m$  = ογκομετρικό ποσοστό μήτρας =  $1 - V_{fib}$
- $f_f$  = εφελκυστική αντοχή συνθέτων υλικών παράλληλα στις ίνες
- $f_{fib}$  = εφελκυστική αντοχή ινών
- $f_m$  = εφελκυστική αντοχή μήτρας

Εδώ πρέπει να τονισθεί ότι επειδή  $E_{fib}/E_m \gg 1$  και  $f_{fib}/f_m \gg 1$ , οι παραπάνω εξισώσεις ισχύουν κατά προσέγγιση ακόμα και αν στα αθροίσματα του δεξιού σκέλους αγνοηθούν οι δεύτεροι όροι. Δηλαδή, τόσο το μέτρο ελαστικότητας, όσο και η εφελκυστική αντοχή των συνθέτων υλικών ουσιαστικά μπορούν να εκτιμηθούν από το γινόμενο της αντίστοιχης ιδιότητας για τις ίνες επί το ογκομετρικό ποσοστό αυτών.

Οι προμηθευτές συστημάτων ενίσχυσης με βάση τα σύνθετα υλικά διαθέτουν στην αγορά συνήθως είτε προκατασκευασμένα ελάσματα, οπότε η παραγωγή του σύνθετου υλικού έχει γίνει σε βιομηχανική μονάδα, είτε υφάσματα με ίνες μίας διεύθυνσης. Στην πρώτη περίπτωση οι μηχανικές ιδιότητες των συνθέτων υλικών είναι γνωστές εκ των προτέρων, π.χ. βάσει εργαστηριακών μετρήσεων. Στη δεύτερη όμως, όπου η επικόλληση των ινών με τη μήτρα γίνεται επί τόπου του έργου, υπάρχει μία σχετική αβεβαιότητα ως προς την ποσότητα ρητίνης η οποία θα εμποτίσει τις ίνες, και άρα ως προς το τελικό ογκομετρικό ποσοστό ινών στο σύνθετο υλικό. Οι πιθανές λύσεις σχετικά με τις τιμές ιδιοτήτων των συνθέτων υλικών που θα πρέπει να υιοθετηθούν στους υπολογισμούς είναι δύο: (α) Χρήση των ιδιοτήτων των τελικώς διαμορφωμένων συστημάτων (συνθέτων υλικών) όπως αυτές έχουν μετρηθεί (εργαστηριακά) από τον προμηθευτή με βάση τη χρήση δεδομένης ποσότητας ρητίνης. (β) Χρήση των ιδιοτήτων των ινών, αφού προηγηθεί ελαφρά μείωση (βάσει πολλαπλασιασμού με μειωτικό συντελεστή  $r_1$ , ο οποίος θα πρέπει να έχει προσδιοριστεί πειραματικά από τον προμηθευτή). Τα παραπάνω καταδεικνύονται μέσω του Παραδείγματος 2.1.

## Παράδειγμα 2.1

Ο προμηθευτής υλικών Χ διαθέτει εύκαμπτα υφάσματα ινών άνθρακα μίας διεύθυνσης με πλάτος 0.70 m και βάρος 260 g/m<sup>2</sup>. Ιδιότητες ινών: έστω μέτρο ελαστικότητας  $E_{fib} = 230$  GPa και εφελκυστική αντοχή  $f_{fib} = 3500$  MPa. Το ονομαστικό πάχος του υφάσματος,  $t_{fib}$ , υπολογίζεται με βάση το βάρος του και την (γνωστή) πυκνότητα του υλικού των ινών,  $\rho_{fib}$ :  $\rho_{fib} \times t_{fib} = 260$ , έστω  $\rho_{fib} = 2000$  g/m<sup>2</sup>, οπότε  $t_{fib} = 0.13$  mm. Υποθέτουμε ότι μετά τον εμποτισμό με την απαιτούμενη ποσότητα ρητίνης το πάχος του συνθέτου υλικού φθάνει τα 0.3 mm, το οποίο σημαίνει ότι το ογκομετρικό ποσοστό ινών είναι  $V_{fib} = 0.13/0.3 = 43\%$ . Αν υπήρχε η δυνατότητα πειραματικού προσδιορισμού της εφελκυστικής αντοχής και του μέτρου ελαστικότητας του συνθέτου υλικού μετά την εφαρμογή της ρητίνης θα προέκυπταν τιμές μικρότερες από 0.43x230 GPa και 0.43x3500 MPa, αντίστοιχα, έστω κατά 10% (οπότε  $r_1 = 0.9$ ): 89 GPa και 1355 MPa. Επομένως, στους υπολογισμούς θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν:

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

(β)  $E_f = 0.9 \times 230$  GPa,  $f_f = 0.9 \times 3500$  MPa,  $t_f = 0.13$  mm.

Σε μία πραγματική εφαρμογή, η ποσότητα ρητίνης εμποτισμού θα είναι ενδεχομένως διαφορετική από αυτήν που προτείνει ο προμηθευτής των υλικών, γι' αυτό και το πραγματικό πάχος του συνθέτου υλικού θα διαφέρει από τα 0.3 mm. Αυτό όμως που πραγματικά ενδιαφέρει στους υπολογισμούς είναι συνήθως το γινόμενο  $E_f t_f$  (και σπανιότερα το  $f_f t_f$ ), οπότε οι παραπάνω λύσεις (α) και (β) είναι **ισοδύναμες**. Το πλεονέκτημα της (α) είναι ότι οι ιδιότητες που παρέχει ο προμηθευτής προσεγγίζουν καλύτερα αυτές που θα έχει το σύνθετο υλικό στην πράξη, ενώ το μειονέκτημα είναι ότι οι ιδιότητες αυτές είναι "πλασματικές", δεν αντιστοιχούν δηλαδή στο προϊόν αγοράς (ύφασμα) αλλά σε ένα "υποθετικό" προϊόν, το οποίο θα μπορέσουμε να κατασκευάσουμε μόνο κάτω από αυστηρές προϋποθέσεις ποιοτικού ελέγχου. Από την άλλη, η λύση (β) έχει το πλεονέκτημα ότι τα υλικά αγοράς (υφάσματα) συνοδεύονται και από τις ιδιότητές τους, ενώ μέσω του μειωτικού συντελεστή  $r_1$  (0.9 στο παράδειγμά μας) μπορούν εύκολα να προκύψουν οι ιδιότητες του τελικού προϊόντος.

### 2.1.5 Κόλλα

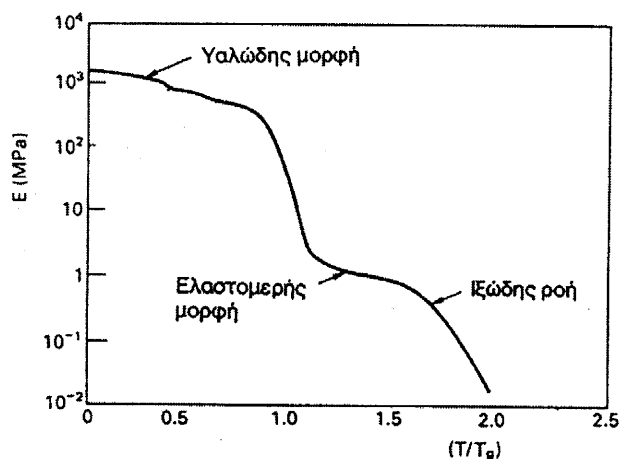
Η κόλλα (κατά κανόνα εποξειδική ρητίνη δύο συστατικών) εφαρμόζεται μεταξύ του σκυροδέματος και του συνθέτου υλικού, εξασφαλίζοντας έτσι τη συνεργασία τους και τη μεταφορά τάσεων από το πρώτο στο δεύτερο. Η χρήση εποξειδικών ρητινών στις κατασκευές προϋποθέτει την κατανόηση τριών βασικών εννοιών. Η πρώτη είναι ο **χρόνος εργασιμότητας** (pot life), η δεύτερη είναι ο **χρόνος εφαρμογής** (open time) και η τρίτη είναι η **θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης**,  $T_g$  (glass transition temperature).

Ο χρόνος εργασιμότητας είναι αυτός που έχει κανείς στη διάθεσή του για να χρησιμοποιήσει την κόλλα με ευκολία πριν αρχίσει να μειώνεται το ιξώδες της και να σκληρύνεται στο δοχείο όπου έγινε η ανάμιξη. Εξαρτάται από τον τύπο κόλλας, από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος αλλά και από την ποσότητα κόλλας που προκύπτει με την ανάμιξη των δύο συστατικών. Ενδεικτικοί χρόνοι για ποσότητα (τυπικής) κόλλας 5 kg είναι 90 min σε 15 °C και 30 min σε 35 °C.

Ο χρόνος εφαρμογής αντιπροσωπεύει το χρονικό διάστημα μέσα στο οποίο η κόλλα είναι ενεργή, δηλαδή έχει ικανοποιητικές συγκολλητικές ιδιότητες. Μέσα σε αυτό το διάστημα θα πρέπει να ολοκληρώνεται η επικόλληση του σπλισμού ενίσχυσης στην επιφάνεια του σκυροδέματος.

Τέλος, στη θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης (χαρακτηριστική ιδιότητα όλων των πολυμερών) οι κόλλες υφίστανται ραγδαία απομείωση του μέτρου ελαστικότητας (Σχ. 2.3), οπότε έχουν περιορισμένη πλέον ικανότητα μεταφοράς δυνάμεων.

Μία σύνοψη ιδιοτήτων (και σύγκριση αυτών με τις αντίστοιχες για σκυρόδεμα και χάλυβα) για συνηθισμένες εποξειδικές ρητίνες που χρησιμοποιούνται σε τεχνικά έργα δίνεται στον Πίνακα 2.2.



**Σχ. 2.3** Επίδραση της θερμοκρασίας στο μέτρο ελαστικότητας των πολυμερών (Τριανταφύλλου - 2001).

**Πίνακας 2.2** Ενδεικτικές ιδιότητες εποξειδικών ρητινών και σύγκριση με σκυρόδεμα και χάλυβα (*fib* 2001).

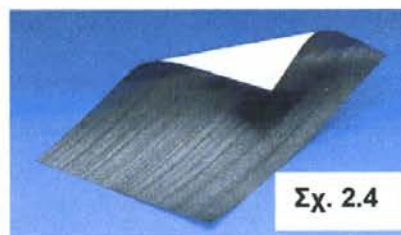
| Ιδιότητα (σε 20 °C)                                    | Εποξειδική ρητίνη | Σκυρόδεμα | Χάλυβας                          |
|--|-------------------|-----------|----------------------------------|
| Πυκνότητα (kg/m <sup>3</sup> )                         | 1100-1700         | 2350      | 7800                             |
| Μέτρο ελαστικότητας (GPa)                              | 0.5-20            | 20-50     | 205                              |
| Μέτρο διάτμησης (GPa)                                  | 0.2-8             | 8-21      | 80                               |
| Λόγος Poisson  | 0.3-0.4           | 0.2       | 0.3                              |
| Εφελκυστική αντοχή (MPa)                               | 9-30              | 1-4       | 200-600                          |
| Διατμητική αντοχή (MPa)                                | 10-30             | 2-5       | 150-400                          |
| Θλιπτική αντοχή (MPa)                                  | 55-110            | 25-150    | 200-600                          |
| Οριακή παραμόρφωση σε εφελκυσμό (%)                    | 0.5-5             | 0.015     | 20-25                            |
| Ενέργεια θραύσης (Jm <sup>-2</sup> ) – κατά προσέγγιση | 200-1000          | 100       | 10 <sup>5</sup> -10 <sup>6</sup> |
| Συντελεστής θερμικής διαστολής (10 <sup>-6</sup> /°C)  | 25-100            | 11-13     | 10-15                            |
| Υδαταπορροφητικότητα: 7 ημ. - 25 °C (% κ.β.)           | 0.1-3             | 5         | 0                                |
| Θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης (°C)                   | 50-80             | ---       | ---                              |

## 2.2 Συστήματα ενίσχυσης

Τα συστήματα ενίσχυσης στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος με σύνθετα υλικά είναι γενικά δύο τύπων: (α) “υγρής εφαρμογής” (ή “επί τόπου σκλήρυνσης” της μήτρας) και (β) “προκατασκευασμένα” (η σκλήρυνση της μήτρας έχει προηγηθεί της εφαρμογής). Η παρουσίαση αυτών γίνεται συνοπτικά παρακάτω (π.χ. ACI 1996).

### 2.2.1 Συστήματα υγρής εφαρμογής

- Φύλλα (sheets) ή υφάσματα (fabrics) αποτελούμενα από συνεχείς ίνες μίας (κυρίως) διεύθυνσης (Σχ. 2.4), χωρίς μήτρα (“ξηρή” κατάσταση). Για την εφαρμογή τους απαιτείται συνήθως η εφαρμογή “ασταρώματος” στο σκυρόδεμα και ακολούθως ο εμποτισμός των ινών με ρητίνη, βάσει μίας εκ των εξής μεθόδων:



Σχ. 2.4

- εφαρμογή της ρητίνης στο σκυρόδεμα, τοποθέτηση των ινών απευθείας στη ρητίνη
- προεμποτισμός των ινών (επί τόπου στο έργο αλλά όχι επάνω στο υπό ενίσχυση στοιχείο) με ρητίνη και ακολούθως επικόλληση

- Υφάσματα (fabrics) αποτελούμενα από συνεχείς ίνες σε τουλάχιστον δύο διευθύνσεις (π.χ.  $0^\circ$  και  $90^\circ$  ή  $\pm 45^\circ$  σε σχέση με τον άξονα του υπό ενίσχυση μέλους, Σχ. 2.5), χωρίς μήτρα (“ξηρή” κατάσταση). Η εφαρμογή τους γίνεται όπως περιγράφεται στις παραπάνω δύο περιπτώσεις.



Σχ. 2.5

- Φύλλα (sheets) ή υφάσματα (fabrics) αποτελούμενα από συνεχείς ίνες μίας (κυρίως) διεύθυνσης, προεμποτισμένα με ρητίνη (μήτρα) σε μη σκληρυμένη μορφή. Η εφαρμογή τους γίνεται με ή χωρίς επί πλέον ρητίνη.
- Φύλλα (sheets) ή υφάσματα (fabrics) αποτελούμενα από συνεχείς ίνες σε τουλάχιστον δύο διευθύνσεις, προεμποτισμένα με ρητίνη (μήτρα) σε μη σκληρυμένη μορφή. Η εφαρμογή τους γίνεται με ή χωρίς επί πλέον ρητίνη.
- Συνεχείς ίνες χωρίς μήτρα (“ξηρή” κατάσταση), συγκεντρωμένες σε μορφή νήματος (tow), το οποίο εμποτίζεται με ρητίνη ενώ τυλίγεται (π.χ. με αυτοματοποιημένο τρόπο) στο στοιχείο σκυροδέματος.

- Προεμποτισμένες συνεχείς ίνες, συγκεντρωμένες σε μορφή νήματος (tow), το οποίο ενώ τυλίγεται (π.χ. με αυτοματοποιημένο τρόπο) στο στοιχείο σκυροδέματος, ενδεχομένως να υφίσταται και πρόσθετο εμποτισμό.

## 2.2.2 Προκατασκευασμένα υλικά

- Προκατασκευασμένα ευθύγραμμα (και σχετικά δύσκαμπτα) ελάσματα (strips), τα οποία επικολλούνται μέσω ρητίνης. Τα ελάσματα διατίθενται συνήθως σε μορφή ρόλλων (“κουλούρες”), και παράγονται με τη μέθοδο της εξέλασης (pultrusion), ή, σπανιότερα, της στρωμάτωσης (lamination). Στη μέθοδο της εξέλασης οι ίνες είναι κατά κανόνα συνεχείς και παράλληλες στη διεύθυνση των ελασμάτων, ενώ η στρωμάτωση επιτρέπει τη χρήση ινών σε διαφορετικές διευθύνσεις (π.χ. παράλληλες και κάθετες στη διεύθυνση των ελασμάτων, ή και υπό γωνίες  $\pm 45^\circ$ ).
- Προκατασκευασμένα κελύφη (shells), μανδύες (jackets) ή γωνίες (angles), τα οποία επικολλούνται μέσω ρητίνης.

Γενικά μπορεί να διατυπωθεί το συμπέρασμα ότι τα προκατασκευασμένα ελάσματα προτιμούνται έναντι των υφασμάτων (ή φύλλων) όταν η εφαρμογή γίνεται σε επίπεδες επιφάνειες (π.χ. καμπτική ενίσχυση δοκών ή πλακών), ενώ σε άλλες περιπτώσεις (π.χ. μανδύες υποστυλωμάτων, διατμητική ενίσχυση δοκών) η εφαρμογή υφασμάτων μέσω της υγρής μεθόδου είναι προτιμητέα.

## 2.3 Τεχνικές εφαρμογής

### 2.3.1 Βασική τεχνική

Η βασική τεχνική, η οποία είναι και η πλέον συνηθισμένη (και εφαρμόζεται κατ' αποκλειστικότητα στη χώρα μας), περιλαμβάνει την δια χειρός επικόλληση είτε υφασμάτων (προεμποτισμένων με ρητίνη ή μη προεμποτισμένων), είτε προκατασκευασμένων στοιχείων (π.χ. ελάσματα) σε στοιχεία οπλισμένου σκυροδέματος, μέσω εποξειδικών ρητινών. Παραδείγματα εφαρμογής δίνονται στο Σχ. 2.6.



Έλασμα για αύξηση  
καμπτικής αντοχής  
δοκού

Ύφασμα για αύξηση  
διατμητικής αντοχής  
δοκού



Επικόλληση ελασμάτων για την  
ενίσχυση καταστρώματος γέφυρας



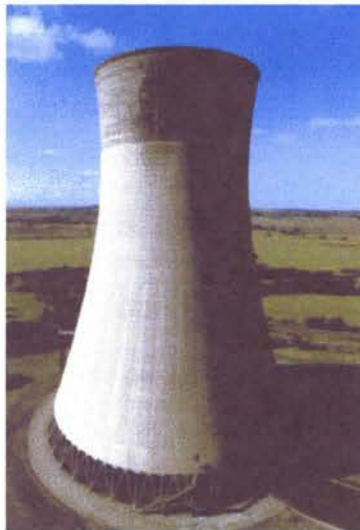
Περιτύλιξη υποστυλώματος  
με ύφασμα



Εμποτισμός υφάσματος σε  
ειδική “μπανιέρα” ρητίνης



Εφαρμογή προ-εμποτισμένου  
υφάσματος σε υποστύλωμα



Ενίσχυση του κελύφους  
πύργου ψύξης με υφάσματα  
συνθέτων υλικών

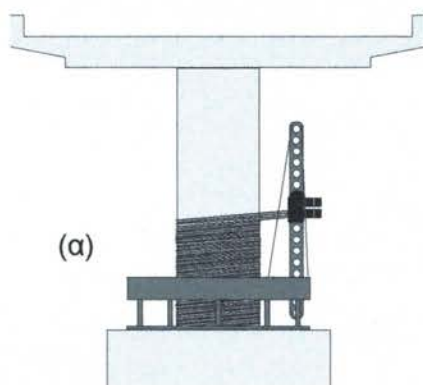
Σχ. 2.6 Παραδείγματα εφαρμογής της βασικής τεχνικής.

### 2.3.2 Ειδικές τεχνικές

Οι περισσότερες από τις παρακάτω τεχνικές δεν έχουν τύχει ακόμα ευρείας εφαρμογής στη χώρα μας, αλλά αναφέρονται παρακάτω κυρίως για λόγους πληρότητας.

#### 2.3.2.1 Αυτοματοποιημένη περιτύλιξη

Η τεχνική της αυτοματοποιημένης περιτύλιξης “νημάτων” αναπτύχθηκε στην Ιαπωνία στις αρχές της δεκαετίας του '90 και λίγο αργότερα στις ΗΠΑ. Περιλαμβάνει την χωρίς διακοπή περιτύλιξη προεμπροτισμένων με ρητίνη νημάτων υπό μικρή γωνία γύρω από υποστυλώματα γεφυρών ή άλλα στοιχεία (π.χ. καπνοδόχοι), μέσω ειδικής συσκευής-ρομπότ (Σχ. 2.7). Βασικό πλεονέκτημα της τεχνικής, πλέον του καλού ποιοτικού ελέγχου, είναι η μεγάλη ταχύτητα εφαρμογής.



(α)

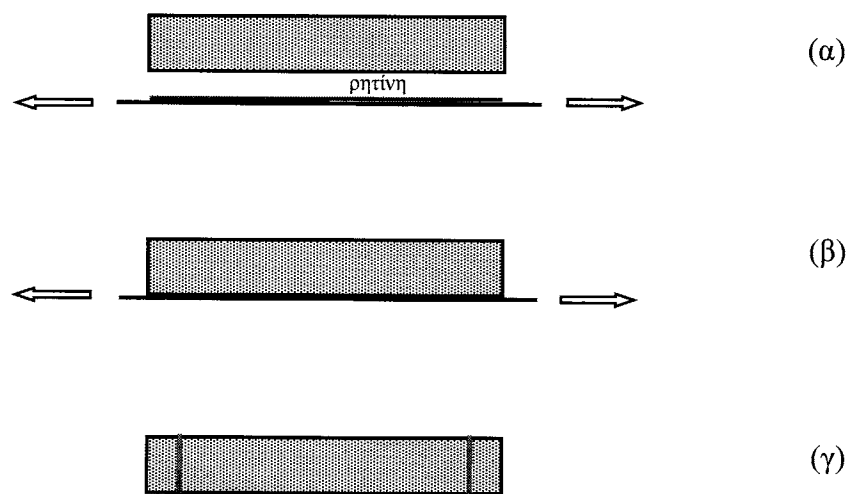


(β)

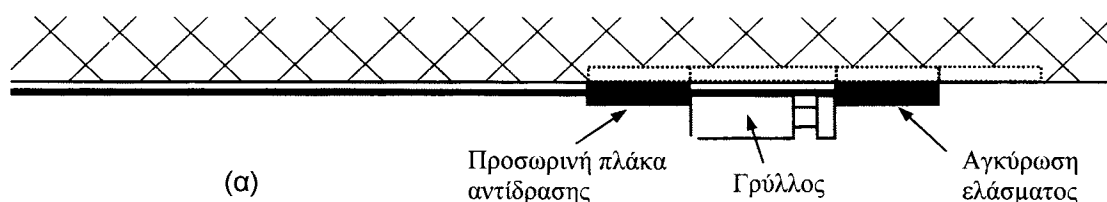
Σχ. 2.7 Αυτοματοποιημένη περιτύλιξη προεμπροτισμένων “νημάτων”. (α) Σχηματική διάταξη, (β) φωτογραφία συσκευής-ρομπότ.

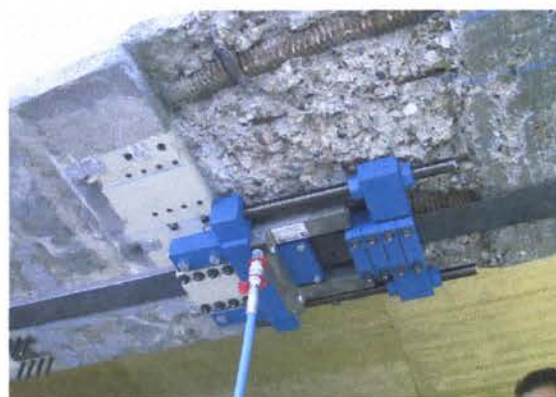
### 2.3.2.2 Εφαρμογή με προένταση

Η μέθοδος προέντασης, η οποία αναπτύχθηκε στις αρχές της δεκαετίας του '90 (Triantafyllou and Deskovic 1991, Deuring 1993), περιλαμβάνει την επικόλληση ελασμάτων ενώ αυτά βρίσκονται υπό τάνυση (Σχ. 2.8). Έτσι εκμεταλλευόμαστε τα βασικά πλεονεκτήματα της προέντασης (αύξηση δυσκαμψίας, καθυστέρηση ρηγμάτωσης, μείωση πλάτους ρωγμών, αύξηση καμπτικής και διατμητικής αντοχής σε σχέση με την εφαρμογή της τεχνικής χωρίς προένταση κλπ), με τίμημα την αύξηση του κόστους αλλά και του βαθμού πολυπλοκότητας της μεθόδου εφαρμογής, λόγω της ανάγκης για τη χρήση ειδικών αγκυρώσεων (π.χ. Σχ. 2.9).



**Σχ. 2.8** Σχηματική διάταξη προέντασης με ελάσματα συνθέτων υλικών. (α) Προένταση, (β) επικόλληση υπό τάνυση, (γ) αγκύρωση άκρων και αποφόρτιση (μετά τη σκλήρυνση της ρητίνης).





(β)

**Σχ. 2.9** Διάταξη εφαρμογής προέντασης ελάσματος και αγκύρωσης στο άκρο. (α) Σχηματικά, (β) φωτογραφία.

Η τεχνική της προέντασης μπορεί να εφαρμοστεί και σε μανδύες υποστυλωμάτων, π.χ. είτε εφαρμόζοντας τα σύνθετα υλικά με τις ίνες υπό τάνυση, είτε εισάγοντας στο κενό μεταξύ του μανδύα και σκυροδέματος ρητίνη υπό πίεση ή διογκούμενο κονίαμα (Σχ. 2.10).

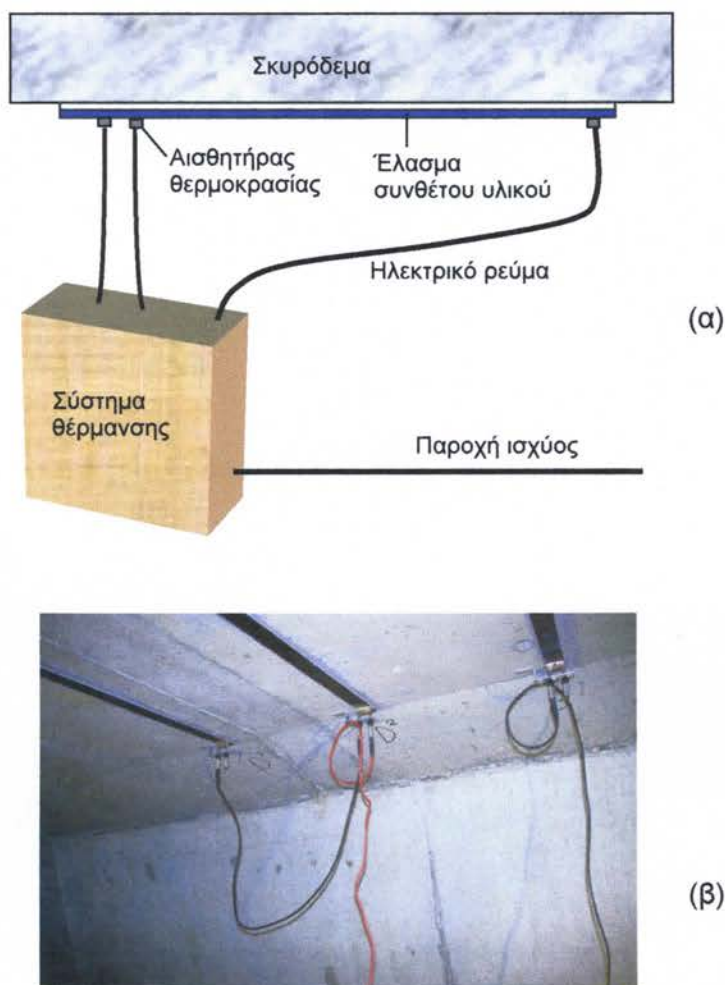


**Σχ. 2.10** Κατασκευή ελλειπτικού μανδύα στην κρίσιμη περιοχή υποστυλώματος και προένταση με χρήση διογκούμενου κονιάματος στο κενό μεταξύ σκυροδέματος και μανδύα.

### 2.3.2.3 Επιταχυμένη σκλήρυνση με θέρμανση

Η σκλήρυνση της εποξειδικής ρητίνης στη διεπιφάνεια ελασμάτων-σκυροδέματος μπορεί να επιταχυνθεί σημαντικά μέσω της χρήσης ειδικών συσκευών θέρμανσης (π.χ. θερμαντικά σώματα, συσκευές θέρμανσης με βάση υπέρυθρες ακτίνες, θερμαντικά καλύμματα), με παράλληλη εκμετάλλευση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας των ινών άνθρακα (Σχ. 2.11). Έτσι αυξάνεται σημαντικά η ταχύτητα εφαρμογής της ενίσχυσης (π.χ. τρεις ώρες θέρμανσης σε 70 °C αρκούν για πλήρη σκλήρυνση), ακόμα και σε

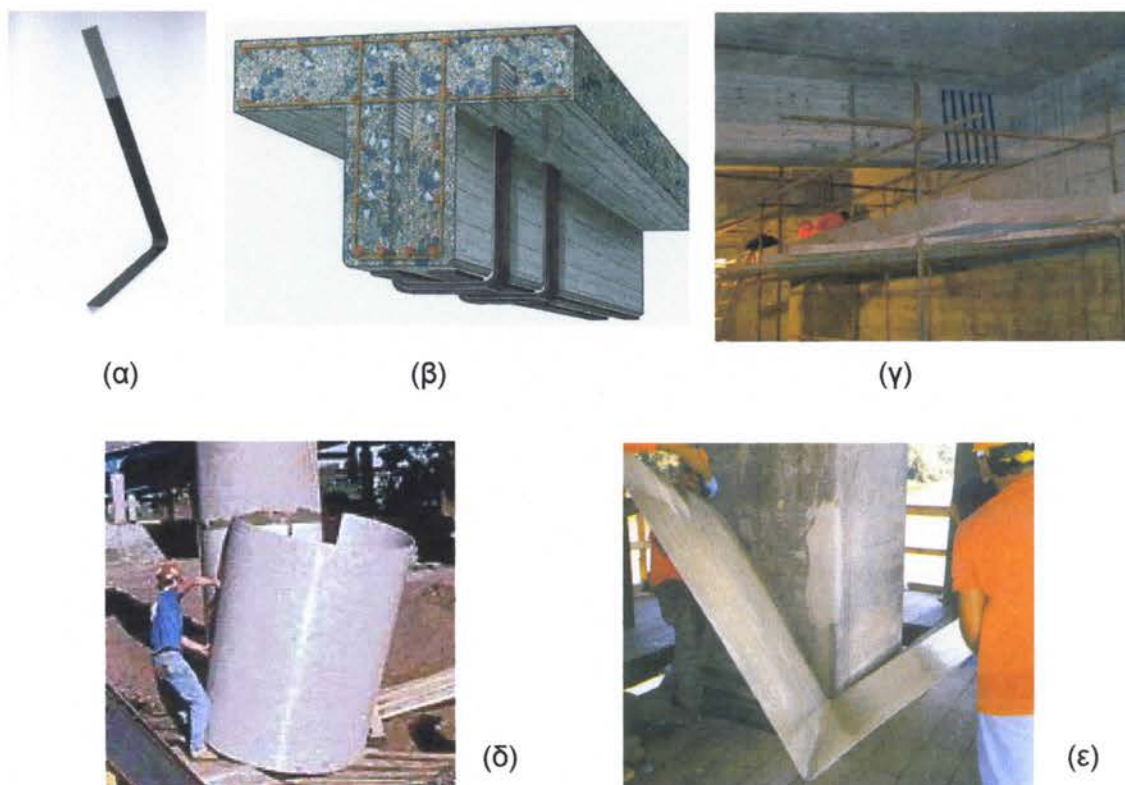
περιπτώσεις που η τελευταία θα ήταν αδύνατη (π.χ. λόγω χαμηλής θερμοκρασίας, οπότε δεν ευνοείται η σκλήρυνση της ρητίνης). Πρόσθετο πλεονέκτημα της επιταχυσμένης σκλήρυνσης είναι η αύξηση της θερμοκρασίας υαλώδους μετάπτωσης της ρητίνης.



**Σχ. 2.11** Συσσκευή ταχείας σκλήρυνσης της ρητίνης μέσω θέρμανσης. (α) Αρχή λειτουργίας, (β) φωτογραφία καλωδίωσης στα άκρα των ελασμάτων.

#### 2.3.2.4 Προκατασκευασμένα στοιχεία

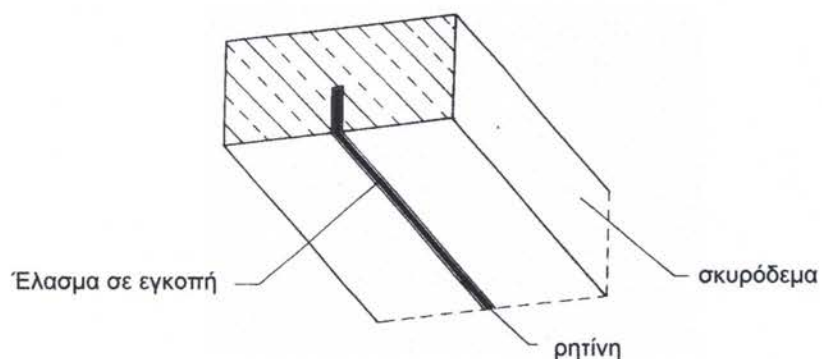
Τα προκατασκευασμένα στοιχεία από σύνθετα υλικά είναι συνήθως μορφής: (α) Ελάσματος (πάχους της τάξης του 1 mm και πλάτους π.χ. 50 mm, 100 mm). (β) Γωνιών, που χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές ενίσχυσης (π.χ. πλακοδοκών) έναντι τέμνουσας (Σχ. 2.12α-γ). (γ) Μανδύα-κελύφους (Σχ. 2.12δ,ε), που τοποθετείται περιμετρικά υποστυλωμάτων με στόχο την αύξηση της περίσφιγξης ή της διατμητικής αντοχής.



**Σχ. 2.12** Παραδείγματα εφαρμογής προκατασκευασμένων στοιχείων. (α) Γωνιές, (β)-(γ) εφαρμογή γωνιών για την ενίσχυση δοκού σε διάτμηση, (δ) εφαρμογή μανδύα μορφής κελύφους, (ε) εφαρμογή μανδύα σε τεμάχια.

### 2.3.2.5 Εφαρμογή σε εγκοπές

Η τοποθέτηση και επικόλληση (μέσω εποξειδικής ρητίνης) ράβδων ή ελασμάτων σε εγκοπές (Σχ. 2.13, 2.14) αποσκοπεί συνήθως στην αύξηση της καμπτικής αντοχής υφισταμένων μελών σκυροδέματος.



**Σχ. 2.13** Τοποθέτηση ελασμάτων σε εγκοπές.



Σχ. 2.14 Τοποθέτηση ράβδων σε εγκοπές.

Κύριο πλεονέκτημα της τεχνικής αυτής, σε σχέση με την επιφανειακή επικόλληση, είναι η εξαιρετικά βελτιωμένη συνάφεια των συνθέτων υλικών με το σκυρόδεμα και εν γένει η καλύτερη προστασία τους.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

### ΒΑΣΕΙΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ

### 3.1 Γενικά

Ο σχεδιασμός ενισχύσεων με σύνθετα υλικά ακολουθεί τη φιλοσοφία των σύγχρονων κανονισμών (π.χ. ΕΚΩΣ 2000, ΕΑΚ 2000), και περιλαμβάνει όλους τους γνωστούς ελέγχους των οριακών καταστάσεων αντοχής και λειτουργικότητας, με τροποποιήσεις όπου χρειάζεται ώστε να ληφθεί υπόψη η συνεισφορά των συνθέτων υλικών. Ειδική μνεία χρειάζεται μόνον η ακραία περίπτωση πρόωρης αστοχίας των οπλισμών ενίσχυσης, π.χ. λόγω πυρκαϊάς. Η περίπτωση αυτή αντιμετωπίζεται εν γένει ως τυχηματική δράση (και κατά πάσα πιθανότητα δεν απαιτούνται ειδικά μέτρα πυροπροστασίας, όπως π.χ. σε πολλές εφαρμογές αντισεισμικών ενισχύσεων), σε ειδικές όμως περιπτώσεις που πρέπει να ικανοποιούνται συγκεκριμένες απαιτήσεις πυροπροστασίας, η μελέτη ενίσχυσης θα πρέπει να περιλαμβάνει τον σχεδιασμό αντιστοίχων συστημάτων (π.χ. ειδικά επιχρίσματα ή γυψοσανίδες). Περισσότερα στοιχεία για ειδικά θέματα ανθεκτικότητας και προστασίας των συνθέτων υλικών δίνονται στο Κεφάλαιο 9.

