



Τ.Ε.Ι. ΠΕΙΡΑΙΑ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΔΟΜΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

“ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΕΣ ΕΝΙΣΧΥΣΕΙΣ ΚΤΙΡΙΩΝ ΜΕ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ”



ΚΑΪΑΦΑΣ ΝΙΚΟΣ & ΤΣΑΜΟΠΟΥΛΟΣ ΝΙΚΟΣ

ΕΙΣΗΓΗΣΗ – ΕΠΙΒΛΕΨΗ

ΓΙΩΡΓΟΣ ΒΑΡΕΛΙΔΗΣ

Δρ. Αρχιτέκτων – Μηχανικός – Πολεοδόμος

ΠΟΠΗ ΘΕΟΔΩΡΑΚΑΚΟΥ – ΒΑΡΕΛΙΔΟΥ

Διδ. Αρχιτέκτων – Καθηγήτρια Αρχιτεκτονικής

Επιστημονικοί Συνεργάτες Τ.Ε.Ι. Πειραιά

ΑΘΗΝΑ 2006

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα πτυχιακή εργασία με θέμα “Αντισεισμικές ενισχύσεις με σύνθετα υλικά” εκπονήθηκε στα πλαίσια 10^{ου} εξαμήνου του τμήματος Πολιτικών Δομικών Έργων του Τ.Ε.Ι. Πειραιά.

Για τη διεκπεραίωση αυτής της πτυχιακής εργασίας χρειάστηκε η σημαντική συμβολή μια σειράς ανθρώπων. Για αυτό το λόγο αισθανόμαστε την ανάγκη να εκφράσουμε τις ευχαριστίες σε αυτούς.

Αρχικά θέλουμε να ευχαριστήσουμε θερμά το κύριο Βαρελίδη Γιώργο καθώς επίσης και τη κυρία Βαρελίδου Πόπη για την ανάθεση του συγκεκριμένου θέματος και για την πολύτιμη καθοδήγηση τους.

Επιπλέον, σημαντική ήταν η βοήθεια του κυρίου Σπυράκου Κωνσταντίνου, αναπληρωτή καθηγητή Ε.Μ.Π. στο εργαστήριο αντισεισμικής τεχνολογίας, ο οποίος μας υπέδειξε κάποιες πηγές για το ξεκίνημα μας.

Θέλουμε να πούμε ένα μεγάλο ευχαριστώ στον κύριο Καρύδη Γιώργο, διπλ. Πολιτικό μηχανικό και υπεύθυνο τεχνικής υποστήριξης στην εταιρία Sika HELLAS A.B.E.E., όχι μόνο για τις χρήσιμες πληροφορίες και για το υλικό που μας έδωσε αλλά και για το προσωπικό χρόνο που αφιέρωσε.

Τέλος, ευχαριστούμε τον υπεύθυνο της εταιρίας ISOMAT A.B.E.E. για το υλικό που μας διέθεσε.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Γενικά χαρακτηριστικά

Με τη πάροδο του χρόνου και την εξέλιξη της τεχνολογίας στον τομέα των δομικών υλικών πληθώρα νέων προϊόντων μπορούν να χρησιμοποιηθούν στις εφαρμογές της επιστήμης του πολιτικού μηχανικού. Τα τελευταία δεκαπέντε χρόνια έχει αναπτυχθεί μία νέα τεχνική ενίσχυσης των κατασκευών που βασίζεται στη χρήση προηγμένων υλικών που αποτελούνται από «υφάσματα» από τον συνδυασμό ινών (άνθρακα, γυαλιού, αραμιδίου) σε μήτρα εποξειδικής ρητίνης. Τα υλικά αυτά είναι γνωστά ως **ινοπλισμένα πολυμερή** ή αλλιώς **σύνθετα υλικά**. Τα υλικά αυτά εφαρμόζονται στις εξωτερικές επιφάνειες των δομικών στοιχείων και αποτελούν εξωτερικό οπλισμό και μόνιμη ενίσχυση τους. Τα ινοπλισμένα πολυμερή τοποθετούνται με προσανατολισμό ινών τέτοιο ώστε να παραλαμβάνουν εφελκυστικές τάσεις.

Ευρεία εφαρμογή έχουν τις τελευταίες δεκαετίες τα υλικά αυτά, στη παραγωγή ποικιλίας προϊόντων σχετικά με την αεροναυπηγική, τη ναυσιπλοΐα, την αυτοκινητοβιομηχανία κλπ.

Προ εικοσαετίας για να παραχθούν ράβδοι οπλισμού ή τένοντες προέντασης σκυροδέματος, αγκύρια εδάφους, ελαφρές γέφυρες, δεξαμενές, σιλό και γενικά όπου είναι απαραίτητη η χρήση υλικών ανθεκτικών σε διάρκεια, χαμηλού βάρους και υψηλής αντοχής.

Κύρια πλεονεκτήματα των σύνθετων υλικών όσον αφορά τις αντισεισμικές ενισχύσεις είναι το χαμηλό βάρος, έτσι ώστε να μην επιβαρύνεται περαιτέρω η κατασκευή, καθώς δεν αυξάνουν σημαντικά το ίδιο βάρος της δοκού, η ανθεκτικότητα σε διάβρωση, η μεγάλη εφελκυστική αντοχή, τομέα που υστερούν κατά πολύ οι κατασκευές από σκυρόδεμα. Επίσης σημαντικό είναι η παραγωγή των υλικών αυτών σε πολύ μεγάλα μήκη, η μεγάλη ευκαμψία τους που έχει ως συνέπεια την εύκολη και ταχύτατη εφαρμογή τους σε δύσκολα προσβάσιμα μέρη των κατασκευών. Επιπροσθέτως απαιτείται μικρή προετοιμασία στο εργοτάξιο, δεν χρειάζεται εκκένωση του χώρου, η

όχληση στους χρήστες είναι ελάχιστη. Τα στοιχεία που θέλουμε να ενισχύσουμε χρειάζονται μικρή και σύντομη προετοιμασία.

Παράλληλα με τα πλεονεκτήματα υπάρχουν και κάποια μειονεκτήματα όπως το σημαντικό κόστος τους (το οποίο μειώνεται όμως με τη πάροδο του χρόνου), η έλλειψη πλαστιμότητας (όχι και παραμορφωσιμότητας). Ένα ακόμα στοιχείο των ινοπλισμένων πολυμερών που αποτελεί μείων είναι η αρνητική συμπεριφορά τους σε υψηλές θερμοκρασίες. Η χρήση τους δε συνίσταται στις περιπτώσεις όπου:

- Υπάρχει σε εξέλιξη διάβρωση του σιδηρού οπλισμού
- Η κατάσταση της υπόστρωσης όπου θα τοποθετηθούν τα υλικά είναι άγνωστη ή έχει υποστεί μείωση της αντοχής της
- Δεν υπάρχει σιδηρούς οπλισμός που να εξασφαλίζει τη πλάσιμη συμπεριφορά του μέλους που πρόκειται να ενισχύσουμε.

Τέλος, αξίζει να αναφερθεί ότι λόγω της πρόσφατης και ραγδαίας ανάπτυξης της συγκεκριμένης τεχνικής υπάρχει σημαντική έλλειψη παιδείας στον τεχνικό κόσμο της χώρας. Το γεγονός αυτό αποδεικνύεται μετά το καταστροφικό σεισμό της Αθήνας το 1999 όπου έγιναν σφάλματα όπως:

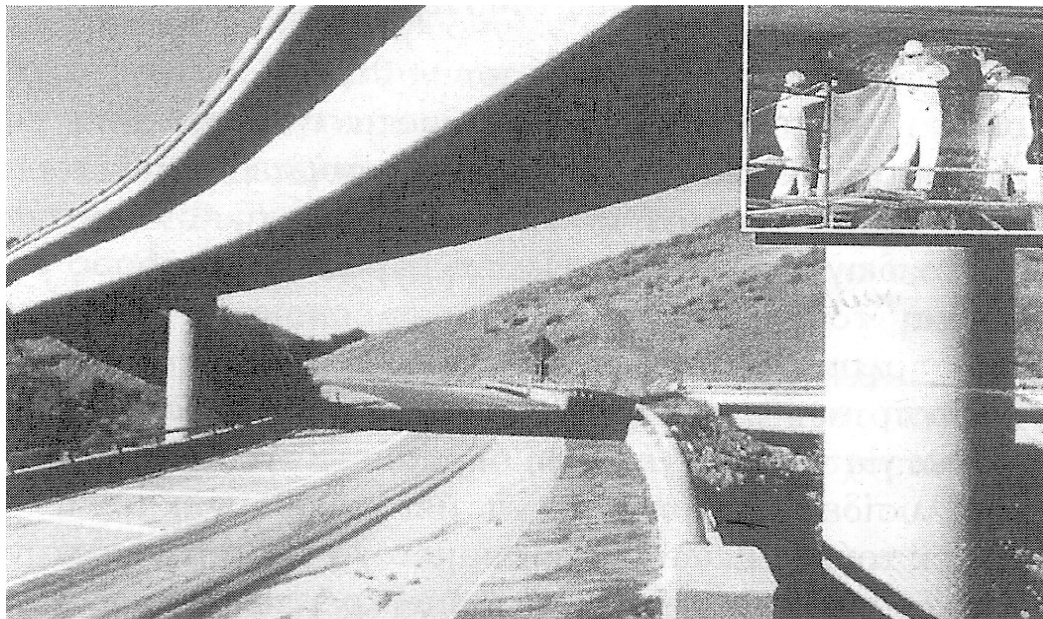
- I. Χρήση μανδύα σε υποστυλώματα με στόχο την αύξηση της καμπτικής αντοχής
- II. Η εφαρμογή «υφασμάτων» με τις ίνες σε μη ευθύγραμμη διάταξη σε φέρουσες τοιχοποιίες.

Η έλλειψη λοιπόν παιδείας στον τομέα αυτό συμβάλλει στην υπερβολική χρήση των υλικών αυτών, χωρίς βέβαια να αποτελούν λύση σε όλες τις περιπτώσεις. Γι'αυτό η χρήση ινοπλισμένων πολυμερών θα πρέπει να θεωρείται τεχνική ενίσχυσης που συμπληρώνει τις υφιστάμενες χωρίς να τις υποκαθιστά αδιακρίτως.

1.2 Ιστορική Αναδρομή

Στα τέλη του 19^{ου} αιώνα συναντάμε τα πρώτα σύνθετα υλικά που έχουν ως συστατικά στοιχεία φυσικές ρητίνες και ίνες όπως πίσσα και ίνες ξύλου. Η μαζική παραγωγή υαλονημάτων ξεκίνησε στο τέλος της δεκαετίας του 1930 και σηματοδοτεί τη γένεση των σύνθετων υλικών προηγμένης τεχνολογίας. Τα

σύγχρονα σύνθετα υλικά χρησιμοποιούνται σε πληθώρα εφαρμογών από υπόγειες δεξαμενές καυσίμων έως ύφαλα πλοίων και πολεμικά αεροσκάφη. Αρχικά, λόγω του υπερβολικού κόστους και των περιορισμένων πειραματικών αποτελεσμάτων οι εφαρμογές των σύνθετων υλικών περιορίστηκαν στην αεροναυπηγική, τη χημική βιομηχανία και τη ναυπηγική. Η επικόλληση στρώσεων ινοπλισμένων πολυμερών από ανθρακονήματα σε δομικά στοιχεία κατασκευών με σκοπό την επισκευή και ενίσχυσή τους πρωτοεφαρμόστηκε στην Ελβετία το 1984. Το Υπουργείο Συγκοινωνιών της Καλιφόρνια (CALTRANS) πρωτοπόρησε με τη χρήση «υφασμάτων» ινοπλισμένων πολυμερών για τη σεισμική ενίσχυση βάθρων γεφυρών στην Καλιφόρνια πριν από περίπου μια δεκαετία (Σχήμα 1.1). Η συμπεριφορά των συστημάτων επισκευής και ενίσχυσης κατασκευών με σύνθετα υλικά σε μεγάλο εύρος εφαρμογών κατά την τελευταία εικοσαετία έχει δοκιμαστεί με εξαιρετική επιτυχία και ιδιαίτερα σε χώρες με δυσμενείς κλιματολογικές συνθήκες όπως οι Η.Π.Α., ο Καναδάς, η Ιαπωνία, η Ελβετία, η Αυστραλία κ.α..



Σχήμα 1.1: (πηγή 1)
Ενίσχυση της γέφυρας Gaviota στην Καλιφόρνια των Η.Π.Α. με υφάσματα
ινοπλισμένων πολυμερών.

Τα τελευταία χρόνια, η ταχεία πρόοδος που έχει σημειωθεί στην τεχνολογία των σύνθετων υλικών, όσον αφορά τόσο στις ιδιότητες όσο και στη διαδικασία παραγωγής τους, έχει επιφέρει σημαντικές βελτιώσεις στη διάρκεια ζωής των ινοπλισμένων πολυμερών και δραματική αύξηση εφαρμογής τους σε

τεχνικά έργα. Σήμερα το $\frac{1}{4}$ της παραγωγής σύνθετων υλικών χρησιμοποιείται σε εφαρμογές πολιτικού μηχανικού. Στη χώρα μας οι πρώτες εφαρμογές πραγματοποιήθηκαν στις αρχές της δεκαετίας του 1990 και εξαπλώθηκαν ιδιαίτερα μετά το σεισμό της Πάρνηθας το 1999.