### 3.2 Καταστατικοί νόμοι των υλικών

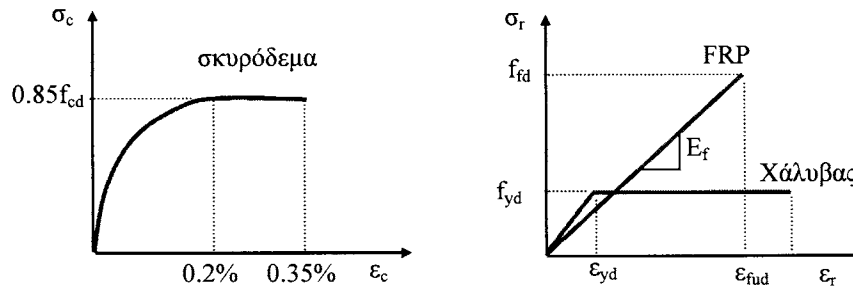
Ακολουθώς περιγράφονται οι καταστατικοί νόμοι των υλικών σε μονοαξονική φόρτιση και δίνονται οι τιμές για τους μερικούς συντελεστές ασφάλειας.

#### 3.2.1 Οριακή κατάσταση αντοχής – πλήρης συνεργασία υλικών

Για το σκυρόδεμα και τον χάλυβα ισχύουν οι υποθέσεις που υιοθετούνται στο σχεδιασμό κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος (π.χ. ΕΚΩΣ 2000), Σχ. 3.1. Έτσι η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος είναι  $0.85f_{cd} = 0.85f_{ck} / \gamma_c$ , όπου  $f_{ck}$  = χαρακτηριστική αντοχή (κυλίνδρου) και  $\gamma_c = 1.5$ . Η τιμή σχεδιασμού της τάσης διαρροής του χάλυβα είναι  $f_{yd} = f_{yk} / \gamma_s$ , όπου  $f_{yk}$  = χαρακτηριστική τιμή τάσης διαρροής και  $\gamma_s = 1.15$ . Η συμπεριφορά των συνθέτων υλικών σε εφελκυσμό θεωρείται γραμμικά ελαστική μέχρι την θραύση, η οποία επέρχεται σε τάση (σχεδιασμού)  $f_{fd} = f_{fk} / \gamma_f$ :

$$\sigma_f = E_f \varepsilon_f \leq f_{fd} \quad (3.1)$$

Το μέτρο ελαστικότητας προσδιορίζεται από το λόγο των χαρακτηριστικών τιμών εφελκυστικής αντοχής προς οριακή παραμόρφωση,  $E_f = f_{fk} / \varepsilon_{fuk}$ .



**Σχ. 3.1** Σχέσεις τάσης-παραμόρφωσης υλικών για την οριακή κατάσταση αντοχής.

Σε μερικές περιπτώσεις, η επί τόπου εφελκυστική αντοχή των συνθέτων υλικών είναι μικρότερη αυτής που προκύπτει από εργαστηριακές δοκιμές εφελκυσμού. Αυτό οφείλεται σε συγκεντρώσεις τάσεων, σε ενδεχόμενη πολυαξονικότητα της εντατικής κατάστασης στα σύνθετα υλικά, στην ύπαρξη σημαντικού αριθμού στρώσεων κλπ. Μπορεί δε να ληφθεί υπόψη στους υπολογισμούς θεωρώντας ότι η αστοχία επέρχεται όταν η παραμόρφωση στα σύνθετα υλικά ισούται με μία “ενεργή” παραμόρφωση,  $\varepsilon_{fue}$ , που κατά κανόνα είναι μικρότερη από την μέση οριακή παραμόρφωση αστοχίας,  $\varepsilon_{fum}$  (η τελευταία προσδιορίζεται μέσω δοκιμής εφελκυσμού). Βάσει των παραπάνω, η ενεργή αντοχή σχεδιασμού  $f_{fde}$  για τα σύνθετα υλικά σε εφελκυσμό μπορεί να υπολογισθεί ως εξής:

$$f_{fde} = \frac{\varepsilon_{fue}}{\varepsilon_{fum}} \frac{f_{fk}}{\gamma_f} = \eta_e f_{fd} \quad (3.2)$$

Περισσότερα στοιχεία για την ενεργή παραμόρφωση  $\varepsilon_{fue}$  θα δοθούν στην περιγραφή των ενοτήτων όπου ο ρόλος αυτής είναι σημαντικός (π.χ. ενίσχυση σε διάτμηση, περίσφιγξη).

Οι τιμές για τον συντελεστή ασφάλειας των συνθέτων υλικών δίνονται στον Πίνακα 3.1 (*fib* 2001), με την επισημάνση ότι αποτελούν ακόμα αντικείμενο τρέχουσας έρευνας, γι’ αυτό και θα πρέπει να θεωρούνται ως ενδεικτικές.

**Πίνακας 3.1** Συντελεστής ασφάλειας υλικού για τα σύνθετα υλικά,  $\gamma_f$ .

| Τύπος ινών | Εφαρμογή τύπου Α <sup>(1)</sup> | Εφαρμογή τύπου Β <sup>(2)</sup> |
|------------|---------------------------------|---------------------------------|
| Άνθρακας   | 1.20                            | 1.35                            |
| Αραμίδιο   | 1.25                            | 1.45                            |
| Γυαλί      | 1.30                            | 1.50                            |

<sup>(1)</sup> Χρήση ελασμάτων (προκατασκευασμένων) σε συνήθεις συνθήκες. Χρήση υφασμάτων σε συνθήκες υψηλού βαθμού ποιοτικού ελέγχου.

<sup>(2)</sup> Χρήση υφασμάτων σε συνθήκες συνηθισμένου βαθμού ποιοτικού ελέγχου. Χρήση οποιουδήποτε υλικού σε δύσκολες συνθήκες επιτόπου εφαρμογής.

### 3.2.2 Οριακή κατάσταση αντοχής – αποκόλληση

Σε ορισμένες περιπτώσεις ο μηχανισμός της εφελκυστικής αστοχίας των συνθέτων υλικών δεν ενεργοποιείται, αλλά αντ' αυτού παρατηρείται αποκόλλησή τους από την επιφάνεια του σκυροδέματος (το φαινόμενο περιγράφεται λεπτομερώς στο επόμενο κεφάλαιο). Η αποκόλληση αυτή οφείλεται στην ανάπτυξη σημαντικών διατμητικών τάσεων στη διεπιφάνεια σκυροδέματος – συνθέτων υλικών και γίνεται κατά κανόνα μέσω του σκυροδέματος, δεδομένου ότι αυτό έχει μικρότερη διατμητική αντοχή από τις συνήθεις εποξειδικές ρητίνες καλής ποιότητας. Σε τέτοιες περιπτώσεις ο συντελεστής ασφάλειας υλικού αφορά στο σκυρόδεμα, και λαμβάνεται ίσος με  $\gamma_b = 1.5$ .

### 3.2.3 Οριακή κατάσταση λειτουργικότητας

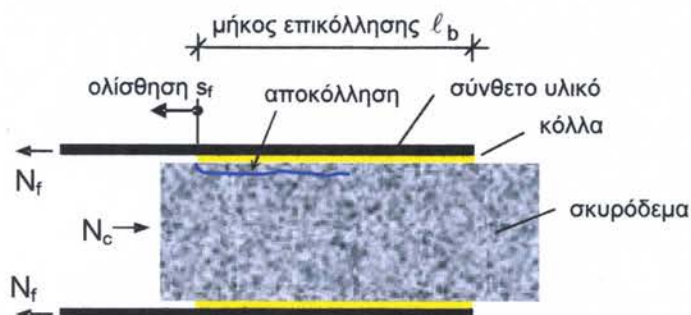
Για την οριακή κατάσταση λειτουργικότητας το μέτρο ελαστικότητας των συνθέτων υλικών μπορεί να θεωρηθεί κατά προσέγγιση ίσο με αυτό που υπολογίζεται για την οριακή κατάσταση αστοχίας, και φυσικά όλοι οι συντελεστές ασφάλειας των υλικών είναι ίσοι με 1.0.

## 3.3 Συνάφεια συνθέτων υλικών - σκυροδέματος

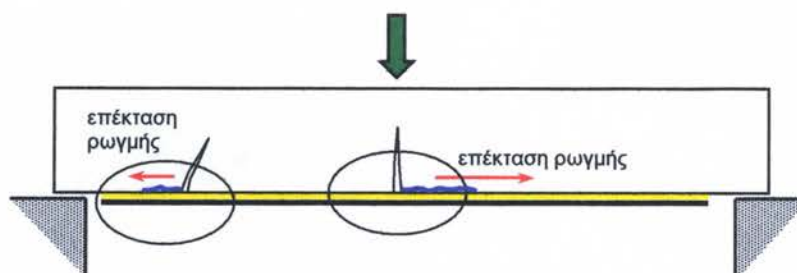
Η πλήρης συνεργασία των συνθέτων υλικών με το σκυρόδεμα προϋποθέτει την ύπαρξη ισχυρού δεσμού μεταξύ των δύο υλικών, ο οποίος εξασφαλίζεται μέσω των εποξειδικών ρητινών. Τυχόν αστοχία του δεσμού αυτού (απώλεια συνάφειας) αποτελεί κρίσιμη παράμετρο, η οποία θα πρέπει να ληφθεί υπόψη στους ελέγχους των οριακών καταστάσεων.

### 3.3.1 Γενικά, συμπεριφορά

Η συμπεριφορά του δεσμού συνθέτων υλικών – σκυροδέματος μπορεί να γίνει εύκολα κατανοητή μέσω απλών δοκιμών συνάφειας, όπως αυτή του Σχ. 3.2, η οποία αντιπροσωπεύει (κατά προσέγγιση) την εντατική και παραμορφωσιακή κατάσταση σε περιοχές ρωγμών, όπως δείχνεται για παράδειγμα στη δοκό του Σχ. 3.3 (βλ. ελαφρά σκιασμένες περιοχές).



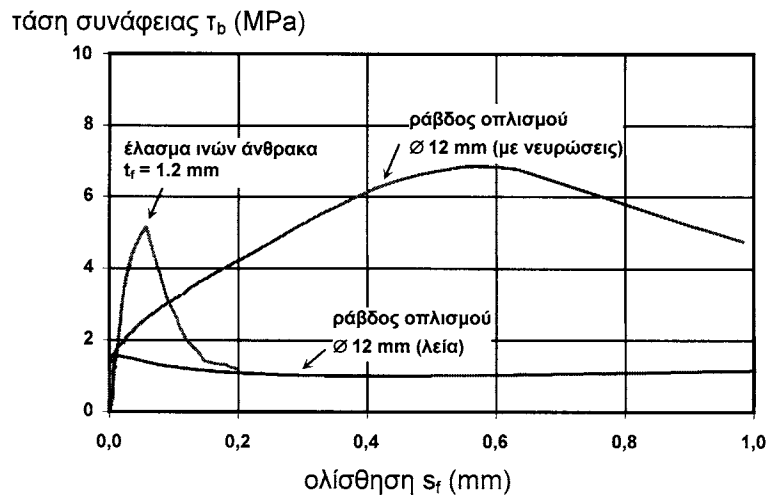
Σχ. 3.2 Δοκιμή συνάφειας συνθέτων υλικών – σκυροδέματος (π.χ. Zilch et al 1998, Bizindavyi and Neale 1999).



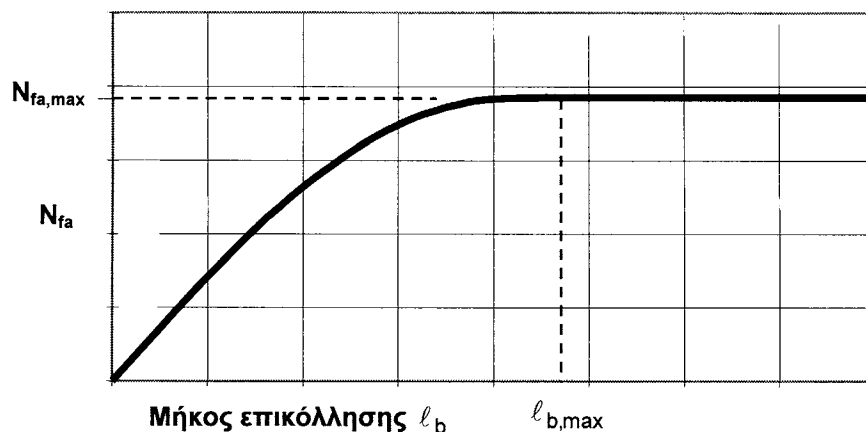
Σχ. 3.3 Ρηγμάτωση δοκού οπλισμένου σκυροδέματος και ενδεχόμενη αστοχία λόγω αποκόλλησης των συνθέτων υλικών (τα βέλη δείχνουν τη φορά επέκτασης της αποκόλλησης).

Στις περιοχές ανάπτυξης ρωγμών, όπως αυτές στο παράδειγμα του Σχ. 3.3, ο εξωτερικός οπλισμός παραλαμβάνει εφελκυστική δύναμη  $N_f$  (Σχ. 3.2), η οποία μεταφέρεται στο σκυρόδεμα μέσω διάτμησης. Ιδιαίτερο πρακτικό ενδιαφέρον παρουσιάζει η σχέση μεταξύ της μέσης διατμητικής τάσης  $\tau_b$  στη διεπιφάνεια συνθέτων υλικών και σκυροδέματος (ίση με  $N_f / \ell_b b_f$  στο Σχ. 3.2, όπου  $b_f$  το πλάτος του ελάσματος) συναρτήσει της ολίσθησης  $s_f$ . Η σχέση αυτή εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, μεταξύ των οποίων είναι η αντοχή του σκυροδέματος, η ποιότητα της κόλλας, τα χαρακτηριστικά των συνθέτων υλικών (π.χ. πάχος, μέτρο ελαστικότητας) και το μήκος επικόλλησης. Μπορεί δε να παρασταθεί γραφικά όπως δείχνει το Σχ. 3.4, στο

οποίο δίνονται για λόγους σύγκρισης και ενδεικτικές σχέσεις τάσης συνάφειας – ολίσθησης για ράβδους οπλισμού με ή χωρίς νευρώσεις.



Σχ. 3.4 Σχέσεις τάσης συνάφειας – ολίσθησης (Zilch et al. 1998).



Σχ. 3.5 Σχέση δύναμης αποκόλλησης συνθέτων υλικών συναρτήσει του μήκους επικόλλησης.

Κύριο χαρακτηριστικό της συμπεριφοράς του δεσμού συνθέτων υλικών - σκυροδέματος είναι ότι η θραύση των συνθέτων υλικών σπανίως προηγείται της αποκόλλησης, σε αντίθεση με τις εσωτερικές ράβδους οπλισμού, οι οποίες μπορούν να σχεδιαστούν με επαρκές μήκος αγκύρωσης ώστε να εξασφαλίζεται η αστοχία τους – διαρροή τους - πριν την απώλεια συνάφειας. Η δύναμη που απαιτείται για την αποκόλληση (η οποία, σημειωτέον, γίνεται λόγω ρηγμάτωσης του σκυροδέματος κοντά στη στρώση της κόλλας, δεδομένου ότι η διατμητική αντοχή αυτής ξεπερνά κατά πολύ αυτήν του σκυροδέματος), δηλαδή η μέγιστη δύναμη “αγκύρωσης”,  $N_{fa}$ , αυξάνεται με το

μήκος επικόλλησης  $\ell_b$ , μέχρις ότου αυτό λάβει μία οριακή τιμή  $\ell_{b,max}$ , πέρα από την οποία η δύναμη αποκόλλησης παραμένει πρακτικά αμετάβλητη, ίση με  $N_{fa,max}$  (Σχ. 3.5).

### 3.3.2 Αναλυτικό προσομοίωμα

Η σχέση δύναμης αποκόλλησης – μήκους επικόλλησης του Σχ. 3.5 περιγράφεται μαθηματικά από τις παρακάτω σχέσεις (Holzenkämpfer 1994, Neubauer and Rostásy 1999):

$$\text{για } \ell_b \geq \ell_{b,max} : \quad N_{fa} = N_{fa,max} = c_1 k_c k_b b_f \sqrt{f_{ctm} E_f t_f} \quad (N) \quad (3.3\alpha)$$

$$\text{για } \ell_b < \ell_{b,max} : \quad N_{fa} = N_{fa,max} \frac{\ell_b}{\ell_{b,max}} \left( 2 - \frac{\ell_b}{\ell_{b,max}} \right) \quad (N) \quad (3.3\beta)$$

$$\ell_{b,max} = \sqrt{\frac{E_f t_f}{c_2 f_{ctm}}} \quad (mm) \quad (3.4)$$

όπου

$$k_b = \sqrt{\frac{1.125 \left( 2 - \frac{b_f}{b} \right)}{1 + \frac{b_f}{400}}} \geq 1 \quad (3.5)$$

με  $b_f/b$  όχι μικρότερο από 0.33,  $k_c$  = συντελεστής συμπίκνωσης του σκυροδέματος, ίσος με 1.0 για κανονική συμπίκνωση ή ίσος με 0.87 για πτωχή συμπίκνωση (π.χ. επιφάνειες όχι σε επαφή με ξυλοτύπους κατά τη διάρκεια της σκυροδέτησης),  $b_f$  = πλάτος ελάσματος (mm),  $b$  = πλάτος διατομής στοιχείου σκυροδέματος στο οποίο έχει επικολληθεί το έλασμα (mm),  $f_{ctm}$  = μέση εφελκυστική αντοχή σκυροδέματος (MPa),  $E_f$  = μέτρο ελαστικότητας συνθέτων υλικών (MPa) και  $t_f$  = πάχος ελάσματος συνθέτων υλικών (mm). Επίσης,  $c_1 = 0.64$  (ή 0.50, αν το ζητούμενο είναι η χαρακτηριστική τιμή της  $N_{fa,max}$ ) και  $c_2 = 2.0$ .

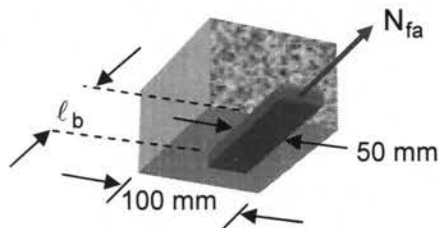
Σε όρους **τάσεων**, από τις παραπάνω σχέσεις προκύπτει ότι η αποκόλληση των συνθέτων υλικών επέρχεται όταν η εφελκυστική τάση σχεδιασμού σε αυτά ( $\sigma_{fd} = N_{fad} / b_f t_f$ ) γίνει ίση με

$$\text{για } \ell_b \geq \ell_{b,max} : \quad \sigma_{fd} = \frac{0.5 k_c k_b}{\gamma_b} \sqrt{\frac{f_{ctm} E_f}{t_f}} \quad (MPa) \quad (3.6\alpha)$$

$$\text{για } \ell_b < \ell_{b,\max} : \quad \sigma_{fd} = \frac{0.5k_c k_b}{\gamma_b} \sqrt{\frac{f_{ctm} E_f}{t_f}} \frac{\ell_b}{\ell_{b,\max}} \left( 2 - \frac{\ell_b}{\ell_{b,\max}} \right) \quad (\text{MPa}) \quad (3.6\beta)$$

### Παράδειγμα 3.1

Θεωρήστε ένα έλασμα συνθέτου υλικού με πλάτος  $b_f = 50 \text{ mm}$ , πάχος  $t_f = 1.2 \text{ mm}$ , μέτρο ελαστικότητας  $E_f = 180000 \text{ MPa}$  και εφελκυστική αντοχή  $f_f = 3000 \text{ MPa}$ , το οποίο επικολλάται σε στοιχείο σκυροδέματος πλάτους  $b = 100 \text{ mm}$  (Σχ. 3.6). Έστω ότι το σκυρόδεμα έχει εφελκυστική αντοχή  $f_{ctm} = 1.9 \text{ MPa}$ .



Σχ. 3.6

Από την εξ. (3.4) προκύπτει ότι το απαιτούμενο μήκος επικόλλησης ώστε να μεγιστοποιηθεί η δύναμη που μπορεί να παραλάβει το έλασμα πριν αποκολληθεί ( $N_{fa,\max}$ ) είναι  $\ell_{b,\max} = \sqrt{(180000 \times 1.2)/(2 \times 1.9)} = 238 \text{ mm}$ .

Η εξ. (3.5) δίνει

$$k_b = \sqrt{\frac{1.125 \left( 2 - \frac{50}{100} \right)}{1 + \frac{50}{400}}} = 1.22 > 1,$$

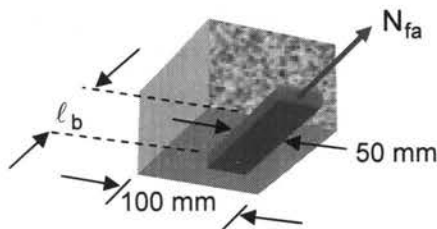
οπότε από την εξ. (3.3α) υπολογίζεται  $N_{fa,\max} = 0.64 \times 1.0 \times 1.22 \times 50 \sqrt{1.9 \times 180000 \times 1.2} = 25010 \text{ N} \approx 25 \text{ kN}$  και η τάση στο έλασμα θα είναι  $25010/(50 \times 1.2) = 417 \text{ MPa}$  [εδώ αξίζει να παρατηρήσουμε ότι αν το έλασμα εξαντλούσε την αντοχή του θα μπορούσε να παραλάβει συνολική δύναμη  $N_f = 3000 \times (50 \times 1.2)/1000 = 180 \text{ kN}$ , δηλαδή περίπου 7-πλάσια της δύναμης που προκαλεί αποκόλληση].

Αν το ζητούμενο είναι η μέγιστη εφελκυστική τάση **σχεδιασμού** (για μήκος επικόλλησης τουλάχιστον ίσο με 238 mm), από την εξ. (3.6) προκύπτει (με συντελεστή ασφάλειας  $\gamma_b = 1.5$ )  $\sigma_{fd} = 217 \text{ MPa}$ .

$$\text{για } \ell_b < \ell_{b,\max}: \quad \sigma_{fd} = \frac{0.5k_c k_b}{\gamma_b} \sqrt{\frac{f_{ctm} E_f}{t_f}} \frac{\ell_b}{\ell_{b,\max}} \left( 2 - \frac{\ell_b}{\ell_{b,\max}} \right) \quad (\text{MPa}) \quad (3.6\beta)$$

### Παράδειγμα 3.1

Θεωρήστε ένα έλασμα συνθέτου υλικού με πλάτος  $b_f = 50 \text{ mm}$ , πάχος  $t_f = 1.2 \text{ mm}$ , μέτρο ελαστικότητας  $E_f = 180000 \text{ MPa}$  και εφελκυστική αντοχή  $f_f = 3000 \text{ MPa}$ , το οποίο επικολλάται σε στοιχείο σκυροδέματος πλάτους  $b = 100 \text{ mm}$  (Σχ. 3.6). Έστω ότι το σκυρόδεμα έχει εφελκυστική αντοχή  $f_{ctm} = 1.9 \text{ MPa}$ .



Σχ. 3.6

Από την εξ. (3.4) προκύπτει ότι το απαιτούμενο μήκος επικόλλησης ώστε να μεγιστοποιηθεί η δύναμη που μπορεί να παραλάβει το έλασμα πριν αποκολληθεί ( $N_{fa,\max}$ ) είναι  $\ell_{b,\max} = \sqrt{(180000 \times 1.2)/(2 \times 1.9)} = 238 \text{ mm}$ .

Η εξ. (3.5) δίνει

$$k_b = \sqrt{\frac{1.125 \left( 2 - \frac{50}{100} \right)}{1 + \frac{50}{400}}} = 1.22 > 1,$$

οπότε από την εξ. (3.3α) υπολογίζεται  $N_{fa,\max} = 0.64 \times 1.0 \times 1.22 \times 50 \sqrt{1.9 \times 180000 \times 1.2} = 25010 \text{ N} \approx 25 \text{ kN}$  και η τάση στο έλασμα θα είναι  $25010/(50 \times 1.2) = 417 \text{ MPa}$  [εδώ αξίζει να παρατηρήσουμε ότι αν το έλασμα εξαντλούσε την αντοχή του θα μπορούσε να παραλάβει συνολική δύναμη  $N_f = 3000 \times (50 \times 1.2)/1000 = 180 \text{ kN}$ , δηλαδή περίπου 7-πλάσια της δύναμης που προκαλεί αποκόλληση].

Αν το ζητούμενο είναι η μέγιστη εφελκυστική τάση **σχεδιασμού** (για μήκος επικόλλησης τουλάχιστον ίσο με  $238 \text{ mm}$ ), από την εξ. (3.6) προκύπτει (με συντελεστή ασφάλειας  $\gamma_b = 1.5$ )  $\sigma_{fd} = 217 \text{ MPa}$ .



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

### ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΣΕ ΚΑΜΨΗ

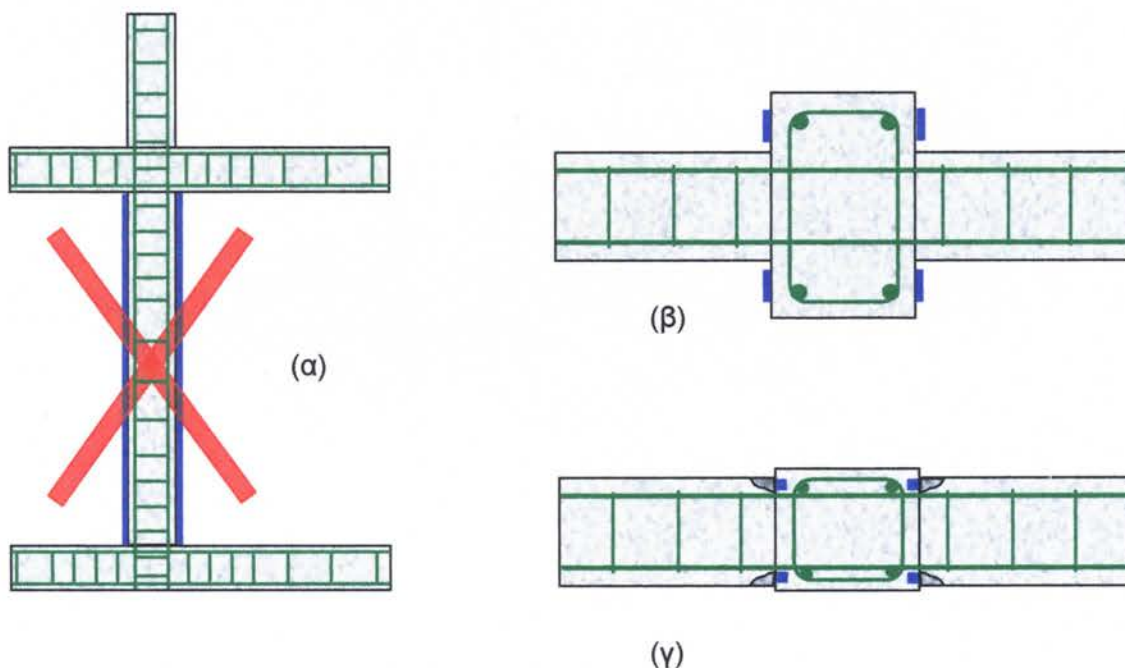
#### 4.1 Γενικά

Η εφαρμογή συνθέτων υλικών για ενισχύσεις έναντι κάμψης (Σχ. 4.1) γίνεται κυρίως σε στοιχεία τύπου δοκού ή πλάκας, μέσω ελασμάτων ή υφασμάτων τα οποία επικολλούνται στο εφελκόμενο πέλμα με διεύθυνση των ινών τέτοια ώστε να παραλαμβάνουν τις λόγω κάμψης εφελκυστικές δυνάμεις (π.χ. παράλληλα στον άξονα του μέλους, για την περίπτωση δοκών, σε δύο κάθετες μεταξύ τους διευθύνσεις για την περίπτωση τετραερείστων πλακών). Στην περίπτωση υποστυλωμάτων με κρίσιμες σε κάμψη τις ακραίες διατομές, η εφαρμογή των συνθέτων υλικών σε μορφή ελασμάτων ή υφασμάτων είναι γενικά δύσκολη, δεδομένου ότι στις περιπτώσεις αυτές πρέπει να εξασφαλισθεί η συνέχεια (αγκύρωση) των οπλισμών εντός των κόμβων. Τούτο γίνεται εφικτό όταν οι δοκοί έχουν μικρότερο πλάτος από τα υποστυλώματα ή όταν χρησιμοποιούνται οπλισμοί συνθέτων υλικών μικρού πλάτους (π.χ. μορφής ράβδων), όπως δείχνει το Σχ. 4.2.



**Σχ. 4.1** Παραδείγματα εφαρμογής ελασμάτων για την καμπτική ενίσχυση δοκών.

Οι υπολογισμοί για τους ελέγχους αντοχής και λειτουργικότητας σε εφαρμογές καμπτικών ενισχύσεων γίνονται κατ' αναλογία με αυτούς για συμβατικά οπλισμένα (με χαλύβδινες ράβδους) μέλη, λαμβάνοντας υπόψη όμως: (α) τις ιδιαιτερότητες της μηχανικής συμπεριφοράς των συνθέτων υλικών (π.χ. γραμμική ελαστικότητα μέχρι τη θραύση) και (β) το ενδεχόμενο πρόωρης αποκόλλησής τους από το σκυρόδεμα.



**Σχ. 4.2** Ενδεικτικές διατάξεις καμπτικής ενίσχυσης υποστυλωμάτων για μέγιστη ροπή στα άκρα. (α) Εσφαλμένη εφαρμογή, (β) συνέχεια οπλισμού τύπου ελάσματος μέσω του κόμβου, (γ) συνέχεια οπλισμού τύπου ράβδου σε εγκοπές μέσω του κόμβου.

## 4.2 Αρχική κατάσταση

Όπως θα φανεί παρακάτω, οι υπολογισμοί των απαιτούμενων ποσοτήτων συνθέτων υλικών προκειμένου να ικανοποιηθούν οι έλεγχοι για τις οριακές καταστάσεις αντοχής και λειτουργικότητας προϋποθέτουν γνώση των παραμορφώσεων (και τάσεων) στα υπό ενίσχυση δομικά στοιχεία κατά τη χρονική στιγμή που λαμβάνει χώρα η ενίσχυση (αρχική κατάσταση). Σημειώνεται δε ότι τα δομικά στοιχεία δρουν ως ενισχυμένα μόνο για τα πρόσθετα φορτία, αυτά δηλαδή τα οποία ασκούνται μετά την ενίσχυση.

Ας υποθέσουμε ότι κατά τη φάση της ενίσχυσης η κρίσιμη διατομή μιας δοκού (Σχ. 4.3) καταπονείται σε ροπή  $M_o$ , μεγαλύτερη από τη ροπή ρηγμάτωσης  $M_{cr}$  (αν είναι μικρότερη, η επίδραση της  $M_o$  είναι αμελητέα). Από ισορροπία δυνάμεων στη διατομή προκύπτει το ύψος της θλιβόμενης ζώνης  $x_o$ :

$$\frac{1}{2}bx_o^2 + (\alpha_s - 1)A_{s2}(x_o - d_2) = \alpha_s A_{s1}(d - x_o) \quad (4.1)$$

όπου  $A_{s1}$  = εμβαδόν εφελκόμενου χάλυβα,  $A_{s2}$  = εμβαδόν θλιβόμενου χάλυβα,  $d_1$  = απόσταση κέντρου βάρους διατομής εφελκόμενου χάλυβα από την ακραία

θλιβόμενη ίνα,  $d$  = στατικό ύψος,  $h$  = ύψος διατομής,  $b$  = πλάτος διατομής και  $\alpha_s = E_s / E_c$  = λόγος μέτρου ελαστικότητας χάλυβα προς μέτρο ελαστικότητας σκυροδέματος. Η παραμόρφωση  $\varepsilon_{co}$  στην ακραία θλιβόμενη ίνα σκυροδέματος είναι

$$\varepsilon_{co} = \frac{M_o x_o}{E_c I_{o2}} \quad (4.2)$$

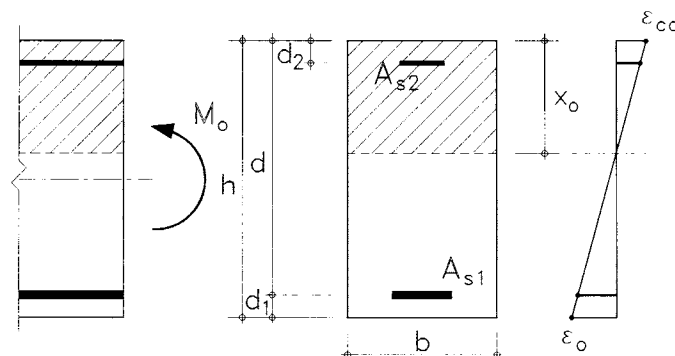
όπου  $I_{o2}$  είναι η ροπή αδράνειας της ρηγματωμένης διατομής, ίση με

$$I_{o2} = \frac{b x_o^3}{3} + (\alpha_s - 1) A_{s2} (x_o - d_2)^2 + \alpha_s A_{s1} (d - x_o)^2 \quad (4.3)$$

Τέλος, η παραμόρφωση  $\varepsilon_o$  στην ακραία εφελκυσμένη ίνα υπολογίζεται βάσει του συμβιβαστού των παραμορφώσεων ως εξής:

$$\varepsilon_o = \varepsilon_{co} \frac{h - x_o}{x_o} \quad (4.4)$$

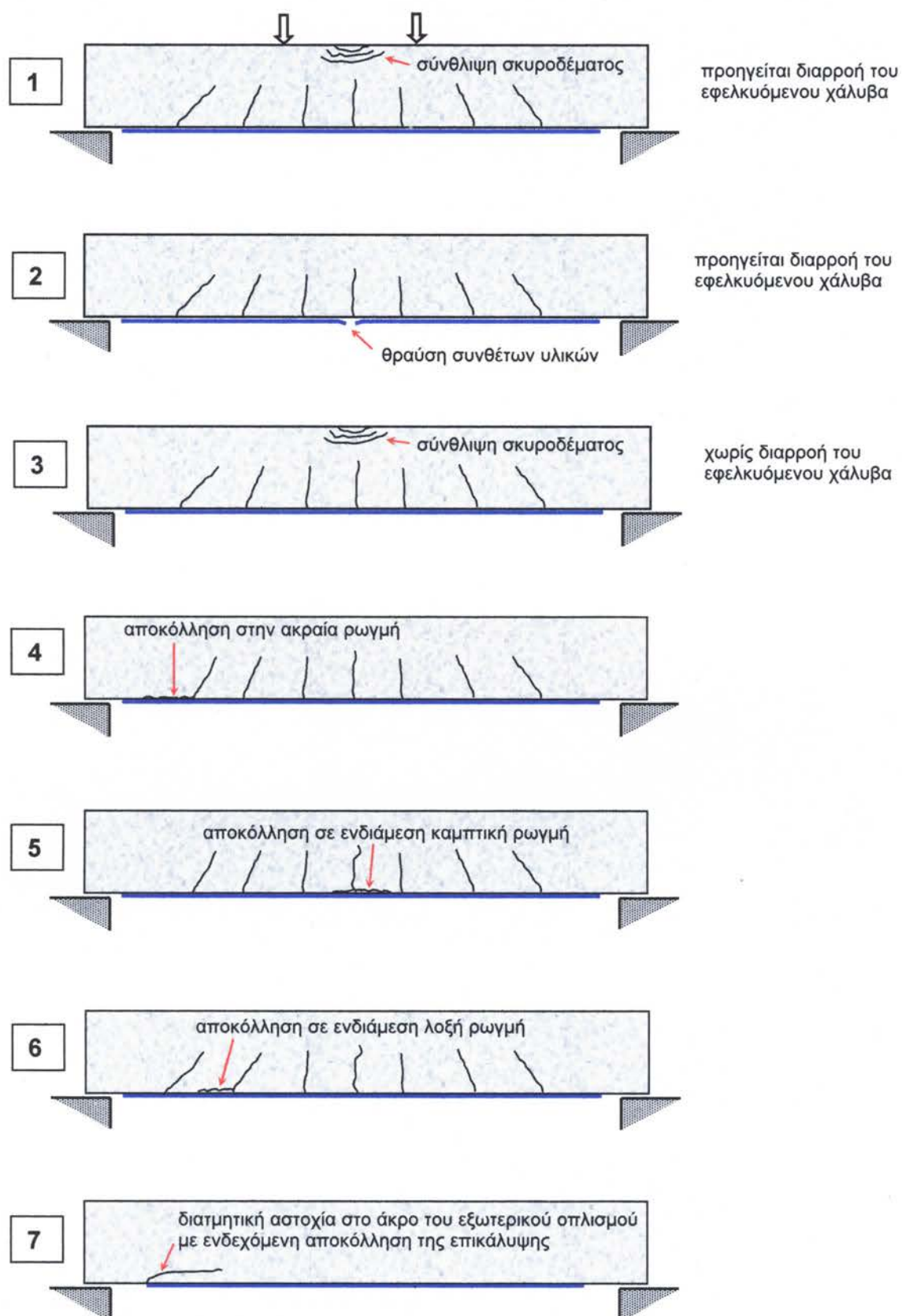
Το  $\varepsilon_o$  που προσδιορίζεται από την εξ. (4.4) αποτελεί την αρχική παραμόρφωση στη θέση επικόλλησης του οπλισμού ενίσχυσης.