ΠΗΓΕΣ

1. Σπυράκος Κ., “Ενίσχυση κατασκευών για σεισμικά φορτία”, Εκδόσεις Τ.Ε.Ε., Αθήνα 2004
2. Τριανταφύλλου Α. Χ., “Ενισχύσεις Κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος με σύνθετα υλικά”, εκδόσεις Πανεπιστημίου Πατρών, 2^η έκδοση, Πάτρα 2004

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΤΑ ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΟΙ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΟΥΣ

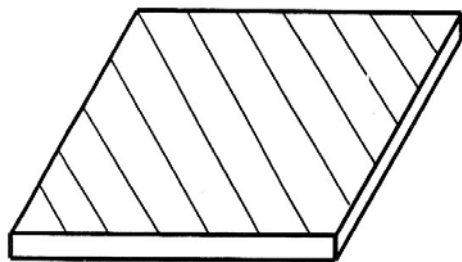
2.1 Κατηγορίες σύνθετων υλικών

Ως **σύνθετο υλικό** θεωρείται ο συνδυασμός δύο ή περισσότερων υλικών. Τα σύνθετα υλικά από ινοπλισμένα πολυμερή έχουν ως κύρια συστατικά στοιχεία ίνες υψηλής αντοχής και υψηλού μέτρου ελαστικότητας σε παχύρρευστοι σκληρυμένη μήτρα. Με τη συγκόλληση των προσανατολισμένων ινών επί του μαλακότερου υλικού της μήτρας παίρνουμε ένα σύνθετο υλικό ινοπλισμένου πολυμερούς με καλύτερες ιδιότητες στη διεύθυνση των ινών. Τα σύνθετα υλικά διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες, ανάλογα με το συνδυασμό των υλικών:

- a. **Σύνθετα υλικά ινών** (fibrous composites) αποτελούμενα από ίνες εμποτισμένες σε ρητίνη ή μη.
- b. **Σύνθετα υλικά στρωμάτων** (laminated composites) αποτελούμενα από επίπεδα διαφόρων υλικών.
- c. **Σύνθετα υλικά σωματιδίων** (particulate composites) αποτελούμενα από σωματίδια διαφόρων υλικών σε ένα σώμα.

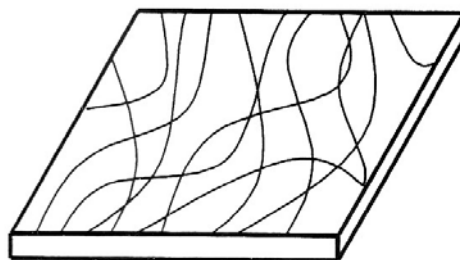
Υπάρχουν δύο γενικές κατηγορίες σύνθετων υλικών ανάλογα με τον προσανατολισμό των ινών:

- d. **Προσανατολισμένα** (directional) των οποίων οι ίνες είναι συνεχείς και έχουν όλες την ίδια διεύθυνση (Σχήμα 2.1).
- e. **Μη προσανατολισμένα** (random) των οποίων οι ίνες είναι τυχαία τοποθετημένες στο συνδετικό υλικό (Σχήμα 2.2).



Σχήμα 2.1: (πηγή 1)

Προσανατολισμένο σύνθετο υλικό

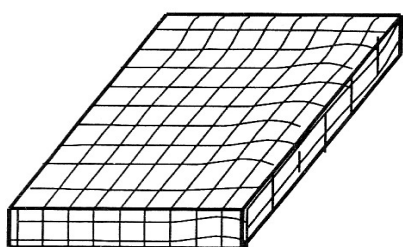


Σχήμα 2.2: (πηγή 1)

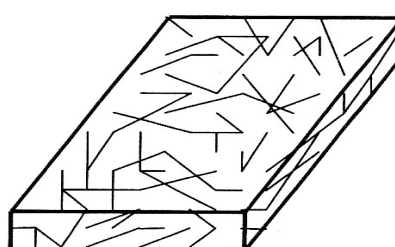
Μη προσανατολισμένο σύνθετο υλικό

Εκτός από τις παραπάνω κατηγορίες έχουμε άλλες τέσσερις ανάλογα με τον τρόπο τοποθέτησης και συνδυασμού των ινών στο συνδετικό υλικό:

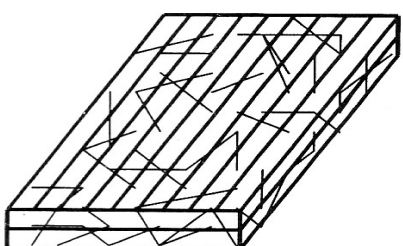
- f. **Πλεκτές ίνες** (woven fiber) οι οποίες αποτελούν συνεχές σώμα χωρίς επιμέρους στρώματα και έτσι δεν παρουσιάζουν πιθανότητες αποκόλλησης (Σχήμα 2.3). Ένα όμως σημαντικό μειονέκτημα είναι η μειωμένη αντοχή τους εξαιτίας της μεγάλης συγκέντρωσης τάσεων, αλλά και της χρήσης υψηλού ποσοστού ρητίνης.
- g. **Ασυνεχείς ίνες** (chopped fiber) οι οποίες έχουν κοντές ίνες διάσπαρτες μέσα στο συνδετικό υλικό (Σχήμα 2.4). Οι μηχανικές αντοχές των ινών αυτών είναι κατά κανόνα κατώτερες των αντίστοιχων με συνεχείς.
- h. **Υβριδικά** (hybrid) τα οποία αποτελούνται είτε από συνεχείς και ασυνεχείς ίνες (Σχήμα 2.5), είτε από περισσότερους του ενός τύπους ινών (ύαλο και γραφίτη).
- i. **Συνεχείς ίνες** (continuous fiber) όπου στρώματα συνεχών ινών – ρητίνης τοποθετούνται στην επιθυμητή διεύθυνση και συνδέονται αποτελώντας ένα σώμα (Σχήμα 2.6). Ενώ επιτυγχάνουν μεγάλη αντοχή υπάρχει μεγάλη πιθανότητα αποκόλλησης μεταξύ των στρωμάτων.



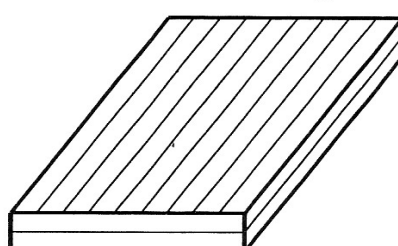
Σχήμα 2.3: (πηγή 1)
Σύνθετο υλικό πλεκτών ινών



Σχήμα 2.4: (πηγή 1)
Σύνθετο υλικό ασυνεχών ινών



Σχήμα 2.5: (πηγή 1)
Υβριδικό σύνθετο υλικό



Σχήμα 2.6: (πηγή 1)
Σύνθετο υλικό συνεχών ινών

Συνήθως για την επισκευή και ενίσχυση κατασκευών χρησιμοποιούνται σύνθετα υλικά που εντάσσονται στη κατηγορία των προσανατολισμένων σύνθετων υλικών συνεχών ινών (directional continuous fibrous composites). Το συγκεκριμένο υλικό συμπεριφέρεται ανισοτροπικά σε σχέση με τη συμπεριφορά του οπλισμένου σκυροδέματος. Λόγω αυτής της συμπεριφοράς έχουμε τη δυνατότητα να τοποθετήσουμε τις στρώσεις του υλικού κατά τέτοιο τρόπο ώστε να ενισχυθεί το μέλος στη διεύθυνση που αναπτύσσονται οι υψηλότερες τάσεις.

2.2 Ιδιότητες σύνθετων υλικών από ινοπλισμένα πολυμερή

Τα σύνθετα υλικά αποτελούνται από ανόργανες ή οργανικές ίνες (γυαλιού, άνθρακα ή αραμιδής) υψηλής εφελκυστικής αντοχής (που οφείλεται στη μικρή διάμετρό τους, της τάξης των 5 – 25 μm) σε μήτρα από πολυμερές (εποξειδική ρητίνη, πολυεστέρας κλπ.) και έχουν βάρος ίσο με ¼ περίπου του χάλυβα. Το μητρικό υλικό (ρητίνη) έχει φτωχές μηχανικές ιδιότητες και η συμπεριφορά του εξαρτάται από τη διάρκεια και το είδος της φόρτισης καθώς και από τη θερμοκρασία. Οι ίνες γυαλιού είναι οι οικονομικότερες αλλά η ευπάθεια τους σε αλκαλικές και όξινες ενώσεις σε συνδυασμό με τη μη ικανοποιητική τους αντοχή σε κόπωση τις κάνει ακατάλληλες για χρήση σε ΙΟΠ φύλλα για ενίσχυση κατασκευών. Οι ίνες άνθρακα και αραμιδής, έχουν αντοχή πολύ καλύτερη από τις ίνες γυαλιού, με τις ίνες άνθρακα να έχουν σχεδόν τη διπλάσια ακαμψία από της ίνες αραμιδής, ενώ είναι και λιγότερο ευπαθείς από τους άλλους δύο τύπους ινών και έτσι προτιμώνται για την ενίσχυση κατασκευών.

Χαρακτηριστικό των σύνθετων υλικών από ΙΟΠ είναι η σχεδόν γραμμική καμπύλη έντασης – παραμόρφωσης έως την αστοχία τους. Οι ίνες έχουν μόνο ελαστική παραμόρφωση ενώ τα υλικά που συνθέτουν τις μήτρες δέχονται και πλαστική παραμόρφωση. Εφόσον όμως η συμπεριφορά των σύνθετων υλικών εξαρτάται κατά κύριο λόγο από τις ίνες, είναι πολύ σπάνιο τα ΙΟΠ που χρησιμοποιούνται για επισκευή και ενίσχυση κατασκευών να παρουσιάζουν πλαστική παραμόρφωση ή έστω διαρροή. Από την άλλη όμως, η θραύση είναι η τυπική μορφή αστοχίας ενός σύνθετου υλικού που καταπονείται από οριακή τιμή τάσης.

2.3 Υλικά

2.3.1 Ίνες

Οι ίνες έχουν ως κύριο χαρακτηριστικό την εξαιρετικά υψηλή εφελκυστική αντοχή και τη γραμμική ελαστική συμπεριφορά μέχρι τη θραύση τους. Οι βασικοί τύποι ινών όσον αφορά τον τομέα των ενισχύσεων είναι οι ίνες άνθρακα, οι ίνες γυαλιού και οι ίνες πολυαραμιδής, των οποίων οι κύριες ιδιότητες φαίνονται στον πίνακα 2.1.

Ίνες άνθρακα: Οι πρώτες ίνες άνθρακα εμφανίστηκαν στο εμπόριο στα τέλη της δεκαετίας του 1950. Ο άνθρακας παράγεται από πολυακρυλονιτρίλιο, πίσσα ή ρεγιόν με πρόλυση σε πολύ υψηλή θερμοκρασία. Οι ίνες άνθρακα έχουν τη δυνατότητα να αποκτήσουν μηχανικές ιδιότητες έως και 100 Gpa εφελκυστικής αντοχής και 1000 Gpa μέτρο ελαστικότητας.

Τα φύλλα από ανθρακονήματα και εποξική ρητίνη είναι ανθεκτικά σε κόπωση, ερπυσμό και διάβρωση. Αντίθετα, λόγω της συμπεριφοράς του ως ευγενές μέταλλο, ο άνθρακας έχει υψηλή αγωγιμότητα και μπορεί να προκαλέσει γαλβανική διάβρωση των μετάλλων που έρχονται σε επαφή μαζί του. Έτσι πρέπει να αποφεύγεται η απ'ευθείας επαφή του χάλυβα με τις ίνες άνθρακα. Αξίζει να σημειωθεί ότι το κόστος των ανθρακονημάτων παρότι παραμένει υψηλό σε σχέση με τα άλλα είδη ινών, έχει μειωθεί σημαντικά τα τελευταία χρόνια.

Ίνες γυαλιού: Οι ίνες γυαλιού εμφανίστηκαν για πρώτη φορά στο εμπόριο στα τέλη της δεκαετίας του 1930. Παρασκευάζονται από λιωμένο γυαλί πυκνότητας 2300 – 2500 kgf/m³. Συναντάμε τρεις τύπους υαλονημάτων, τους εξής:

- a) *Τύπου E*, που είναι ο κοινός και πλέον συνηθισμένος τύπος γυαλιού. Βασικό μειονέκτημα του είναι η μείωση αντοχής σε αλκαλικό περιβάλλον, όπως αυτό του σκυροδέματος.
- b) *Τύπου Z*, με κύριο χαρακτηριστικό την αυξημένη αντοχή σε αλκαλικό περιβάλλον.
- c) *Τύπου S*, με βασικά χαρακτηριστικά την υψηλή αντοχή και μέτρο ελαστικότητας.

Τα φύλλα ύαλου παρουσιάζουν μικρότερη αντοχή σε κόπωση από τα φύλλα άνθρακα και πολυαραμίδης αλλά μεγαλύτερη από τα περισσότερα μέταλλα. Δεν παρουσιάζουν ερπυστικές παραμορφώσεις (όπως και ο άνθρακας), αλλά είναι ευπαθείς σε διάβρωση. Ο ύαλος λειτουργεί ως εξαιρετικό θερμομονωτικό και ηλεκτρομονωτικό υλικό. Οι ίνες ύαλου, αν και είναι ανθεκτικές στους περισσότερους διαλύτες, αντιδρούν με ορισμένες αλκαλικές ενώσεις και ισχυρά οξέα. Οι παραπάνω ιδιότητες επηρεάζονται σημαντικά από τις περιβαλλοντικές συνθήκες και τη μήτρα που επιλέγεται για τη παραγωγή του σύνθετου υλικού. Το χαμηλό κόστος των ινών ύαλου είναι ένα σημαντικό πλεονέκτημα έναντι των άλλων τύπων ινών.

Ίνες πολυαραμίδης: Στις αρχές της δεκαετίας του 1970 συναντάμε τις πρώτες ίνες πολυαραμίδης. Διακρίνονται σε αυτές που προέρχονται από αρωματικό πολυαμίδιο (Kevlar, Twaron) και σε αυτές που προέρχονται από αρωματικό πολυαιθεραμίδιο (Technora).