**Σχ. 4.3** Παραμορφώσεις σε ορθογωνική διατομή δοκού υπό ροπή  $M_o$  κατά τη φάση ενίσχυσης.

### 4.3 Οριακή κατάσταση αντοχής – μηχανισμοί αστοχίας

Οι πιο πιθανοί μηχανισμοί αστοχίας στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος ενισχυμένων σε κάμψη με σύνθετα υλικά περιγράφονται παραστατικά στο Σχ. 4.4 (Triantafyllou and Plevris 1992, Matthys 2000, fib 2001, Teng et al. 2001). Η διαδικασία υπολογισμών για τον κάθε μηχανισμό δίνεται στην επόμενη ενότητα.



Σχ. 4.4 Μορφές αστοχίας δοκού ενισχυμένης σε κάμψη με σύνθετα υλικά.

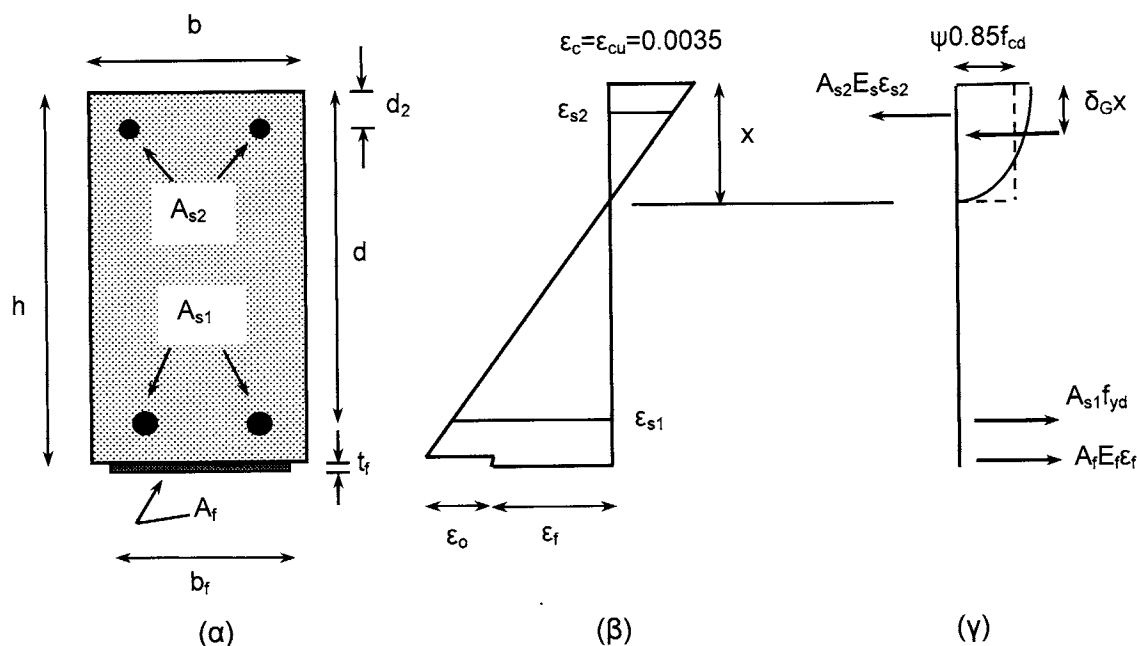
#### 4.4 Υπολογισμοί για την οριακή κατάσταση αντοχής

Οι τρεις πρώτοι από τους παραπάνω μηχανισμούς δεν σχετίζονται με πρόωρες αστοχίες (π.χ. αποκολλήσεις των συνθέτων υλικών). Έτσι το ενισχυμένο στοιχείο μπορεί να μελετηθεί ως ένα σύμμικτο στοιχείο, στο οποίο υπάρχει *πλήρης συνεργασία* μεταξύ του σκυροδέματος και των εξωτερικών οπλισμών. Όλοι οι υπόλοιποι μηχανισμοί αντιστοιχούν σε απώλεια της πλήρους συνεργασίας και αναλύονται ξεχωριστά.

##### 4.4.1 Μηχανισμοί πλήρους συνεργασίας

###### (1) Διαρροή εφελκόμενου χάλυβα, σύνθλιψη σκυροδέματος

Σύμφωνα με το μηχανισμό αυτό, ο οποίος είναι και ο πλέον επιθυμητός, πρώτα διαρρέει ο διαμήκης οπλισμός σε εφελκυσμό και ακολούθως υφίσταται σύνθλιψη το σκυρόδεμα στη θλιβόμενη ζώνη, χωρίς να υπάρχει αστοχία ή κάποιου είδους αποκόλληση στα σύνθετα υλικά. Ο υπολογισμός της ροπής αντοχής στην κρίσιμη διατομή του μέλους (Σχ. 4.5) γίνεται βάσει ισορροπίας των εσωτερικών δυνάμεων και του συμβιβαστού των παραμορφώσεων:



**Σχ. 4.5** Ανάλυση διατομής στην οριακή κατάσταση αντοχής. (α) Γεωμετρικά χαρακτηριστικά, (β) κατανομή παραμορφώσεων καθ' ύψος της διατομής, (γ) κατανομή εσωτερικών δυνάμεων.

Υπολογισμός ύψους θλιβόμενης ζώνης,  $x$ , από ισορροπία εσωτερικών δυνάμεων:

$$0.85\psi f_{cd}bx + A_{s2}E_s\varepsilon_{s2} = A_{s1}f_{yd} + A_f E_f \varepsilon_f \quad (4.5)$$

όπου  $\psi = 0.8$ ,  $f_{cd}$  = θλιπτική αντοχή σκυροδέματος (τιμή σχεδιασμού),  $x$  = ύψος θλιβόμενης ζώνης,  $f_{yd}$  = τάση διαρροής χάλυβα (τιμή σχεδιασμού) και  $A_f$  = εμβαδόν διατομής συνθέτων υλικών.  $\varepsilon_{s2}$  και  $\varepsilon_f$  είναι οι παραμορφώσεις του θλιβόμενου χάλυβα και των συνθέτων υλικών, αντίστοιχα, οι οποίες δίνονται από τις ακόλουθες σχέσεις (συμβιβαστό παραμορφώσεων):

$$\varepsilon_{s2} = \varepsilon_c \frac{x - d_2}{x} \quad (4.6)$$

$$\varepsilon_f = \varepsilon_c \frac{h - x}{x} - \varepsilon_o \quad (4.7)$$

Στις παραπάνω σχέσεις  $\varepsilon_c = \varepsilon_{cu}$  είναι η οριακή παραμόρφωση του σκυροδέματος ( $=0.0035$ ) και  $\varepsilon_o$  η αρχική παραμόρφωση στην ακραία εφελκυσμένη ίνα [εξ. (4.4)]. Επίσης, το γινόμενο  $E_s \varepsilon_{s2}$  (τάση στον θλιβόμενο χάλυβα) στην εξ. (4.5) δεν θα πρέπει να λαμβάνεται πάνω από  $f_{yd}$ .

Υπολογισμός ροπής αντοχής:

$$M_{Rd} = A_{s1} f_{yd} (d - \delta_G x) + A_f E_f \varepsilon_f (h - \delta_G x) + A_{s2} E_s \varepsilon_{s2} (\delta_G x - d_2) \quad (4.8)$$

όπου  $\delta_G = 0.4$ .

Προϋποθέσεις για την εφαρμογή των παραπάνω εξισώσεων είναι ότι ο εφελκυσμένος χάλυβας έχει πράγματι διαρρεύσει και ότι η παραμόρφωση στα σύνθετα υλικά είναι μικρότερη της οριακής,  $\varepsilon_{f,lim}$  (αυτής δηλαδή που αντιστοιχεί στη θραύση ή αποκόλλησή τους), δηλαδή:

$$\varepsilon_{s1} = \varepsilon_c \frac{d - x}{x} \geq \frac{f_{yd}}{E_s} \quad (4.9)$$

$$\varepsilon_f = \varepsilon_c \frac{h - x}{x} - \varepsilon_o \leq \varepsilon_{f,lim} \quad (4.10)$$

όπου  $\varepsilon_c = \varepsilon_{cu}$ .

## **(2) Διαρροή εφελκυσμένου χάλυβα, θραύση συνθέτων υλικών**

Ο μηχανισμός αστοχίας κατά τον οποίο μετά τη διαρροή του εφελκυσμένου χάλυβα ακολουθεί θραύση των συνθέτων υλικών είναι γενικά σπάνιος (ενδέχεται να εμφανιστεί αν το εμβαδόν διατομής των συνθέτων υλικών είναι πάρα πολύ μικρό). Πάντως, για λόγους πληρότητας μπορούμε να αναφέρουμε ότι η ανάλυση της κρίσιμης διατομής στην

περίπτωση αυτή γίνεται όπως παραπάνω, δηλαδή ισχύουν οι εξ. (4.5) – (4.10), με τις εξής τροποποιήσεις: (α) Η μέγιστη θλιπτική παραμόρφωση στο σκυρόδεμα δεν είναι κατ' ανάγκη ίση με την οριακή. (β) Η παραμόρφωση στα σύνθετα υλικά ισούται με την οριακή, δηλ.  $\varepsilon_f = \varepsilon_{fud}$ . (γ) Οι συντελεστές  $\psi$  και  $\delta_G$  δίνονται από τις σχέσεις:

$$\psi = \begin{cases} 1000\varepsilon_c \left( 0.5 - \frac{1000}{12} \varepsilon_c \right) & \text{για } \varepsilon_c \leq 0.002 \\ 1 - \frac{2}{3000\varepsilon_c} & \text{για } 0.002 \leq \varepsilon_c \leq 0.0035 \end{cases} \quad (4.11)$$

$$\delta_G = \begin{cases} \frac{8 - 1000\varepsilon_c}{4(6 - 1000\varepsilon_c)} & \text{για } \varepsilon_c \leq 0.002 \\ \frac{1000\varepsilon_c(3000\varepsilon_c - 4) + 2}{2000\varepsilon_c(3000\varepsilon_c - 2)} & \text{για } 0.002 \leq \varepsilon_c \leq 0.0035 \end{cases} \quad (4.12)$$

Έτσι, για τον υπολογισμό της ροπής αντοχής απαιτείται η επίλυση των εξ. (4.5) – (4.10) (αφού προηγηθούν οι προαναφερθείσες τροποποιήσεις) με αγνώστους τα  $\chi$ ,  $\varepsilon_c$  και  $M_{Rd}$ . Τούτο μπορεί να γίνει είτε υπολογιστικά, είτε βάσει διαδοχικών δοκιμών.

### (3) Σύνθλιψη σκυροδέματος

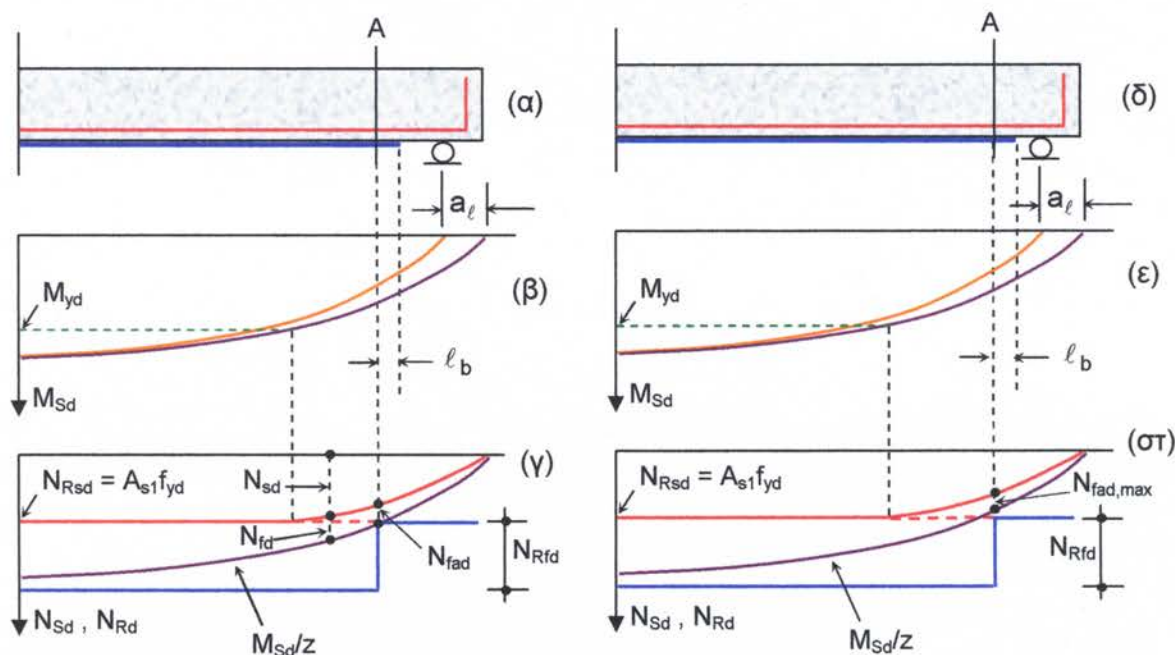
Η μηχανισμός σύμφωνα με τον οποίο η θραύση του σκυροδέματος στη θλιβόμενη ζώνη προηγείται οποιασδήποτε άλλης αστοχίας αντιστοιχεί σε ψαθυρή συμπεριφορά και δεν είναι αποδεκτός, γι' αυτό και δεν αναλύεται περαιτέρω. Η μη ενεργοποίηση του εν λόγω μηχανισμού επιτυγχάνεται περιορίζοντας το εμβαδόν των συνθέτων υλικών κάτω από μία κρίσιμη τιμή, έτσι ώστε εξασφαλισθεί η διαρροή του εφελκυόμενου χάλυβα. Περισσότερα σχετικά στοιχεία δίνονται στην Ενότητα 4.5, όπου περιγράφονται οι απαιτήσεις πλαστιμότητας.

#### 4.4.2 Μηχανισμοί με απώλεια της πλήρους συνεργασίας

### (4) Αποκόλληση στην ακραία ρωγμή

Εφαρμόζοντας το αναλυτικό προσομοίωμα που παρουσιάστηκε στην Ενότητα 3.3 μπορεί να γίνει ο υπολογισμός του απαιτούμενου μήκους αγκύρωσης στα άκρα των συνθέτων υλικών ώστε να μην επέλθει αποκόλληση στην περιοχή της αγκύρωσης. Ας θεωρήσουμε, για παράδειγμα, τη δοκό του Σχ. 4.6α, με διάγραμμα ροπών αυτό του Σχ.

θεωρήσουμε, για παράδειγμα, τη δοκό του Σχ. 4.6α, με διάγραμμα ροπών αυτό του Σχ. 4.6β (σημειώνεται ότι το διάγραμμα ροπών πρέπει να μετατεθεί κατά  $a_\ell$ , βάσει του μηχανισμού ισοδυνάμου δικτυώματος για το μηχανισμό ανάληψης τέμνουσας). Το Σχ. 4.6γ δίνει τις δυνάμεις που ασκούνται τόσο στον εφελκυσμένο χάλυβα ( $N_{sd}$ ) όσο και στα σύνθετα υλικά ( $N_{fd}$ ) σε κάθε διατομή, ως αποτέλεσμα της δρώσης ροπής σχεδιασμού  $M_{sd}$ . Προσεγγιστικά, η συνολική εφελκυστική δύναμη (σε ράβδους οπλισμού και σύνθετα υλικά), δηλαδή το άθροισμα  $N_{sd} + N_{fd}$ , ισούται με  $M_{sd}/z$ , όπου  $z$  ο μοχλοβραχίονας της δύναμης αυτής, περίπου ίσος με  $0.95 d$ .



Σχ. 4.6 Αγκύρωση συνθέτων υλικών.

Βάσει του Σχ. 4.6γ, η θέση (διατομή A) πέρα από την οποία υπολογίζεται το μήκος αγκύρωσης των συνθέτων υλικών προσδιορίζεται εκεί όπου η καμπύλη της συνολικής εφελκυστικής δύναμης  $M_{sd}/z$  τέμνει τη μέγιστη δύναμη που μπορεί να παραληφθεί από το χάλυβα μόνο,  $N_{Rsd} = A_{s1}f_{yd}$ . Στη θέση αυτή η εφελκυστική δύναμη στα σύνθετα υλικά είναι  $N_{fad}$ , ενώ το αντίστοιχο μήκος αγκύρωσης είναι  $l_b$ . Η προς αγκύρωση δύναμη  $N_{fad}$  (τιμή σχεδιασμού) μπορεί να προσεγγιστεί βάσει ισορροπίας εσωτερικών εντατικών μεγεθών ως εξής:

$$\frac{M_{sd}}{z} = N_{fad} \left( 1 + \frac{A_{s1}E_s\varepsilon_{s1}}{A_fE_f\varepsilon_f} \right) \approx N_{fad} \left( 1 + \frac{A_{s1}E_s}{A_fE_f} \right) \quad (4.13)$$

Στην παραπάνω σχέση θεωρήθηκε ότι  $\varepsilon_{s1}/\varepsilon_f \approx 1$ .

Είναι αυτονόητο ότι η  $N_{fad}$  δεν πρέπει να ξεπερνά την  $N_{fad,max}$  [εξ. (3.3α), με συντελεστή ασφάλειας  $\gamma_b$ ] και ότι θα πρέπει να υπάρχει επαρκής διαθέσιμος χώρος για το μήκος αγκύρωσης  $\ell_b$ . Αν αυτό δεν συμβαίνει, η διατομή  $A$  θα πρέπει να ορισθεί παραπέρα (προς την κατεύθυνση όπου μειώνεται η ροπή κάμψης, δηλ. κοντά στη στήριξη), Σχ. 4.6δ-στ, έτσι ώστε ή να μειωθεί η  $N_{fad}$  μέχρι την τιμή  $N_{fad,max}$ , ή να απαιτείται μικρότερο  $\ell_b$  (όπως φαίνεται στο Σχ. 3.5, μικρή σχετικά μείωση στη  $N_{fad}$  επιφέρει σημαντική μείωση στο  $\ell_b$ ). Αν το μήκος αγκύρωσης και πάλι δεν επαρκεί, θα πρέπει είτε να αυξηθεί το πλάτος και να μειωθεί το πάχος των ελασμάτων, είτε να βελτιωθεί η αγκύρωση με μηχανικό τρόπο (θα αναφερθούμε σε επόμενο κεφάλαιο).

### (5) Αποκόλληση σε ενδιάμεση καμπτική ρωγμή

Και εδώ μπορεί να εφαρμοστεί το αναλυτικό προσομοίωμα της Ενότητας 3.3, στο οποίο όμως πρέπει να γίνει μία μικρή διόρθωση, δεδομένου ότι η πραγματική εντατική κατάσταση στη διεπιφάνεια συνθέτων υλικών – σκυροδέματος στις περιοχές δοκών με κατακόρυφη ρηγμάτωση (χαμηλή τιμή τέμνουσας δύναμης) διαφέρει ως προς αυτήν της πειραματικής διάταξης του Σχ. 3.2. Λεπτομερείς αναλύσεις με πεπερασμένα στοιχεία αλλά και πειραματικά αποτελέσματα δείχνουν ότι για αποκολλήσεις σε περιοχές πολύ μικρής ή μηδενικής τέμνουσας η μέγιστη διατμητική τάση στη διεπιφάνεια είναι αισθητά μικρότερη σε σχέση με αυτήν της διάταξης του Σχ. 3.2. Με βάσει λοιπόν διαθέσιμα αποτελέσματα από τη διεθνή βιβλιογραφία (π.χ. Teng et al. 2001), προτείνεται μία ελαφρά τροποποίηση του προσομοιώματος της Ενότητας 3.3.2, η οποία συνίσταται στην προσαύξηση της δύναμης που προκαλεί αποκόλληση κατά 30%.

Συμπερασματικά, η μέγιστη επιτρεπόμενη παραμόρφωση στα σύνθετα υλικά για αποκόλληση σε περιοχές καμπτικών ρωγμών (όπου η τέμνουσα είναι πρακτικά μηδέν) είναι:

$$\text{για } \ell_b \geq \ell_{b,max}: \quad \varepsilon_{fbd,fl} = \alpha_{fl} \frac{0.5k_c k_b}{\gamma_b} \sqrt{\frac{f_{ctm}}{E_f t_f}} \quad (4.14\alpha)$$

$$\text{για } \ell_b < \ell_{b,max}: \quad \varepsilon_{fbd,fl} = \alpha_{fl} \frac{0.5k_c k_b}{\gamma_b} \sqrt{\frac{f_{ctm}}{E_f t_f}} \frac{\ell_b}{\ell_{b,max}} \left( 2 - \frac{\ell_b}{\ell_{b,max}} \right) \quad (4.14\beta)$$

όπου  $\alpha_{fl} = 1.30$ .

Κατά τα λοιπά, οι υπολογισμοί για τη ροπή αντοχής γίνονται όπως ακριβώς στην παραπάνω περίπτωση (2), με  $\varepsilon_f = \varepsilon_{fbd,fl}$ .

**(6) Αποκόλληση σε ενδιάμεση λοξή ρωγμή**

Για αποκολλήσεις σε καμπτο-διατμητικές ρωγμές ισχύουν οι παρατηρήσεις της προηγούμενης παραγράφου, με τη διαφορά ότι η προσαύξηση της δύναμης αποκόλλησης είναι μικρότερη, της τάξης του 25%. Έτσι η μέγιστη επιτρεπόμενη παραμόρφωση στα σύνθετα υλικά είναι:

$$\text{για } \ell_b \geq \ell_{b,\max} : \quad \varepsilon_{fbd,fl-sh} = \alpha_{fl-sh} \frac{0.5k_c k_b}{\gamma_b} \sqrt{\frac{f_{ctm}}{E_f t_f}} \quad (4.15\alpha)$$

$$\text{για } \ell_b < \ell_{b,\max} : \quad \varepsilon_{fbd,fl-sh} = \alpha_{fl-sh} \frac{0.5k_c k_b}{\gamma_b} \sqrt{\frac{f_{ctm}}{E_f t_f}} \frac{\ell_b}{\ell_{b,\max}} \left( 2 - \frac{\ell_b}{\ell_{b,\max}} \right) \quad (4.15\beta)$$

όπου  $\alpha_{fl-sh} = 1.25$ .

Κατά τα λοιπά, οι υπολογισμοί για τη ροπή αντοχής γίνονται όπως ακριβώς στην παραπάνω περίπτωση (2), με  $\varepsilon_f = \varepsilon_{fbd,fl-sh}$ .

**(7) Διατμητική αστοχία στο άκρο – αποκόλληση της επικάλυψης**

Η αποκόλληση των συνθέτων υλικών λόγω της ανάπτυξης διατμητικής ρωγμής στο άκρο με κατεύθυνση επέκτασης περίπου οριζόντια (κάπου μεταξύ της κάτω στρώσης οπλισμού χάλυβα και της κόλλας), αποτελεί έναν από τους πιο συνηθισμένους μηχανισμούς αστοχίας δοκών (και πλακών) ενισχυμένων σε κάμψη. Ο μηχανισμός αυτός, ο οποίος οφείλει τη γένεσή του κατά βάση στην ανάπτυξη σημαντικών οριζοντίων διατμητικών αλλά και κάθετων στον άξονα του οπλισμού ενίσχυσης εφελκυστικών τάσεων, στη στρώση επικάλυψης του σκυροδέματος, έχει αποτελέσει αντικείμενο μελέτης δεκάδων ερευνητών (π.χ. Oehlers 1992, Ziraba et al. 1994, Jansze 1997, Raoof and Hassanen 2000). Μία απλή, συντηρητική και αρκετά αξιόπιστη μέθοδος αντιμετώπισης περιλαμβάνει την παρακάτω σειρά ελέγχων:

$$V_{Sd,end} \leq 1.4V_{cd} \quad (4.16)$$

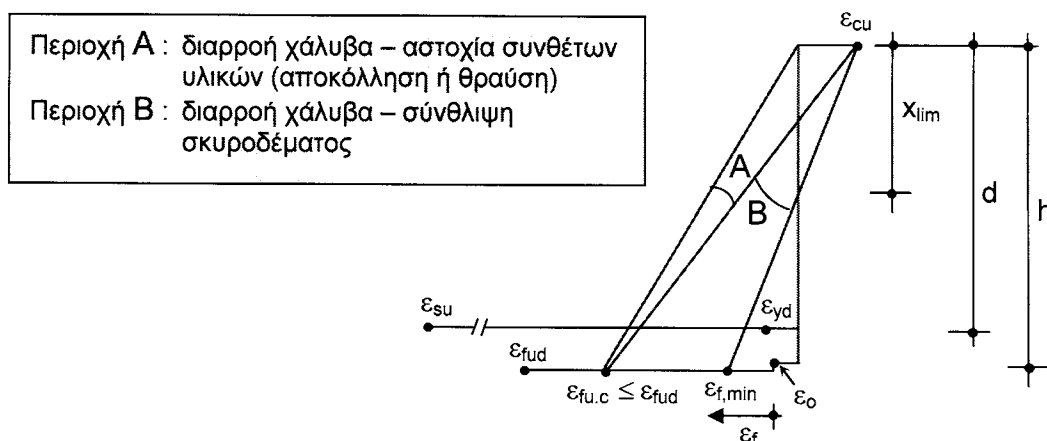
$$M_{Sd,end} \leq \frac{2}{3}M_{Rd} \quad (4.17)$$

όπου  $V_{Sd,end}$  και  $M_{Sd,end}$  είναι η δρώσα τέμνουσα και ροπή (τιμές σχεδιασμού), αντίστοιχα, στη διατομή που τερματίζουν τα σύνθετα υλικά,  $V_{cd}$  είναι η διατμητική αντοχή του μέλους αγνοώντας τη συνεισφορά οπλισμών διάτμησης (συνδετήρες) και  $M_{Rd}$  είναι η ροπή αντοχής του μέλους [δηλαδή η ελάχιστη τιμή εξ αυτών που αντιστοιχούν στους μηχανισμούς (1), (2), (5) και (6)]. Επισημαίνεται ότι η ικανοποίηση της συνθήκης (4.17)

γίνεται εύκολα, π.χ. ρυθμίζοντας τη θέση τερματισμού των συνθέτων υλικών. Αν όμως δεν ικανοποιείται η συνθήκη (4.16), τότε απαιτείται ενίσχυση του μέλους (στην περιοχή κοντά στα άκρα των συνθέτων υλικών) έναντι τέμνουσας.

#### 4.5 Απαιτήσεις πλαστιμότητας

Βασική απαίτηση πλαστιμότητας αποτελεί η ενεργοποίηση μηχανισμού αστοχίας κατά τον οποίο η διαρροή του εφελκόμενου χάλυβα θα προηγείται σαφώς οποιασδήποτε άλλης αστοχίας, ούτως ώστε να εξασφαλίζεται μία ελάχιστη τιμή πλαστιμότητας καμπυλοτήτων ( $\mu_\phi$ ). Τούτο σημαίνει ότι η εφελκυστική παραμόρφωση των συνθέτων υλικών στην κρίσιμη διατομή κατά την οριακή κατάσταση αντοχής,  $\varepsilon_{fu,c}$ , θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη από μία ελάχιστη τιμή,  $\varepsilon_{f,min}$ , ενώ έχει ως άνω όριο είτε την παραμόρφωση θραύσης,  $\varepsilon_{fud}$ , είτε την παραμόρφωση εκείνη η οποία αντιστοιχεί σε αποκόλληση (όχι όμως κατ' ανάγκη στην κρίσιμη διατομή σε κάμψη). Σχετικό είναι το Σχ. 4.7.



Σχ. 4.7 Κατανομή παραμορφώσεων καθ' ύψος της κρίσιμης διατομής.

Η ελάχιστη επιτρεπόμενη τιμή παραμόρφωσης στα σύνθετα υλικά κατά την οριακή κατάσταση αντοχής,  $\varepsilon_{f,min}$ , για δεδομένη πλαστιμότητα καμπυλοτήτων,  $\mu_\phi$ , υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$\varepsilon_{f,min} = \varepsilon_{yd} \frac{\mu_\phi}{\left(\frac{d}{h} - \frac{x_y}{h}\right)} \frac{h}{d} - \varepsilon_{cu} - \varepsilon_0 \quad (4.18)$$

όπου  $x_y$  το ύψος της θλιβόμενης ζώνης κατά την εκκίνηση διαρροής του χάλυβα. Σημειώνεται πάντως ότι η επίτευξη μεγάλης πλαστιμότητας δεν είναι πάντα εφικτή,

ιδιαίτερα όταν η απαιτούμενη ποσότητα συνθέτων υλικών καθορίζεται από τις απαιτήσεις της οριακής κατάστασης λειτουργικότητας, οπότε το μέλος είναι υπερ-διαστασιολογημένο σε όρους αντοχής.

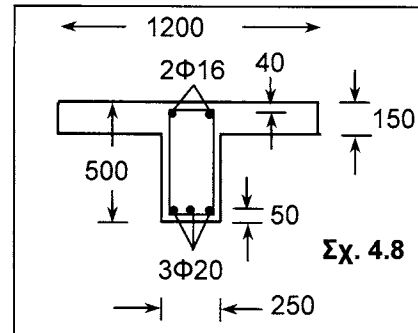
#### 4.6 Σύνοψη διαδικασίας υπολογισμών – οριακή κατάσταση αντοχής

Η προτεινόμενη διαδικασία ελέγχων για την οριακή κατάσταση αντοχής συνοψίζεται στα παρακάτω βήματα:

1. Υπολογισμός ροπής αντοχής πριν από την ενίσχυση ( $M_{o,Rd}$ ).
2. Υπολογισμός της αρχικής παραμόρφωσης  $\varepsilon_o$  στην ακραία εφελκυσμένη ίνα βάσει της ροπής  $M_o$  που ασκείται στην κρίσιμη διατομή κατά τη φάση της ενίσχυσης.
3. Υπολογισμός απαιτούμενης ποσότητας οπλισμού συνθέτων υλικών  $A_f$  (για δεδομένη  $M_{Rd}$ ) για τις περιπτώσεις αστοχίας (1), (2) και (6) [ή (5), αν δεν δρα τέμνουσα δύναμη] στην κρίσιμη διατομή, βάσει των εξ. (4.5)-(4.12). Σημειώνεται ότι οι εξισώσεις αυτές με  $\varepsilon_c \leq \varepsilon_{cu}$  και  $\varepsilon_f \leq \varepsilon_{f,lim} = \min(\varepsilon_{fud}, \varepsilon_{fbd,fl-sh})$  περιγράφουν ταυτοχρόνως τρεις πιθανούς μηχανισμούς αστοχίας (διαρροή χάλυβα – σύνθλιψη σκυροδέματος, διαρροή χάλυβα – θραύση συνθέτων υλικών, διαρροή χάλυβα – αποκόλληση σε ενδιάμεση ρωγμή) [προσεγγιστικά η  $\varepsilon_{f,lim}$  μπορεί να θεωρηθεί σταθερή και ίση με 0.004-0.005]. Ακολουθεί ο έλεγχος των απαιτήσεων πλαστιμότητας.
4. Υπολογισμός μήκους αγκύρωσης και γενικά οριστικοποίηση της διάταξης των συνθέτων υλικών βάσει του ελέγχου αγκύρωσης – [μηχανισμός (4)].
5. Έλεγχος μηχανισμού [7] (διατμητική αστοχία στο άκρο). Αν ο έλεγχος δεν ικανοποιείται γίνεται ενίσχυση σε τέμνουσα (βλ. επόμενο κεφάλαιο).
6. Έλεγχος της οριακής κατάστασης αστοχίας του μέλους από διάτμηση (δεδομένου ότι έχει αυξηθεί η καμπτική αντοχή). Αν ο έλεγχος δεν ικανοποιείται απαιτείται ενίσχυση (βλ. επόμενο κεφάλαιο).

#### 4.7 Παράδειγμα

Θεωρούμε αμφιέριστη πλακοδοκό ανοίγματος 5 m με γεωμετρία διατομής όπως φαίνεται στο Σχ. 4.8. Η δοκός φορτίζεται με ομοιόμορφα κατανεμημένο φορτίο  $g_d = 15 \text{ kN/m}$  (μόνιμο) και  $q_d = 30 \text{ kN/m}$  (κινητό). Υλικά: C20/25, S500s. Να γίνουν οι υπολογισμοί καμπτικής ενίσχυσης με στόχο την αύξηση του κινητού φορτίου σχεδιασμού σε  $50 \text{ kN/m}$ . Θεωρούμε ελάσματα συνθέτων υλικών πάχους  $1.1 \text{ mm}$ , πλάτους  $80 \text{ mm}$ , μέτρου ελαστικότητας  $E_f = 150 \text{ GPa}$  και οριακής παραμόρφωσης αστοχίας (τιμή σχεδιασμού)  $\varepsilon_{fud} = 0.01$ .



Γεωμετρικά στοιχεία:  $A_{s1} = 940 \text{ mm}^2$ ,  $A_{s2} = 400 \text{ mm}^2$ ,  $h = 500 \text{ mm}$ ,  $d = 450 \text{ mm}$ ,  $d_1 = 50 \text{ mm}$ ,  $d_2 = 40 \text{ mm}$  και  $b = 1200 \text{ mm}$ . Η ροπή κάμψης κατά τη διάρκεια των εργασιών ενίσχυσης είναι  $M_o = 15 \times 5^2 / 8 = 46.9 \text{ kNm}$ . Ο λόγος  $\alpha_s = E_s / E_c$  είναι  $200/29 = 6.9$ . Επιλύοντας τις εξ. (4.1)-(4.4) βρίσκουμε  $\varepsilon_o = 0.00066$ . Ακολουθώντας υπολογίζουμε την απαιτούμενη ροπή αντοχής μετά την ενίσχυση:  $M_{Rd} \geq 65 \times 5^2 / 8 = 203.12 \text{ kNm}$ .

Θεωρώντας  $k_c = 1$  και  $k_b \approx 1.2$ , η εξ. (4.14α) για αποκόλληση στην περιοχή της μεσαίας διατομής (όπου η ροπή είναι μέγιστη και η τέμνουσα μηδέν) δίνει:

$$\varepsilon_{fbd,fl} = 1.30 \frac{0.5 \times 1.2}{1.5} \sqrt{\frac{2.2}{150000 \times 1.1}} = 0.002, \text{ οπότε } \varepsilon_{f,lim} = \min(0.01, 0.002) = 0.002.$$

Αυτή είναι η τιμή της παραμόρφωσης στα σύνθετα υλικά στη διατομή όπου η ροπή είναι μέγιστη (μέσον ανοίγματος), κατά την οριακή κατάσταση αστοχίας (λόγω αποκόλλησης).

Ακολουθώντας, από τις εξ. (4.5) – (4.12) υπολογίζεται  $x = 105 \text{ mm}$ ,  $\varepsilon_c = 0.00071$ , και  $A_f = 246.9 \text{ mm}^2$ . Το εμβαδόν κάθε ελάσματος είναι  $88 \text{ mm}^2$ , οπότε απαιτούνται συνολικά 3 ελάσματα, συνολικού εμβαδού  $264 \text{ mm}^2$ , τα οποία αντιστοιχούν σε  $M_{Rd} = 205.83 \text{ kNm}$ ,  $x = 106 \text{ mm}$  και  $\varepsilon_c = 0.00072$ . Τα ελάσματα αυτά θα τοποθετηθούν το ένα δίπλα στο άλλο, ώστε να αποφευχθεί ο σχηματισμός διπλής στρώσης.

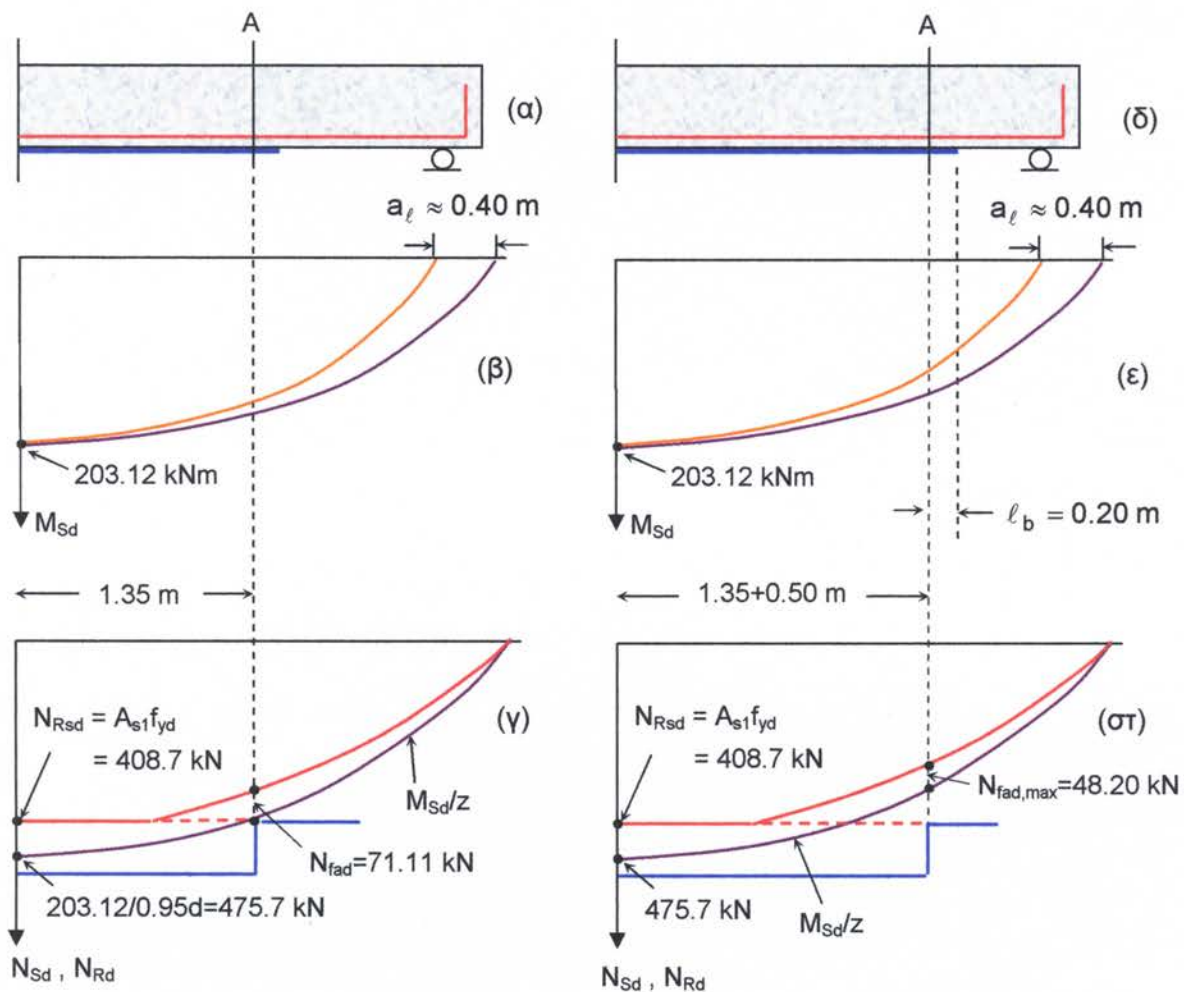
Ακολουθεί ο υπολογισμός της αγκύρωσης στα άκρα (Σχ. 4.9). Βάσει αυτού προκύπτει ότι τα ελάσματα θα πρέπει να επικοληθούν σε μήκος  $4.10 \text{ m}$ . Τέλος, γίνεται ο έλεγχος διατμητικής αστοχίας στο άκρο:

$$V_{Sd,end} = 65 \left( \frac{5}{2} - 0.45 \right) = 133.25 \text{ kN}, \quad M_{Sd,end} = 65 \times 0.45 \times \left( \frac{5}{2} - \frac{0.45}{2} \right) = 66.54 \text{ kNm}$$

$$1.4 V_{cd} = 1.4 \tau_{Rd} \max(1, 1.6 - d) \min(2, 1.2 + 1.4 \rho_\ell) b_w d =$$

$$1.4 \times 0.26 \times 1.15 \times 1.2024 \times 0.25 \times 0.25 \times 0.45 \times 10^3 = 56.62 \text{ kN}$$

Παρατηρούμε ότι η σχέση (4.17) ικανοποιείται αλλά η σχέση (4.16) παραβιάζεται, οπότε απαιτείται ενίσχυση στα άκρα για τέμνουσα δύναμη  $133.25 - 56.62 = 76.63 \text{ kN}$ .



$$408.7 \approx N_{\text{fad}} \left( 1 + \frac{940 \times 200}{264 \times 150} \right) \Rightarrow N_{\text{fad}} = 71.11 \text{ kN}$$

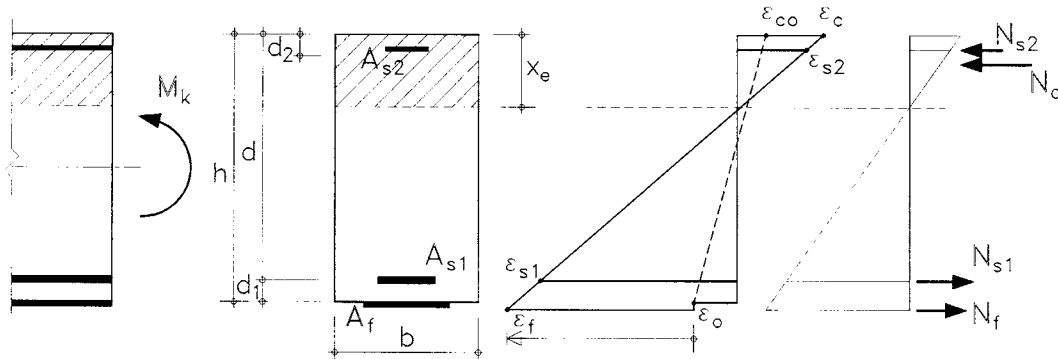
$$N_{\text{fad,max}} = 0.264 \times \left( \frac{0.5 \times 1.0 \times 1.0}{1.5} \sqrt{\frac{2.2 \times 150000}{1.1}} \right) = 48.20 \text{ kN}$$

$$\ell_{\text{b,max}} = \sqrt{\frac{150000 \times 1.1}{2 \times 2.2}} = 193.6 \text{ mm} \rightarrow 0.2 \text{ m}$$

Σχ. 4.9 Υπολογισμός αγκύρωσης.

#### 4.8 Οριακή κατάσταση λειτουργικότητας

Οι υπολογισμοί για την οριακή κατάσταση λειτουργικότητας μπορούν να βασισθούν σε γραμμικά ελαστική συμπεριφορά των υλικών (εξαιρουμένου βεβαίως του σκυροδέματος σε εφελκυσμό), όπως δίνει το Σχ. 4.10.



Σχ. 4.10 Ανάλυση ρηγματωμένης διατομής βάσει γραμμικά ελαστικής συμπεριφοράς των υλικών.

Το ύψος της θλιβόμενης ζώνης  $x_e$  της ρηγματωμένης διατομής υπολογίζεται βάσει των συνθηκών ισορροπίας και συμβιβαστού των παραμορφώσεων:

$$\frac{1}{2}bx_e^2 + (\alpha_s - 1)A_{s2}(x_e - d_2) = \alpha_s A_{s1}(d - x_e) + \alpha_f A_f \left[ h - \left( 1 + \frac{\varepsilon_o}{\varepsilon_c} \right) x_e \right] \quad (4.19)$$

$$E_c \varepsilon_c = \frac{M_k}{\frac{1}{2}bx_e \left( h - \frac{x_e}{3} \right) + (\alpha_s - 1)A_{s2} \frac{(x_e - d_2)}{x_e} (h - d_2) - \alpha_s A_{s1} \frac{d - x_e}{x_e} (h - d)} \quad (4.20)$$

όπου  $\alpha_f = E_f / E_c$  και  $M_k$  η χαρακτηριστική ροπή κάμψης στη διατομή. Οι παραπάνω δύο εξισώσεις μπορούν να επιλυθούν για τους αγνώστους  $x_e$  και  $\varepsilon_c$ .

Η ροπή αδράνειας της ρηγματωμένης διατομής δίνεται από τη σχέση:

$$I_2 = \frac{bx_e^3}{3} + (\alpha_s - 1)A_{s2}(x_e - d_2)^2 + \alpha_s A_{s1}(d - x_e)^2 + \alpha_f A_f (h - x_e)^2 \quad (4.21)$$

ενώ της αρηγμάτωτης μπορεί προσεγγιστικά να ληφθεί ως:

$$I_1 \approx \frac{bh^3}{12} \quad (4.22)$$

Σε ότι αφορά ελέγχους **τάσεων**, πλέον αυτών για το σκυρόδεμα και το χάλυβα, θα πρέπει να ελεγχθεί ότι η τάση στα σύνθετα υλικά,  $\sigma_f$ , για το μακροχρόνιο συνδυασμό δράσεων ικανοποιεί τη συνθήκη:

$$\sigma_f = E_f \left( \varepsilon_c \frac{h - x_e}{x_e} - \varepsilon_o \right) \leq \eta f_{fk} \quad (4.22)$$

όπου ο μειωτικός συντελεστής  $\eta < 1$  αντανakλά την πτωχή συμπεριφορά (μείωση αντοχής) ορισμένων τύπων συνθέτων υλικών (π.χ. αυτών με ίνες γυαλιού) όταν βρίσκονται υπό μακροχρόνια ένταση. Βάσει πειραματικών δεδομένων (π.χ. Yamaguchi et al. 1998), ενδεικτικές τιμές για το συντελεστή  $\eta$  είναι 0.8, 0.5 και 0.3 για υλικά με ίνες άνθρακα, αραμιδίου και γυαλιού, αντίστοιχα. Γενικά πάντως ο παραπάνω έλεγχος σπανίως είναι κρίσιμος.

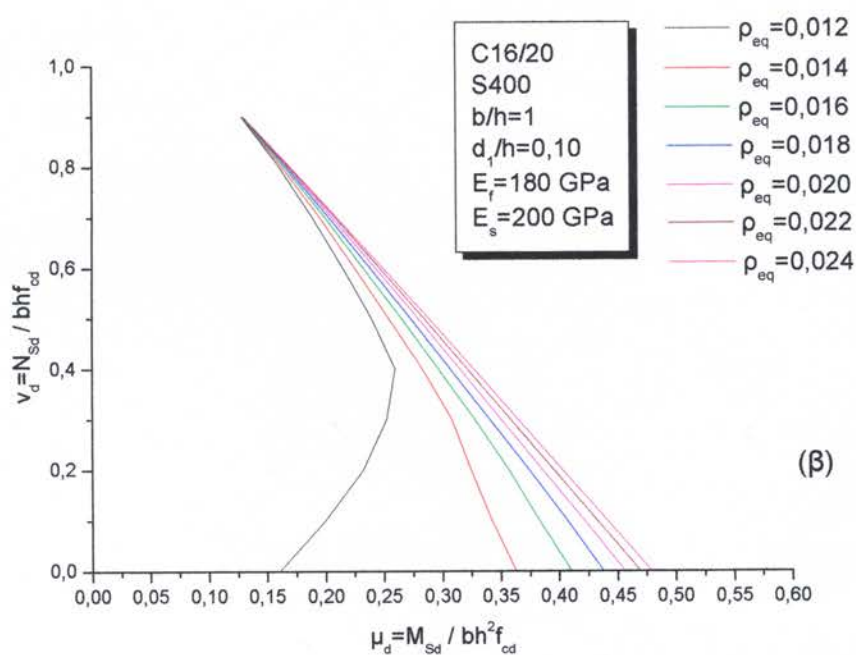
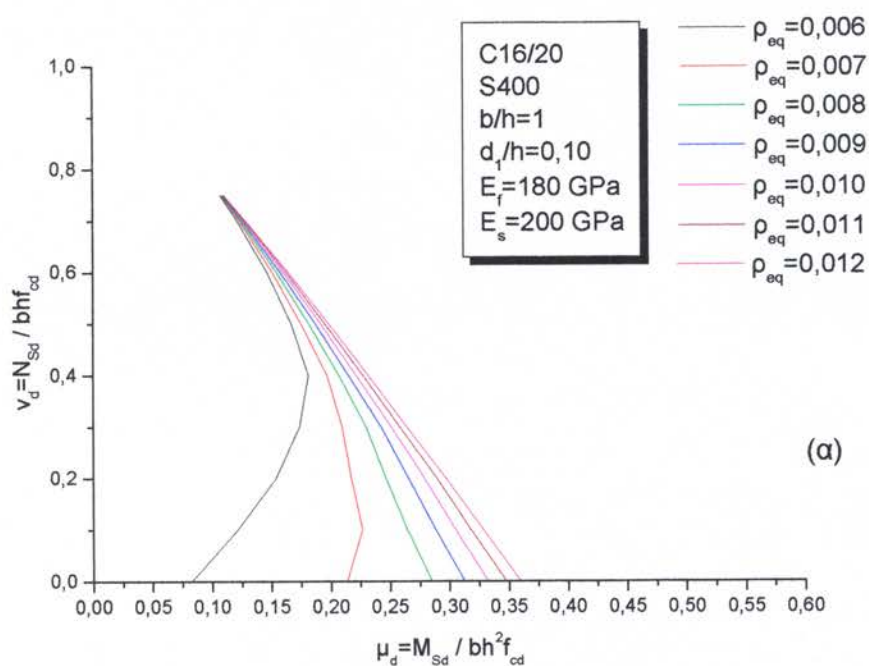
Η διαδικασία υπολογισμών **βέλους κάμψης** και **ανοίγματος ρωγμών** είναι αντίστοιχη αυτής για στοιχεία οπλισμένου σκυροδέματος (π.χ. *fib* 2001).

#### 4.9 Υποστυλώματα

Η ανάλυση διατομών για τις οποίες πρέπει να ληφθεί υπόψη η αλληλεπίδραση ροπής κάμψης – αξονικής δύναμης (υποστυλώματα) γίνεται σε πλήρη αναλογία με τα προαναφερθέντα, με βασική διαφορά την προσθήκη ενός επί πλέον όρου στις εξισώσεις ισορροπίας δυνάμεων και υπολογισμού ροπών, αυτού που αντιστοιχεί στην αξονική δύναμη (τιμή σχεδιασμού) που ασκείται στη διατομή, δηλ.  $N_{Sd}$  στο δεξί μέλος της εξ. (4.5) και  $N_{Sd}[(h/2) - \delta_G x]$  στο δεξί μέλος της εξ. (4.8). Επί πλέον μπορεί να αγνοηθεί η συνεισφορά των συνθέτων υλικών σε θλίψη. Υπό την προϋπόθεση επαρκούς αγκύρωσης (π.χ. συνέχειας των συνθέτων υλικών στους κόμβους, Σχ. 4.2β-γ), ο μηχανισμός αστοχίας θα είναι ένας από τους παρακάτω:

- διαρροή εφελκυόμενου χάλυβα ( $\varepsilon_{s1} \geq f_{yd} / E_s$ ), σύνθλιψη σκυροδέματος ( $\varepsilon_c = \varepsilon_{cu}$ )
- διαρροή εφελκυόμενου χάλυβα ( $\varepsilon_{s1} \geq f_{yd} / E_s$ ), αποκόλληση ή θραύση συνθέτων υλικών [ $\varepsilon_f = \varepsilon_{f,lim} = \min(\varepsilon_{fud}, \varepsilon_{fbd,fl-sh})$ ]
- σύνθλιψη σκυροδέματος ( $\varepsilon_c = \varepsilon_{cu}$ )

Ο συνδυασμός ροπής – αξονικής δύναμης κατά την αστοχία της κρίσιμης διατομής μπορεί να παρασταθεί γραφικά μέσω διαγραμμάτων αλληλεπίδρασης, όπως για παράδειγμα αυτά του Σχ. 4.11α-β.



**Σχ. 4.11** Διάγραμμα αλληλεπίδρασης τετραγωνικής διατομής ( $b=h$ ) για μονοαξονική κάμψη με αξονική δύναμη. Σκυρόδεμα C16/20, χάλυβας S400,  $d_1/h=0.10$ ,  $E_f=180 \text{ GPa}$ .  
 (α)  $A_{s,tot}=0.006$ , (β)  $A_{s,tot}=0.012$ .

Στα παραπάνω διαγράμματα το ισοδύναμο ογκομετρικό ποσοστό διαμήκους οπλισμού,  $\rho_{eq}$ , ορίζεται ως

$$\rho_{eq} = \rho_s + \rho_f \frac{E_f}{E_s} = \frac{A_{s,tot}}{bd} + \frac{A_{f,tot}}{bd} \frac{E_f}{E_s} \quad (4.23)$$

όπου  $A_{s,tot} = 2A_{s1} = 2A_{s2}$  (συμμετρικά τοποθετημένος οπλισμός χάλυβα) και  $A_{f,tot} = 2A_f$  (συμμετρικά τοποθετημένος οπλισμός ενίσχυσης). Επίσης, απλουστευτικά έχει υποτεθεί ότι  $\varepsilon_{f,min} = 0.008$ .

Από τα παραπάνω διαγράμματα αλληλεπίδρασης φαίνεται ότι η αποτελεσματικότητα των συνθέτων υλικών στην αύξηση της ροπής αντοχής εξαρτάται σημαντικά από το μέγεθος του αξονικού φορτίου, και πάντως μειώνεται όσο αυτό αυξάνεται. Επίσης φαίνεται ότι οι καμπύλες αλληλεπίδρασης συγκλίνουν προς σημείο πάνω από το οποίο ολόκληρη η διατομή βρίσκεται σε θλίψη, και επομένως η δράση των συνθέτων υλικών μπορεί (προσεγγιστικά) να αγνοηθεί (οπότε όλες οι καμπύλες ταυτίζονται).

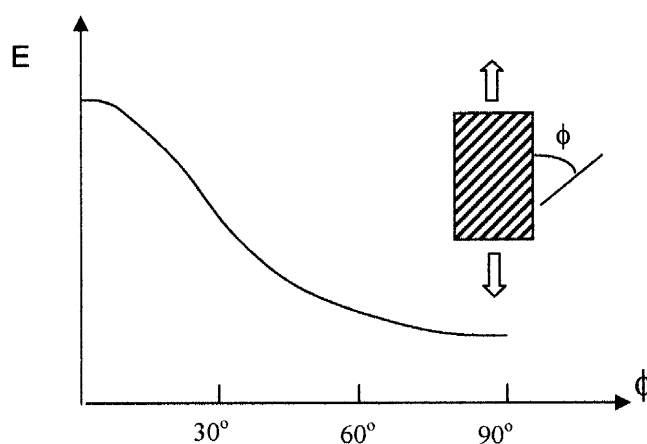
Ως γενικό συμπέρασμα μπορούμε να αναφέρουμε ότι η εφαρμογή των συνθέτων υλικών για την αύξηση της καμπτικής αντοχής υποστυλωμάτων δεν είναι πάντοτε πρακτικά (κατασκευαστικά) εφικτή, ενώ είναι γενικά περιορισμένης αποτελεσματικότητας, εκτός αν η αξονική δύναμη διατηρείται σε χαμηλά επίπεδα (π.χ.  $\nu_d < 0.2$ ).

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

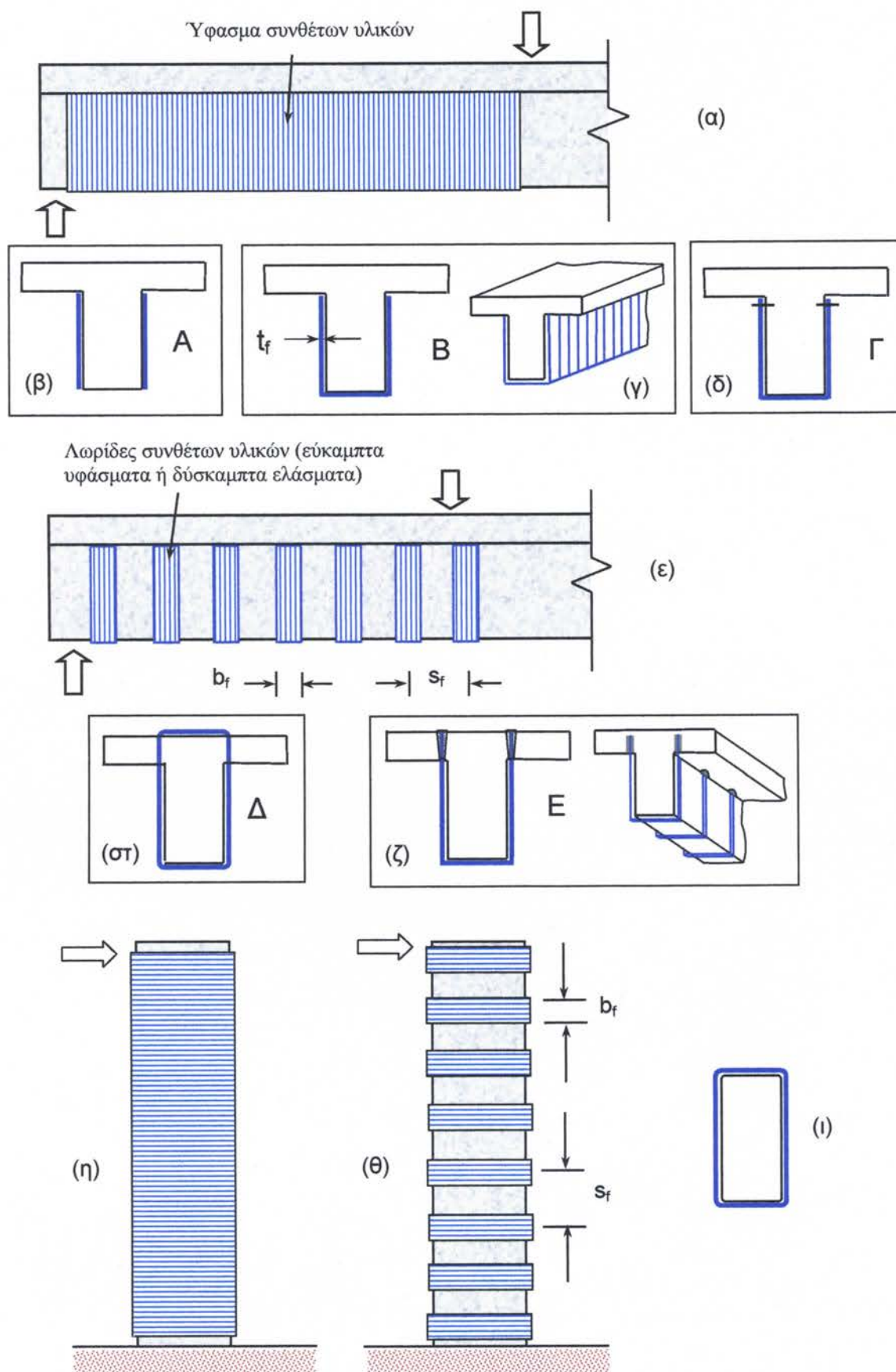
### ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΣΕ ΔΙΑΤΜΗΣΗ

#### 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)-(ζ) δοκού, (η)-(ι) υποστύλματος.



(α)

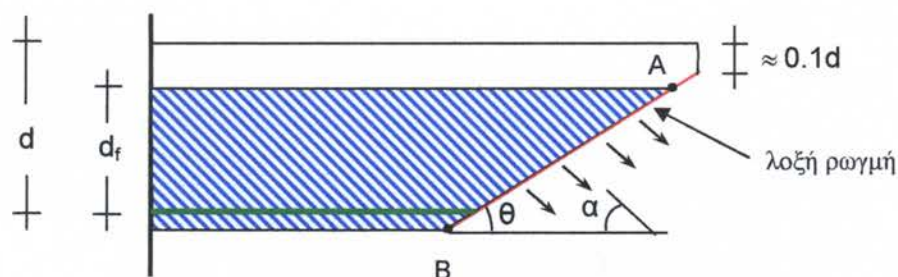


(β)

**Σχ. 5.3** Ενίσχυση (α) κρίσιμης περιοχής δοκού και (β) κοντού 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’ αναλογία με τους εσωτερικούς συνδετήρες**, Σχ. 5.4.



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

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

$$V_{fd} = \frac{2t_f b_f}{s_f} d_f (\epsilon_{fe,d} E_f) (\cot \theta + \cot \alpha) \sin \alpha \quad (5.1)$$

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. 5.2στ, ζ, ι),  $\theta$  = γωνία ρωγμής ως προς τον άξονα του μέλους (μπορεί να θεωρηθεί  $45^\circ$ ),  $\alpha$  = γωνία διεύθυνσης ινών ως προς τον άξονα του μέλους,  $E_f$  = μέτρο ελαστικότητας συνθέτων υλικών παράλληλα στη διεύθυνση των ινών και  $\varepsilon_{fe,d}$  = μέση τιμή, κατά μήκος της ρωγμής, της παραμόρφωσης στα σύνθετα υλικά παράλληλα στη διεύθυνση των ινών, κατά την οριακή κατάσταση αστοχίας λόγω τέμνουσας (“ενεργή” παραμόρφωση).

Εδώ αξίζει να επισημανθεί ότι οι μόνες διαφορές της εξ. (5.1) με την αντίστοιχη για τη συνεισφορά  $V_{wd}$  του συμβατικού οπλισμού διάτμησης (συνδετήρες), είναι:  $2t_f b_f$  αντί  $A_{sw}$  (εμβαδόν διατομής συνδετήρων),  $s_f$  αντί  $s$  (απόσταση συνδετήρων) και  $\varepsilon_{fe,d} E_f$  αντί για  $f_{ywd}$  (τάση διαρροής συνδετήρων).

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

$$V_{fd} = 2t_f d_f (\varepsilon_{fe,d} E_f) (\cot \theta + \cot \alpha) \sin^2 \alpha \quad (5.2)$$

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

$$V_{fd} = 2t_f d_f (\varepsilon_{fe,d} E_f) \cot \theta \quad (5.3)$$

Παραπάνω αναφέρθηκε ότι κατά την οριακή κατάσταση αστοχίας του μέλους σε τέμνουσα, στα σύνθετα υλικά έχει αναπτυχθεί μία “ενεργή” παραμόρφωση  $\varepsilon_{fe,d}$ , με αντίστοιχη ορθή τάση  $\varepsilon_{fe,d} E_f$ . Ο υπολογισμός της πραγματικής κατανομής των ορθών τάσεων και παραμορφώσεων στα σύνθετα υλικά κατά μήκος της λοξής ρωγμής είναι σχετικά περίπλοκος. Η παραμόρφωση αυτή είναι περίπου ανάλογη του ανοίγματος της ρωγμής, το οποίο είναι ελάχιστο στη θέση Α του Σχ. 5.4 και μέγιστο στη θέση Β, οπότε και η παραμόρφωση μεταβάλλεται περίπου γραμμικά μέχρι μία μέγιστη τιμή,  $\varepsilon_{fd,max}$ , η οποία είναι και η καθοριστική για την αστοχία του συνθέτου υλικού. Βάσει των παραπάνω υποθέσεων, η “ενεργή” παραμόρφωση ισούται με

$$\varepsilon_{fe,d} = D_f \varepsilon_{fd,max} = \left( 1 - \frac{0.5d_f}{0.9d} \right) \varepsilon_{fd,max} \quad (5.4)$$

Η τιμή της παραμόρφωσης  $\varepsilon_{fd,max}$  κατά την οριακή κατάσταση αστοχίας λόγω τέμνουσας εξαρτάται από το μηχανισμό αστοχίας, που μπορεί να είναι ένας από τους παρακάτω:

*Θραύση των συνθέτων υλικών*

Αναμένεται να συμβεί κατά κανόνα σε επαρκώς αγκυρωμένους (κλειστούς) μανδύες (π.χ. Σχ. 5.2στ,ζ,ι). Στην περίπτωση αυτή

$$\varepsilon_{fd,max} = \frac{f_{fde}}{E_f} \quad (5.5)$$

όπου  $f_{fde}$  η (μειωμένη ως προς την εφελκυστική αντοχή, λόγω συγκεντρώσεων τάσεων στις γωνίες του μέλους) αντοχή σχεδιασμού της εξ. (3.2). Ελλείπει περισσοτέρων στοιχείων μπορεί να θεωρηθεί ότι ο μειωτικός συντελεστής  $\eta_e$  για τον υπολογισμό της  $f_{fde}$  είναι 0.80 (αντιστοιχεί σε 20% μείωση της αντοχής που προκύπτει μέσω δοκιμής εφελκυσμού).

*Αποκόλληση των συνθέτων υλικών*

Για μανδύες ανοικτού τύπου (π.χ. τρίπλευροι ή δίπλευροι, Σχ. 5.2β ή Σχ. 5.2γ, αντίστοιχα) η πιθανότητα αστοχίας με θραύση του μανδύα είναι σχετικά μικρή. Κύριος μηχανισμός αστοχίας είναι η αποκόλληση των συνθέτων υλικών (Σχ. 5.5), για την οποία αποδεχόμαστε την ισχύ του αναλυτικού προσομοιώματος της Ενότητας 3.3.2. Στο προσομοίωμα αυτό εδώ θεωρούμε  $k_c = 1$ ,  $k_b = 1$  και μία προσαύξηση της παραμόρφωσης αποκόλλησης (όπως και στους υπολογισμούς ενισχύσεων έναντι κάμψης), δεδομένου ότι η πραγματική εντατική κατάσταση στη διεπιφάνεια συνθέτων υλικών – σκυροδέματος στην περιοχή της ρωγμής διαφέρει ως προς αυτήν της πειραματικής διάταξης του Σχ. 3.2.

$$\text{για } \ell_b \geq \ell_{b,max} : \quad \varepsilon_{fd,max} = \alpha_{sh} \frac{0.5}{\gamma_b} \sqrt{\frac{f_{ctm}}{E_f t_f}} \quad (5.6a)$$

$$\text{για } \ell_b < \ell_{b,max} : \quad \varepsilon_{fd,max} = \alpha_{sh} \frac{0.5}{\gamma_b} \sqrt{\frac{f_{ctm}}{E_f t_f}} \frac{\ell_b}{\ell_{b,max}} \left( 2 - \frac{\ell_b}{\ell_{b,max}} \right) \quad (5.6b)$$

όπου  $\alpha_{sh} = 1.25$ ,

$$\ell_b = \frac{d_f}{\sin \alpha} \quad \text{για "τρίπλευρο" μανδύα τύπου U} \quad (5.7a)$$

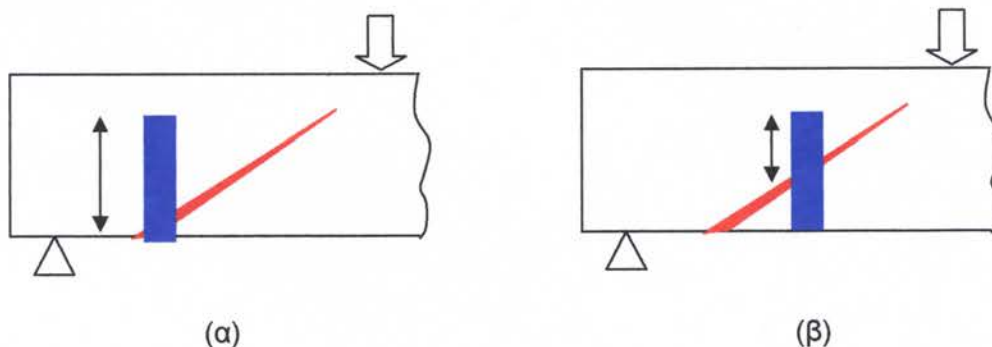
$$\ell_b = \frac{d_f}{2 \sin \alpha} \quad \text{για "δίπλευρο" μανδύα τύπου I I} \quad (5.7b)$$

$$\ell_{b,max} = \sqrt{\frac{E_f t_f}{c_2 f_{ctm}}} \quad (5.8)$$



Σχ. 5.5 Αποκόλληση οπλισμών διάτμησης.

Ας σημειωθεί ότι στην περίπτωση τρίπλευρου μανδύα το καλύτερα αγκυρωμένο τμήμα συνθέτων υλικών είναι αυτό στο κάτω τμήμα, με μήκος αγκύρωσης  $d_f / \sin \alpha$  (Σχ. 5.6α), ενώ στην περίπτωση δίπλευρου μανδύα το μήκος αγκύρωσης είναι μέγιστο στο μέσο της ρωγμής (Σχ. 5.6β). Αυτό εξηγεί τον αριθμό 2 στον παρονομαστή της εξ. (5.7β).



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

#### Πρόωρη αστοχία λόγω μεγάλου ανοίγματος της λοξής ρωγμής

Η ανάπτυξη μεγάλου ανοίγματος ρωγμής ενδέχεται να μειώσει σημαντικά την συνεισφορά των μηχανισμών ανάληψης τέμνουσας που εκφράζονται μέσω του όρου  $V_{cd}$  (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  $\varepsilon_{fd,max}$  σε μία μέγιστη τιμή, της τάξης του 0.6%.

### 5.3 Σύνοψη υπολογισμών

Η συνεισφορά των συνθέτων υλικών στην ανάληψη τέμνουσας υπολογίζεται μέσω του όρου  $V_{fd}$  στη γνωστή σχέση για την τέμνουσα σχεδιασμού:

$$V_{Rd} = \min (V_{cd} + V_{wd} + V_{fd}, V_{Rd2}) \quad (5.9)$$

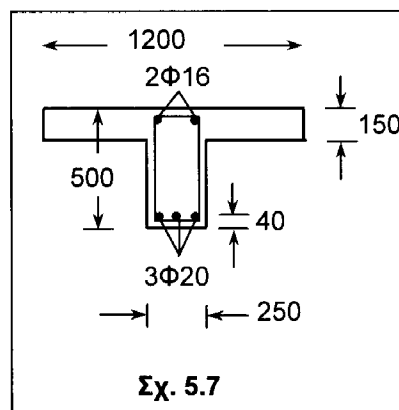
όπου η  $V_{cd}$  εκφράζεται ως ποσοστό της  $V_{Rd1}$  (π.χ. 30% στις κρίσιμες περιοχές δοκών και υποστυλωμάτων αν  $v_d < 0.1$ , 90% στις κρίσιμες περιοχές υποστυλωμάτων αν  $v_d > 0.1$ , 25% στις κρίσιμες περιοχές τοιχωμάτων, 100% στις μη κρίσιμες περιοχές). Η  $V_{fd}$  στην εξ. (5.9) δίνεται από την εξ. (5.1) ή (5.2) για σύνθετα υλικά μορφής λωρίδων ανά αποστάσεις ή συνεχούς υφάσματος, αντίστοιχα, με  $\varepsilon_{fe,d}$  αυτό που δίνει η εξ. (5.4), στην οποία το  $\varepsilon_{fd,max}$  υπολογίζεται ως:

- Για κλειστό, επαρκώς αγκυρωμένο μανδύα (π.χ. υποστυλώματα):  
Το ελάχιστο της τιμής που δίνει η εξ. (5.5) και του 0.6%.
- Για ανοικτό, ανεπαρκώς αγκυρωμένο μανδύα (π.χ. δίπλευρος ή τρίπλευρος):  
Το ελάχιστο της τιμής που δίνει η εξ. (5.5), η εξ. (5.6) και του 0.6%.