Κύριο χαρακτηριστικό είναι η υψηλή αντοχή τους σε κρουστικά φορτία. Επιπλέον, παρουσιάζουν μεγάλη αντοχή σε κόπωση και τριβή και είναι ανθεκτικές στους διαλύτες, με εξαίρεση τα ισχυρά οξέα και τις βάσεις. Λόγω της υδροφιλίας τους, έχουν μερική απώλεια αντοχής σε θερμό περιβάλλον με υψηλά ποσοστά υγρασίας. Η θλιπτική τους αντοχή είναι σημαντικά μικρότερη από την αντίστοιχη εφελκυστική, ενώ υπό δεδομένη τάση παρουσιάζουν ερπυστικές παραμορφώσεις.

Ανεξάρτητα από τις παραπάνω τρεις κύριες κατηγορίες ινών, έχουμε και άλλες τρεις κατηγορίες ινών οι οποίες χρησιμοποιούνται σε ελάχιστες εφαρμογές του πολιτικού μηχανικού. Αυτές είναι:

- **Ίνες γραφίτη:** παράγονται με πυρόλυση. Περιέχουν τουλάχιστον 99% άνθρακα, τη στιγμή που το ποσοστό άνθρακα των ανθρακονημάτων είναι λιγότερο από 95%.
- **Ίνες βορίου:** έχουν τη μεγαλύτερη διάμετρο (0,05 – 0,2 mm) σε σχέση με τις άλλες ίνες. Η αντοχή και η ακαμψία τους είναι μεγαλύτερες από αυτές των ινών γραφίτη.

- **Ίνες από καρβίδιο του πυριτίου:** έχουν υψηλή αντοχή σε οξείδωση και ανθεκτικότητα σε υψηλές θερμοκρασίες.

Υλικό	Μέτρο ελαστικότητας (Gra)	Εφελκυστική αντοχή (Mpa)	Οριακή παραμόρφωση εφελκυστικής αστοχίας (%)
Ανθρακας			
Υψηλής αντοχής	215 - 235	3500 – 4800	1,4 – 2,0
Υπέρ υψηλής αντοχής	215 - 235	3500 – 6000	1,5 – 2,3
Υψηλού μέτρου ελαστικότητας	350 - 500	2500 – 3100	0,5 – 0,9
Υπέρ υψηλού μέτρου ελάστικ.	500 - 700	2100 – 2400	0,2 – 0,4
Γυαλί			
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
Αραμίδιο			
Χαμηλού μέτρου ελαστικότητας (Kevlar 29)	70 – 80	3500 – 4100	4,3 – 5,0
Υψηλού μέτρου ελαστικότητας (Kevlar 29, Twaron)	115 - 130	3500 - 4000	2,5 – 3,5

Πίνακας 2.1: (πηγή 2) Ενδεικτικές ιδιότητες ινών (Feldman 1989, Kim 1995)

2.3.2 Μήτρα

Η συγκόλληση μεταξύ των ινών επιτυγχάνεται με χρήση της **μήτρας**. Η μήτρα είναι ένα θερμοσκληρυνόμενο πολυμερές, το οποίο εκτός από το ότι συνδέει τις ίνες μεταξύ τους, τις προστατεύει, εξασφαλίζει τη μεταφορά δυνάμεων σε αυτές αλλά και καθορίζει αρκετές μηχανικές ιδιότητες των σύνθετων υλικών όπως η αντοχή κάθετα στη διεύθυνση των ινών, η διατμητική και η θλιπτική αντοχή. Ο συνηθέστερος τύπος μήτρας είναι οι ρητίνες. Είναι απαραίτητη η συνάφεια μεταξύ των ινών και της ρητίνης έτσι ώστε να αναπτυχθεί χημική και μηχανική σύνδεση μεταξύ των δύο αυτών υλικών.

Οι ρητίνες είναι περισσότερο ευπαθείς στη θερμότητα και στους χημικούς διαλύτες, τα οξέα, τις βάσεις και το νερό σε σχέση με τις ίνες. Επιπλέον όλες οι ρητίνες εμφανίζουν σημαντικές ερπυστικές παραμορφώσεις. Ένα εξαιρετικό πλεονέκτημα που έχουν οι ρητίνες είναι η μεγάλη διάρκεια ζωής τους, στην οποία συμβάλλει σημαντικά η προένταση των σύνθετων υλικών. Οι φυσικές ιδιότητες των μήτρων πολυμερών αλλάζουν με το πέρασ του χρόνου και την αλλαγή της φόρτισης.

Στο εμπόριο, συναντάμε τρεις κατηγορίες ρητινών:

1. **Εποξειδικές ρητίνες:** Οι εποξειδικές ρητίνες υπερέχουν των άλλων τύπων μήτρας λόγω της μεγάλης αντοχής, της μεγάλης συγκολλητικής ικανότητας, της ανθεκτικότητας σε κόπωση και χημική διάβρωση όπως επίσης και της χαμηλής συστολής ξηράνσεως που εμφανίζουν. Το συγκεκριμένο είδος ρητίνης έχει συντελεστή ιξώδους μεγαλύτερο τόσο των πολυεστερικών όσο και των βινυλεστερικών ρητινών. Δύο ακόμα μειονεκτήματα των εποξειδικών ρητινών είναι το μεγάλο χρονικό διάστημα που απαιτούν για την πλήρη ανάπτυξη των μηχανικών τους ιδιοτήτων και το υψηλό κόστος σε σχέση με τις άλλες δύο κατηγορίες.
2. **Πολυεστερικές ρητίνες:** Είναι ακόρεστοι πολυεστέρες παραγόμενοι από την αντίδραση γλυκόλης, είτε με διβασικά οξέα είτε με ανυδρίδες. Οι πολυεστέρες παράγονται μέσω εξώθερμης χημικής αντίδρασης, πράγμα το οποίο συνιστά μεγάλη προσοχή στη χρήση της ποσότητας της μάζας των αντιδρώντων. Σε περίπτωση όπου η μάζα είναι μεγαλύτερη της απαιτούμενης, ελλοχεύει ο κίνδυνος ρηγμάτωσης ή ανάφλεξης του φύλλου πολυεστέρα. Εν αντιθέσει, εάν γίνει χρήση μικρότερης της απαιτούμενης μάζας, η θερμότητα που εκλύεται δεν επαρκεί για την ολοκλήρωση της αντίδρασης. Βασικά μειονεκτήματα των ρητινών αυτών είναι: η ευπάθεια τους στις βάσεις και στο νερό υψηλής θερμοκρασίας, η μικρή ανθεκτικότητα σε κόπωση (σε σχέση με τις άλλες ρητίνες) και τέλος η δυσάρεστη οσμή λόγω της χημικής τους σύστασης.

3. **Βινυλεστερικές ρητίνες:** Είναι υβριδικές ρητίνες παραγόμενες από αλυσιδωτές αντιδράσεις ενός εποξειδικού πολυμερούς με ακρυλικές ή μεθακρυλικές ενώσεις. Οι βινυλεστερικές ρητίνες είναι περισσότερο εύκαμπτες, σκληρότερες, πιο ανθεκτικές σε κόπωση και λιγότερο χημικά ενεργές σε σχέση με τις πολυεστερικές. Οι υδροξυλικές ενώσεις που περιέχονται στο εποξειδικό πολυμερές σχηματίζουν δεσμούς υδρογόνου με αντίστοιχες ενώσεις στην επιφάνεια των ινών ύαλου. Με τον τρόπο αυτό βελτιώνεται σημαντικά η σύνδεση της ρητίνης με τις ίνες. Οι συγκεκριμένες ρητίνες έχουν χαμηλότερη αντοχή και ανθεκτικότητα σε κόπωση από τις εποξειδικές. Όπως και οι πολυεστερικές έτσι και οι βινυλεστερικές ρητίνες έχουν δυσάρεστη οσμή λόγω της χημικής τους σύστασης. Το κόστος τους κυμαίνεται μεταξύ του κόστους των δύο άλλων τύπων ρητινών.

Οι σημαντικότερες μηχανικές ιδιότητες των τριών αυτών ειδών ρητίνης παρουσιάζονται στο πίνακα 2.2.

Είδος ρητίνης	Εποξειδική ρητίνη	Πολυεστερική ρητίνη	Βινυλεστερική ρητίνη
Εφελκυστική αντοχή (Mpa)	55 – 130	35 – 104	73 – 81
Μέτρο ελαστικότητας (Gra)	2,0 – 4,5	2,1 – 4,1	3,0 – 3,6
Επιμήκυνση θραύσης (%)	4,0 – 14,0	< 5,0	3,5 – 5,5
Πυκνότητα (gr/cm ³)	1,20 – 1,30	1,10 – 1,46	1,12 – 1,32

Πίνακας 2.2: (πηγή 2) Μηχανικές ιδιότητες ρητινών

2.3.3 Κόλλα

Είναι συνήθως η εποξειδική ρητίνη δύο συστατικών και εφαρμόζεται μεταξύ σκυροδέματος και σύνθετου υλικού εξασφαλίζοντας έτσι τη συνεργασία τους και τη μεταφορά τάσεων από το πρώτο στο δεύτερο. Ο χρόνος εργασιμότητας, ο χρόνος εφαρμογής και η θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης είναι τρεις έννοιες που πρέπει να κατανοηθούν για την ορθή χρήση της κόλλας (εποξειδική ρητίνη).

Ο χρόνος εργασιμότητας, είναι ο χρόνος τον οποίο μπορούμε να εκμεταλλευτούμε για να κάνουμε εύκολη χρήση της κόλλας πριν αυτή αρχίσει να σκληραίνει στο δοχείο όπου έγινε η ανάμιξη. Εξαρτάται από το τύπο της κόλλας, τη θερμοκρασία περιβάλλοντος και τη ποσότητα κόλλας που προκύπτει με την ανάμιξη των δύο συστατικών.

Ο χρόνος εφαρμογής, είναι το χρονικό διάστημα στο οποίο η κόλλα διατηρεί τις συγκολλητικές της ιδιότητες σε ικανοποιητικό βαθμό. Μέσα στο χρόνο αυτό πρέπει να γίνει η επικόλληση του οπλισμού ενίσχυσης στην επιφάνεια του σκυροδέματος.

Η θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης, είναι η θερμοκρασία στην οποία η κόλλα υφίσταται ταχεία μείωση του μέτρου ελαστικότητας οπότε και έχει περιορισμένη ικανότητα μεταφοράς δυνάμεων.

2.3.4 Σύνθετα υλικά

Τα σύνθετα υλικά αποτελούν συνδυασμό συνεχών ινών και πολυμερικής μήτρας. Σε περίπτωση ελασμάτων σύνθετων υλικών οι ίνες καταλαμβάνουν το 50 – 70% του συνολικού όγκου ενώ το αντίστοιχο ποσοστό για μανδύες που κατασκευάζονται με επί τόπου εφαρμογή ρητίνης είναι 20 – 35%.

Οι μηχανικές ιδιότητες των ινοπλισμένων πολυμερών με ίνες σε μία κυρίως διεύθυνση μπορούν είτε να μετρηθούν πειραματικά είτε να εκτιμηθούν μέσω του «κανόνα ανάμιξης»:

$$E_f = E_{fib} \times V_{fib} + E_m \times V_m \quad \text{Εξ. (2.1)}$$

$$f_f = f_{fib} \times V_{fib} + f_m \times V_m \quad \text{Εξ. (2.2)}$$

όπου:

E_f = μέτρο ελαστικότητας σύνθετων 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 σύνθετων υλικών παράλληλα στις ίνες

f_{fib} = εφελκυστική αντοχή ινών

f_m = εφελκυστική αντοχή μήτρας

2.3.5 Συστήματα ενίσχυσης

Υπάρχουν δύο ειδών μέθοδοι για την ενίσχυση στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος με σύνθετα υλικά. Τα συστήματα υγρής εφαρμογής και τα προκατασκευασμένα υλικά.

2.3.5.1 Συστήματα υγρής εφαρμογής

- I. Φύλλα ή υφάσματα αποτελούμενα από συνεχείς ίνες μίας διεύθυνσης χωρίς μήτρα. Για την εφαρμογή τους απαιτείται η εφαρμογή «ασταρώματος» στο σκυρόδεμα και ο εμποτισμός των ινών με ρητίνη ακολουθώντας μια από τις παρακάτω μεθόδους:
 - α) εφαρμογή της ρητίνης στο σκυρόδεμα, τοποθέτηση των ινών κατευθείαν στη ρητίνη, β) προεμποτισμός των ινών με ρητίνη και ακολούθως επικόλληση.
- II. Υφάσματα αποτελούμενα από συνεχείς ίνες σε τουλάχιστον δύο διευθύνσεις, χωρίς μήτρα. Η εφαρμογή τους γίνεται όπως προαναφέρθηκε.
- III. Φύλλα ή υφάσματα αποτελούμενα από συνεχείς ίνες μίας διεύθυνσης, προεμποτισμένα με ρητίνη σε μη σκληρυμένη μορφή. Η εφαρμογή τους γίνεται με ή χωρίς επιπλέον ρητίνη.

- IV. Φύλλα ή υφάσματα αποτελούμενα από συνεχείς ίνες σε τουλάχιστον δύο διευθύνσεις, προεμποτισμένα με ρητίνη σε μη σκληρυμένη μορφή. Η εφαρμογή τους γίνεται με ή χωρίς επιπλέον ρητίνη.
- V. Συνεχείς ίνες χωρίς μήτρα, συγκεντρωμένες σε μορφή νήματος, το οποίο εμποτίζεται με ρητίνη ενώ τυλίγεται στο στοιχείο σκυροδέματος.
- VI. Προεμποτισμένες συνεχείς ίνες, συγκεντρωμένες σε μορφή νήματος, το οποίο ενώ τυλίγεται στο στοιχείο σκυροδέματος ενδεχομένως να υφίσταται και πρόσθετο εμποτισμό.