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 γύρω στα 2 MPa. Ζητείται ο σχεδιασμός μανδύα συνθέτων υλικών έτσι ώστε η πλακοδοκός να παραλάβει 75 kN πρόσθετη τέμνουσα (πλέον δηλαδή αυτής που ήδη παραλαμβάνει το υφιστάμενο μέλος ως έχει) στις κρίσιμες περιοχές.



Θεωρούμε ότι έχουμε στη διάθεσή μας ύφασμα συνθέτων υλικών, πάχους 0.12 mm, με ίνες άνθρακα, μέτρο ελαστικότητας  $E_f = 230$  GPa και εφελκυστική αντοχή σχεδιασμού 3200 MPa. Η τιμή αυτή, μειωμένη κατά 20%, δίνει την αντοχή σχεδιασμού του μανδύα:

$f_{de}=2560$  MPa. Ο μανδύας θα εφαρμοσθεί σύμφωνα με τη διάταξη του Σχ. 5.2γ (τρίπλευρος).

$$\text{Εξ. (5.5): } \varepsilon_{fd,max} = 2560/230000 = 0.0111$$

$$\text{Εξ. (5.7α): } d_f = 310 \text{ mm, } \alpha = 90^\circ, \ell_b = 310 \text{ mm}$$

Ανάληψη τέμνουσας από μία στρώση μανδύα:

$$\text{Εξ. (5.8): } \ell_{b,max} = \sqrt{\frac{230000 \times 0.12}{2 \times 2}} = 83 \text{ mm} < \ell_b$$

$$\text{Εξ. (5.6α): } \varepsilon_{fd,max} = 1.25 \times \frac{0.5}{1.5} \sqrt{\frac{2}{230000 \times 0.12}} = 0.0035$$

Τελικά λαμβάνεται  $\varepsilon_{fd,max} = \min(0.0111, 0.0035, 0.0060) = \underline{0.0035}$ .

$$\text{Εξ. (5.4): } \varepsilon_{fe,d} = D_f \varepsilon_{fd,max} = \left(1 - \frac{0.5 \times 310}{0.9 \times 460}\right) \times 0.0035 = 0.62 \times 0.0035 = \mathbf{0.0022}$$

Συνεπώς, κατα την οριακή κατάσταση αστοχίας από τέμνουσα η παραμόρφωση σχεδιασμού για τα σύνθετα υλικά που αντιστοιχεί σε μία στρώση μανδύα θα είναι 0.0022.

$$\text{Εξ. (5.3): } V_{fd} = 2 \times 0.12 \times 310(0.0022 \times 230) = 37.65 \text{ kN}$$

Η παραπάνω τιμή είναι η τέμνουσα που θα παραληφθεί από μία στρώση μανδύα. Η τιμή αυτή είναι αρκετά χαμηλή και γι' αυτό δοκιμάζουμε 3 στρώσεις:

$$\text{Εξ. (5.8): } \ell_{b,max} = \sqrt{\frac{230000 \times (3 \times 0.12)}{2 \times 2}} = 144 \text{ mm} < \ell_b$$

$$\text{Εξ. (5.6α): } \varepsilon_{fd,max} = 1.25 \times \frac{0.5}{1.5} \sqrt{\frac{2}{230000 \times (3 \times 0.12)}} = 0.0020$$

Τελικά λαμβάνεται  $\varepsilon_{fd,max} = \min(0.0111, 0.0020, 0.0060) = \underline{0.0020}$ .

$$\text{Εξ. (5.4): } \varepsilon_{fe,d} = D_f \varepsilon_{fd,max} = \left(1 - \frac{0.5 \times 310}{0.9 \times 460}\right) \times 0.0020 = 0.62 \times 0.0020 = \mathbf{0.0012}$$

$$\text{Εξ. (5.3): } V_{fd} = 2 \times (3 \times 0.12) \times 310(0.0012 \times 230) = 61.60 \text{ kN} < 75 \text{ kN}$$

Δοκιμάζουμε με 4 στρώσεις:

$$\text{Εξ. (5.8): } \ell_{b,max} = \sqrt{\frac{230000 \times (4 \times 0.12)}{2 \times 2}} = 166 \text{ mm} < \ell_b$$

$$\text{Εξ. (5.6α): } \varepsilon_{fd,max} = 1.25 \times \frac{0.5}{1.5} \sqrt{\frac{2}{230000 \times (4 \times 0.12)}} = 0.0018$$

Τελικά λαμβάνεται  $\varepsilon_{fd,max} = \min(0.0111, 0.0018, 0.0060) = \underline{0.0018}$ .

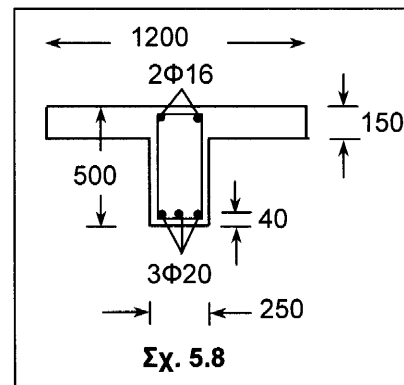
$$\text{Εξ. (5.4): } \varepsilon_{fe,d} = D_f \varepsilon_{fd,max} = \left(1 - \frac{0.5 \times 310}{0.9 \times 460}\right) \times 0.0018 = 0.62 \times 0.0018 = \mathbf{0.0011}$$

$$\text{Εξ. (5.3): } V_{fd} = 2 \times (4 \times 0.12) \times 310 (0.0011 \times 230) = 75.30 \text{ kN} > 75 \text{ kN} \quad \text{OK}$$

Επομένως απαιτούνται 4 στρώσεις.

### 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. 5.2ζ). Η ενίσχυση αποσκοπεί και πάλι στην αύξηση της τέμνουσας σχεδιασμού κατά 75 kN.



Θεωρούμε ότι έχουμε στη διάθεσή μας ελάσματα πλάτους 40 mm, πάχους 1.4 mm, με ίνες άνθρακα, μέτρου ελαστικότητας  $E_f = 120 \text{ GPa}$  και εφελκυστική αντοχή σχεδιασμού 1700 MPa. Η τιμή αυτή, μειωμένη κατά 20%, δίνει την αντοχή σχεδιασμού του κάθε ελάσματος:  $f_{fde} = 1360 \text{ MPa}$ .

$$\text{Εξ. (5.5): } \varepsilon_{fd,max} = 1360/120000 = 0.0113$$

Τελικά λαμβάνεται  $\varepsilon_{fd,max} = \min(0.0113, 0.0060) = \underline{0.0060}$ .

$$d_f = 0.9d$$

$$\text{Εξ. (5.4): } \varepsilon_{fe,d} = D_f \varepsilon_{fd,max} = 0.5 \times 0.0060 = \mathbf{0.003}$$

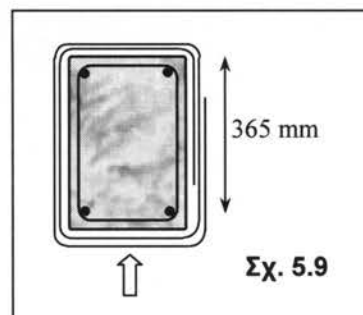
Υπολογισμός απόστασης ελασμάτων:

$$\text{Εξ. (5.1): } V_{fd} = \frac{2 \times 1.4 \times 40}{s_f} \times 0.9 \times 460 \times (0.003 \times 120) > 75 \text{ kN} \rightarrow s_f < 223 \text{ mm}$$

$s_{f,max} = 0.5 \times 0.9 \times 460 = 207 \text{ mm}$ . Τελικά προτείνεται η χρήση των ελασμάτων ανά αποστάσεις 200 mm.

### Παράδειγμα 5.3

Θεωρούμε υποστύλωμα ορθογωνικής διατομής 250x400 mm, με στατικό ύψος 365 mm. Η εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος εκτιμάται γύρω στα 2 MPa. Ζητείται ο σχεδιασμός μανδύα συνθέτων υλικών έτσι ώστε το υποστύλωμα να παραλάβει πρόσθετη τέμνουσα 100 kN παράλληλα στη μεγάλη πλευρά.



Θεωρούμε ότι έχουμε στη διάθεσή μας ύφασμα συνθέτων υλικών, πάχους 0.12 mm, με ίνες άνθρακα, μέτρο ελαστικότητας  $E_f = 230 \text{ GPa}$  και εφελκυστική αντοχή σχεδιασμού  $f_{fd} = 3200 \text{ MPa}$ . Η τιμή αυτή, μειωμένη κατά 20%, δίνει την αντοχή σχεδιασμού του μανδύα:  $f_{fde} = 2560 \text{ MPa}$ . Ο μανδύας θα εφαρμοσθεί σύμφωνα με τη διάταξη του Σχ. 5.2ι (πλήρης περιτύλιξη).

Εξ. (5.5):  $\varepsilon_{fd,max} = 2560/230000 = 0.0111$

Τελικά λαμβάνεται  $\varepsilon_{fd,max} = \min(0.0111, 0.0060) = 0.0060$ .

Εξ. (5.4):  $\varepsilon_{fe,d} = D_f \varepsilon_{fd,max} = 0.5 \times 0.0060 = 0.0030$

Υπολογισμός απαιτούμενου αριθμού στρώσεων:

Εξ. (5.2):  $V_{fd} = 2 \times (n \times 0.12) \times 0.9 \times 365 \times (0.0030 \times 230) \geq 100 \text{ kN} \rightarrow n \geq 1.84$

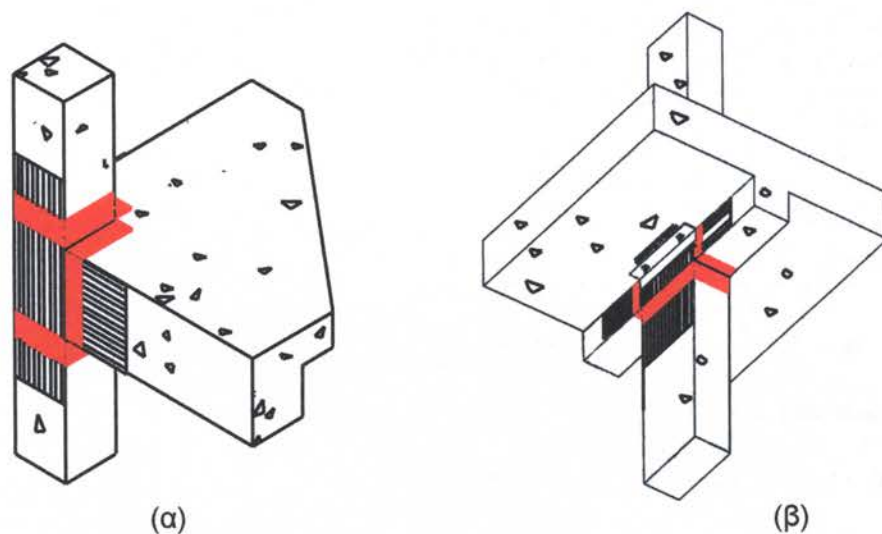
Συνεπώς χρειάζονται 2 στρώσεις (αντιστοιχούν σε πρόσθετη τέμνουσα  $V_{fd} = 108.8 \text{ kN}$ ).

### 5.4 Κόμβοι

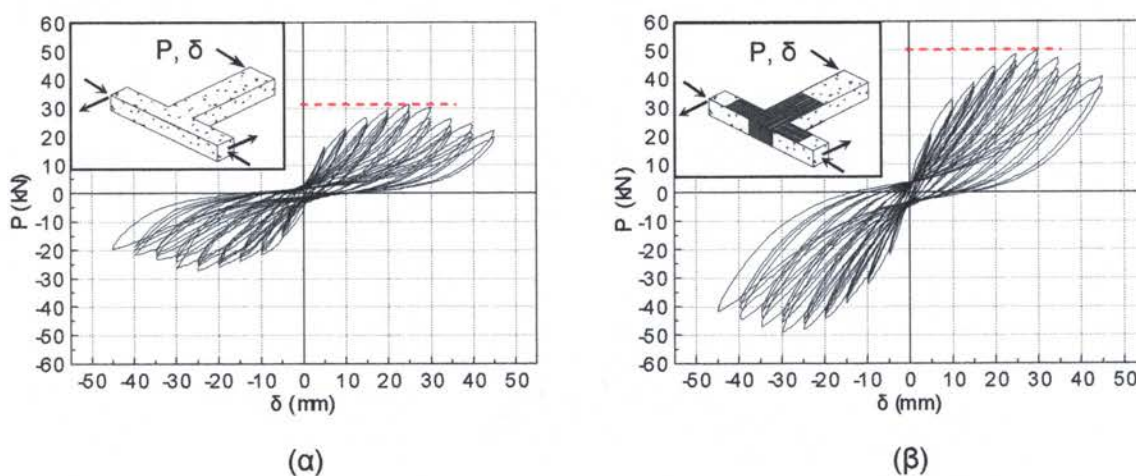
Η μελέτη της ενίσχυσης κόμβων δοκών-υποστυλωμάτων σε διάτμηση ξεκίνησε σχετικά πρόσφατα (π.χ. Αντωνόπουλος 2002, Antonopoulos and Triantafillou 2002, Antonopoulos and Triantafillou 2003), και κατέδειξε ότι ακόμα και σχετικά μικρά ποσοστά συνθέτων υλικών (π.χ. 2-3 στρώσεις υφάσματος με ίνες άνθρακα) καλά αγκυρωμένων έξω από τις περιοχές των κόμβων επαρκούν για την αύξηση της διατμητικής αντοχής των

κόμβων σε ποσοστά μέχρι και 80-100%. Η διάταξη των συνθέτων υλικών για να καταστεί τούτο εφικτό θα πρέπει να περιλαμβάνει υφάσματα τοποθετημένα με τη διεύθυνση των ινών παράλληλη κατά προτεραιότητα στις δοκούς, αλλά όπου είναι δυνατόν και στα υποστυλώματα (π.χ. Σχ. 5.10).

Η σημαντική αύξηση της διατμητικής αντοχής κόμβων μέσω της ενίσχυσης με σύνθετα υλικά καταδεικνύεται μέσω των αποτελεσμάτων του Σχ. 5.11, το οποίο δίνει την καμπύλη φορτίου-μετατόπισης μη ενισχυμένου και ενισχυμένου (με 2 στρώσεις υφάσματος ινών άνθρακα) δοκιμίου μορφής κόμβου σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση (Antonopoulos and Triantafyllou 2003).



**Σχ. 5.10** 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. 5.11** Καμπύλες φορτίου-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.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

## ΠΕΡΙΣΦΙΓΞΗ

## 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 του σκυροδέματος και αύξηση της παραμορφωσιμότητας, δηλαδή της μέγιστης παραμόρφωσης που καταγράφεται στο σκυρόδεμα μέχρι τη θλιπτική αστοχία.
2. Αύξηση της πλαστιμότητας, λόγω αύξησης της παραμορφωσιμότητας.
3. Αύξηση της συνάφειας μεταξύ ράβδων οπλισμού και σκυροδέματος σε περιοχές με ματίσεις και άρα παρεμπόδιση της ολίσθησης των διαμήκων ράβδων στις περιοχές αυτές.
4. Παρεμπόδιση του τοπικού λυγισμού των διαμήκων ράβδων σε περιοχές με έλλειψη συνδετήρων.



(α)



(β)

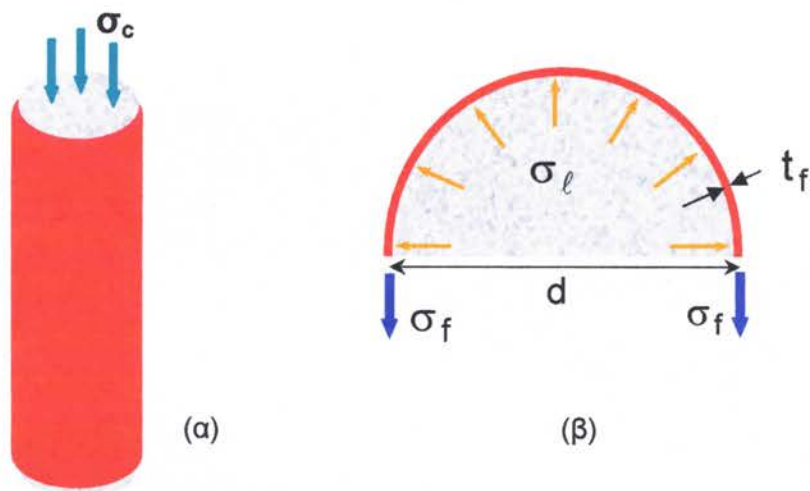
**Σχ. 6.1** Περίσφιγξη υποστυλωμάτων με μανδύες συνθέτων υλικών: (α) εφαρμογή υφάσματος με τις ίνες σε οριζόντια διάταξη, (β) εφαρμογή υφάσματος με τις ίνες υπό γωνία ως προς τον άξονα του μέλους.

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)  $E_f$ .

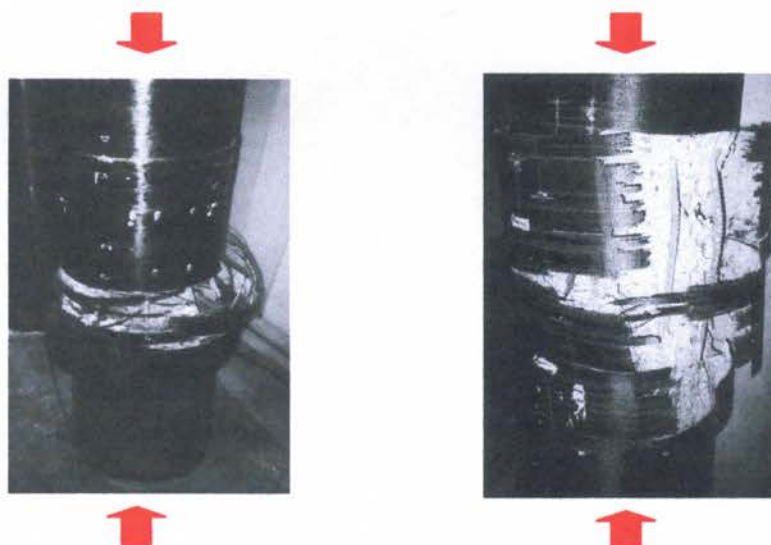


**Σχ. 6.2** (α) Αξονική καταπόνηση υποστυλώματος με μανδύα συνθέτων υλικών. (β) Ανάπτυξη εγκάρσιων τάσεων λόγω διόγκωσης.

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

$$\sigma_r = \frac{2t_f}{d} \sigma_f = \frac{2t_f}{d} E_f \varepsilon_f \quad (6.1)$$

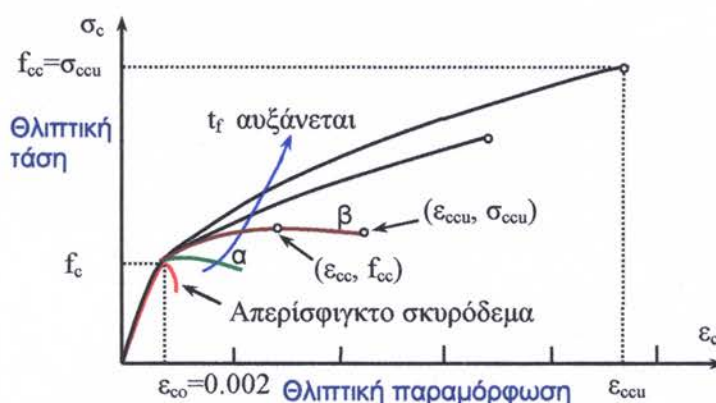
όπου  $\sigma_f$  και  $\varepsilon_f$  = εφελκυστική τάση και παραμόρφωση στο μανδύα, αντίστοιχα. Αποτέλεσμα των τάσεων περίσφιγξης  $\sigma_r$  είναι η παρεμπόδιση της ρηγμάτωσης και άρα η αύξηση της αντοχής και της παραμορφωσιμότητας, έως ότου η εφελκυστική τάση  $\sigma_f$  (αντίστοιχη παραμόρφωση  $\varepsilon_f$ ) στον μανδύα φθάσει την αντοχή του,  $f_{fde}$  (αντίστοιχη παραμόρφωση  $\varepsilon_{fud,e}$ ), 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  $\sigma_f$  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 του μειωτικού συντελεστή  $\eta_e$ , που μπορεί να θεωρηθεί προσεγγιστικά περίπου ίσος με 0.7-0.9:

$$f_{fde} = \eta_e f_{fd} \quad (6.2)$$



**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 μέγιστη παραμόρφωση  $\varepsilon_{ccu}$  (καμπύλη α στο Σχ. 6.4).
- Για μανδύες σχετικά μικρού πάχους η αντοχή του περισφιγμένου σκυροδέματος  $f_{cc}$  αντιστοιχεί σε παραμόρφωση  $\varepsilon_{cc}$  μικρότερη από τη μέγιστη ( $\varepsilon_{ccu}$ ) (καμπύλη β στο Σχ. 6.4).
- Για δεδομένο τύπο συνθέτων υλικών, η αντοχή  $f_{cc}$  και η μέγιστη παραμόρφωση  $\varepsilon_{ccu}$  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 μέγιστη παραμόρφωση του σκυροδέματος  $\varepsilon_{ccu}$  αυξάνεται με την αντοχή του μανδύα  $f_{fde}$  αλλά κυρίως με την μέγιστη παραμόρφωσή του,  $\varepsilon_{fud,e}$  (εδώ πλεονεκτούν οι ίνες γυαλιού).
- Για μανδύες ίσης δυστένειας (εκφράζεται από το γινόμενο  $E_f t_f$ ), η αντοχή  $f_{cc}$  αυξάνεται με την μέγιστη παραμόρφωση του μανδύα  $\varepsilon_{fud,e}$ .

## 6.2.2 Αναλυτικό προσομοίωμα σχεδιασμού

Σε ό,τι αφορά στο σχεδιασμό μανδυνών, 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 μέγιστη παραμόρφωση σχεδιασμού ( $\varepsilon_{ccud}$ ). Για τον υπολογισμό των εν λόγω ποσοτήτων η διεθνής βιβλιογραφία έχει να προσφέρει πληθώρα αναλυτικών προσομοιωμάτων, ένα εκ των οποίων παρουσιάζεται ακολούθως για την περίσφιγξη ορθογωνικών διατομών πλευρών  $b$  και  $d$  ( $b \geq d$ ) με ακτίνα καμπυλότητας στις γωνίες  $r_c$  (fib 2001):

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

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

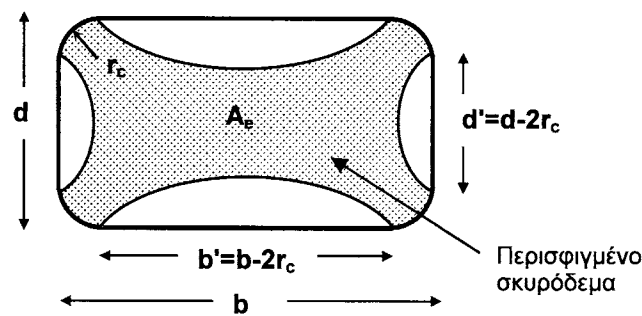
$$E_{\text{sec,ud}} = \frac{E_c}{1 + 2 \left( \frac{E_c}{f_{cd}} - \frac{1}{0.002} \right) \frac{f_{fde}}{E_f}} \quad (6.5)$$

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

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

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

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



**Σχ. 6.5** Η περίσφιγξη σκυροδέματος (με σύνθετα υλικά) σε ορθογωνικές διατομές επιτυγχάνεται μέσω 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  $k_e$  = **συντελεστής αποτελεσματικότητας** 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. 6.6β) και (γ) από τη διεύθυνση των ινών σε σχέση με τον άξονα του περισφιγμένου μέλους (Σχ. 6.6γ). Συγκεκριμένα, είναι:

$$k_e = k_{e1} \times k_{e2} \times k_{e3} \leq 1 \quad (6.10)$$

Συντελεστής διατομής:

$$k_{e1} = \frac{A_e}{A_g} = 1 - \frac{b'^2 + d'^2}{3A_g \left( 1 - \frac{A_s}{A_g} \right)} \quad (6.11)$$

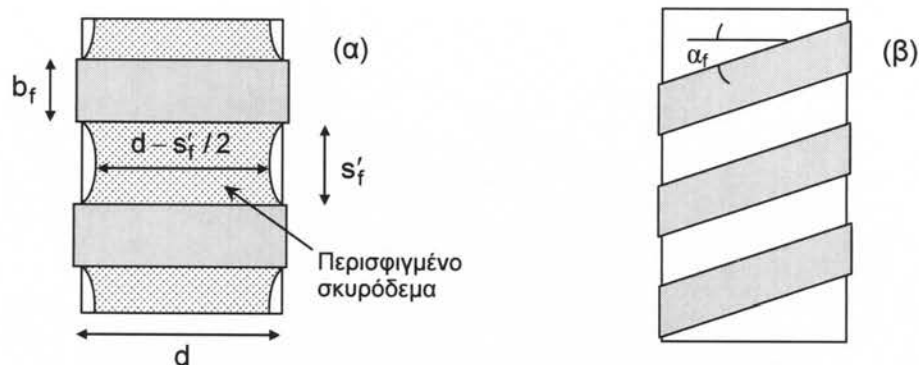
Συντελεστής κάλυψης:

$$k_{e2} = \frac{\left(1 - \frac{s'_f}{2d}\right)^2}{1 - \frac{A_s}{A_g}} \quad (6.12)$$

Συντελεστής διεύθυνσης:

$$k_{e3} = \frac{1}{1 + (\tan \alpha_f)^2} \quad (6.13)$$

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),  $\alpha_f$  = γωνία ινών ως προς τον άξονα του μέλους (Σχ. 6.6β). Σημειώνεται ότι για κυκλικές διατομές  $k_{e1}=1$ , για πλήρη κάλυψη του στοιχείου  $k_{e2}=1$  και για οριζόντια διάταξη των ινών  $k_{e3}=1$ .



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

Αν οι υπολογισμοί απαιτούν, πλέον της αντοχής και μέγιστης παραμόρφωσης, τον πλήρη **κατασταστικό νόμο** για σκυρόδεμα περισφιγμένο μέσω συνθέτων υλικών (π.χ. 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. 6.7:

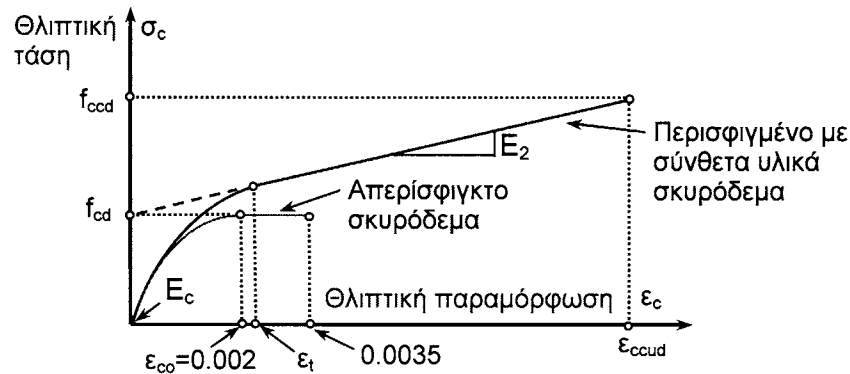
$$\sigma_c = E_c \varepsilon_c - \frac{(E_c - E_2)^2}{4f_{cd}} \varepsilon_c^2 \quad \text{για } 0 \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_t \quad (6.14\alpha)$$

$$\sigma_c = f_{cd} + E_2 \varepsilon_c \quad \text{για } \varepsilon_t \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{ccud} \quad (6.14\beta)$$

όπου

$$\varepsilon_t = \frac{2f_{cd}}{(E_c - E_2)} \quad (6.15)$$

$$E_2 = \frac{f_{ccd} - f_{cd}}{\varepsilon_{ccud}} \quad (6.16)$$




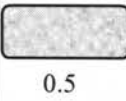
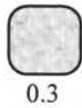
**Σχ. 6.7** Καμπύλες τάσης – παραμόρφωσης για απερίσφιγκτο και περισφιγμένο μέσω συνθέτων υλικών σκυρόδεμα.

### Παράδειγμα 6.1

Θεωρούμε ορθογωνική διατομή σκυροδέματος αντοχής  $f_{cd} = 20 \text{ MPa}$  και μέτρου ελαστικότητας  $E_c = 33.5 \text{ GPa}$ . Έστω ότι διαθέτουμε δύο διαφορετικούς τύπους υλικών, προκειμένου να τα χρησιμοποιήσουμε για την κατασκευή μανδύα με στόχο την αύξηση της θλιπτικής αντοχής σε  $f_{ccd} = 35 \text{ MPa}$  και της μέγιστης παραμόρφωσης σε  $\varepsilon_{ccud} = 0.025$ : (α) Σύνθετα υλικά ινών άνθρακα με μέτρο ελαστικότητας  $E_f = 230 \text{ GPa}$ , εφελκυστική αντοχή (χαρακτηριστική τιμή)  $f_{fk} = 3500 \text{ MPa}$ , πάχος υφάσματος  $0.12 \text{ mm}$ . (β) Υφάσματα ινών γυαλιού με  $E_f = 70 \text{ GPa}$ ,  $f_{fk} = 2100 \text{ MPa}$ , πάχος υφάσματος  $0.17 \text{ mm}$ . Υποθέτουμε συνήθεις συνθήκες ποιοτικού ελέγχου της εφαρμογής. Τέλος, θεωρούμε ότι η εφελκυστική αντοχή του μανδύα είναι κατά 5% μειωμένη σε σχέση με τις αντίστοιχες ιδιότητες ευθύγραμμων δοκιμίων (δηλαδή  $\eta_e = 0.95$ ).

Για τα σύνθετα υλικά ινών άνθρακα είναι  $f_{fde} = \eta_e (f_{fk} / \gamma_f) = 0.95(3500/1.35) = 2465 \text{ MPa}$  ενώ για τα σύνθετα υλικά ινών γυαλιού  $f_{fde} = 0.95(2100/1.5) = 1330 \text{ MPa}$ . Τα αποτελέσματα για το απαιτούμενο πάχος υφάσματος και τον αντίστοιχο αριθμό στρώσεων δίνονται στον Πίνακα 6.1, για τρεις διαφορετικές περιπτώσεις διατομών.

**Πίνακας 6.1** Απαιτούμενο πάχος υφάσματος για διάφορους τύπους διατομών.

| Διατομή<br>(b, d σε m)   | $r_c$<br>(cm) | $A_g$<br>(cm <sup>2</sup> ) | $k_{e1}$<br>(αποτελεσμα-<br>τικότητα) | Απαιτούμενο πάχος υφάσματος $t_f$ (mm)<br>[και σε () ο αντίστοιχος αριθμός στρώσεων] |                                  |                                |                                  |
|--|---------------|-----------------------------|---------------------------------------|--|----------------------------------|--------------------------------|----------------------------------|
|  |               |                             |                                       | Ίνες άνθρακα   |                                  | Ίνες γυαλιού                   |                                  |
|  |               |                             |                                       | για $f_{ccd} = 35 \text{ MPa}$   | για $\varepsilon_{ccud} = 0.025$ | για $f_{ccd} = 35 \text{ MPa}$ | για $\varepsilon_{ccud} = 0.025$ |
|  d=0.3<br>b=0.3 | 2             | 896.5                       | 0.50                                  | <b>0.39 (4)</b>  | <b>0.31 (3)</b>                  | <b>0.82 (7)</b>                | <b>0.12 (1)</b>                  |
|  0.25<br>0.5    | 2             | 1246.5                      | 0.32                                  | <b>0.74 (7)</b>  | <b>0.56 (5)</b>                  | <b>1.56 (13)</b>               | <b>0.22 (2)</b>                  |
|  0.3<br>0.3     | 4             | 886.2                       | 0.64                                  | <b>0.31 (3)</b>  | <b>0.24 (2)</b>                  | <b>0.64 (6)</b>                | <b>0.10 (1)</b>                  |

Τα αποτελέσματα του Πίνακα 6.1 δείχνουν ότι για τις τιμές ιδιοτήτων υλικών που επελέγησαν: (α) Υλικά με ίνες άνθρακα υπερέρχουν 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 υπερέρχουν 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).

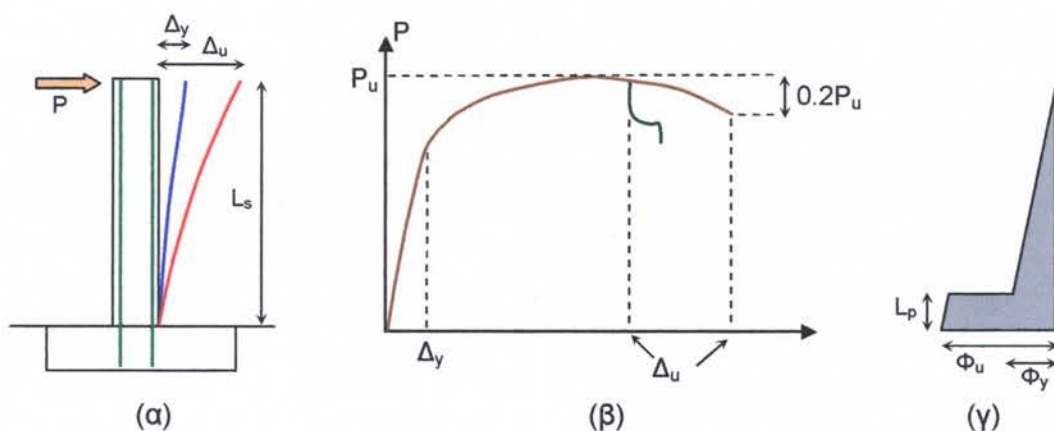
### 6.3 Πλαστιμότητα

Ένας από τους βασικούς στόχους αντισεισμικών ενισχύσεων σε υφιστάμενα δομικά στοιχεία είναι η αύξηση της πλαστιμότητας, η οποία συνήθως ποσοτικοποιείται μέσω του δείκτη πλαστιμότητας μετατοπίσεων,  $\mu_\Delta$ :

$$\mu_\Delta = \frac{\Delta_u}{\Delta_y} \quad (6.17)$$

όπου  $\Delta_u$  η μετατόπιση κατά την αστοχία του μέλους και  $\Delta_y$  η μετατόπιση κατά τη διαρροή του διαμήκους οπλισμού. Σημειώνεται ότι στην περίπτωση μη διακριτής πτώσης της δύναμης λόγω κάποιας αστοχίας (π.χ. θραύση ή λυγισμός ράβδου, θραύση του

μανδύα ενίσχυσης) η  $\Delta_u$  συνήθως ορίζεται εκεί όπου το μέγιστο φορτίο υφίσταται μείωση κατά 20% (Σχ. 6.8β).

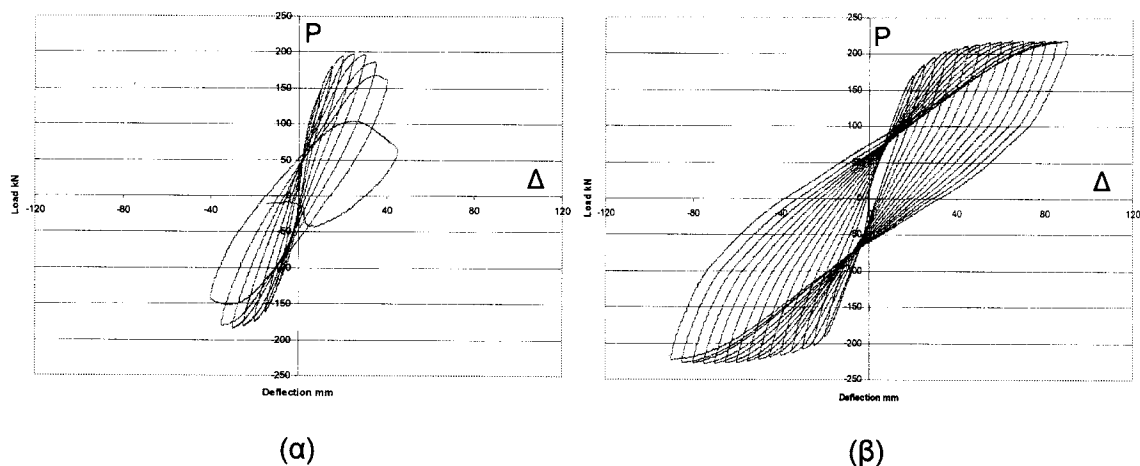


**Σχ. 6.8** (α) Φόρτιση στοιχείου. (β) Διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης. (γ) Διάγραμμα καμπυλοτήτων.

Ο δείκτης πλαστιμότητας  $\mu_\Delta$  μπορεί να αυξηθεί μέσω της κατασκευής μανδύα συνθέτων υλικών στις κρίσιμες περιοχές (Σχ. 6.9), εκεί δηλαδή όπου ενδέχεται να αναπτυχθούν σημαντικές παραμορφώσεις στο χάλυβα και στο σκυρόδεμα, με αποτέλεσμα την ανάπτυξη μεγάλων καμπυλοτήτων. Η περίσφιγξη του σκυροδέματος στις περιοχές αυτές αυξάνει τη μέγιστη παραμόρφωσή του (πλέον του ότι παρεμποδίζει το λυγισμό ράβδων και/ή την απώλεια συνάφειας σε περιοχές με ματίσεις) και άρα την πλαστιμότητα (Σχ. 6.10).



**Σχ. 6.9** Ενίσχυση κρίσιμων περιοχών με στόχο την αύξηση της πλαστιμότητας.



**Σχ. 6.10** Καμπύλες φορτίου – 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 πλαστιμότητας προϋποθέτει τη συσχέτιση του  $\mu_{\Delta}$  με τα χαρακτηριστικά του μανδύα. Τούτο μπορεί να γίνει βάσει των παρακάτω βημάτων:

1. Εκτίμηση του απαιτούμενου δείκτη πλαστιμότητας μετατοπίσεων  $\mu_{\Delta}$  βάσει της μετατόπισης κατά τη διαρροή  $\Delta_y$  και της επιθυμητής μετατόπισης κατά την αστοχία  $\Delta_u$ .
2. Υπολογισμός του μήκους πλαστικής άρθρωσης  $L_p$  (Σχ. 6.8γ), βάσει της γεωμετρίας του μέλους και των χαρακτηριστικών των διαμήκων ράβδων οπλισμού (π.χ. Priestley et al. 1996).

$$L_p = 0.08L_s + 0.022f_y d_b \geq 0.044f_y d_b \quad (6.18)$$

όπου  $L_s$  = διαμητικό μήκος (απόσταση από τη βάση του υποστυλώματος μέχρι το σημείο μηδενισμού ροπών),  $f_y$  = τάση διαρροής διαμήκους οπλισμού (MPa),  $d_b$  = διάμετρος ράβδων διαμήκους οπλισμού. Εναλλακτικά, το  $L_p$  μπορεί να ληφθεί περίπου ίσο με το στατικό ύψος της διατομής.

3. Υπολογισμός του δείκτη πλαστιμότητας καμπυλοτήτων,  $\mu_{\phi} (= \phi_u / \phi_y)$  από τη σχέση:

$$\mu_{\Delta} = 1 + 3(\mu_{\phi} - 1) \frac{L_p}{L_s} \left( 1 - 0.5 \frac{L_p}{L_s} \right) \quad (6.19)$$

4. Υπολογισμός της καμπυλότητας της διατομής κατά τη διαρροή,  $\phi_y$ . Το βήμα αυτό προϋποθέτει ανάλυση της διατομής (εύρεση της σχέσης ροπών – καμπυλοτήτων).

5. Υπολογισμός της καμπυλότητας της διατομής κατά την αστοχία (θραύση σκυροδέματος),  $\phi_u = \mu_\phi \phi_y$ .
6. Υπολογισμός της μέγιστης παραμόρφωσης στο σκυρόδεμα κατά την αστοχία,  $\varepsilon_{ccud} = \phi_u x_u$ , όπου  $x_u$  = ύψος θλιβόμενης ζώνης κατά την αστοχία (και εδώ απαιτείται ανάλυση της διατομής για την εύρεση του  $x_u$ ).
7. Εφαρμογή του αναλυτικού προσομοιώματος περίσφιγξης για τη συσχέτιση του  $\varepsilon_{ccud}$  με τα χαρακτηριστικά (πάχος, εφελκυστική αντοχή) του μανδύα.

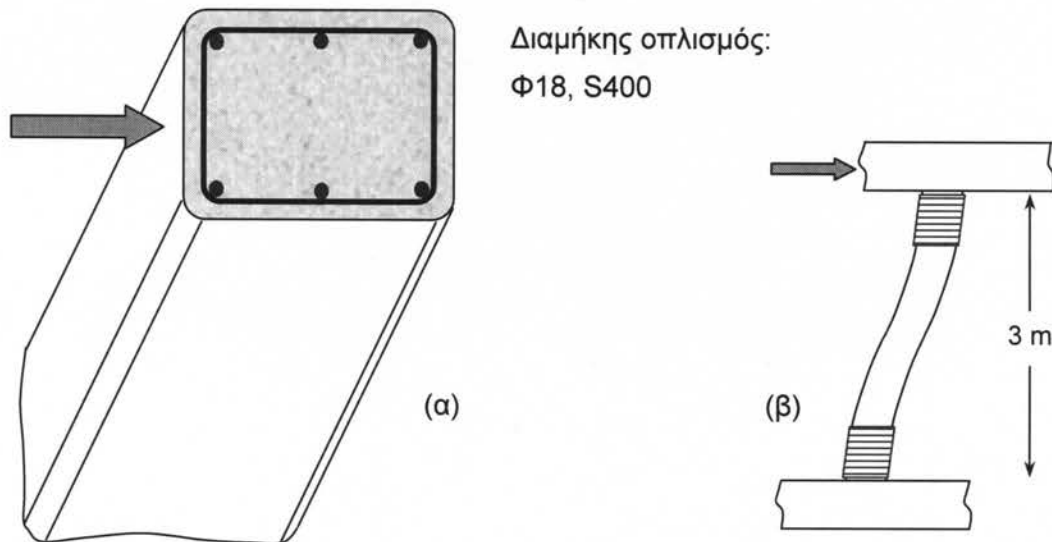
Εναλλακτική (και απλούστερη) μέθοδο συσχέτισης του  $\mu_\Delta$  με τα χαρακτηριστικά του μανδύα αποτελεί η χρήση της παρακάτω εμπειρικής (αλλά αρκετά συντηρητικής) σχέσης (Tastani and Pantazopoulou 2002):

$$\mu_\Delta = 1.3 + 12.4 \left( \frac{\sigma_{\ell ud}}{f_{cd}} - 0.1 \right) \geq 1.3 \quad (6.20)$$

όπου  $\sigma_{\ell ud}$  η τάση περίσφιγξης στο σκυρόδεμα κατά την οριακή κατάσταση αστοχίας (τιμή σχεδιασμού), η οποία (αγνοώντας, επί το συντηρητικότερον, την περίσφιξη μέσω υφισταμένων συνδετήρων) δίνεται 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 φόρτισης.

## Παράδειγμα 6.2

Θεωρούμε υποστύλωμα ορθογωνικής διατομής 0.30x0.40 m, για το οποίο η σεισμική φόρτιση (οριζόντια δύναμη - επιβαλλόμενη μετατόπιση) δρα παράλληλα στη μεγάλη πλευρά (Σχ. 6.11). Υποθέτουμε ότι οι γωνίες του υποστυλώματος έχουν στρογγυλευθεί ώστε να είναι  $r_c = 25$  mm. Το σκυρόδεμα έχει αντοχή σχεδιασμού  $f_{cd} = 10.67$  MPa. Έστω ότι διαθέτουμε ύφασμα ινών άνθρακα με μέτρο ελαστικότητας  $E_f = 230$  GPa, εφελκυστική αντοχή (χαρακτηριστική τιμή)  $f_{fk} = 3500$  MPa και πάχος 0.12 mm, προκειμένου να το χρησιμοποιήσουμε για την κατασκευή μανδύα στις κρίσιμες περιοχές με στόχο την επίτευξη δείκτη πλαστιμότητας μετατοπίσεων  $\mu_\Delta = 4$ . Υποθέτουμε συνθήκες υψηλού βαθμού ποιοτικού ελέγχου της εφαρμογής. Τέλος, θεωρούμε ότι η εφελκυστική αντοχή του μανδύα είναι κατά 10% μειωμένη σε σχέση με τις αντίστοιχες ιδιότητες ευθύγραμμων δοκιμίων (δηλαδή  $\eta_e = 0.90$ ). Ζητούμενο του προβλήματος είναι ο προσεγγιστικός υπολογισμός του απαιτούμενου αριθμού στρώσεων.



**Σχ. 6.11** (α) Φόρτιση υποστυλώματος και (β) διάταξη ενίσχυσης με στόχο την αύξηση της πλαστιμότητας μετατοπίσεων.

Για το υλικό του μανδύα είναι  $f_{fde} = \eta_e (f_{fk} / \gamma_f) = 0.90(3500/1.20) = 2625 \text{ MPa}$ .

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

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

Από την εξ. (6.20) έχουμε:

$$4 = 1.3 + 12.4 \left( \frac{0.48 \times \frac{2t_f}{300} \times 2625}{10.67} - 0.1 \right) \quad \text{άρα} \quad t_f = 0.40 \text{ mm}$$

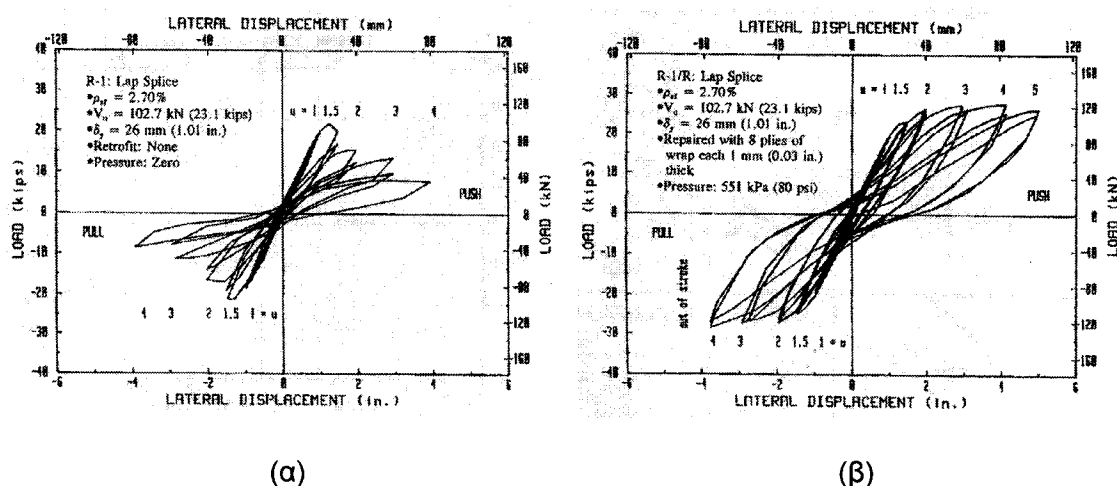
Δηλαδή απαιτούνται  $0.40/0.12 = 3.3 \rightarrow 4$  στρώσεις (επανάληψη των υπολογισμών με  $t_f = 4 \times 0.12 \text{ mm}$  δίνει  $\mu_\Delta = 4.75$ ).

#### 6.4 Ματίσεις

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 (οπότε η αντοχή σε συνάφεια εξαρτάται κυρίως από τον μηχανισμό τριβής στο διάστημα που αναπτύσσεται η αγκύρωση).

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. 6.12.



**Σχ. 6.12** 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  $\ell_s$  εξισορροπείται από την διατμητική τάση συνάφειας  $\tau_b$  που αναπτύσσεται στην περιφέρεια της ράβδου. Η τάση αυτή λαμβάνεται από θεώρηση μοντέλου τριβής, είναι δηλαδή ανάλογη με την εγκάρσια τάση  $\sigma_\ell$  μέσω συντελεστή  $\mu$ , ο οποίος είναι περίπου ίσος με 1.4 (Σχ. 6.13). Απουσία εγκάρσιου οπλισμού στο μήκος μάτισης, η εγκάρσια τάση αναλαμβάνεται μόνον από την εφελκυστική αντοχή της επικάλυψης (πάχους  $c$ ) του οπλισμού, αναπτύσσοντας ρωγμή διαδρομής  $\rho_c$  (Σχ. 6.14β,γ). Η δύναμη  $F$  που μπορεί να αναπτυχθεί σε αυτή την περίπτωση είναι ίση με  $\rho_c(\mu f_{ctm})\ell_s$ .

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

$$A_b f_{yd} = p_c \mu \sigma_\ell \ell_s \quad (6.21)$$

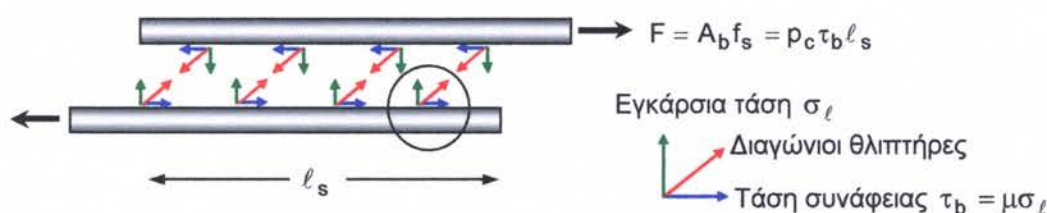
όπου  $\sigma_\ell$  η τάση περίσφιγξης που παρέχει ο μανδύας των συνθέτων υλικών (αγνοώντας, επί το συντηρητικότερον, τη συνεισφορά συνδετήρων) κατά την οριακή κατάσταση αστοχίας ( $\sigma_\ell = \sigma_{\ell ud}$ ). Σημειώνεται ότι η τάση αυτή ασκείται μόνο στις ράβδους εκείνες που βρίσκονται εντός της περιοχής επαρκώς περισφιγμένου σκυροδέματος (σκιασμένη περιοχή Σχ. 6.5, Σχ. 6.14γ), δίνεται δε από τη σχέση:

$$\sigma_{\ell ud} = \frac{2t_f}{d} f_{fde} \quad (6.22)$$

όπου  $d$  η μικρότερη πλευρά του υποστυλώματος. Συνδυάζοντας τις εξ. (6.21)-(6.22) καταλήγουμε στο απαιτούμενο πάχος μανδύα ώστε να αποφεύγεται η απώλεια συνάφειας σε περιοχές ματίσεων:

$$t_f = \frac{d A_b f_{yd}}{2 p_c \mu f_{fde} \ell_s} \quad (6.23)$$

Στην παραπάνω σχέση  $A_b$  είναι το εμβαδόν διατομής μίας εφελκυσμένης ράβδου οπλισμού (με διάμετρο  $d_b$ ) που ματίζεται εντός της περιοχής επαρκώς περισφιγμένου σκυροδέματος και  $p_c$  είναι η αντίστοιχη διαδρομή ρηγμάτωσης που αντιστοιχεί στη ράβδο αυτή (Σχ. 6.14γ). Για τυχόν ράβδους εκτός της περιοχής αυτής ο μανδύας συνθέτων υλικών είναι μειωμένης αποτελεσματικότητας ως προς την αποτροπή απώλειας συνάφειας σε ματίσεις.

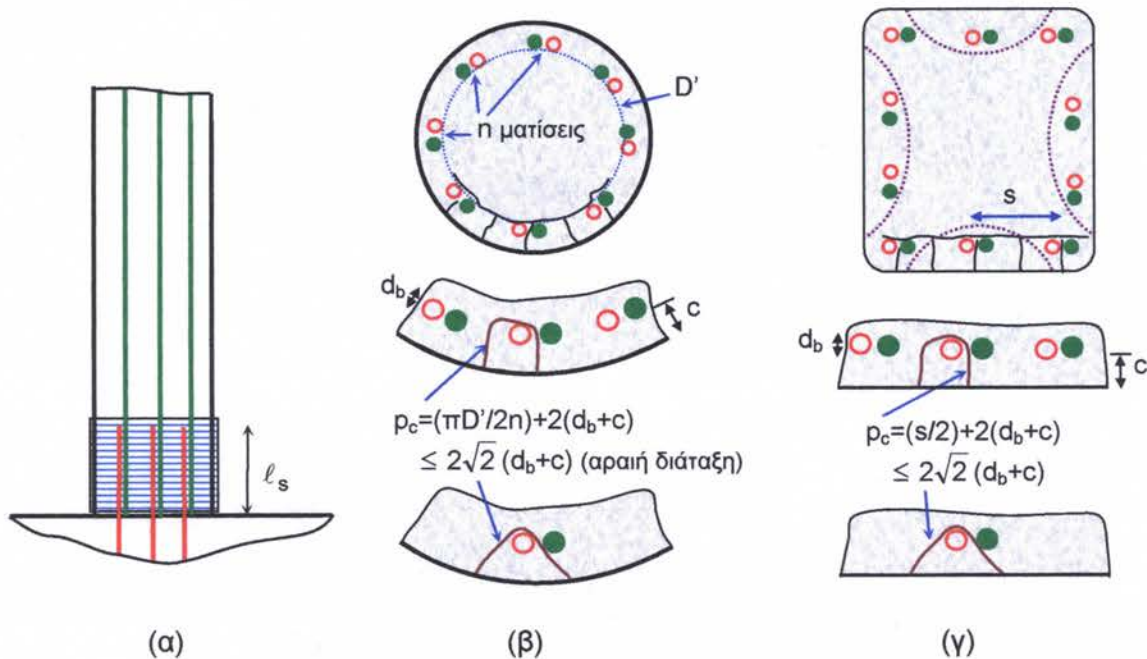


Σχ. 6.13 Εντατική κατάσταση στην περιοχή μάτισης (μηχανισμός τριβής).

Σύμφωνα με τους Seible et al. (1997), η εξ. (6.23) δεν εξασφαλίζει πάντα την μη ενεργοποίηση του μηχανισμού απώλειας συνάφειας. Βασισμένοι σε σειρά πειραματικών αποτελεσμάτων, οι παραπάνω ερευνητές 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 0.001-0.002. Έτσι, στην εξ. (6.23) για το

σχεδιασμό του πάχους μανδύα, η ενεργή τάση σχεδιασμού των συνθέτων υλικών  $f_{fde}$  θα πρέπει να περιορίζεται σε:

$$f_{fde} \leq 0.0015 \times E_f \quad (6.24)$$



**Σχ. 6.14** (α) Περίσφιγξη υποστυλώματος σε περιοχή μάτισης. (β) Ανάπτυξη ρωγμών στην εφελκούμενη περιοχή κυκλικού υποστυλώματος λόγω αστοχίας συνάφειας και ορισμός της κρίσιμης διαδρομής ρηγμάτωσης. (γ) Ομοίως για ορθογωνικά υποστυλώματα, για τα οποία οριοθετείται και η περιοχή επαρκώς περισφιγμένου σκυροδέματος.

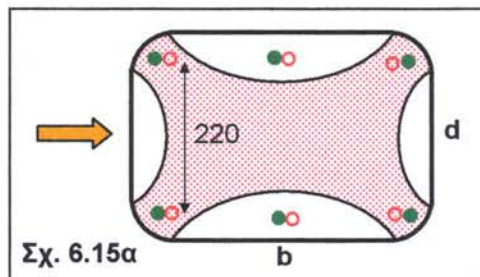
### Παράδειγμα 6.3

Θεωρούμε το υποστύλωμα του Σχ. 6.11α (ορθογωνική διατομή 0.30x0.40 m), το οποίο καταπονείται σε σεισμική φόρτιση (οριζόντια δύναμη - επιβαλλόμενη μετατόπιση) η οποία ενδέχεται να δρα παράλληλα είτε στη μεγάλη είτε στη μικρή πλευρά. Υποθέτουμε ότι οι γωνίες του υποστυλώματος έχουν στρογγυλευθεί ώστε να είναι  $r_c = 25$  mm και ότι η επικάλυψη του σκυροδέματος είναι  $c = 30$  mm. Το σκυρόδεμα έχει αντοχή σχεδιασμού  $f_{cd} = 10.67$  MPa. Οι διαμήκειες ράβδοι του υποστυλώματος θεωρούνται ματισμένες στη βάση, σε μήκος 0.60 m. Έστω ότι διαθέτουμε ύφασμα ινών άνθρακα με μέτρο ελαστικότητας  $E_f = 230$  GPa, εφελκυστική αντοχή (χαρακτηριστική τιμή)  $f_{fk} = 3500$  MPa και πάχος 0.12 mm, προκειμένου να το χρησιμοποιήσουμε για την κατασκευή μανδύα στην περιοχή της μάτισης με στόχο την αποτροπή απώλειας συνάφειας. Υποθέτουμε συνθήκες υψηλού βαθμού ποιοτικού ελέγχου της εφαρμογής. 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 υπολογισμός του απαιτούμενου αριθμού στρώσεων.

(α) Σεισμική φόρτιση παράλληλα στη μεγάλη πλευρά

Στην περίπτωση αυτή όλες οι εφελκόμενες ράβδοι (και οι δύο) βρίσκονται εντός της περιοχής επαρκώς περισφιγμένου σκυροδέματος.



Σχ. 6.15α

Κρίσιμη διαδρομή ρηγμάτωσης:  $\rho_c = \min\left\{\left(\frac{220}{2} + 2(18 + 30)\right), 2\sqrt{2}(18 + 30)\right\} = 136 \text{ mm}.$

Εμβαδόν διατομής ράβδου:  $A_b = (\pi \times 18^2) / 4 = 255 \text{ mm}^2.$

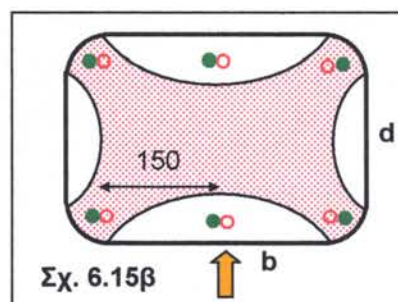
$f_{fde} = \min(0.9 \times (3500 / 1.2), 0.0015 \times 230000) = \min(2625, 345) = 345 \text{ MPa}.$

Απαιτούμενο πάχος μανδύα:  $t_f = \frac{300 \times 255 \times (400 / 1.15)}{2 \times 136 \times 1.4 \times 345 \times 600} = 0.34 \text{ mm}$

Απαιτούμενος αριθμός στρώσεων:  $0.34 / 0.12 = 2.8 \rightarrow 3 \text{ στρώσεις}$

(β) Σεισμική φόρτιση παράλληλα στη μικρή πλευρά

Στην περίπτωση αυτή μόνο οι δύο γωνιακές εφελκόμενες ράβδοι βρίσκονται εντός της περιοχής επαρκώς περισφιγμένου σκυροδέματος.



Σχ. 6.15β

Κρίσιμη διαδρομή ρηγμάτωσης:  $\rho_c = \min\left\{\left(\frac{150}{2} + 2(18 + 30)\right), 2\sqrt{2}(18 + 30)\right\} = 136 \text{ mm}.$

Εμβαδόν διατομής ράβδου:  $A_b = 255 \text{ mm}^2, f_{fde} = 345 \text{ MPa}.$

Επομένως το απαιτούμενο πάχος μανδύα είναι ίδιο με αυτό της παραπάνω περίπτωσης. Βασική διαφορά στην περίπτωση αυτή είναι ότι ο μανδύας συνθέτων υλικών θα αποτρέψει την αστοχία συνάφειας στις δύο γωνιακές ράβδους, αλλά όχι κατ' ανάγκη και στη μεσαία.

Τέλος, επ' ευκαιρία του παραδείγματος αυτού επισημαίνεται ότι ο υπολογισμός του απαιτούμενου πάχους μανδύα για τον συνδυασμό αύξησης 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

εγκιβωτίζει το σκυρόδεμα στη θλιβόμενη περιοχή, για δε τις ματίσεις ενδιαφέρει το τμήμα του μανδύα στην εφελκυσόμενη. Συνεπώς, οι 4 στρώσεις μανδύα που υπολογίσθηκαν στο Παράδειγμα 6.2 αρκούν και για τον έλεγχο των ματίσεων.

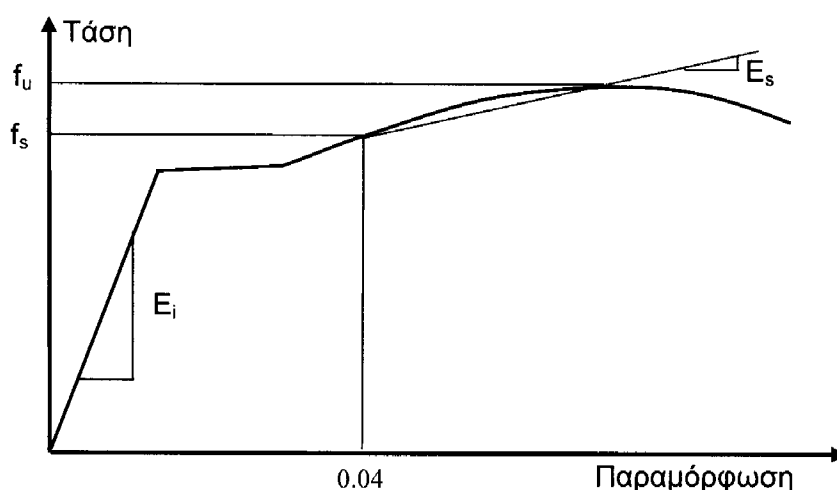
### 6.5 Λυγισμός ράβδων

Σύμφωνα με τους Priestley et al. (1995), 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,  $s/d_b$ , ξεπερνά μία κρίσιμη τιμή, τότε υπάρχει ενδεχόμενο λυγισμού των διαμήκων ράβδων λόγω υψηλής τιμής του αξονικού φορτίου. Ο λυγισμός αυτός αποτρέπεται όταν ο μανδύας συνθέτων υλικών ο οποίος επιβάλλει τάσεις περισφίγξης στο υποστύλωμα έχει πάχος τουλάχιστον ίσο με:

$$t_f = \frac{0.45nf_s^2d}{4E_{ds}E_fk_e} \quad (6.25)$$

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. 6.16):

$$E_{ds} = \frac{4E_sE_i}{(\sqrt{E_s} + \sqrt{E_i})^2} \quad (6.26)$$



Σχ. 6.16 Ορισμός μέτρων ελαστικότητας χάλυβα.

Στην εξ. (6.26)  $E_s$  = 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. (6.25) η ποσότητα  $0.45 f_s^2 / E_{ds}$  μπορεί να ληφθεί προσεγγιστικά (και συντηρητικά) ίση με 40 MPa, οπότε:

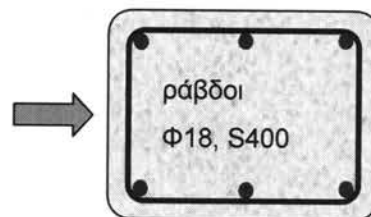
$$t_f = \frac{10nd}{E_f k_e} \quad (E_f \text{ σε MPa}) \quad (6.27)$$

#### Παράδειγμα 6.4

Θεωρώντας το υποστύλωμα του Σχ. 6.11α (Παράδειγμα 6.2), για σύνθετα υλικά με  $E_f = 230$  GPa και πάχος υφάσματος 0.12 mm, το απαιτούμενο πάχος μανδύα για την αποφυγή λυγισμού είναι:

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

δηλαδή  $0.22/0.12 = 1.83 \rightarrow \underline{2 \text{ στρώσεις}}$ .



Σχ. 6.17

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

## ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΗ ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΕΠΕΜΒΑΣΕΩΝ

## 7.1 Γενικά

Θα πρέπει να καταστεί σαφές ότι η χρήση μανδύα συνθέτων υλικών σε υποστυλώματα προσδίδει αντοχή και παραμορφωσιμότητα **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 αποτελέσει 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 ότι η επέμβαση δεν αποσκοπεί σε αύξηση της δυσκαμψίας, με δεδομένη την επιβαλλόμενη σεισμική καταπόνηση θα πρέπει αρχικά να υπολογισθεί για κάθε υποστύλωμα (α) η απαιτούμενη τιμή του δείκτη πλαστιμότητας μετατοπίσεων 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 του απαιτούμενου δείκτη πλαστιμότητας, της τέμνουσας σχεδιασμού, της αποφυγής λυγισμού των διαμήκων ράβδων και της αποφυγής αστοχίας σε περιοχές με ματίσεις (αν υπάρχουν).

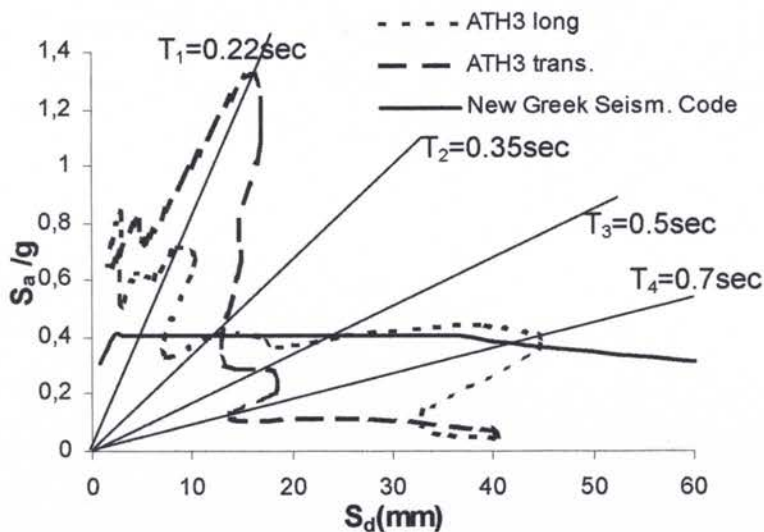
## 7.2 Εκτίμηση επιβαλλόμενης σεισμικής μετακίνησης και διαθέσιμης ικανότητας για οριζόντια μετάθεση

Η παρακάτω μέθοδος υπολογισμού της απαιτούμενης πλαστιμότητας έχει βασισθεί στην εργασία των Tastani and Pantazopoulou (2002). Η τέμνουσα βάσης  $V$  και η μέγιστη οριζόντια μετάθεση μιας κατασκευής μπορεί να απεικονιστεί σε ένα φάσμα απόκρισης επιταχύνσεων – μετατοπίσεων, όπως π.χ. αυτό του Σχ. 7.1 (σεισμός των Αθηνών, 1999). Στον κατακόρυφο άξονα του Σχ. 7.1 η ανηγμένη επιτάχυνση  $S_a / g$  είναι ίση με τον λόγο  $V / W$ , όπου  $W$  είναι το βάρος της κατασκευής =  $Mg$  και  $M$  η

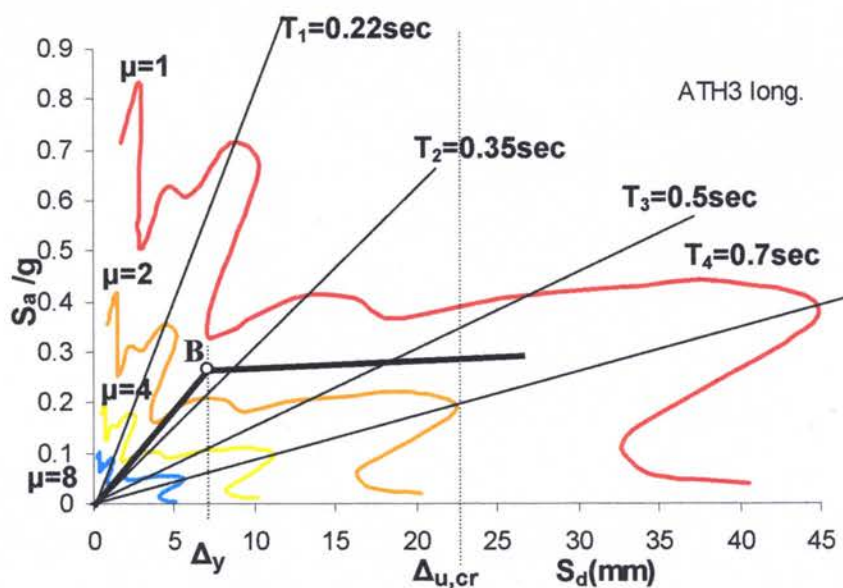
μάζα. Στον οριζόντιο άξονα  $S_d$  είναι η ελαστική μετατόπιση που αναπτύσσει το σύστημα κατά την απόκρισή του σε σεισμική τέμνουσα  $V$  και είναι ίση με:

$$S_d = S_a / \omega^2 \quad S_a = V / M \quad \omega^2 = k / M \quad S_d = V / k \quad (7.1)$$

Συνεπώς, για δεδομένη μάζα  $M$  η κλίση της γραμμής που διέρχεται από την αρχή των αξόνων και τέμνει το φάσμα απόκρισης είναι ανάλογη της δυσκαμψίας  $k$  του αντίστοιχου γραμμικά ελαστικού ισοδύναμου μονοβάθμιου ταλαντωτή.



Σχ. 7.1 Φάσμα απόκρισης επιτάχυνσης – μετατόπισης του σεισμού Αθηνών 1999 (Tastani and Pantazopoulou 2002).



Σχ. 7.2 Ισοδύναμο φάσμα διαρροής για το ATH3 long. (Tastani and Pantazopoulou 2002).

Από το ελαστικό φάσμα μπορεί να προκύψει το ισοδύναμο φάσμα διαρροής χρησιμοποιώντας κάποια από τις θεωρήσεις συσχέτισης του ελαστικού με το ανελαστικό σύστημα (π.χ. θεώρηση ίσων μετατοπίσεων ή ίσων ενεργειών). Στο Σχήμα 7.2 χρησιμοποιήθηκε για την καταγραφή ATH3 long. η θεώρηση ίσων μετατοπίσεων ( $V_{el}/V_y = \Delta_u/\Delta_y = \mu_\Delta$ ), οπότε για διάφορες τιμές του δείκτη πλαστιμότητας  $\mu_\Delta$  προέκυψαν διαφορετικά φάσματα διαρροής.

Επόμενο βήμα είναι η παράθεση της καμπύλης ανελαστικής στατικής ανάλυσης (μονότονη σχέση τέμνουσας βάσης – μετακίνησης κορυφής που προκύπτει από ανελαστική στατική ανάλυση - push over analysis) στο φάσμα απόκρισης επιτάχυνσης – μετατόπισης (βλ. Σχήμα 7.2), μετά από κατάλληλη τροποποίηση των αξόνων. Σημειώνεται ότι εδώ απαιτείται μια προκαταρκτική ανάλυση του κτιρίου με τις κλασσικές μεθόδους ιδιομορφικής ανάλυσης για τον υπολογισμό του συντελεστή συμμετοχής της θεμελιώδους ιδιομορφής στην απόκριση του κτιρίου. Εναλλακτικά, στις αντίστοιχες εκφράσεις μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα οποιοδήποτε σχήμα που προσεγγίζει ποιοτικά τη θεμελιώδη ιδιομορφή του κτιρίου. Απουσία άλλης, πιο τεκμηριωμένης επιλογής, είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί και η τριγωνική κατανομή, όπου η μέγιστη συντεταγμένη του σχήματος είναι μονάδα στην κορυφή του κτιρίου. Έτσι, εάν  $\Gamma$  είναι ο συντελεστής συμμετοχής της θεμελιώδους ιδιομορφής στην απόκριση και  $\alpha$  ο συντελεστής συμμετοχής της μάζας του κτιρίου στη συγκεκριμένη ιδιομορφή αντιστοίχως, τότε η τέμνουσα διαρροής καθώς και η μετακίνηση διαρροής του ισοδύναμου μονοβάθμιου ταλαντωτή ισούται με την τέμνουσα διαρροής και τη μετακίνηση διαρροής του κτιρίου πολλαπλασιασμένη με το λόγο  $\Gamma/\alpha$ . Με αναγωγή των τιμών του κατακόρυφου άξονα προς την μάζα του ισοδύναμου μονοβάθμιου ταλαντωτή ο άξονας των δυνάμεων στην καμπύλη ανελαστικής στατικής ανάλυσης μετατρέπεται εύκολα σε επιτάχυνση. Έτσι, με εναπόθεση της καμπύλης ανελαστικής στατικής ανάλυσης του μονοβάθμιου ταλαντωτή στο φάσμα επιτάχυνσης - μετατόπισης προκύπτει αφενός το μέγεθος της απαιτούμενης πλαστιμότητας για το δεδομένο σεισμό (αυτή είναι η τιμή  $\mu_\Delta$  που χαρακτηρίζει το ανελαστικό φάσμα που διέρχεται από το σημείο διαρροής), αφετέρου η μέγιστη αναμενόμενη ανελαστική μετακίνηση του ισοδύναμου μονοβάθμιου ταλαντωτή από το γινόμενο της μετακίνησης διαρροής επί την απαιτούμενη πλαστιμότητα. Με περαιτέρω πολλαπλασιασμό αυτού του μεγέθους με το λόγο  $\alpha/\Gamma$  προκύπτει η αναμενόμενη μετακίνηση στην κορυφή του κτιρίου, η οποία μπορεί να συγκριθεί με τη διαθέσιμη ικανότητα μετακίνησης, καθώς και με τις προεπιλεγμένες τιμές που συσχετίζονται με τα διάφορα στάδια επιτελεστικότητας.