2.3.5.2 Προκατασκευασμένα υλικά

- I. Προκατασκευασμένα ευθύγραμμα ελάσματα που επικολλούνται μέσω ρητίνης. Τα ελάσματα διατίθενται συνήθως σε μορφή ρολών.
- II. Προκατασκευασμένα κελύφη, μανδύες ή γωνίες που επικολλούνται μέσω ρητίνης.

Αξίζει να σημειωθεί ότι τα προκατασκευασμένα ελάσματα προτιμούνται έναντι των υφασμάτων όταν η εφαρμογή γίνεται σε επίπεδες επιφάνειες (πλάκες), ενώ σε άλλες περιπτώσεις (μανδύες υποστυλωμάτων) προτιμάται η εφαρμογή υφασμάτων μέσω της υγρής μεθόδου.

2.3.6 Σύνθετα υλικά ανόργανης μήτρας

2.3.6.1 Γενικά

Κανένας δε μπορεί να αμφισβητήσει την αξιοπιστία της χρήσης των ινοπλισμένων πολυμερών η οποία καταδεικνύεται και από την πρακτική αποτελεσματικότητα του όλο και μεγαλύτερου πλήθους των εφαρμογών τους. Στοχεύοντας όμως στην εξάλειψη των μειονεκτημάτων της τεχνικής αυτής ερευνάται η αντικατάσταση της χρήσης των οργανικών πολυμερικών υλικών

από ανόργανα υλικά με βάση το τσιμέντο. Η νεότερη αυτή τεχνική των σύνθετων υλικών ανόργανης μήτρας, εισήχθη στο τέλος της δεκαετίας του 1990 ακολουθώντας την αυξανόμενη παραγωγή των δομικών κονιαμάτων υψηλών επιδόσεων.

Εν συντομία μπορούμε να προσδιορίσουμε τα απαιτούμενα χαρακτηριστικά του εναλλακτικού συστήματος ενίσχυσης στα εξής:

- Ικανές μηχανικές ιδιότητες για τη μεταφορά φορτίων
- Σωστή σύσταση ώστε να εξασφαλίζει καλή διείσδυση και καλή συνάφεια με το ύφασμα ή το πλέγμα των ινών
- Θερμική και χημική συμβατότητα με τις ίνες και το υλικό του υποστρώματος
- Αντίσταση στη φωτιά και τις υψηλές θερμοκρασίες
- Αποδεκτοί περιβαλλοντικοί όροι κυρίως στην εφαρμογή
- Καλή συνάφεια με τη προεργασμένη επιφάνεια σκυροδέματος
- Ικανή εργασιμότητα, δηλαδή δυνατότητα εφαρμογής σε μεγάλες κατακόρυφες επιφάνειες και ικανός χρόνος εργασιμότητας
- Περιορισμένη συστολή ώστε να μην αναπτυχθούν τάσεις στη διεπιφάνεια της ενισχυμένης κατασκευής και της ενίσχυσης
- χρήση υλικού ως μήτρα με χαμηλότερη εφελκυστική παραμόρφωση αστοχίας από τις ίνες, με σκοπό την αποφυγή της ψαθυρής αστοχίας.
- Το μέτρο ελαστικότητας του κονιάματος της μήτρας θα πρέπει να είναι ίδιας τάξης μεγέθους με το ενισχυμένο σκυρόδεμα, διότι μεγάλες διαφορές στα μέτρα ελαστικότητας της κόλλας και των συγκολλούμενων υλικών μπορούν να επιφέρουν συγκεντρώσεις τάσεων.

Η σύσταση της ανόργανης μήτρας είναι ένα κρίσιμο σημείο προκειμένου να επιτευχθούν τα παραπάνω απαιτούμενα χαρακτηριστικά. Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στην όσο το δυνατό εξασφάλιση καλύτερης συνάφειας μεταξύ των ινών και της μήτρας.

Η ζητούμενη συνάφεια εξαρτάται κυρίως από α) την κοκκομετρία και β) την περιεκτικότητα κονιάματος σε πολυμερή.

Η χρήση λεπτόκοκκου τσιμέντου (έχει μεγάλες αντοχές και επιτάχυνση της ανάπτυξης του σε σχέση με το κανονικό) αποσκοπεί στην καλύτερη διείσδυση και εμποτισμό των ινών. Τα πολυμερή βελτιώνουν τις συνθήκες συνάφειας και αυξάνουν την ελαστικότητα της μήτρας συνεισφέροντας έτσι στη μεταφορά των δυνάμεων στις ίνες. Έλεγχοι σε εμπορικά κονιάματα έδειξαν ότι ο βέλτιστος λόγος πολυμερούς προς τσιμεντοκονίαμα είναι 0,5.

Παραδειγματικά αναφέρουμε ότι ύστερα από έρευνες επάνω στην σύσταση της ανόργανης μήτρας έχουν προκύψει διάφορα παρασκευάσματα όπως το γεωπολυμερές, ένα ποζολανικό κονίαμα, το οποίο αποτελείται από σκόνη αργιλοπιριτίου με καταλύτη το νερό, η μήτρα A30, η οποία προέρχεται από πολύ λεπτό τσιμέντο με 30% πολυμερή και το IPC (Inorganic Phosphate Cement) που προέρχεται από ασβεστοπυριτική σκόνη και φωσφορικό οξύ και συνθέτει μη αλκαλική ανόργανη μήτρα, κατάλληλη να συνδυαστεί με ίνες γυαλιού (το φθηνότερο υλικό ινών).

2.3.6.2 Κονιάματα με πολυμερή

Τα κονιάματα με πολυμερή παρασκευάζονται με δύο τρόπους:

- a) Με αντικατάσταση του τσιμέντου με πολυμερές
- b) Με αντικατάσταση μέρους του νερού με υδατοδιαλυτό πολυμερές (Latex)

Στην πράξη έχει επικρατήσει η ονομασία ρητινοκονιάματα επειδή συνήθως ως πολυμερές χρησιμοποιείται ρητίνη. Κονιάματα αυτού του τύπου χρησιμοποιούνται εκτός των άλλων και για αποκατάσταση βλαβών μικρού βαθμού σε δομικά στοιχεία από οπλισμένο σκυρόδεμα. Αν και το κόστος του είναι ιδιαίτερα υψηλό σε σχέση με τα κονιάματα που έχουν βάση το τσιμέντο, στο πεδίο εφαρμογής που προαναφέρθηκε έχουν σαφές προβάδισμα.

Τα πλεονεκτήματα των κονιαμάτων αυτού του τύπου είναι:

- Οι επιτυγχανόμενες αντοχές σε θλίψη μπορεί να φθάσουν μέχρι και το τετραπλάσιο των αντίστοιχων συμβατικών κονιαμάτων,

ενώ η αντοχή σε εφελκυσμό μπορεί να φθάσει μέχρι και το εικοσαπλάσιο

- Η σκλήρυνση τους γίνεται πολύ γρήγορα και επιταχύνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας. Σε πολύ σύντομο χρονικό διάστημα μπορούν να επιτευχθούν ιδιαίτερα υψηλές αντοχές
- Στην περίπτωση που το τσιμέντο έχει αντικατασταθεί με πολυμερές το μέτρο ελαστικότητας προκύπτει μέχρι 50% υψηλότερο του αντίστοιχου για συμβατικό κονίαμα, ενώ όταν το νερό αντικατασταθεί με υδατοδιαλυτό πολυμερές το μέτρο ελαστικότητας μπορεί να μειωθεί μέχρι και 50%
- Επιτυγχάνεται αυξημένη αντίσταση στην επιφανειακή φθορά, στην προσβολή από χημικά και στον παγετό, ενώ παρατηρείται και μια σχετική μείωση του πορώδους και της συστολής ξήρανσης.

Βασικά μειονεκτήματα αυτών των κονιαμάτων είναι ο υψηλός συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας, ο σχετικά υψηλός ερπιστικός συντελεστής και η μικρή αντοχή σε πυρκαγιά.

2.3.7 Σύνθετα υλικά που χρησιμοποιούνται για ενισχύσεις κατασκευών

Εν συντομία αξίζει να κάνουμε μια μικρή αναφορά σε κάποια υλικά που κυκλοφορούν και χρησιμοποιούνται στον τεχνικό κόσμο, ενώ η χρήση τους και η βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων τους και όχι μόνο, αποτελεί τα τελευταία 30 χρόνια αντικείμενο μελέτης και έρευνας (Technical Report, Bulletin 14):

- GRC (Glass Reinforced Concrete). Κατασκευάστηκε για πρώτη φορά από τον δόκτορα A.J.Majumdar στην Αγγλία το 1967. Είναι ένα σύνθετο υλικό αποτελούμενο από τσιμεντοειδή μήτρα οπλισμένη με ίνες γυαλιού
- AR-GRC (Alkali Resistant-Glass Reinforced Concrete). Το 1979 ο δόκτωρ Majumdar παρασκεύασε ίνες αλκαλικής αντίστασης προκειμένου να μειώσει την επίδραση του αλκαλικού τσιμεντοειδούς

περιβάλλοντος στις ίνες γυαλιού. Επίσης οι ίνες αυτές μπορούν, αν διαθέτουν κάποια ειδική προστατευτική μεμβράνη που τις βοηθάει, να αυξήσουν την εργασιμότητα τους και να καθυστερήσουν ή ακόμα και να αναβάλουν την δημιουργία κρυστάλλων ασβεστίου ανάμεσα στις δέσμες τους κατά την διαδικασία ενυδάτωσης του υλικού.

- PGRC (Polymer Glass Reinforced Concrete). Πρωτοεμφανίστηκε από τον Forton BV στην αγορά της Ολλανδίας. Αποτελείται από τσιμεντοειδή μήτρα, ίνες γυαλιού και πρόσθετα πολυμερικής σύστασης. τα πολυμερή αυτά δεν είναι παρά μόρια σκόνης αρκετά μεγάλου μεγέθους ώστε μετά την κατακάλιση του υλικού να καλύπτουν όλα τα μικρότερα συστατικά των κονιαμάτων. Η κατακάλιση των πολυμερών γίνεται πριν ή κατά την διάρκεια της ενυδάτωσης της τσιμεντοειδούς μήτρας και αυξάνει την αντοχή του GRC, προστατεύοντας τις ίνες γυαλιού από την αλκαλική δράση και γεμίζοντας τα κενά μεταξύ αυτών

Βασικοί λόγοι για τους οποίους τα παραπάνω υλικά μπορούν να χάσουν σε μεγάλο βαθμό την αντοχή και τη πλαστιμότητα τους είναι η “αλκαλική επίθεση” στις ίνες γυαλιού και η εισχώρηση της υγρασίας του τσιμέντου ανάμεσα σε αυτές. Φυσικά ο τύπος των ινών αλλά και η σύνθεση της μήτρας παίζουν κυρίαρχο ρόλο στον χρόνο γήρανσης του υλικού. Επίσης η μήτρα αλλά και η περιεκτικότητα σε πρόσθετα πολυμερή είναι αυτή που επηρεάζει κατά κύριο λόγο το μέτρο ελαστικότητας του υλικού, καθώς με την γήρανση του μειώνεται (όπως άλλωστε αναμένεται από μία τσιμεντοειδή μήτρα). Τέλος να σημειώσουμε ότι σύμφωνα με τις Γερμανικές προδιαγραφές NEN 3884 πολύ λεπτά στρώματα των παραπάνω υλικών έχουν αμελητέα αντίσταση σε πυρκαγιά, ενώ με την προσθήκη άλλων στοιχείων πολυμερικής σύστασης μπορεί να εξασφαλιστεί πυροπροστασία κάποιων ωρών.

- CRC (Carbon Reinforced Cement). Αποτελείται από τσιμεντοειδή μήτρα και ίνες άνθρακα. Αποτελέσματα από δοκιμές σε λυγισμό, όπου τα δοκίμια κρατούνταν σε υγρό περιβάλλον 75 °C, έδειξαν διατήρηση της αρχικής εφελκυστικής αντοχής και πολύ καλή απόκριση των ανθρακικών ινών στο αλκαλικό περιβάλλον.

ΠΗΓΕΣ

1. Σπυράκος Κ., “Ενίσχυση κατασκευών για σεισμικά φορτία”, Εκδόσεις Τ.Ε.Ε., Αθήνα 2004
2. Ντελμέκουρα Κωνσταντίνα, “Ενίσχυση κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα με χρήση σύνθετων υλικών ανόργανης μήτρας”, 11ο Φοιτητικό Συνέδριο “Επισκευές Κατασκευών 2005”, Πανεπιστήμιο Πατρών 2005
3. Τριανταφύλλου Α. Χ., “Ενισχύσεις Κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος με σύνθετα υλικά”, εκδόσεις Πανεπιστημίου Πατρών, 2^η έκδοση, Πάτρα 2004
4. Παναγιώτης Νικολόπουλος, “Τεχνολογία νέων υλικών σε επισκευές-ενισχύσεις κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα”, 6^ο Φοιτητικό συνέδριο “Επισκευές κατασκευών 2000”, Πανεπιστήμιο Πατρών 2000
5. “Δομητικές ενισχύσεις με συστήματα υφασμάτων SikaWrap”, Sika A.B.E.E., 2005
6. “Ολοκληρωμένα συστήματα ενίσχυσης κατασκευών με σύνθετα υλικά”, ISOMAT A.B.E.E., 2006

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΥΠΟ ΤΗΝ ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΠΑΡΑΓΟΝΤΩΝ

Σε αυτό το κεφάλαιο θα παρουσιάσουμε παράγοντες οι οποίοι επηρεάζουν την ανθεκτικότητα των συστημάτων ενίσχυσης σύνθετων υλικών. Θα παραθέσουμε και συμπεράσματα που διεξήχθησαν από πειραματικά αποτελέσματα.

3.1 Ανθεκτικότητα σύνθετων υλικών

Γενικά, τα σύνθετα υλικά ινοπλισμένων πολυμερών σχεδιάζονται και παρασκευάζονται έτσι ώστε να είναι ανθεκτικά υπό φυσιολογικές συνθήκες περιβάλλοντος για μακρές χρονικές περιόδους.

Τα σύνθετα υλικά ινοπλισμένων πολυμερών παρουσιάζουν μεγάλη διάρκεια ζωής για ένα λογικό εύρος περιβαλλοντικών συνθηκών, οι οποίες περιλαμβάνουν:

- Θερμοκρασία: από $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ έως $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ για μακρά έκθεση και $650\text{ }^{\circ}\text{C}$ έως $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ για βραχεία έκθεση (μικρότερη από 2 ώρες) σε φωτιά.
- Υγρασία: πλήρης βύθιση σε αλμυρό ή γλυκό νερό για έκθεση μακράς διάρκειας από $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ έως $40\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- pH: από 3 έως 10 για μακρά χρήση
- Υπεριώδης ακτινοβολία: δείκτης υπεριώδους ακτινοβολίας ίσος με 10 για μακρά έκθεση
- Υδρογονάνθρακες: απορρόφηση συγκεκριμένης ποσότητας για μακροχρόνια διαστήματα.

Σε εφαρμογές σε έντονα αλκαλικό περιβάλλον, π.χ. ενίσχυση πασσάλων στη θάλασσα, απαιτείται χρήση ειδικών ρητινών με ίνες άνθρακα ή ύαλου. Αξίζει να τονιστεί ότι οι προδιαγραφές ενός καλά σχεδιασμένου συστήματος ινοπλισμένων πολυμερών πρέπει να περιέχουν στοιχεία για έκθεση συστήματος σε κάθε μία από τις παραπάνω συνθήκες για περιόδους έως 10000 ωρών.

Παρακάτω παρατίθενται αναλυτικά η ανθεκτικότητα των σύνθετων υλικών σε διάφορες δυσμενείς συνθήκες.

3.1.1 Θερμοκρασιακές επιδράσεις

Η θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης ύαλου (T_g) είναι το σημείο πέρα από το οποίο η συμπεριφορά του ΙΟΠ αλλοιώνεται δραματικά παρουσιάζοντας μείωση των μηχανικών χαρακτηριστικών του. Σε θερμοκρασίες της τάξης των 50 - 80 °C τα ΙΟΠ μειώνουν σημαντικά την ικανότητα ανάληψης δυνάμεων στις ρητίνες. Κατά τη διάρκεια πυρκαγιάς έχουμε πλήρη αποσύνθεση των ρητινών και το σύστημα θα πρέπει να θεωρείται ανενεργό, εκτός εάν φέρει πυροπροστασία. Η πυροπροστασία επιτυγχάνεται με ειδικά επιχρίσματα ή κοινά επιχρίσματα μεγάλου πάχους (40 – 50 mm) ή ειδικά προστατευτικά όπως γυψοσανίδες. Οι θερμοκρασίες αποσύνθεσης των ινών είναι 1000 °C για τα υαλονήματα, 650 °C για τα ανθρακονήματα και 200 °C για τις ίνες πολυαραμίδης.

Σύνθετα υλικά έχουν δοκιμαστεί σε αρνητικές θερμοκρασίες τάξης -40 °C και δεν έχουν διαπιστωθεί δυσμενείς επιπτώσεις στη συμπεριφορά τους. Έχει παρατηρηθεί ότι σε θερμοκρασίες από -30 °C έως 10 °C αυξάνεται η δυσκαμψία του υλικού με αποτέλεσμα να έχουμε ψαθυρή μορφή αστοχίας αλλά και μείωση της αντοχής σε κρούση.

3.1.2 Συμπεριφορά στο νερό

Τα σύνθετα υλικά παρουσιάζουν καλή συμπεριφορά σε συνθήκες υγρασίας. Μετά από μακροχρόνια παρουσία νερού κάποιοι συνδυασμοί ινών – ρητίνης παρουσιάζουν προβλήματα.

Η μήτρα από ρητίνη απορροφά νερό και έχει ως άμεσες συνέπειες τη μείωση της θερμοκρασίας υαλώδους μετάπτωσης ύαλου (T_g) και τη μείωση της δυσκαμψίας της ρητίνης. Στη περίπτωση των εποξικών ρητινών τα παραπάνω φαινόμενα είναι ανατρέψιμα ενώ στα άλλα δύο είδη ρητινών μπορούν είτε να είναι ανατρέψιμα είτε όχι, ανάλογα με το χρόνο και τη θερμοκρασία της έκθεσης (όσο μεγαλύτερη είναι η θερμοκρασία τόσο



Σχήμα 3.1:
Τοποθέτηση μανδύα σύνθετων υλικών
σε κατασκευή θεμελιωμένη σε νερό

ταχύτερες και δυσμενέστερες είναι η μόνιμες επιπτώσεις της διείσδυσης του νερού).

Όσον αφορά τα είδη ινών αξίζει να σημειωθεί ότι οι ίνες άνθρακα είναι αδρανείς στο νερό, οι ίνες ύαλου εμφανίζουν μικρή μείωση της αντοχής ενώ

οι ίνες πολυαραμίδης απορροφούν υγρασία έως 13% του βάρους, η οποία μπορεί να έχει αρνητική επίδραση στην

εφελκυστική τους αντοχή καθώς και στην διεπιφάνεια ρητίνης και ινών.

Υπάρχουν τρεις τρόποι πρόσβασης του νερού στα ινοπλισμένα πολυμερή:

- Μέσω της τριχοειδούς δράσης κατά μήκος του διαμήκους άξονα της ίνας στη διεπιφάνεια ρητίνης – ίνας.
- Μέσω ρωγμών και κενών στη δομή του σύνθετου υλικού.
- Μέσω διάχυσης διαμέσου της μήτρας.



Σχήμα 3.2: (πηγή 2)
Ενίσχυση πασσάλων με ανθρακονήματα στο Lamma Island Jetty του
Χονγκ Κονγκ

Για τη προστασία των κατασκευών από την αρνητική επίδραση του νερού, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε μανδύες σύνθετων υλικών. Έτσι

επιτυγχάνεται στεγάνωση των εξωτερικών επιφανειών. Τέτοια παραδείγματα έχουμε στη θεμελίωση κατασκευών στη θάλασσα, στην ενίσχυση λιμενικών εγκαταστάσεων, στην ενίσχυση και στεγάνωση σηράγγων και αγωγών μεγάλων διαστάσεων, κ.τ.λ. (Σχήμα 3.1 και 3.2). Πρέπει να αποφεύγεται η χρήση καθολικού μανδύα σε στοιχεία που πρέπει να αναπνέουν (πλάκες).

3.1.3 Υπεριώδης ακτινοβολία

Η υπεριώδης ακτινοβολία του ήλιου (UV) προκαλεί αλλοίωση της ισχύος των δεσμών και γενικά μείωση της αντοχής στα σύνθετα υλικά που εκτίθενται σε αυτή. Η υπεριώδης ακτινοβολία επηρεάζει κάπως την επιφανειακή στρώση ρητίνης προκαλώντας χρωματική αλλοίωση και μικρή μείωση της αντοχής της. Σε αντίθεση, όμως με τις ρητίνες, οι ίνες (εκτός από τις ίνες πολυαραμίδης, οι οποίες είναι ελαφρώς ευπαθείς) δεν επηρεάζονται από την έκθεση στην ακτινοβολία του ήλιου. Μια άλλη ένδειξη εκτός από τη χρωματική αλλοίωση είναι η μικρορηγμάτωση των εκτιθέμενων επιφανειών. Για να προστατεύσουμε τις κατασκευές μας από την απευθείας έκθεση τους στον ήλιο προτείνεται η εφαρμογή επιχρισμάτων ή ειδικών αντι-UV βαφών ανοικτού χρώματος.

3.1.4 Αλκαλικό και όξινο περιβάλλον

Τα σύνθετα υλικά με ίνες άνθρακα τόσο στο αλκαλικό όσο και στο όξινο περιβάλλον δεν έχουν δυσμενείς επιδράσεις. Αντίθετα όμως οι ίνες ύαλου υφίστανται μείωση αντοχής σε αλκαλικό ή όξινο περιβάλλον, ενώ ενδιάμεση συμπεριφορά έχουν οι ίνες πολυαραμίδης. Η μήτρα μπορεί να παρέχει προστασία σε ευπαθείς ίνες, εφόσον όμως τις απομονώνει από το περιβάλλον αυτό.

3.1.5 Γαλβανική διάβρωση

Γαλβανική διάβρωση έχουμε όταν έρθουν σε επαφή οι ίνες άνθρακα με τον χάλυβα. Με τη χρησιμοποίηση ινών ύαλου ή πολυαραμίδης δεν πρόκειται να υπάρξει γαλβανική διάβρωση.

3.1.6 Ερπυσμός

Ερπυσμό παρουσιάζουν οι ίνες πολυαραμίδης και οι μήτρες των ρητινών. Εξαρτάται από το υλικό της ίνας και το προσανατολισμό των ινών σε σχέση με την εφαρμοζόμενη ένταση. Στη περίπτωση που έχουμε ανθρακονήματα ή υαλονήματα δεν υπάρχει στρέβλωση στις ίνες τους και έτσι δεν παρουσιάζουν ερπυσμό με αποτέλεσμα το σύνθετο υλικό να συμπεριφέρεται σχεδόν πλήρως ελαστικά. Με την επιβολή φόρτισης οι ίνες μπορεί να γίνονται ευθείες, το ινοπλισμένο πολυμερές να ολισθαίνει στις θέσεις αγκύρωσης, ενώ υπάρχει η πιθανότητα επιπλέον ένταση των ινών λόγω χαλάρωσης της μήτρας του πολυμερούς ακόμα και μετά την απομάκρυνση της εξωτερικής φόρτισης. Αν και τα παραπάνω προκαλούν «έκταση» του σύνθετου υλικού, δεν αποτελούν πραγματικό ερπυσμό και έχουν ασήμαντες επιδράσεις στις διαστάσεις του ινοπλισμένου πολυμερούς. Εάν όμως ο άξονας των ινών του σύνθετου υλικού βρίσκεται εκτός επιπέδου φόρτισης ή οι ίνες είναι πολυαραμίδης, τότε μπορεί να έχουμε σημαντική παραμόρφωση λόγω ερπυσμού.

3.1.7 Θραύση και διάβρωση υπό ένταση

Σε πολλά ΙΟΠ παρατηρείται το φαινόμενο της θραύσης λόγω έντασης υπό μόνιμη φόρτιση. Εξαιρετικά φτωχή αντοχή σε θραύση υπό τάση έχουν τα σύνθετα υλικά από ίνες ύαλου.

Η διάβρωση υπό ένταση αφορά στη μείωση της αντοχής των ινοπλισμένων πολυμερών λόγω της συνδυασμένης δράσης εφελκυστικών τάσεων και διαβρωτικού περιβάλλοντος. Στη περίπτωση που το υλικό μας αποτελείται από ανθρακονήματα δεν έχουμε πρόβλημα διάβρωσης υπό τάση, όπως συμβαίνει στη περίπτωση που έχουμε υαλονήματα. Οι ίνες πολυαραμίδης παρουσιάζουν ενδιάμεση συμπεριφορά.

Τα δύο παραπάνω φαινόμενα σχετίζονται με το χρόνο έκτασης, το επίπεδο έντασης, το περιβάλλοντα χώρο, τη μήτρα και τις ίνες του σύνθετου υλικού. Σημαντικό ρόλο για το χρόνο εκδήλωσης της αστοχίας λόγω διάβρωσης και θραύσης υπό τάση, παίζει η ποιότητα της μήτρας που χρησιμοποιείται. Στη περίπτωση που χρησιμοποιούνται εποξικές ρητίνες επιτυγχάνεται 2 έως 4 φορές μεγαλύτερη ανθεκτικότητα σε σχέση με τις άλλες κατηγορίες ρητινών.

3.1.8 Κόπωση

Γενικά, η συμπεριφορά των ινοπλισμένων πολυμερών σε κόπωση (ανακυκλιζόμενη φόρτιση) είναι πολύ καλή. Μεγαλύτερη αντοχή έχουν κατά σειρά οι ίνες άνθρακα, οι ίνες πολυαραμίδης και τέλος οι ίνες ύαλου. Όσον αφορά την αντοχή σε κόπωση των ρητινών κατά σειρά έχουμε τις εποξικές, τις πολυεστερικές και τις βινυλεστερικές. Σχετικά με τα σύνθετα υλικά με ανθρακονήματα, καταδεικνύεται ότι έχουν μεγαλύτερη αντοχή σε κόπωση από το χάλυβα οπλισμού. Αξίζει να αναφερθεί ότι σημαντικό ρόλο στην αντοχή ενός συστήματος ινοπλισμένου πολυμερούς σε κόπωση παίζει το είδος της ρητίνης στο οποίο εμποτίζονται οι ίνες.

Τα ινοπλισμένα πολυμερή είναι ευαίσθητα στη συχνότητα εφαρμογής της ανακυκλιζόμενης φόρτισης. Η συχνότητα αυτή πρέπει να διατηρείται μικρότερη από 10 Hz, έτσι ώστε να προλαβαίνετε η έκλυση θερμότητας στο πολυμερές, η οποία μπορεί να προκαλέσει πρόωμη αστοχία της μήτρας, με αποτέλεσμα την αστοχία ολόκληρου του συστήματος ινοπλισμένου πολυμερούς.