Η ανηγμένη καμπύλη ανελαστικής στατικής ανάλυσης παρεμβάλλει το σημείο διαρροής B μεταξύ των ισοδυνάμων φασμάτων διαρροής για διάφορες τιμές του δείκτη πλαστιμότητας. Το μέγεθος αυτό του δείκτη πλαστιμότητας  $\mu_B$  (στο παράδειγμα του Σχ.

7.2 είναι μεταξύ των τιμών 1 και 2) προσδιορίζει την απαίτηση για πλαστιμότητα του ανελαστικού συστήματος για το δεδομένο ιστορικό μετατοπίσεων. Η οριακή μετατόπιση σχεδιασμού  $\Delta_{u,cr}$  προκύπτει άμεσα με πολλαπλασιασμό του  $\mu_B$  με τη μετατόπιση διαρροής  $\Delta_y$ , ενώ η αντίστοιχη αναλαμβανόμενη δύναμη συνάγεται από την καμπύλη ανελαστικής στατικής ανάλυσης.

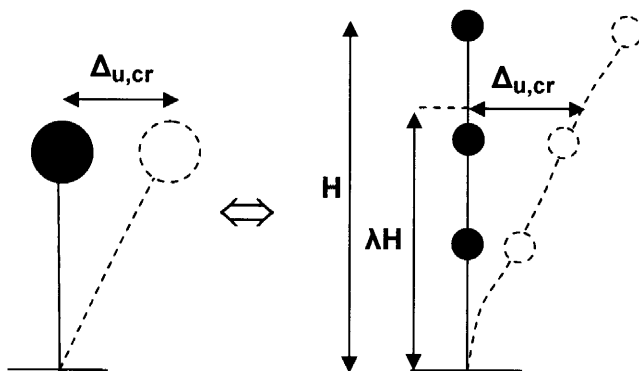
Στην περίπτωση εύκαμπτων κατασκευών, όπου το μεγαλύτερο ποσοστό της συνολικής παραμόρφωσης αναλαμβάνεται από έναν όροφο (π.χ. κτίριο με πιλοτή), η στρόφη των κατακόρυφων στοιχείων θα πρέπει να περιοριστεί σε ένα εύρος τιμών συνήθως 1%÷2%, προκειμένου να αποφευχθεί ανεξέλεγκτη βλάβη λόγω φαινομένων δεύτερης τάξης (κυρίως από το μόνιμο αξονικό φορτίο της κατασκευής). Σημειώνεται ότι η συσχέτιση της ποσότητας  $\Delta_{u,cr}$  από το εξιδανικευμένο μονοβάθμιο σύστημα με την πραγματική στρόφη της κατασκευής γίνεται με βάση τη σχέση:

$$\Delta_{u,cr} = \lambda \theta_{cr} H \quad (7.2)$$

όπου  $H$  = συνολικό ύψος της κατασκευής, και  $\lambda$  = συντελεστής που προκύπτει από την ισοδυναμία των δύο συστημάτων (εξίσωση ροπών των αδρανειακών δυνάμεων στη στάθμη των μαζών – Σχ. 7.3) και δίδεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$\lambda = \frac{\sum_{i=1,N} m_i \Phi_i^2}{\sum_{i=1,N} m_i \Phi_i} \quad (7.3)$$

όπου  $m_i$  = μάζα ορόφου  $i$ ,  $\Phi_i$  = στοιχείο  $i$  της θεμελιώδους ιδιομορφής και  $N$  = αριθμός ορόφων. Σημειώνεται ότι η περίπτωση ομοιόμορφης κατανομής μαζών καθ' ύψος της κατασκευής για ιδιομορφή τριγωνικού σχήματος δίνει  $\lambda = 0.67$ , ενώ η περίπτωση κατασκευής με πιλοτή και συγκεντρωμένες μάζες στους ορόφους δίνει  $\lambda \approx 1$ . Στην τελευταία περίπτωση η στρόφη της κατασκευής ισούται με  $\theta_{cr,1} = \Delta_{u,cr} / h_1 = \theta_{cr} H / h_1$ , όπου  $h_1$  το ύψος του πρώτου ορόφου.

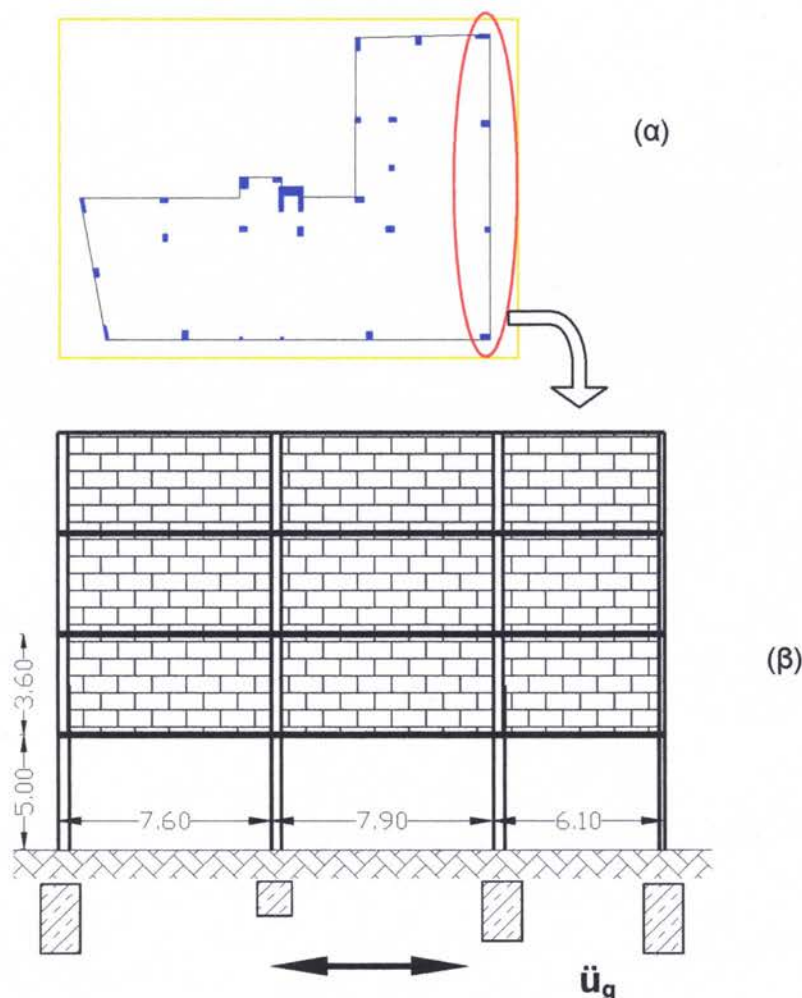


Σχ. 7.3 Ισοδυναμία μοναβάθμιου συστήματος με την πραγματική κατασκευή.

Ο ορισμός τιμής στροφής εντός των ορίων που έχουν αναφερθεί οδηγεί στον καθορισμό ενός κατακόρυφου ορίου  $\Delta_{u,cr}$  στο φάσμα του Σχήματος 7.2. Αποδεκτό σύστημα ενίσχυσης είναι γενικά αυτό που μπορεί να βελτιώσει την αντοχή και την δυσκαμψία (σχηματικά, τιμές δεξιά του ορίου  $\Delta_{u,cr}$  και πάνω από την καμπύλη ισοδύναμου φάσματος διαρροής που αντιστοιχεί στην οριακή διαθέσιμη πλαστιμότητα  $\mu_u$  του μονοβάθμιου συστήματος όπως προκύπτει από τα χαρακτηριστικά των πλαστικών αρθρώσεων των κατακόρυφων στοιχείων).

### 7.3 Παράδειγμα

Οι αρχές διαστασιολόγησης ενισχύσεων υφιστάμενων κατασκευών όπως διατυπώθηκαν παραπάνω έχουν εφαρμοσθεί από τους Tastani and Pantazopoulou (2002) στο τετραόροφο πλαίσιο με πιλοτή του Σχ. 7.4 και παρουσιάζονται ακολούθως.



Σχ. 7.4 Εφαρμογή ενίσχυσης σε τετραόροφο πλαίσιο υφιστάμενης κατασκευής.

Τα τρία ανοίγματα του πλαισίου έχουν μήκη 7.6 m, 7.9 m και 6.1 m αντίστοιχα, ενώ οι διαστάσεις των υποστυλωμάτων λαμβάνονται ως 0.4x0.7 m, 0.35x0.35 m, 0.4x0.6 m και 0.4x0.7 m στην πιλοτή, και 0.35x0.60 m, 0.35x0.35 m, 0.35x0.5 m και 0.35x0.6 m στους ανώτερους ορόφους. Σημειώνεται ότι ο ισχυρός άξονας των υποστυλωμάτων είναι κάθετος στο επίπεδο του πλαισίου με αποτέλεσμα κατά την σεισμική δράση η κάμψη να ασκείται περί τον ασθενή άξονα της διατομής. Το ύψος του ισογείου είναι 5 m ενώ των ανώτερων ορόφων 3.6 m. Οι ονομαστικές αντοχές των υλικών αντιστοιχούν σε C25/30 και S400, ενώ ως οπλισμός διάτμησης θεωρούνται συνδετήρες S220 με διάταξη Φ6/300 mm. Τα ποσοστά διαμήκους οπλισμού (εφελκυσμένου και θλιβόμενου) για τα υποστυλώματα της πιλοτής λαμβάνονται αντίστοιχα: 0.97% για 40/70, 0.82% για 35/35 και 0.54% για 40/60.

Ο προκαταρκτικός έλεγχος της λυγρότητας των υποστυλωμάτων της πιλοτής υποδεικνύει την ανάγκη δυσκαμψίας: τα ακραία στοιχεία έχουν τιμή  $\lambda = 41.7 < \max(25, 15/\sqrt{v_d})$  και χαρακτηρίζονται ως μη λυγρά (λόγω του χαμηλού αξονικού τους φορτίου), ενώ τα ενδιάμεσα με  $\lambda = 47.6 \text{ \& } 41.6 \leq \max(15\sqrt{v_d}, 75/\sqrt{v_d})$  είναι μεν λυγρά, αλλά επιτρέπεται να αναλυθούν με τη θεωρία του μεμονωμένου υποστυλώματος ( $v_d$  είναι το ανηγμένο αξονικό φορτίο που μεταβιβάζει η ανωδομή σε κάθε κατακόρυφο στοιχείο).

Προκειμένου να προσδιοριστούν τα δυναμικά χαρακτηριστικά της κατασκευής (θεμελιώδης ιδιομορφή και αντίστοιχη ιδιοπερίοδος) απαιτείται αρχικά ο προσδιορισμός των συγκεντρωμένων μαζών στη στάθμη των ορόφων καθώς και οι δυσκαμψίες των κατακόρυφων στοιχείων. Το διάνυσμα των μαζών είναι:

$$\bar{M} = m \cdot \{1, 0.92, 0.92, 0.84\}, \quad m = 98.4 \text{ kNsec}^2/\text{m}$$

Οι δυσκαμψίες των υποστυλωμάτων υπολογίζονται στο στάδιο ρηγμάτωσης II από τη σχέση  $K_i = 12EI/h^3$  όπου η ποσότητα  $EI$  λαμβάνεται ως η τέμνουσα δυσκαμψία στο στάδιο της διαρροής  $M_y / \phi_y$ . Από ανάλυση διατομής υπολογίζεται η ροπή διαρροής  $M_y$  και η αντίστοιχη καμπυλότητα  $\phi_y$ , και λαμβάνοντας μήκος στοιχείου  $h = 5 \text{ m}$  προκύπτει τελικά ότι  $K_{\text{πιλοτής}} = 9300 \text{ kN/m}$ .

Σημειώνεται ότι, προσεγγιστικά, η ροπή διαρροής για στοιχεία σε προέχουσα κάμψη ισούται με το γινόμενο  $A_{s1}zdf_y$ , όπου  $A_{s1}$  το εμβαδόν του εφελκυσμένου (μόνον) οπλισμού (συμπεριλαμβανομένου και του οπλισμού των πλακών εντός του συνεργαζόμενου πλάτους σε περίπτωση αρνητικής κάμψης δοκών ή σε τοιχώματα με πτερύγια όταν το πτερύγιο βρίσκεται στην εφελκυσμένη ζώνη),  $z$  αδιάστατος αριθμός που κυμαίνεται μεταξύ 0.75 και 0.85 ανάλογα με τα χαρακτηριστικά της διατομής,  $d$  το στατικό ύψος της διατομής και  $f_y$  η τάση διαρροής του εφελκυσμένου χάλυβα (π.χ. για

S400,  $f_y = 400$  MPa). Η καμπυλότητα διαρροής  $\phi_y$  δίνεται από τις παρακάτω προσεγγιστικές σχέσεις, ανάλογα με το σχήμα της διατομής (ορθογωνική ύψους  $h$  ή κυκλική διαμέτρου  $D$ ) (Priestley et al. 1996):

$$\phi_y h = 2.15 \frac{f_y}{E_s} \quad (7.4\alpha)$$

$$\phi_y D = 2.45 \frac{f_y}{E_s} \quad (7.4\beta)$$

όπου  $E_s$  το μέτρο ελαστικότητας του χάλυβα (200 GPa).

Η δυσκαμψία των τοιχοπληρώσεων των ανώτερων ορόφων ορίζεται ως  $E_m t_m / [4(h_i / \ell_{mi})^3 + (h_i / \ell_{mi})]$ , όπου  $E_m$  και  $t_m$  το μέτρο ελαστικότητας και το πάχος της τοιχοπλήρωσης (λαμβάνονται προσεγγιστικά ως  $0.3 E_c$  και 200 mm αντίστοιχα),  $h_i$  είναι το ύψος του ορόφου και  $\ell_{mi}$  είναι το μήκος του κάθε ανοίγματος το οποίο στους υπολογισμούς λαμβάνεται ως το μισό του ανοίγματος, ώστε εμμέσως να ληφθούν υπόψη τα κενά (παράθυρα και πόρτες). Έτσι προκύπτει ότι η δυσκαμψία του κάθε ορόφου είναι:  $K_{\text{ορόφου}} = K_{\text{υποστ.}} + K_{\text{τοιχ.}} = 830000 \text{ kN/m} = 89 K_{\text{πυλοτήης}}$ , και το αντίστοιχο διάνυσμα δυσκαμψιών της κατασκευής είναι:

$$\bar{K} = K_{\text{πυλοτήης}} \cdot \{1, 89, 89, 89\}, \quad K_{\text{πυλοτήης}} = 9300 \text{ kN/m}$$

Τα δυναμικά χαρακτηριστικά της κατασκευής, όπως προκύπτουν από την επαναληπτική μέθοδο ανάλυσης του Rayleigh, έχουν ως εξής:

$$T = 1.24 \text{ sec} \quad \bar{\Phi} = \{0.984, 0.992, 0.997, 1\}$$

Με χρήση του ελαστικού φάσματος απόκρισης επιταχύνσεων – μετατοπίσεων (ATH3 long. –  $\mu = 1$ ) προκύπτει ότι για περίοδο κατασκευής  $T = 1.24 \text{ sec}$  η σεισμική επιτάχυνση είναι  $S_a = 0.088g$  και η αντίστοιχη ελαστική μετατόπιση του μονοβάθμιου συστήματος  $S_d^{\text{el}} = S_a / \omega^2 = 33.7 \text{ mm}$ . Ο συντελεστής συμμετοχής της 1<sup>ης</sup> ιδιομορφής υπολογίστηκε σε  $\lambda = 0.993$ , οπότε η μετατόπιση του πλαισίου είναι ίση με  $S_d^{\text{πλαίσιου}} = S_d^{\text{el}} / \lambda = 33.9 \text{ mm}$ . Η ελαστική τέμνουσα βάσης είναι  $V_{\text{el}} = K_{\text{πυλοτήης}} S_d^{\text{πλαίσιου}} \Phi_1 = 310.23 \text{ kN}$ .

Το επόμενο βήμα ανάλυσης είναι ο προσδιορισμός της εγγενούς αντοχής της πυλοτής σε οριζόντια δύναμη. Η συνολική τέμνουσα δύναμη προσδιορίζεται από την συμβολή οπλισμού και σκυροδέματος των τεσσάρων υποστυλωμάτων (δεν λαμβάνεται υπόψη η ευμενής συμβολή του αξονικού φορτίου στην βελτίωση της αντοχής σε διάτμηση διότι οι θεωρούμενοι αραιά τοποθετημένοι συνδετήρες – Φ6/300 - παρέχουν πτωχή περίσφιγξη) ως εξής (βλ. Πίν. 7.1):

$$V_{Rd,tot} = \sum_{i=1,4} V_{Rdi} = \sum_{i=1,4} (0.3V_{Rd1} + V_{wd}) = 174.87 \text{ kN}$$

Ακολούθως υπολογίζεται η αθροιστική τέμνουσα δύναμη διαρροής (Πίν. 7.1), ίση με 378.49 kN, η οποία είναι κατά πολύ μεγαλύτερη από την αντοχή του φορέα (174.87 kN). Ο απαιτούμενος δείκτης πλαστιμότητας σε σχέση με το δεδομένο ελαστικό φάσμα προσδιορίζεται σε  $\mu_u = V_{el} / V_{Rd,tot} = 310.23 / 174.87 \approx 1.8$ , ενώ η αντίστοιχη μετατόπιση της πιλοτής είναι  $\Delta_u = \mu_u S_d^{el} = 1.8 \times 33.7 = 60.66 \text{ mm}$ , από την οποία προκύπτει στροφή βάσης για τα υποστυλώματα της πιλοτής ίση με 1.21% ( $= \Delta_u / h_i$ ).

Προκειμένου η διαστασιολόγηση της ενίσχυσης να είναι αποτελεσματική προάγοντας την επιθυμητή ελαστοπλαστική απόκριση της κατασκευής και αποτρέποντας ταυτοχρόνως την υπερβολική στροφή βάσης, πρέπει να τεκμηριωθεί με κατάλληλο έλεγχο ότι επαρκεί η διατήρηση της δυσκαμψίας και η αύξηση της ικανότητας για παραμόρφωση των επιμέρους στοιχείων. Δηλαδή, διατηρώντας τη λειτουργία “μαλακού ορόφου” (διατήρηση δυσκαμψίας) αλλά αποτρέποντας την αστοχία των υποστυλωμάτων σε διάτμηση (το οποίο επιτυγχάνεται με αύξηση της διατμητικής αντοχής σε τιμή μεγαλύτερη από την δύναμη που απαιτείται για να διαρρεύσει ο διαμήκης σπλισμός των ισχυρότερων υποστυλωμάτων) η εκτιμώμενη τέμνουσα βάσης είναι ίση με την τέμνουσα διαρροής  $V_y = 378.49 \text{ kN}$ . Στον Πίν. 7.1 υπολογίζεται η μετατόπιση κάθε υποστυλώματος  $\Delta_y$  κατά τη διαρροή στη στάθμη του 1<sup>ου</sup> ορόφου καθώς και η ανηγμένη δυσκαμψία  $k_i$  κάθε υποστυλώματος ως προς τη συνολική δυσκαμψία του ορόφου. Σημειώνεται ότι κατά τη διαρροή των πλέον δύσκαμπτων υποστυλωμάτων  $K_1$ ,  $K_3$  και  $K_4$  η οριζόντια μετάθεση του ορόφου εκτιμάται προσεγγιστικά σε  $0.5 \times (35.96 + 40.70) = 38.33 \text{ mm}$ , που αντιστοιχεί σε στροφή βάσης περίπου 0.8%, ενώ το υποστύλωμα  $K_2$  παραμένει ελαστικό. Η αναπτυσσόμενη οριζόντια δύναμη σ’ αυτό το επίπεδο μετατόπισης για το  $K_2$  προσδιορίζεται σε  $V_{Sd2} = K_2 \times 38.33 = 44.83 \text{ kN}$ , και επομένως η συνολική πλευρική δύναμη  $V_{Sd,tot}$  για την οποία θα σχεδιαστεί η ενίσχυση είναι 348.59 kN. Αν συγκριθούν τα μεγέθη της διαθέσιμης αντοχής (174.87 kN) και της αντοχής διαρροής (378.49 kN) προκύπτει ότι η διαθέσιμη πλαστιμότητα είναι μόλις  $\approx 0.5$ , γεγονός που δηλώνει την πρώιμη διατμητική αστοχία. Επιπλέον θα πρέπει να σημειωθεί ότι η παραπάνω τιμή της τέμνουσας διαρροής προσεγγίζει την ελαστική τέμνουσα βάσης του τροποποιημένου ελαστικού φάσματος επιταχύνσεων – μετατοπίσεων (310.23 kN), γεγονός που οδηγεί σε απαιτούμενη πλαστιμότητα  $\mu_{\alpha\pi\alpha\iota\tau} \approx 1$ .

Κατά την έναρξη της ανάλυσης της κατασκευής αναφέρθηκε ότι τα ενδιάμεσα υποστυλώματα είναι λυγηρά, γεγονός που δηλώνει την ιδιαίτερη αδυναμία που παρουσιάζουν σε φαινόμενα δεύτερης τάξης: αν θεωρηθεί μετατόπιση αστοχίας κατά την διαστασιολόγηση της ενίσχυσης 38.33 mm, τότε η προκληθείσα ροπή δεύτερης τάξης

( $M_{P-\Delta}$ ) λόγω του αξονικού φορτίου της κατασκευής στις περιπτώσεις των ενδιάμεσων υποστυλωμάτων υπερβαίνει το όριο 10% της ροπής διαρροής ( $M_y$ ) του διαμήκου οπλισμού που θεωρείται ως αποδεκτή τιμή χωρίς την ανάγκη επανασχεδιασμού του στοιχείου (Πίν. 7.1). Ωστόσο, η διαστασιολόγηση της ενίσχυσης θα πρέπει να συμβαδίζει με της απαιτήσεις των νέων κανονισμών περί πλαστικής συμπεριφοράς κατά την αστοχία, οπότε θα πρέπει να επιλεγεί τιμή του δείκτη πλαστιμότητας μετατοπίσεων  $\mu_\Delta > 1$  αλλά ταυτόχρονα θα πρέπει να υπάρξει ιδιαίτερη αντιμετώπιση των ενδιάμεσων υποστυλωμάτων ώστε να αποφευχθεί ο κίνδυνος αστοχίας από φαινόμενα δεύτερης τάξης. Μία πιθανή λύση είναι η εφαρμογή συμβατικού μανδύα από οπλισμένο σκυρόδεμα, ο οποίος όμως θα αυξήσει τη δυσκαμψία της πιλοτής. Λαμβάνοντας υπόψη όλα τα παραπάνω αποφασίζεται ως απαιτούμενη τιμή του δείκτη πλαστιμότητας μετατοπίσεων  $\mu_\Delta = 2.5$  (που αντιστοιχεί σε οριακή πραγματοποιούμενη στροφή βάσης  $2.5 \times 38.33/5000 = 1.9\%$ ).

**Πίνακας 7.1** Συγκεντρωτικά στοιχεία ανάλυσης.

| Υποστύλωμα    | $V_{Rd}$<br>(kN) | $V_y$<br>(kN) | $\Delta_y$<br>(mm) | $k_i = \frac{K_i}{\sum K_j}$ | $V_{Sd}$<br>(kN) | $N_{Sd}$<br>(kN) | $\frac{M_{P-\Delta}}{M_y}$ |
|---------------|------------------|---------------|--------------------|------------------------------|------------------|------------------|----------------------------|
| $K_1$ (40/70) | 51.55            | 103.40        | 35.96              | 0.31                         | 103.40           | 625              | 9.27%                      |
| $K_2$ (35/35) | 27.81            | 74.73         | 63.89              | 0.13                         | 44.83            | 1275             | 43.60%                     |
| $K_3$ (40/60) | 43.96            | 96.96         | 40.70              | 0.25                         | 96.96            | 1150             | 18.18%                     |
| $K_4$ (40/70) | 51.55            | 103.40        | 35.96              | 0.31                         | 103.40           | 500              | 7.41%                      |
| <b>Σύνολα</b> | <b>174.87</b>    | <b>378.49</b> | ---                | <b>1.00</b>                  | <b>348.59</b>    | ---              | ---                        |

Στη συνέχεια θα πρέπει να υπολογισθεί ο απαιτούμενος αριθμός στρώσεων μανδύα για την επίτευξη  $\mu_\Delta = 2.5$  αλλά και για την αποφυγή των διαφόρων μορφών αστοχίας ψαθυρού τύπου (διάτμηση, λυγισμός θλιβόμενων οπλισμών, αστοχία αγκύρωσης σε ματίσεις), βάσει της μεθοδολογίας του Κεφ. 6 (για την πλαστιμότητα, τον λυγισμό και τις ματίσεις) και του Κεφ. 5 (για την διάτμηση). Για την εφαρμογή της ενίσχυσης επιλέγονται σύνθετα υλικά ινών άνθρακα με μέτρο ελαστικότητας  $E_f = 230$  GPa, εφελκυστική αντοχή (χαρακτηριστική τιμή)  $f_{fk} = 3500$  MPa και πάχος υφάσματος 0.13 mm. Επίσης υποθέτουμε συνθήκες υψηλού βαθμού ποιοτικού ελέγχου της εφαρμογής. Τέλος, θεωρούμε ότι η εφελκυστική αντοχή του μανδύα είναι κατά 10% μειωμένη σε σχέση με τις αντίστοιχες ιδιότητες ευθύγραμμων δοκιμών (δηλαδή  $\eta_e = 0.10$ ). Η αντοχή σχεδιασμού του μανδύα υπολογίζεται ως  $f_{fde} = \eta_e (f_{fk} / \gamma_f) = 0.90(3500/1.20) = 2625$  MPa. Ο

απαιτούμενος αριθμός στρώσεων για την επίτευξη  $\mu_{\Delta} = 2.5$  δίνεται στον Πίν. 7.2, ενώ ως σημειωθεί ότι για όλες τις υπόλοιπες περιπτώσεις (διάτμηση, λυγισμός, αγκύρωση) οι υπολογισμοί (εδώ παραλείπονται) δίνουν 1 ή το πολύ 2 στρώσεις.

**Πίνακας 7.2** Απαιτούμενος αριθμός στρώσεων μανδύα συνθέτων υλικών ανά υποστύλωμα για την επίτευξη  $\mu_{\Delta} = 2.5$ .

| Υποστύλωμα    | Πλαστιμότητα $\mu_{\Delta} = 2.5$ |          |                   |
|---------------|-----------------------------------|----------|-------------------|
|               | $\frac{\sigma_{\ell ud}}{f_{cd}}$ | $k_{e1}$ | Αρ. στρώσεων      |
| $K_1$ (40/70) | 0.2                               | 0.34     | 10.05 → <b>10</b> |
| $K_2$ (35/35) | 0.2                               | 0.50     | 3.42 → <b>4</b>   |
| $K_3$ (40/60) | 0.2                               | 0.40     | 7.33 → <b>8</b>   |
| $K_4$ (40/70) | 0.2                               | 0.34     | 10.05 → <b>10</b> |

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8

### ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΕΣ ΛΕΠΤΟΜΕΡΕΙΕΣ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ

#### 8.1 Γενικά

Το κεφάλαιο παρουσιάζει κατά συνοπτικό τρόπο βασικές κατασκευαστικές λεπτομέρειες και μία σειρά από οδηγίες για την αρτιότερη δυνατή εφαρμογή της τεχνικής ενίσχυσης μέσω συνθέτων υλικών.

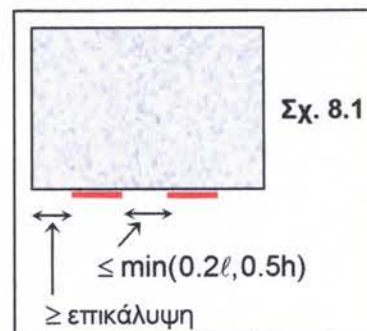
#### 8.2 Κατασκευαστικές λεπτομέρειες

Στην ενότητα αυτή δίνονται μία σειρά από κατασκευαστικές λεπτομέρειες για τις τρεις βασικές περιπτώσεις ενίσχυσης, οι οποίες αποσκοπούν (α) στην αύξηση της καμπτικής αντοχής, (β) στην αύξηση της διατμητικής αντοχής και (γ) στην περίσφιγξη.

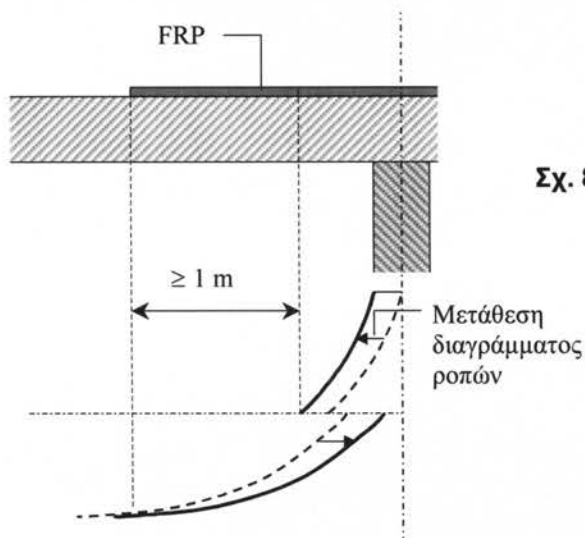
##### 8.2.1 Ενίσχυση σε κάμψη

Στο *fib* bulletin 14 (2001) προτείνονται οι παρακάτω κατασκευαστικοί κανόνες (για την ενίσχυση δοκών):

- Μέγιστη απόσταση μεταξύ ελασμάτων  $= \min(0.2\ell, 5h)$ , όπου  $\ell$  = μήκος δοκού και  $h$  = ύψος δοκού (στην περίπτωση προβόλου το 0.2 γίνεται 0.4).
- Ελάχιστη απόσταση ελάσματος (ή υφάσματος) από τη γωνία της διατομής τουλάχιστον ίση με το πάχος επικάλυψης του διαμήκου οπλισμού.
- Να αποφεύγονται οι ματίσεις ελασμάτων (ή υφασμάτων) με υπερκάλυψη (τούτο είναι πολύ εύκολο, λόγω της διαθεσιμότητας των συνθέτων υλικών σε πολύ μεγάλα μήκη). Όπου αυτές είναι τελείως απαραίτητες, να γίνονται (παράλληλα στη διεύθυνση των ινών) με μήκος υπερκάλυψης τέτοιο ώστε να εξασφαλίζεται ότι η εφελκυστική αστοχία του οπλισμού θα προηγείται της αποκόλλησης στη μάτιση.

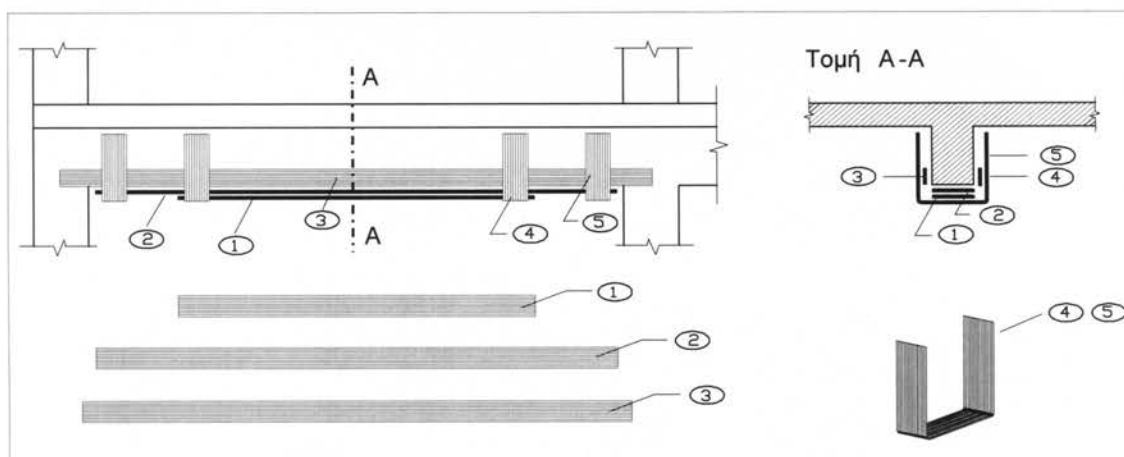


- Επιτρέπονται οι διασταυρώσεις ελασμάτων ή υφασμάτων (με επικόλληση στην διασταυρούμενη επιφάνεια), π.χ. για την ενίσχυση επιφανειακών στοιχείων (όπως οι πλάκες).
- Να αποφεύγεται η τοποθέτηση των ελασμάτων ή υφασμάτων σε πολλές στρώσεις. Αυτές δεν θα πρέπει να ξεπερνούν τις 3 ή 5 για ελάσματα ή υφάσματα, αντίστοιχα.
- Οι οπλισμοί στήριξης (αρνητική ροπή) θα πρέπει να έχουν μήκος επικόλλησης της τάξης του 1 m στη θλιβόμενη περιοχή (Σχ. 8.2).



Σχ. 8.2 Επικόλληση σε εσωτερικές στηρίξεις.

- Στις θέσεις τερματισμού των ελασμάτων ή υφασμάτων συνιστάται η επικόλληση υφασμάτων μορφής U (όπως οι οπλισμοί διάτμησης) ώστε να βελτιωθούν οι συνθήκες αγκύρωσης (Σχ. 8.3, 8.4).



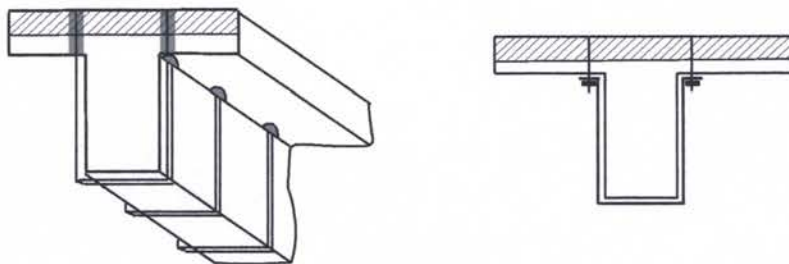
Σχ. 8.3 Πιθανή διάταξη καμπτικής ενίσχυσης και βελτίωση αγκυρώσεων με εγκάρσιους οπλισμούς διάτμησης.



Σχ. 8.4 Βελτίωση αγκύρωσης διαμήκων οπλισμών με εγκάρσιους οπλισμούς διάτμησης.

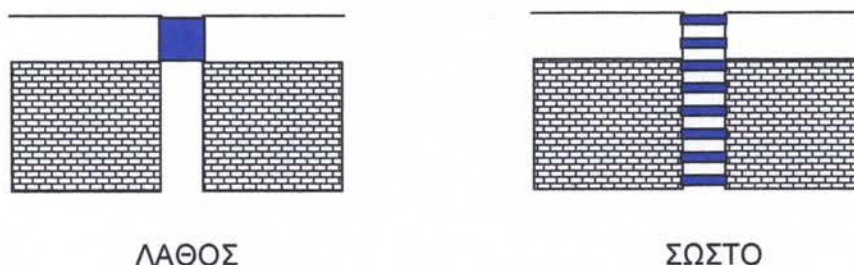
### 8.2.2 Ενίσχυση σε διάτμηση

- Στην περίπτωση ενίσχυσης πλακοδοκών, συνιστάται η αγκύρωση των οπλισμών διάτμησης στη θλιβόμενη ζώνη (π.χ. Σχ. 8.5).



Σχ. 8.5 Αγκύρωση οπλισμών διάτμησης πλακοδοκών στη θλιβόμενη ζώνη.