3.1.9 Κρούση

Στη περίπτωση της κρούσης, καλύτερη συμπεριφορά εμφανίζουν τα υλικά με ίνες πολυαραμίδης (χρησιμοποιούνται και για την κατασκευή αλεξίσφαιρων γιλέκων), ακολουθούν αυτά με ίνες ύαλου και τέλος αυτά με ίνες άνθρακα.

Στο τέλος του κεφαλαίου παρατίθεται πίνακας, όπου παρουσιάζεται η ανθεκτικότητα των τριών τύπων ινών για κάθε μία από τις παραπάνω περιπτώσεις.

3.2 Η περιβαλλοντική και θερμοκρασιακή επίδραση στη συμπεριφορά των ινοπλισμένων πολυμερών (αποτελέσματα από πειράματα φοιτητών πανεπιστημίου Πατρών)

Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα των σύνθετων υλικών σε σχέση με τα συμβατικά είναι ότι δεν διαβρώνονται και παρουσιάζουν υψηλή αντίσταση

ακόμα και σε ισχυρά χημικά. Το κυριότερο πρόβλημα των σύνθετων υλικών είναι ότι είναι υδρόφιλα και απορροφούν νερό. Για να εξετάσουμε την επίδραση της απορρόφησης υγρασίας στην εφελκυστική δύναμη σύνθετων τενόντων χρησιμοποιούμε τον πρώτο Νόμο του Fick για την εξομοίωση της διάδοσης των μορίων του νερού και ελεύθερων ιόντων. Η διάδοση της υγρασίας θα προκαλούσε χάσμα στην περιοχή των ινών. Για να μελετήσουμε τη διάδοση της υγρασίας πρέπει να καθοριστεί η ποσοστιαία αύξηση βάρους ενός σύνθετου στοιχείου. Ο Νόμος του Fick μπορεί να γραφτεί σαν :

$$D \frac{\partial^2 C}{\partial^2 x} = \frac{\partial C}{\partial t}$$

όπου D είναι συντελεστής της διάδοσης της μάζας, C η συγκέντρωση ιόντων, x το βάθος εισχώρησης (mm).

Ο συντελεστής χρόνου G σχετίζεται με τη διάδοση D σύμφωνα με τον παρακάτω τύπο:

$$G = \frac{m - m_i}{m_m - m_i} = 1 - \frac{8}{\pi^2} \sum_0^{\infty} \frac{\exp[(-2j)^2 \pi^2 \left(\frac{Dt}{h^2}\right)]}{(2j+1)^2}$$

όπου h είναι το πάχος του στοιχείου, m_i το αρχικό βάρος, m_m το τελικό βάρος.

Η σχέση μεταξύ της αύξησης βάρους και της διάδοσης κατά τη διάρκεια του αρχικού γραμμικού σταδίου αύξησης βάρους για ένα κυλινδρικό δοκίμιο είναι η εξής:

$$\frac{m - m_i}{m_m - m_i} = 4 \sqrt{\left(\frac{Dt}{\pi r^2}\right)}$$

Η εισχώρηση της υγρασίας (m) και το ποσοστό της αύξησης βάρους του σύνθετου υλικού M συσχετίζονται σύμφωνα με τον παρακάτω τύπο:

$$M = \frac{W - W_d}{W_d} \times 100$$

όπου W και W_d είναι τα βάρη του υγρού και ξηρού δοκιμίου αντίστοιχα. Το βάθος της κατεστραμμένης ζώνης x δίνεται τελικά απ' τον τύπο:

$$x = \sqrt{2 \cdot D \cdot C \cdot t} \quad \text{Εξ. (3.1)}$$

Η προβλεπόμενη εναπομένουσα εφελκυστική δύναμη P_p δίνεται σαν συνάρτηση της αρχικής εφελκυστικής δύναμης P_u και της αρχικής r_0 και τελικής r_r ακτίνας δοκιμίου από τον εξής τύπο:

$$P_p = P_u \left(1 - \frac{x}{r_0}\right)^2 = P_u \left(\frac{r_r}{r_0}\right)^2 \quad \text{Εξ. (3.2)}$$

Για την πρόβλεψη της συμπεριφοράς κάτω από τις δυνατές συνθήκες περιβάλλοντος τα πολυμερή τοποθετήθηκαν σε επτά διαφορετικά χημικά διαλύματα, που εξομοιώνουν παρόμοιες συνθήκες. Τα αποτελέσματα τους συγκρινόμενα με τα θεωρητικά από τις παραπάνω σχέσεις, παρουσιάζονται παρακάτω.

3.2.1 Ανθεκτικότητα στο νερό

Γενικά η απώλεια της ελαστικής αντοχής των υλικών FRP rebars και τενόντων ήταν σε χαμηλά επίπεδα. Ο Νόμος του Fick εφαρμόστηκε για τον υπολογισμό της διασκόρπισης, αλλά οι σχέσεις (3.1) και (3.2) δεν μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για την εκτίμηση της ελαστικής αντοχής καθώς η συγκέντρωση ιόντων είναι 0 επιπλέον έχουμε σαν αποτέλεσμα μηδενική διάτρηση υγρασίας (δηλαδή $\chi=0$). Για παράδειγμα η μείωση στην ελαστική αντοχή των 10 mm ινών γυαλιού - πολυεστέρα ή βινυλεστέρα ήταν 7,3% και 5,8% αντίστοιχα. Η οριακή αλλαγή των ελαστικών μοντέλων που παρατηρήθηκε ήταν εντός του 5% της αρχικής αντοχής. Γενικά η μείωση αντοχής παρατηρήθηκε μεγαλύτερη στις ίνες 10 mm από αυτές των 19mm του πειράματος. Όσον αφορά τους τένοντες FRP η διασκόρπιση (d) και η μέγιστη περιεκτικότητα υγρασίας (M_m) ήταν χαμηλότερη για το LeadLine και το CFCC στο νερό απ' ότι σε άλλες συνθήκες. Τα μεγέθη διασκόρπισης και M_m είχαν υπερεκτιμηθεί για το CFCC. Αυτό οφείλεται στην υφή της επιφάνειας του CFCC η οποία δεν επιτρέπει στην υγρασία να φιλτράρεται ανάμεσα στα κενά

και τις κοιλότητες που δημιουργούνται από τις ίνες του άνθρακα γύρω από την πλέξη των 2.5mm. Τα αποτελέσματα των πειραμάτων δείχνουν ότι το νερό έχει περιορισμένη επίδραση πάνω στην ελαστική αντοχή και των τριών ειδών τενόντων. Για παράδειγμα η μείωση ελαστικής αντοχής για το LeadLine μετά από ένα χρόνο ήταν 0,7%. Επίσης καμία αλλαγή δεν επήλθε στη δομή τους.

3.2.2 Ανθεκτικότητα σε αλκαλικό περιβάλλον (pH 12, T=25 °C και T=60 °C)

Σε όλες τις περιπτώσεις η διασκόρπιση αυξήθηκε με την αύξηση της θερμοκρασίας δείχνοντας άμεση σχέση μεταξύ των δύο μεγεθών. Για το υλικό E-glass η μείωση στην ελαστική αντοχή ήταν η υψηλότερη στην αλκαλική κατάσταση. Χαμηλότερη διασκόρπιση καταγράφηκε για τον βινυλεστέρα απ'ότι για πολυεστέρα που φάνηκε και από το μικρότερο βάθος διάτρηση υγρασίας (χ) και μείωσης της ελαστικής αντοχής. Για τις θερμοκρασίες 25 °C και 60 °C η μείωση αντοχής των πολυεστερικών υλικών των 10mm ήταν 25% και 28,6% αντίστοιχα, ενώ για τα βινυλεστερικά υλικά των 10mm ήταν 13,0% και 20,3% αντίστοιχα. Για τα AR-glass, τα πολυεστερικά παρουσίασαν μικρότερη διασκόρπιση και αυξανόμενη ανάλογα με τη θερμοκρασία, μεγαλύτερη όμως μείωση ελαστικής αντοχής. Σε πείραμα μετά από 6 μήνες σε αλκαλικό διάλυμα στους 60 °C τα ποσοστά μείωσης αντοχής για πολυεστερικά και βινυλεστερικά AR-glass πάχους 10mm ήταν 28% και 22,6% αντίστοιχα. Γενικά συμπεραίνουμε ότι ο Νόμος του Fick είναι αποδεκτή μέθοδος προσέγγισης της απώλειας αντοχής που οφείλεται στη διασκόρπιση σε αλκαλικό διάλυμα. Επίσης αποδείχθηκε μικρή επίδραση του αλκαλικού περιβάλλοντος στις μεταβολές της ελαστικής αντοχής των μοντέλων. Η μέγιστη περιεκτικότητα σε υγρασία αυξάνει όσο αυξάνει και η θερμοκρασία για όλους τους τύπους τενόντων. Η υπολειμματική αντοχή αποδεικνύεται υποτιμημένη από το νόμο του Fick που για το CFCC προέβλεπε 83% έναντι 98.8% της πραγματικής για διάστημα 12 μηνών.

3.2.3 Ανθεκτικότητα σε όξινο περιβάλλον

Σε αυτή την περίπτωση οι μειώσεις αντοχών που παρατηρήθηκαν ήταν χαμηλότερες απ'ότι σε αλκαλικό διάλυμα. Αυτό συνέβη λόγω χαμηλής συγκέντρωσης ιόντων Cl^- που είναι υπεύθυνα για σημαντική μείωση ελαστικής αντοχής. Αυτό δείχνει ότι άλλοι παράγοντες συντέλεσαν στη μείωση της αντοχής όπως η διάχυση νερού και τα ιόντα H^+ . Ο νόμος του Fick προέβλεπε μείωση αντοχής σε ποσοστό μέχρι 15% που και πάλι ήταν υπεράνω της πραγματικής. Από τους τένοντες καλύτερα συμπεριφέρθηκε το LeadLine χωρίς αξιοσημείωτη μείωση της ελαστικής αντοχής. Ενώ η μεγαλύτερη μείωση παρατηρήθηκε στο Agarsee και ήταν 8.30% μετά από 12 μήνες.

3.2.4 Ανθεκτικότητα σε θαλασσινό νερό και ρευστό διάλυμα αλατιού T=25 °C

Χαμηλότερη μείωση σε ελαστική αντοχή παρατηρήθηκε στο θαλασσινό νερό απ'ότι στο διάλυμα αλατιού, ενώ οι διαχύσεις ήταν παρεμφερείς. Αυτό οφείλεται σε υψηλές περιεκτικότητες Cl^- στο διάλυμα αλατιού. Για τα E-glass από πολυεστέρα και βινυλεστέρα, η μείωση ελαστικής αντοχής σε θαλασσινό νερό ήταν 10.9 και 6.5% αντίστοιχα, ενώ σε διάλυμα αλατιού 26.7% και 22.9% αντίστοιχα. Πανομοιότυπες ήταν οι παρατηρήσεις και για τα AR-glass. Ο νόμος του Fick ήταν επαρκής για την εκτίμηση της μείωσης των παραπάνω αντοχών. Το LeadLine αποδείχθηκε ισχυρό σε διαχυτικότητα με σχετικά μικρή μείωση της αντοχής και για τις δύο περιπτώσεις. Το CFCC ακολούθησε διαχυτικότητα ανεξάρτητη από το νόμο του Fick και περιορισμένη μείωση στην ελαστική αντοχή που οφείλεται στην άριστη ικανότητα του carbon PAN να αντέχει στην επίδραση του Cl^- . Το agarsee ακολούθησε διάχυση κατά το νόμο του Fick ανεξάρτητη από τον τύπο του αλατιού και τη συγκέντρωση. Επιπλέον η διαχυτικότητα και το ποσοστό υγρασίας ήταν υψηλότερα σε όξινα και αλκαλικά διαλύματα απ'ότι σε αλκαλικά. Γενικά πρέπει να τονίσουμε ότι τα αποτελέσματα των δειγμάτων σε άμεση έκθεση σε όξινα και ανθρακικά διαλύματα υπερβάλλουν την πραγματική έκθεση στο χώρο.

3.2.5 Ανθεκτικότητα κάτω από υπεριώδη ακτινοβολία

Έκθεση σε υπεριώδες φως προκάλεσε τον χρωματισμό των δειγμάτων σε “σκοτεινά” χωρίς να προκαλέσει αλλαγή στη δομή τους. Η εκτιμηθείσα μείωση στην ελαστική αντοχή ήταν λιγότερο από 3%.

3.2.6 Ανθεκτικότητα σε κύκλους παγώματος – ξεπαγώματος

Μετά από 1200 τέτοιους κύκλους μεταξύ -30°C και 60°C δεν συνέβησαν μετρήσιμες αλλαγές στη δομή των LeadLine CFCC και arapree. Άρα κάτω από ξηρές συνθήκες οι κύκλοι παγώματος-ξεπαγώματος δεν έχουν αποτέλεσμα πάνω στα υλικά.