- Στην περίπτωση ενίσχυσης υποστυλωμάτων ορθογωνικής διατομής θα πρέπει να στρογγυλεύονται οι γωνίες της διατομής με ακτίνα καμπυλότητας της τάξης των 20 mm (ειδικά για υλικά με ίνες αραμιδίου η ακτίνα μπορεί να μειωθεί στα 10 mm).
- Στην περίπτωση ενίσχυσης υποστυλωμάτων μεταξύ τοίχων πλήρωσης οι οποίοι καλύπτουν μερικώς το ύψος ορόφου, η διατμητική ενίσχυση θα πρέπει να γίνεται σε όλο το ύψος του υποστυλώματος και όχι μόνο στο ελεύθερο τμήμα (Σχ. 8.6).
-



**Σχ. 8.6** Διαμητική ενίσχυση υποστυλωμάτων μεταξύ τοίχων πλήρωσης σε τμήμα του συνολικού ύψους ορόφου.

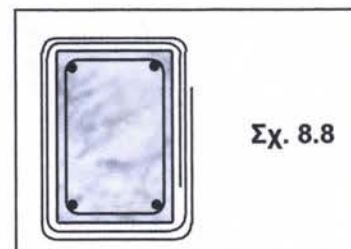
- Όταν γίνεται καθολική περιτύλιξη υποστυλωμάτων με υφάσματα, η μάτιση κάθε τμήματος θα πρέπει να γίνεται σε διαφορετική πλευρά (Σχ. 8.7).



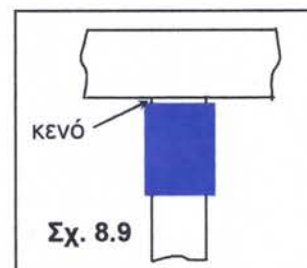
**Σχ. 8.7**

### 8.2.3 Περίσφιγξη

- Συνιστάται να στρογγυλεύονται οι γωνίες της διατομής με τη μέγιστη εφικτή ακτίνα καμπυλότητας (η οποία καθορίζεται συνήθως από το πάχος επικάλυψης).
- Η υπερκάλυψη των δύο άκρων σε επάλληλες στρώσεις επί υποστυλωμάτων ορθογωνικής διατομής (Σχ. 8.8) θα πρέπει να έχει μήκος τέτοιο ώστε η θραύση του μανδύα να προηγείται της αποκόλλησης. Ενδεικτικό ελάχιστο μήκος υπερκάλυψης είναι τα 200 mm, για υφάσματα ινών άνθρακα ονομαστικού πάχους 0.12-0.13 mm.
- Ο μέγιστος επιτρεπόμενος αριθμός στρώσεων για την κατασκευή μανδύα είναι της τάξης του 15 (ή όπως συνιστάται από τον προμηθευτή του συστήματος ενίσχυσης).
- Στην περίπτωση εφαρμογής μανδύα στις κρίσιμες περιοχές υποστυλωμάτων πρέπει να αφήνεται κενό της τάξης των 15 mm (Σχ. 8.9), ώστε αφενός να μην παρεμποδίζεται η στροφή της ακραίας διατομής, αφετέρου να μην υφίσταται σύνθλιψη ο μανδύας λόγω της στροφής αυτής.
- Όταν ο μανδύας αποσκοπεί στην αποτελεσματική περίσφιγξη υποστυλωμάτων ορθογωνικής διατομής με μεγάλο λόγο πλευρών (π.χ.  $>3$ ) ή τοιχωμάτων, τα τμήματα του μανδύα επί των μεγάλων πλευρών θα πρέπει είτε να συνδέονται μεταξύ τους μέσω κατάλληλα διαμορφωμένων βλήτρων (κατά προτίμηση), είτε να

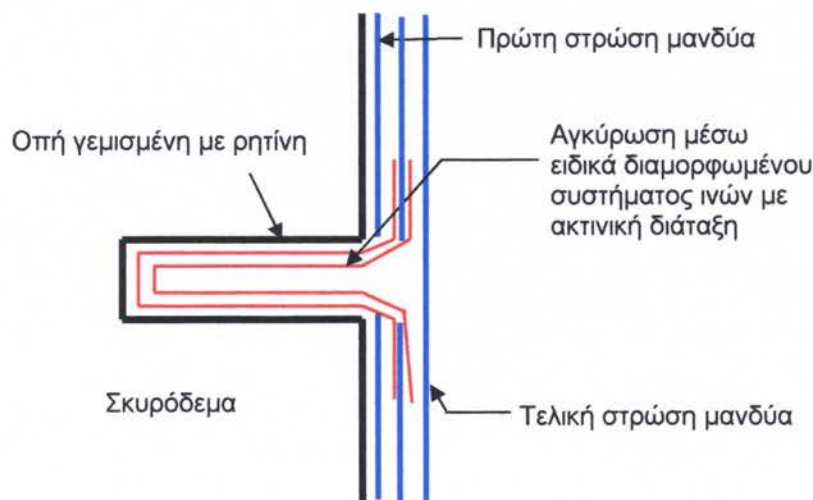


**Σχ. 8.8**



**Σχ. 8.9**

στερεώνονται επαρκώς στις πλευρές αυτές μέσω ειδικών βλήτρων σε οπές (Σχ. 8.10).



Σχ. 8.10 Στερέωση μανδύα μέσω ειδικού βλήτρου-αγκυρίου σε οπή.

- Όπως και στην περίπτωση διατμητικής ενίσχυσης υποστυλώματος με καθολική περιτύλιξη υφασμάτων, η μάτιση κάθε τμήματος θα πρέπει να γίνεται σε διαφορετική πλευρά (Σχ. 8.7).

### 8.3 Μέθοδος εφαρμογής

Τα σύνθετα υλικά που εφαρμόζονται συνήθως στο πεδίο των ενισχύσεων είναι (α) τύπου ελάσματος (ινών άνθρακα σε εποξειδική μήτρα) πάχους 1.0-1.5 mm και πλάτους αρκετών χιλιοστών (π.χ. 50-100 mm) ή (β) τύπου υφάσματος (ινών άνθρακα ή γυαλιού, και σπανιότερα αραμιδίου), πάχους 0.1-0.5 mm. Τα ελάσματα επικολλώνται στην επιφάνεια σκυροδέματος μέσω εποξειδικής ρητίνης δύο συστατικών, ενώ τα υφάσματα εμποτίζονται με εποξειδική ρητίνη επί τόπου. Τα διαθέσιμα συστήματα ενισχύσεων συνθέτων υλικών στην Ελληνική αγορά σήμερα είναι αρκετά. Στα περισσότερα εξ αυτών οι ίνες χαρακτηρίζονται από τις ίδιες ή παρόμοιες ιδιότητες, ενώ οι ρητίνες ποικίλλουν μεταξύ των διαφόρων προμηθευτών. Κάθε σύστημα συνοδεύεται (ή θα πρέπει να συνοδεύεται), εκτός από πλήρη κατάλογο των ιδιοτήτων που ενδιαφέρουν τους μηχανικούς-μελετητές, και από λεπτομερείς οδηγίες εφαρμογής. Έτσι, η παρουσίαση των λεπτομερειών της εφαρμογής των συνθέτων υλικών (οι οποίες μάλιστα τροποποιούνται ή συμπληρώνονται κάθε φορά που εμφανίζονται νέα προϊόντα στην αγορά) ξεφεύγει από το στόχο του παρόντος συγγράμματος. Αντ' αυτών δίνονται βασικές συστάσεις, οι οποίες θα πρέπει να ακολουθούνται σε κάθε περίπτωση, ώστε η

εφαρμογή των συνθέτων υλικών να γίνεται με τρόπο άρτιο. Περισσότερα στοιχεία δίνονται στο JBDPA (1999), στο *fib bulletin* 14 (2001) και στο ACI 440.2R-02 (2002).

- Οι επιφάνειες σκυροδέματος όπου θα γίνει επικόλληση θα πρέπει να είναι απαλλαγμένες σαθρού υλικού, επίπεδες (πλήρωση μεγάλων ρωγμών με ένεμα, επισκευή κοιλοτήτων με κονίαμα), εκτραχυμένες (π.χ. με συρματόβουρτσα ή αμμοβολή ή υδροβολή), απόλυτα καθαρές και στεγνές. Τυχόν υγρασία (τόσο επιφανειακή όσο και εγκλωβισμένη στο υπό ενίσχυση στοιχείο) προϋποθέτει τη χρήση ειδικών ρητινών.
- Η επιλογή της ρητίνης θα πρέπει να γίνει λαμβάνοντας υπόψη, εκτός από τις συνθήκες υγρασίας, και τις συνθήκες θερμοκρασίας, οι οποίες είναι καθοριστικές για την σκλήρυνση της ρητίνης αλλά και για την μετέπειτα συμπεριφορά της. Η εφαρμογή των ρητινών σε χαμηλές θερμοκρασίες περιβάλλοντος ενδέχεται να πρέπει να γίνεται σε συνδυασμό με επιβολή τοπικής θέρμανσης.
- Τα ελάσματα συνθέτων υλικών θα πρέπει να καθαρίζονται σχολαστικά (π.χ. με διάλυμα ακετόνης) λίγο πριν από την εφαρμογή τους, να υφίστανται προσεκτική μεταχείριση (από εργάτες που θα φορούν γάντια) και να τοποθετούνται χωρίς να υφίστανται στρέβλωση. Ιδιαίτερη φροντίδα απαιτείται κατά την εφαρμογή των υφασμάτων, στα οποία οι ίνες θα πρέπει να είναι απόλυτα ευθύγραμμες (με εξαίρεση τις περιοχές όπου θα πρέπει να εφαρμόζονται υπό καμπυλότητα, όπως π.χ. στις γωνίες υποστυλωμάτων) και όσο τεντωμένες γίνεται (ώστε να “ενεργοποιηθούν”, δηλαδή να παραλάβουν δυνάμεις, αμέσως μετά την εφαρμογή φορτίων στο ενισχυμένο στοιχείο).
- Η στρώση εποξειδικής ρητίνης για την επικόλληση ελασμάτων θα πρέπει να έχει πάχος της τάξης του 1.5 mm. Αυτή που χρησιμοποιείται για τον επί τόπου εμποτισμό υφασμάτων θα πρέπει να έχει την κατάλληλη ρευστότητα (ιξώδες) και να εφαρμόζεται στην κατάλληλη ποσότητα ώστε να εξασφαλίζεται πλήρης κάλυψη (εμποτισμός) των ινών, χωρίς παράλληλα να εγκλωβίζεται αέρας (το τελευταίο επιτυγχάνεται όταν η ρητίνη απλώνεται και ταυτόχρονα πιέζεται με ειδικούς κυλίνδρους).
- Για να διευκολύνεται η εφαρμογή επιχρίσματος πάνω στα σύνθετα υλικά, θα πρέπει προτού σκληρυνθεί η εξωτερική στρώση ρητίνης να γίνει πάνω σ’ αυτήν ρίψη επαρκούς ποσότητας (της τάξης του 1 kg/m<sup>2</sup>) χαλαζιακής άμμου, ώστε να δημιουργηθεί τραχειά επιφάνεια.
- Γενικά η εφαρμογή του συστήματος ενίσχυσης θα πρέπει να γίνεται από εξειδικευμένα συνεργεία και με εξαιρετική επιμέλεια.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9

### ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ

#### 9.1 Γενικά

Στο Κεφάλαιο αυτό γίνεται μία συνοπτική παρουσίαση της ανθεκτικότητας συστημάτων ενίσχυσης συνθέτων υλικών υπό την επίδραση μίας σειράς παραγόντων, που δίνονται ακολούθως:

- Υψηλές θερμοκρασίες
- Υγρασία
- Υπεριώδης ακτινοβολία
- Αλκαλικό και όξινο περιβάλλον
- Γαλβανική διάβρωση
- Ερπυσμός, θραύση υπό τάση, διάβρωση υπό τάση
- Κόπωση
- Κρούση

#### 9.2 Θερμοκρασιακές επιδράσεις

Έχει ήδη αναφερθεί στο Κεφ. 2 ότι σχετικά υψηλές θερμοκρασίες, της τάξης των 50-80 °C, μειώνουν σημαντικά την ικανότητα ανάληψης δυνάμεων στις ρητίνες (μήτρα συνθέτων υλικών, κόλλα στη διεπιφάνεια συνθέτων υλικών – σκυροδέματος). Ακόμα υψηλότερες θερμοκρασίες, όπως αυτές κατά τη διάρκεια πυρκαϊάς, προκαλούν πλήρη αποσύνθεση των ρητινών (πολλές από τις οποίες κατά την καύση τους εκλύουν τοξικά αέρια) και επομένως τα σύνθετα υλικά δεν μπορούν να φέρουν τάσεις. Οι θερμοκρασίες “αποσύνθεσης” των ίνων είναι 1000 °C για το γυαλί, 650 °C για τον άνθρακα και 200 °C για το αραμίδιο. Πειραματικά αποτελέσματα έχουν δείξει ότι μανδύες συνθέτων υλικών με ίνες άνθρακα σε εποξειδική μήτρα υφίστανται απώλεια αντοχής για θερμοκρασίες πάνω από περίπου 260 °C. Έτσι, κατά τη διάρκεια ανάπτυξης υψηλών θερμοκρασιών (αλλά και μετά) το σύστημα ενίσχυσης θα πρέπει να θεωρείται ανενεργό, εκτός αν φέρει πυροπροστασία. Η τελευταία είναι εφικτή σε σημαντικό βαθμό μέσω επικάλυψης των συνθέτων υλικών είτε με ειδικά επιχρίσματα (ή κοινά επιχρίσματα μεγάλου πάχους, της τάξης των 40-50 mm, σύμφωνα με τις Ιαπωνικές Συστάσεις JSCE 2001) είτε με ειδικά προστατευτικά (π.χ. τύπου γυψοσανίδας μεγάλου πάχους).

### 9.3 Υγρασία

Γενικά τα σύνθετα υλικά έχουν πολύ καλή συμπεριφορά σε συνθήκες υγρασίας. Σε ορισμένες περιπτώσεις όμως και μετά από μακροχρόνια δράση του νερού (ή ρευστών, γενικότερα), κάποιοι συνδυασμοί ινών-ρητίνης ενδέχεται να παρουσιάσουν προβλήματα. Οι ρητίνες απορροφούν μικρές ποσότητες νερού, οι οποίες μειώνουν ελαφρά την αντοχή τους καθώς και τη θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης. Αυτές βέβαια που χρησιμοποιούνται συνήθως για την επικόλληση συνθέτων υλικών (καλής ποιότητας εποξειδικές ρητίνες) έχουν γενικά εξαιρετική ανθεκτικότητα στην υγρασία (Blaschko et al. 1998). Από τις ίνες, παρουσία υγρασίας το γυαλί υφίσταται μικρή μείωση αντοχής (λόγω απομάκρυνσης ιόντων από την επιφάνεια των ινών) και το αραμίδιο, το οποίο μπορεί να απορροφήσει υγρασία μέχρι και 13% κ.β., αρκετά μεγαλύτερη. Οι ίνες άνθρακα είναι πρακτικά απρόσβλητες.

Εδώ αξίζει να επισημάνουμε ότι η πλήρης κάλυψη στοιχείων σκυροδέματος με μανδύες συνθέτων υλικών δημιουργεί στεγανές (σε νερό και αέρα) εξωτερικές επιφάνειες με αποτέλεσμα την προστασία του μέλους από δυσμενείς περιβαλλοντικούς παράγοντες (π.χ. χλωριόντα, δράση χημικών). Τούτο, σε στοιχεία τα οποία είτε παρουσιάζουν έντονη διάβρωση είτε εκτίθενται σε διαβρωτικό περιβάλλον, είναι ιδιαίτερα ευνοϊκό, διότι ο ρυθμός διάβρωσης μειώνεται δραστικά. Πρέπει να τονιστεί βέβαια ότι σε στοιχεία τα οποία θα πρέπει να “αναπνέουν” (να είναι δηλαδή σχετικά εύκολα διαπερατά) ένας καθολικός μανδύας (ο οποίος ενδέχεται μάλιστα να εγκλωβίσει την υγρασία) θα πρέπει να αποφεύγεται.

### 9.4 Υπεριώδης ακτινοβολία

Η υπεριώδης ακτινοβολία του ηλίου (UV) επιφέρει αλλοίωση της ισχύος των δεσμών και γενικά μείωση της αντοχής στα πολυμερή (μήτρα συνθέτων υλικών) που εκτίθενται σε αυτή. Φαινομενικά, το αποτέλεσμα της επίδρασης της υπεριώδους ακτινοβολίας είναι η χρωματική αλλοίωση και μικρορηγματώση των εκτιθέμενων επιφανειών. Για την περίπτωση των συνθέτων υλικών η υπεριώδης ακτινοβολία επηρεάζει κάπως την επιφανειακή στρώση ρητίνης, επιφέροντας χρωματική αλλοίωση και ενδεχομένως μικρή μείωση της αντοχής της, όχι όμως και τις ίνες (εξαιρέση αποτελούν οι ίνες αραμιδίου, οι οποίες είναι ελαφρώς ευπαθείς, Ahmad and Plecnik 1989). Ως μέθοδος προστασίας στην περίπτωση απευθείας έκθεσης στον ήλιο επί μακρόν προτείνεται η εφαρμογή επιχρισμάτων ή ειδικών αντι-UV (ακρυλικής ή πολυουρεθανικής σύστασης) βαφών ανοικτού χρώματος (π.χ. γκρί ανοικτό).

### 9.5 Αλκαλικό και όξινο περιβάλλον

Γενικά, τόσο το αλκαλικό περιβάλλον (π.χ. αυτό του σκυροδέματος) όσο και το όξινο δεν έχουν δυσμενείς επιδράσεις σε σύνθετα υλικά με ίνες άνθρακα. Οι ίνες γυαλιού είναι όμως αρκετά ευπαθείς (υφίστανται μείωση αντοχής), ενώ οι ίνες αραμιδίου έχουν ενδιάμεση συμπεριφορά. Προστασία σε ευπαθείς ίνες μπορεί παρέχεται από την μήτρα (ρητίνη), υπό την προϋπόθεση βέβαια ότι αυτή τις απομονώνει από το αλκαλικό ή το όξινο περιβάλλον.

### 9.6 Γαλβανική διάβρωση

Η επαφή των ινών άνθρακα με χάλυβα θα πρέπει να αποφεύγεται, διότι ο τελευταίος θα υποστεί γαλβανική διάβρωση. Τέτοιο πρόβλημα δεν υφίσταται όταν χρησιμοποιούνται ίνες γυαλιού ή αραμιδίου.

### 9.7 Ερπυσμός, θραύση υπό τάση, διάβρωση υπό τάση

Γενικά οι ερπυστικές παραμορφώσεις (αυτές δηλαδή που αναπτύσσονται με το χρόνο υπό σταθερή τάση) συνθέτων υλικών τα οποία φορτίζονται κυρίως παράλληλα στις ίνες είναι μικρές. Για υλικά με ίνες άνθρακα είναι πρακτικά μηδενικές, για ίνες γυαλιού πολύ μικρές (αμελητέες), ενώ για ίνες αραμιδίου κάπως μεγαλύτερες. Δεδομένου όμως ότι σε περιπτώσεις ενισχύσεων συνήθως (α) τα σύνθετα υλικά ευρίσκονται υπό τάση μόνο για τα πρόσθετα φορτία (πλέον του ιδίου βάρους) και (β) το σκυρόδεμα δεν είναι “μικρής ηλικίας”, οπότε έχει αναπτύξει το μεγαλύτερο τμήμα των ερπυστικών παραμορφώσεων, ο ερπυσμός σπανίως αποτελεί φαινόμενο προς εξέταση. Περισσότερες λεπτομέρειες δίνονται στην εργασία των Plevris and Triantafillou (1994).

Μία αξιοσημείωτη πάντως παρατήρηση είναι η εξαιρετικά πτωχή συμπεριφορά των συνθέτων υλικών με ίνες γυαλιού υπό τάση. Οι τελευταίες μπορεί να αστοχήσουν όταν βρίσκονται υπό μόνιμη τάση, ακόμα και αν αυτή είναι εξαιρετικά χαμηλή (π.χ. 20% της εφελκυστικής αντοχής). Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται *θραύση υπό τάση* (stress rupture).

Το φαινόμενο της *διάβρωσης υπό τάση* (stress corrosion) αφορά στην μείωση της αντοχής των συνθέτων υλικών λόγω της συνδυασμένης δράσης εφελκυστικών τάσεων και διαβρωτικού (π.χ. όξινου ή αλκαλικού) περιβάλλοντος (το οποίο όμως, απουσία τάσεων, δεν θα είχε ως αποτέλεσμα την μείωση της αντοχής). Γενικά τα σύνθετα υλικά με ίνες άνθρακα δεν έχουν πρόβλημα διάβρωσης υπό τάση ακόμα και αν η τάση φθάνει

στο 80% της εφελκυστικής αντοχής. Οι ίνες γυαλιού όμως είναι εξαιρετικά ευπαθείς (ειδικά όταν συνδυάζονται με ρητίνες όχι τόσο καλές όσο οι εποξειδικές) ενώ οι ίνες αραμιδίου δείχνουν ενδιάμεση συμπεριφορά.

Συμπερασματικά, όταν τα σύνθετα υλικά φέρουν μόνιμα φορτία, η βέλτιστη επιλογή υλικού ινών είναι ο άνθρακας (σε συνδυασμό με εποξειδική ρητίνη).

## 9.8 Κόπωση

Γενικά, η συμπεριφορά των συνθέτων υλικών σε κόπωση (δράση μεγάλου αριθμού κύκλων επαναλαμβανόμενης φόρτισης) είναι πολύ καλή. Ειδικά για υλικά με ίνες άνθρακα η διεθνής βιβλιογραφία (π.χ. Kaiser 1989, Deuring 1993, Barnes and Mays 1999) καταδεικνύει ότι η αντοχή σε κόπωση είναι μεγαλύτερη από αυτή του χάλυβα οπλισμού: σε περιπτώσεις καμπτικής ενίσχυσης δοκών με υλικά ινών άνθρακα υπό επαναλαμβανόμενη φόρτιση πρώτα παρατηρήθηκαν αστοχίες λόγω κόπωσης στον εφελκυσμένο χάλυβα και σε καμμία περίπτωση στους εξωτερικούς οπλισμούς ενίσχυσης.

## 9.9 Κρούση

Σε ότι αφορά στην επίδραση της κρούσης (π.χ. λόγω πρόσκρουσης οχήματος σε υποστύλωμα γέφυρας ενισχυμένο με μανδύα συνθέτων υλικών) στην εναπομένουσα αντοχή των συνθέτων υλικών, καλύτερη συμπεριφορά δίνουν τα υλικά με ίνες αραμιδίου (δεν είναι τυχαίο άλλωστε ότι αυτές χρησιμοποιούνται για την κατασκευή αλεξίσφαιρων γιλέκων!), ακολουθούν αυτά με ίνες γυαλιού και τέλος αυτά με ίνες άνθρακα.

## 9.10 Αξιολόγηση τύπου ινών

Ένα ερώτημα το οποίο τίθεται συχνά στην πράξη από τους μηχανικούς – μελετητές ενισχύσεων με σύνθετα υλικά αφορά στην επιλογή του πλέον κατάλληλου για κάθε περίπτωση τύπου ινών. Όπως φαίνεται στα Κεφάλαια 4-6, η παράμετρος που καθορίζει τον σχεδιασμό μίας επέμβασης σε πολλές περιπτώσεις (π.χ. ενίσχυση σε κάμψη, ενίσχυση σε τέμνουσα, περίσφιγξη με στόχο αύξηση της θλιπτικής αντοχής, περίσφιγξη στις κρίσιμες περιοχές υποστυλωμάτων με στόχο την αποτροπή λυγισμού των διαμήκων ράβδων) είναι η “δυστένεια” του υλικού, δηλαδή το γινόμενο  $E_f t_f$  (μέτρο ελαστικότητας επί συνολικό πάχος). Έτσι, ένα πρώτο κριτήριο επιλογής υλικού ινών θα μπορούσε να αποτελέσει το **κόστος για δεδομένη δυστένεια**. Για παράδειγμα, ένα ύφασμα ινών άνθρακα με μέτρο ελαστικότητας 230 GPa και πάχος  $t_{fb} = 0.12$  mm είναι ουσιαστικά

“ισοδύναμο” ενός υφάσματος ινών γυαλιού με μέτρο ελαστικότητας 69 GPa και πάχος  $t_{fib} = 0.40$  mm. Το σύνθετο υλικό που θα προκύψει και από τα δύο θα έχει “δυστένεια” κάτι λιγότερο (λόγω του μειωτικού συντελεστή  $r_1$ , που αναφέρθηκε στην Ενότ. 2.1.4) από  $nE_ft_{fib}$  όπου  $n$  = αριθμός στρώσεων. Σαν δεύτερο παράδειγμα, δύο στρώσεις υφάσματος ινών άνθρακα με μέτρο ελαστικότητας 230 GPa και πάχος 0.12 mm είναι ουσιαστικά “ισοδύναμες” 5 στρώσεων υφάσματος γυαλιού με μέτρο ελαστικότητας 69 GPa και πάχος 0.16 mm. Έτσι, αν το κόστος (π.χ. ανά  $m^2$ ) κάθε υφάσματος γυαλιού, στο τελευταίο παράδειγμα, είναι πάνω από 2.5 φορές χαμηλότερο του αντίστοιχου για το ύφασμα άνθρακα, η επιλογή του γυαλιού αποτελεί τη βέλτιστη λύση. Στην περίπτωση που στόχος της ενίσχυσης είναι η αύξηση της παραμορφωσιμότητας του σκυροδέματος μέσω περίσφιγξης (π.χ. σε περιοχές πλαστικών αρθρώσεων με στόχο την αύξηση του δείκτη πλαστιμότητας) η παράμετρος που καθορίζει τον σχεδιασμό μίας επέμβασης είναι το γινόμενο  $f_{td}t_f$  (εφελκυστική αντοχή επί συνολικό πάχος), οπότε ως κριτήριο επιλογής του τύπου ινών θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί το κόστος για δεδομένη τιμή του παραπάνω γινομένου.

**Πίνακας 9.1** Αξιολόγηση ινών με βάση την ανθεκτικότητα.

| Κριτήριο                           | Ινες<br>Άνθρακα | Ινες<br>Γυαλιού | Ινες<br>Αραμιδίου |
|------------------------------------|-----------------|-----------------|-------------------|
| Υψηλές θερμοκρασίες                | +               | -               | -                 |
| Υγρασία                            | +               | -               | -                 |
| Υπεριώδης ακτινοβολία              | ++              | +               | -                 |
| Αλκαλικό και όξινο περιβάλλον      | ++              | --              | +                 |
| Γαλβανική διάβρωση                 | --              | +               | +                 |
| Ερπυσμός                           | ++              | --              | -                 |
| Θραύση υπό τάση, διάβρωση υπό τάση | ++              | --              | +                 |
| Κόπωση                             | ++              | -               | +                 |
| Κρούση                             | -               | +               | ++                |

Στους παραπάνω συλλογισμούς όμως θα πρέπει να ληφθούν σοβαρά υπόψη και άλλες παράμετροι, όπως είναι το κόστος εργατικών (αυξάνεται με τον αριθμό στρώσεων), η αποδοτικότητα των πολλαπλών στρώσεων (δεν είναι ανάλογη του αριθμού των στρώσεων), η δυσκολία εμποτισμού στρώσεων μεγάλου πάχους και, φυσικά, η ανθεκτικότητα του συστήματος σε διάρκεια. Σε ότι αφορά στον τελευταίο παράγοντα, τα

σύνθετα υλικά με ίνες άνθρακα είναι αυτά που έχουν την καλύτερη συμπεριφορά, όπως φαίνεται και στον Πίν. 9.1.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ ΤΕΥΧΟΥΣ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΟΔΗΓΙΩΝ

American Concrete Institute (1996), *State-of-the-art Report on Fiber Reinforced Plastic Reinforcement for Concrete Structures*, ACI Report 440R-96, Detroit, Michigan.

American Concrete Institute (2002), *Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures*, ACI Report 440.2R-02, Detroit, Michigan.

Αντωνόπουλος, Κ. (2001), *Ενίσχυση Κόμβων Οπλισμένου Σκυροδέματος με Σύνθετα Υλικά*, Διδακτορική Διατριβή, Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών.

Ahmad, S. H. and Plecnik, J. M. (1989), *Transfer of Composites Technology to Design and Construction of Bridges*, Report of the California State University.

Antonopoulos, C. P. and Triantafillou, T. C. (2002), "Analysis of FRP-Strengthened RC Beam-Column Joints", *Journal of Composites for Construction*, ASCE, **6**(1), 41-51.

Antonopoulos, C. P. and Triantafillou, T. C. (2003), "Experimental Investigation of FRP-Strengthened RC Beam-Column Joints", *Journal of Composites for Construction*, ASCE, **7**(1), 39-49.

Barnes, R. A. and Mays, G. C. (1999), "Fatigue performance of concrete beams strengthened with CFRP plates", *Journal of Composites for Construction*, ASCE, **3**(2), 63-72.

Bizindavyi, L. and Neale, K. W. (1999), "Transfer lengths and bond strengths for composites bonded to concrete", *Journal of Composites for Construction*, ASCE, **3**(4), 153-160.

Blaschko M., Nierdermeier R. and Zilch, K. (1998), "Bond failure modes of flexural members strengthened with FRP", *Proceedings of Second International Conference on Composites in Infrastructures*, Saadatmanesh, H. and Ehsani, M. R., eds., Tucson, Arizona, 315-327.

Business Communications Co., Inc. (2002), Internal Report.

Deuring, M. (1993), *Strengthening of RC with Prestressed Fiber Reinforced Plastic Sheets*. EMPA Research Report 224, Dübendorf, Switzerland (in German).

Ελληνικός Αντισεισμικός Κανονισμός – ΕΑΚ (2000), Οργανισμός Αντισεισμικού Σχεδιασμού και Προστασίας, Αθήνα.

Feldman, D. (1989), *Polymeric Building Materials*, Elsevier Science Publishers Ltd., UK.

Federation International du Beton – fib (2001), *Externally Bonded FRP Reinforcement for RC Structures*, Bulletin 14, Lausanne.

Haroun, M. A., Mosallam, A. S., Feng, M. Q. and Elsanedebey L. L. (2001) "Experimental investigation of seismic repair and retrofit of bridge columns by composite

jackets", *Proceedings of the International Conference of FRP composites in Civil Engineering*, J.-G. Teng, ed., Hong Kong, 839-848.

Holzenkämpfer, P. (1994), *Ingenieurmodelle des verbundes geklebter bewehrung für betonbauteile*. Dissertation, TU Braunschweig (In German).

Jansze, W. (1997), *Strengthening of Reinforced Concrete Members in Bending by Externally Bonded Steel Plates*, PhD Dissertation, TU Delft, The Netherlands.

Japan Building Disaster Prevention Association (1999), *Seismic Retrofit Design and Construction Guidelines for Existing Reinforced Concrete Buildings and Steel Encased Reinforced Concrete Buildings Using Continuous Fiber Reinforced Materials*, Ed. By the Building Guidance Division, Housing Bureau, Japan Ministry of Construction.

Japan Society of Civil Engineers (2001), *Recommendations for Upgrading of Concrete Structures with use of Continuous Fiber Sheets*, Concrete Engineering Series 41.

Kaiser, H. (1989), *Strengthening of Reinforced Concrete with CFRP Plates*, Ph.D. Dissertation, ETH Zürich (in German).

Kim, D.-H. (1995), *Composite Structures for Civil and Architectural Engineering*, E & FN Spon, London.

Lam, L., and Teng, J. G. (2003), "Stress-strain models for FRP-confined concrete", submitted for publication.

Ma, R. and Xiao, Y. (1997), "Seismic retrofit and repair of circular bridge columns with advanced composite materials", *Earthquake Spectra*, **15**(4), 747-764.

Matthys, S. (2000), *Structural Behaviour and Design of Concrete Members Strengthened with Externally Bonded FRP Reinforcement*, Doctoral Thesis, Ghent University.

Neubauer, U. and Rostásy, F. S. (1999), "Bond failure of concrete fibre reinforced polymer at inclined cracks – experiments and fracture mechanics model", *Proceedings of the 4<sup>th</sup> International Conference on Fibre Reinforced Polymer Reinforcement for Concrete Structures*, Eds. C. W. Dolan, S. H. Rizkalla and A. Nanni, ACI, Michigan, USA, 369-382.

Oehlers, D. J. (1992), "Reinforced concrete beams with plates glued to their soffits", *Journal of Structural Engineering, ASCE*, **118**(8), 2023-2038.

Osada, K., Yamaguchi, T. and Ikeda, S. (1999), "Seismic performance and the retrofit of hollow circular reinforced concrete piers having reinforcement cut-off planes and variable wall thickness", *Transactions of the Japan Concrete Institute*, **21**, 263-274.

Plevris, N. and Triantafillou, T. C. (1994), "Time-dependent behaviour of RC members strengthened with FRP laminates", *Journal of Structural Engineering, ASCE*, **120**(3), 1016-1042.

Priestley, M. J. N., Seible, F. and Calvi, G. M. (1996), *Seismic Design and Retrofit of Bridges*, John Wiley & Sons, New York, USA.

Raoof, M. and Hassanen, M. A. H. (2000), "Peeling failure of reinforced concrete beams with fibre-reinforced plastic or steel plates glued to their soffits", *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Structures and Buildings*, **140**, 291-305.

Restrepo, J. I., Wang, Y. C., Irwin, R. W. and DeVino, B. (1988) "Fibreglass/epoxy composites for the seismic upgrading of reinforced concrete beams with shear and bar curtailment deficiencies", *Proceedings 8<sup>th</sup> European Conference on Composite Materials*, Naples, Italy, 59-66.

Saadatmanesh, H., Ehsani, M. R. and Jin, L. (1997) "Repair of earthquake-damaged RC columns with FRP wraps", *ACI Structural Journal*, **94**(2), 206-215.

Seible, F., Priestley, M. J. N., Hegemier, G. A. and Innamorato, D. (1997) "Seismic retrofit of RC columns with continuous carbon fiber jackets", *Journal of Composites for Construction*, ASCE, **1**(2), 52-62.

Τριανταφύλλου, Αθ. (2001), *Δομικά Υλικά*, Βιβλιοπωλεία Παπασωτηρίου.

Tastani, S. and Pantazopoulou, S. (2002), "Design of seismic strengthening for brittle RC members using FRP jackets", *Proceedings of 12<sup>th</sup> European Conference on Earthquake Engineering*, London, Paper 360.

Teng, J. G.; Chen, J. F.; Smith, S. T. and Lam, L. (2001), *FRP Strengthened RC Structures*, John Wiley & Sons Inc.

Triantafillou, T. C. (1998), "Shear strengthening of reinforced concrete beams using epoxy-bonded FRP composites", *ACI Structural Journal*, **95**(2), 107-115.

Triantafillou, T. C. and Deskovic, N. (1991), "Innovative prestressing with FRP sheets: mechanics of short-term behavior", *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, **117**(7), 1652-1672.

Triantafillou, T. C. and Plevris, N. (1992), "Strengthening of RC beams with epoxy-bonded fibre-composite materials", *Materials and Structures*, **25**, 201-211.

ΥΠΕΧΩΔΕ (2000), *Έγκριση Ελληνικού Κανονισμού για τη Μελέτη και Κατασκευή Έργων από Ωπλισμένο Σκυρόδεμα*, Υπουργ. Απόφαση Δ17α/116/4/ΦΝ429/18-10-2000 (ΦΕΚ 1329/Β/18-10-2000), ΕΚΩΣ - 2000.

Yamaguchi, T., Nishimura, T., and Uomoto, T. (1998), "Creep model of FRP rods based on fibre damaging rate", *Proceedings of 1<sup>st</sup> International Conference on Durability of Fibre Reinforced Polymer (FRP) Composites for Construction*, Eds. B. Benmokrane and H. Rahman, Sherbrooke, Canada, 427-437.

Zilch, K., Niedermeier, R. and Blaschko, M. (1998), *Bericht über versuche zum verstärken von betonbauteilen mit CFK (Test report on retrofitting concrete members with CFRP)*. Versuchsbericht Nr. 1310, Technische Universität München, Lehrstuhl für Massivbau (In German).

Ziraba, Y. N., Baluch, M. H., Basunbul, I. A., Sharif, A. M., Azad, A. K. and Al-Sulaimani, G. J. (1994), "Guidelines towards the design of reinforced concrete beams with external plates", *ACI Structural Journal*, **91**(6), 639-646.