Κριτήρια	Ίνες Άνθρακα	Ίνες Γυαλιού	Ίνες Πολυαραμιίδης
Υψηλές θερμοκρασίες	+	-	-
Συμπεριφορά στο νερό	+	-	-
Υπεριώδης ακτινοβολία	++	+	-
Αλκαλικό και όξινο περιβάλλον	++	--	+
Γαλβανική διάβρωση	--	+	+
Ερπυσμός	++	--	-
Θραύση & διάβρωση υπό ένταση	++	--	+
Κόπωση	++	-	+
Κρούση	-	+	++

ΠΗΓΕΣ

1. Τριανταφύλλου Α. Χ., “Προηγμένες τεχνολογίες υλικών & κατασκευών”, εκδόσεις Πανεπιστημίου Πατρών, Πάτρα 2003
2. Σπυράκος Κ., “Ενίσχυση κατασκευών για σεισμικά φορτία”, Εκδόσεις Τ.Ε.Ε., Αθήνα 2004
3. Δήμητρα Κροντήρη-Γεωργία Χασκά, “Εφαρμογή επικολλητών ελασμάτων (χάλυβας-ινοπλισμένα)”, 10^ο Φοιτητικό συνέδριο “Επισκευές κατασκευών 2004”, Πανεπιστήμιο Πατρών 2004
4. Απόστολος Μαμούνας-Δημήτριος Τερζής, “Ενίσχυση δοκών από οπλισμένο σκυρόδεμα με ινοπλισμένα πλαστικά”, 6^ο Φοιτητικό συνέδριο “Επισκευές κατασκευών 2000”, Πανεπιστήμιο Πατρών 2000

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

4.1 Διαδικασία εφαρμογής σύνθετων υλικών

Για την εφαρμογή των σύνθετων υλικών στην ενίσχυση κατασκευών έχουμε δύο βασικά στάδια: **την προετοιμασία** και **την επικόλληση** των στρώσεων του ΙΟΠ. Βασικό ρόλο, για τη καλύτερη συμπεριφορά του ενισχυμένου στοιχείου, παίζει η προετοιμασία της επιφάνειας του δομικού στοιχείου που θέλουμε να ενισχύσουμε, καθώς από αυτή εξαρτάται η συνεργασία παλαιού και νέου υλικού.

4.1.1 Σύμφυση και επαφή διεπιφανειών

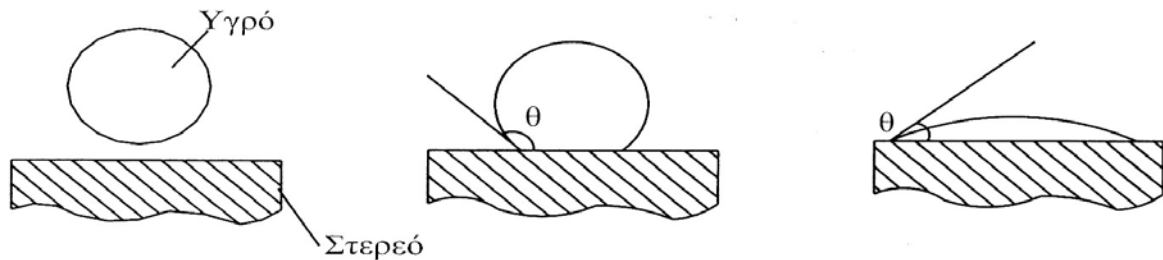
Διάφορες συγκολλητικές ουσίες που εξασφαλίζουν την σύνδεση και την από κοινού λειτουργία του ΙΟΠ με το σκυρόδεμα είναι οι εποξικές κόλλες, οι πολυεστερικές κ.α..

Αυτές οι ουσίες πρέπει να πληρούν τα εξής:

- Ελάχιστη διατμητική αντοχή στους 20 °C ίση με 18 Mpa
- Ανθεκτικότητα στην αλκαλική φύση του σκυροδέματος
- Ικανότητα πλήρωσης κενών και εφαρμογής σε κατακόρυφες και ανεστραμμένες επιφάνειες
- Θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης ύαλου (Tg) τουλάχιστον 45 °C
- Επαρκής αντοχή σε υγρασία και ερπυσμό.

Ο όρος σύμφυση αναφέρεται στις εφελκυστικές μοριακές δυνάμεις που δρουν κατά μήκος της διεπιφάνειας μεταξύ δύο υλικών. Η σύνδεση των δύο επιφανειών (σκυρόδεμα και ΙΟΠ) επιτυγχάνεται με τη ροή των συγκολλητικών ουσιών πάνω και ανάμεσα στις ανωμαλίες της στερεάς επιφάνειας, καθώς αλληλεπιδρούν μέσω των μοριακών τους δυνάμεων. Στη συνέχεια η ουσία στερεοποιείται και έτσι συνδέονται τα δύο υλικά. Ικανοποιητική σύμφυση επιτυγχάνεται όταν έχουμε άμεση επαφή μεταξύ της συγκολλητικής ουσίας και των δύο υποστρωμάτων και απουσία αδύναμων και ενανθρακωμένων

στρώσεων ή σκόνης από την επιφάνεια του σκυροδέματος. Η συγκολλητική ουσία πρέπει να σχηματίζει μία πολύ λεπτή στρώση χωρίς να διαιρείται σε επιμέρους σταγονίδια (σχήμα 4.1) για να επιτύχουμε ποιοτική συγκόλληση.



Σχήμα 4.1: (πηγή 1)

Διάστρωση της συγκολλητικής ουσίας στην επιφάνεια του δομικού στοιχείου

4.1.2 Προετοιμασία επιφάνειας σκυροδέματος

Σκοπός της προετοιμασίας της επιφάνειας του σκυροδέματος είναι η επίτευξη της καλύτερης δυνατής συγκόλλησης των στρώσεων του σύνθετου υλικού σε αυτή. Το σκυροδέμα μπορεί να περιέχει στην επιφάνεια του εκτεθειμένα αδρανή, σωματίδια τσιμέντου όπως επίσης ρωγμές και κενά, στοιχεία που μπορεί να επηρεάσουν την ποιότητα συγκόλλησης των διεπιφανειών. Στόχος μας είναι να εξομαλύνουμε την επιφάνεια του σκυροδέματος.

Η κατασκευή μας μπορεί να επηρεαστεί αρνητικά από κακή προετοιμασία της επιφάνειας του σκυροδέματος, πράγμα που θα γίνει αντιληπτό μακροχρόνια παρά βραχυχρόνια. Για το λόγο αυτό θα πρέπει να δίνεται μεγάλη έμφαση στην προετοιμασία της επιφάνειας συγκόλλησης.

Κατά τη διαδικασία της προετοιμασίας είναι σημαντικό να μην προκληθούν μικρορωγμές ή άλλες βλάβες στην υποκείμενη στρώση που πιθανόν θα μειώσουν την αντοχή της. Αν τυχόν υπάρξουν ρωγμές, οπές κ.λ.π. πρέπει να πληρωθούν με κονιάματα ή ρητινενέσεις πριν την εφαρμογή της συγκολλητικής ουσίας. Η διαδικασία προετοιμασίας της επιφάνειας του σκυροδέματος περιλαμβάνει τα εξής βήματα:

- Απομάκρυνση βλαμμένου σκυροδέματος ή σκυροδέματος που δε πληροί τις προδιαγραφές και αντικατάσταση με υλικό καλής ποιότητας

- Απομάκρυνση σκυροδέματος με υψηλή περιεκτικότητα τσιμέντου
- Απομάκρυνση σκόνης και θραυσμάτων με χρήση πεπιεσμένου αέρα.

Τέλος, είναι σημαντικό μετά τη διαδικασία προετοιμασίας της επιφάνειας να γίνεται η επικόλληση των στρώσεων του σύνθετου υλικού όσο το δυνατόν γρηγορότερα, ώστε να προλάβουμε περαιτέρω ενανθράκωση του σκυροδέματος.

4.1.3 Διαδικασία εφαρμογής σύνθετων υλικών

Για την εφαρμογή των σύνθετων υλικών πρέπει να ακολουθήσουμε την εξής διαδικασία:

- Καθαίρεση του επιχρίσματος
- Αποκατάσταση τυχών βλαβών
- Προετοιμασία της επιφάνειας του δομικού στοιχείου
- Επάλειψη της επιφάνειας του δομικού στοιχείου με εποξική ρητίνη ή άλλη συγκολλητική ουσία
- Τοποθέτηση της πρώτης στρώσης του ινοπλισμένου πολυμερούς στην επιφάνεια του δομικού στοιχείου
- Τοποθέτηση ειδικών αγκυρίων όπου χρειάζεται
- Τοποθέτηση επιπλέον στρώσεων σύνθετου υλικού σύμφωνα με τη μελέτη μας
- Μετά τη σκλήρυνση του συστήματος (24 ώρες) εφαρμογή επιχρίσματος και βαφή της επιφάνειας του δομικού στοιχείου.

4.2 Τεχνικές εφαρμογής

4.2.1 Βασική τεχνική

Η πλέον διαδεδομένη τεχνική περιλαμβάνει τη δια χειρός επικόλληση είτε υφασμάτων είτε προκατασκευασμένων στοιχείων σε στοιχεία οπλισμένου σκυροδέματος μέσω εποξειδικών ρητινών (σχήμα 4.2).

Μια τυπική διαδικασία εφαρμογής της τεχνικής (ΟΑΣΠ 2001) είναι η εξής:

- Απομακρύνεται η επιδερμική στρώση σκυροδέματος στην επιφάνεια που θα γίνει η επικόλληση έτσι ώστε να αποκαλυφθούν τα αδρανή σε βάθος περίπου 5mm χρησιμοποιώντας ειδικό μηχανικό εξοπλισμό ή υδροβολή.
- Εφόσον το σύνθετο υλικό καλύπτει και γωνίες του στοιχείου σκυροδέματος, αυτές εξομαλύνονται και λειαίνονται για να αποκτήσουν καμπυλότητα με ακτίνα 30mm.
- Η επιφάνεια σκυροδέματος καθαρίζεται καλά, διαβρέχεται με νερό υπό πίεση και μετά στεγνώνεται. Η υγρασία της τελικής επιφάνειας του σκυροδέματος δεν επιτρέπεται να είναι περισσότερο από 4%.
- Η επιφάνεια του σκυροδέματος εμποτίζεται με αραιό διάλυμα εποξειδικής κόλλας εάν κριθεί ότι είναι ιδιαίτερα πορώδης ή υπάρχουν μικρορηγματώσεις. Στη συνέχεια η επιφάνεια επαλείφεται με παχύρρευστο συγκολλητικό υλικό που συνήθως είναι εποξειδικός στόκος. Σημειώνεται ότι συχνά επιλέγεται η διαδικασία λείανσης της επιφάνειας χωρίς να προηγηθεί η εξομαλυντική στρώση του εποξειδικού στόκου.
- Μετά την σκλήρυνση το συγκολλητικού υλικού, η επιφάνεια λειαίνεται με επιμέλεια έτσι ώστε να μην υπάρχει ανωμαλία σε ύψος μεγαλύτερο από 1mm
- Η επιφάνεια αναμονής επαλείφεται με εποξειδική κόλλα πάχους 1-2mm με κατάλληλο ιξώδες που διευκολύνει την τοποθέτηση του φύλλου. Η κόλλα τοποθετείται με μεγαλύτερο πάχος, που είναι της τάξης των 10mm στην κεντρική περιοχή επαφής, με αποτέλεσμα κατά την τοποθέτηση του φύλλου η κόλλα να προχωράει προς τα έξω όταν συμπιεστεί. Συχνά, τα χαρακτηριστικά της κόλλας, προδιαγράφονται από τον προμηθευτή του σύνθετου υλικού.
- Το φύλλο του σύνθετου υλικού τοποθετείται στην επιφάνεια αναμονής, εφαρμόζοντας ομοιόμορφη πίεση, με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε να μην εγκλωβιστεί αέρας. Συνήθως χρησιμοποιείται ένα σκληρό ρολό.



Σχήμα 4.2: (πηγή 10) Παραδείγματα εφαρμογής βασικής τεχνικής

- Μετά την πάροδο χρόνου μισής έως μιας ώρας, αφαιρείται το προστατευτικό κάλυμμα του φύλλου και οι ίνες επαλείφονται με μια δεύτερη στρώση της ίδιας κόλλας.
- Αν προβλέπεται η τοποθέτηση περισσότερων του ενός φύλλου, η διαδικασία επαναλαμβάνεται, προετοιμάζοντας με ανάλογο τρόπο την εξωτερική επιφάνεια του προηγούμενου ελάσματος.
- Στο τέλος μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα «πεταχτό» τσιμεντοκονίαμα για προστασία των φύλλων του σύνθετου υλικού από υψηλές θερμοκρασίες και άλλες περιβαλλοντικές προσβολές.

4.2.2 Ειδικές τεχνικές

4.2.2.1 Αυτοματοποιημένη περίσφιγξη

Στις αρχές της δεκαετίας του '90 στην Ιαπωνία, έχουμε την ανάπτυξη της τεχνικής αυτής η οποία αργότερα αναπτύχθηκε και στις Η.Π.Α.. Είναι η χωρίς διακοπή περιτύλιξη προεμποτισμένων με ρητίνη νημάτων υπό μικρή γωνία γύρω από υποστυλώματα γεφυρών ή άλλων στοιχείων μέσω ειδικών συσκευών. Κύριο πλεονέκτημα είναι η μεγάλη ταχύτητα εφαρμογής (σχήμα 4.3).



Σχήμα 4.3: (πηγή 2) ειδική συσκευή

4.2.2.2 Προεντεταμένα ελάσματα

Άλλη μία μέθοδος που αναπτύχθηκε στις αρχές του '90 είναι η εφαρμογή προεντεταμένων ελασμάτων. Η χρήση προεντεταμένων ελασμάτων από ινοπλισμένα πολυμερή είναι μια ειδική εφαρμογή που συνδυάζει τα πλεονεκτήματα ενός παθητικού κατασκευαστικού συστήματος από ελάσματα FRP με τα πλεονεκτήματα της γενικής εξωτερικής προέντασης.

Τα προεντεταμένα ελάσματα από FRP χαρακτηρίζονται, όπως και τα μη προεντεταμένα, από πολύ χαμηλό βάρος (1/4 περίπου του χάλυβα), υλικά που

δε διαβρώνονται, υψηλή εφελκυστική αντοχή και ευκολία και ταχύτητα εφαρμογής. Ασκώντας προένταση στο έλασμα, το υλικό χρησιμοποιείται πιο αποτελεσματικά, αφού ένα μεγαλύτερο ποσοστό της εφελκυστικής του αντοχής είναι διαθέσιμο.

Η προένταση ενός συστήματος με εξωτερικά συνδεδεμένα ελάσματα FRP έχει ως πλεονεκτήματα άψογη ανθεκτικότητα και βελτίωση της λειτουργικότητας και της φέρουσας ικανότητας. Τα προεντεταμένα ελάσματα, όταν εφαρμόζονται στην επιφάνεια μιας δοκού από σκυρόδεμα μπορούν να βελτιώσουν τη λειτουργικότητά της και να παρέχουν άριστο έλεγχο στις ρωγμές, κλείνοντας τελείως τις ήδη υπάρχουσες και καθυστερώντας την εμφάνιση νέων. Αυτό βοηθάει στη διατήρηση της ανθεκτικότητας της κατασκευής, αφού οι ρωγμές παρέχουν πρόσθετη πρόσβαση στην υγρασία στο εσωτερικό του σκυροδέματος.

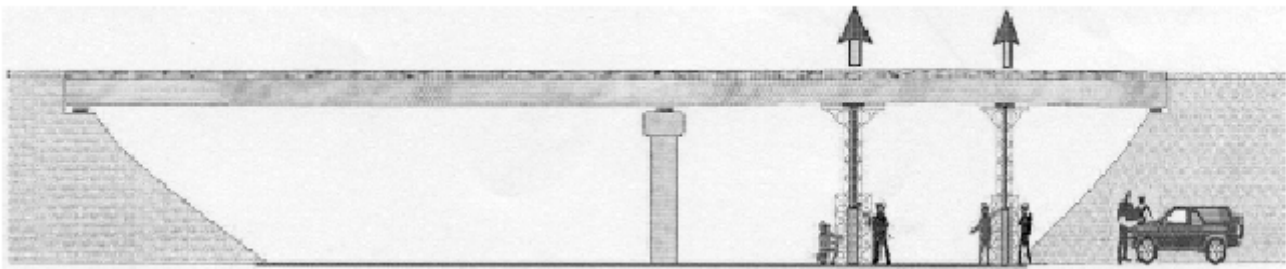
Αρκετά συστήματα έχουν αναπτυχθεί για να προκαλέσουν προένταση στα ελάσματα. Αυτά τα συστήματα συγκαταλέγονται βασικά σε τρεις κατηγορίες που εμπεριέχουν συστήματα κυρτωμένων δοκών, συστήματα προέντασης ελασμάτων σε μία ανεξάρτητη δοκό και συστήματα κατά τα οποία το έλασμα προεντείνεται πάνω στη δοκό προς ενίσχυση. Επίσης, έχει αναπτυχθεί σύστημα για διατμητική ενίσχυση και περίσφιξη του σκυροδέματος καθώς έχει διαχωριστεί η μέθοδος προέντασης ελασμάτων για ενίσχυση υποστρωμάτων.

Τα ελάσματα που έχουν προενταθεί παρουσιάζουν μεγάλες τάσεις στα σημεία τερματισμού τους. Αυτές οι τάσεις είναι αρκετές για να προκαλέσουν αποκόλληση και για αυτό το λόγο πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στην αγκύρωση των ελασμάτων.

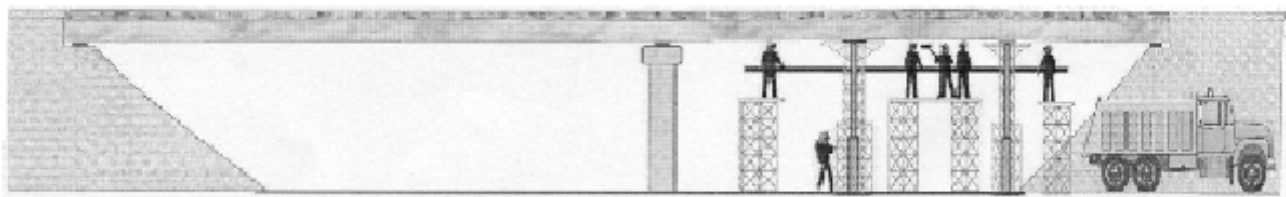
4.2.2.2.1 Σύστημα κυρτωμένων δοκών

Στις κυρτωμένες δοκούς, τα ελάσματα από ινοπλισμένα πολυμερή προεντείνονται εμμέσως, ως εξής: η δοκός κυρτώνεται με φορά τόξου προς τα πάνω με τη βοήθεια υδραυλικών ανυψωτήρων στο μέσο του ανοίγματος, όπου και τοποθετείται ινοπλισμένο πολυμερές από γυαλί με εποξειδική ρητίνη. Η δοκός παραμένει σε αυτή τη θέση και το έλασμα στην κατώτερη εφελκυστική επιφάνεια της δοκού κάμπτεται. Οι ανυψωτήρες

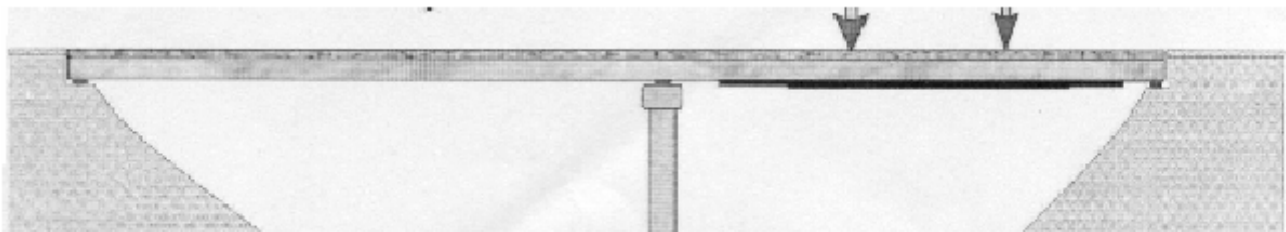
αφαιρούνται όταν η εποξειδική ρητίνη, έχει ανακτήσει τελείως την αντοχή της (σχήμα 4.4).



α. Εφαρμογή κατακόρυφης δύναμης προς τα πάνω, χρησιμοποιώντας υδραυλικούς ανυψωτήρες



β. Τοποθέτηση των FRP ελασμάτων



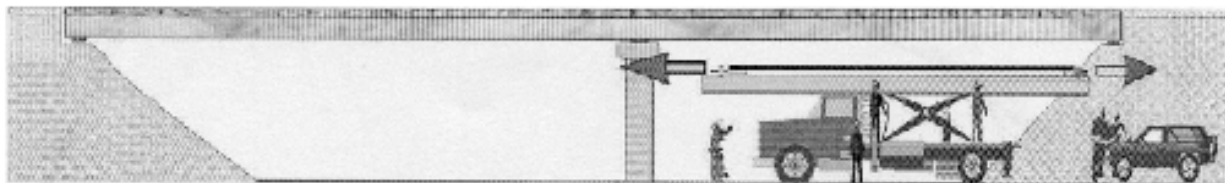
γ. Αποδέσμευση και απομάκρυνση των ανυψωτήρων

Σχήμα 4.4: (πηγή 5) Σύστημα κυρτωμένων δοκών

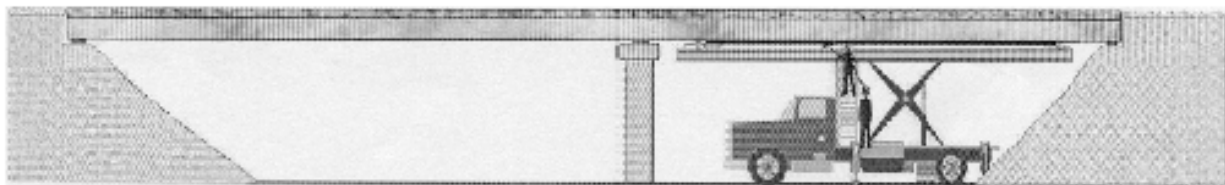
Μόνο ένα χαμηλό ποσοστό της προέντασης έχει επιδράσει στα ελάσματα κατά την αφαίρεση των ανυψωτήρων. Αυτή η μέθοδος αξιοποιεί πολύ ανεπαρκώς το υλικό και μπορεί να καταστρέψει και να υπερφορτίσει την ενισχυμένη δοκό. Στο πεδίο εφαρμογής, η προσπάθεια που πρέπει να καταβληθεί για την καμπύλωση της γέφυρας στο μέσο του ανοίγματος είναι αρκετά μεγάλη, σε σχέση με την μικρή δύναμη προέντασης που προκαλείται στο έλασμα.

4.2.2.2 Προεντείνοντας σε ανεξάρτητο σύστημα

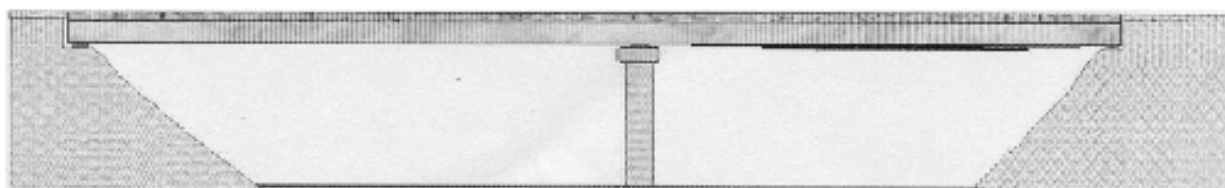
Μια δεύτερη τεχνική για να προκληθεί προένταση σε ένα έλασμα από ινοπλισμένο πολυμερές, είναι να γίνει ανεξάρτητα από την κατασκευή. Οι άκρες των ελασμάτων συνδέονται με μεταλλικές λάμες και εντείνονται υπό εξωτερική δράση ενός μεταλλικού πλαισίου-ελκυστήρα σε τράπεζα προέντασης, ανεξάρτητα από τη δοκό προς ενίσχυση. Όταν τα ελάσματα ενταθούν, η κατώτερη επιφάνεια της δοκού προς ενίσχυση και η ανώτερη του ελάσματος έρχονται σε επαφή και ενώνονται μεταξύ τους με εποξειδική συγκολλητική ουσία. Μετά από την πάροδο του χρόνου ωρίμανσης του συγκολλητικού υλικού το προεντεταμένο σύστημα αποδεσμεύεται και η προένταση μεταφέρεται στη δοκό σκυροδέματος και τα άκρα των ελασμάτων αφαιρούνται (σχήμα 4.5).



α. Σύνδεση του FRP ελάσματος με αγκύρια. Προένταση του FRP ελάσματος σε τράπεζα προέντασης.



β. Τοποθέτηση του FRP ελάσματος. Τοποθέτηση συγκολλητικής εποξειδικής ουσίας



γ. Αφαίρεση αγκυρίων και μεταφορά της προέντασης στη δοκό

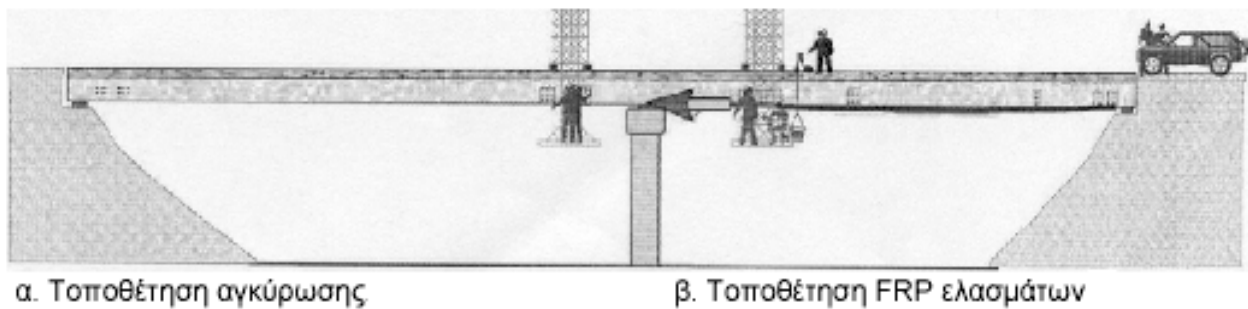
Σχήμα 4.5: (πηγή 5) Προεντείνοντας σε ανεξάρτητο σύστημα

Το παραπάνω σύστημα έχει χρησιμοποιηθεί για δοκούς μικρής κλίμακας (μήκους 0,6 m) από σκυρόδεμα, όπου η αρχική προένταση δεν ήταν σταθερή. Η μέγιστη επιτευχθήσα προένταση μετά την αποδέσμευση του συστήματος και πριν την αστοχία αποκοπής του προεντεταμένου ελάσματος εμφανίζεται να κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 280 και 360 Μpa, αντιπροσωπεύοντας το 20-27% της εφελκυστικής αντοχής του ελάσματος.

4.2.2.2.3 Προεντείνοντας πάνω στη δοκό προς ενίσχυση

Γενικά, στη μέθοδο αυτή, το κατασκευαστικό σύστημα αποτελείται από ελάσματα FRP που συνδέονται με αγκύρωση στα άκρα. Ξεχωριστά αγκύρια προσαρμόζονται κατά μήκος της δοκού. Τα ελάσματα εντείνονται άμεσα, με εφελκυσμό των αγκυρίων τους, τα οποία αντιδρούν με τις εξωτερικές αγκυρώσεις πάνω στην ενισχυμένη δοκό (σχήμα 4.6).

Ο Izimo ερεύνησε τη συμπεριφορά δοκών διατομής T, ανοίγματος 3 m, ενισχυμένων με προεντεταμένα φύλλα από οπλισμένα πολυμερή, με ίνες άνθρακα. Με αυτά τα ελάσματα, επιτεύχθηκαν επίπεδα προέντασης που αντιπροσωπεύουν το 23% της εφελκυστικής αντοχής. Η ευκαμψία των δοκών, ενισχυμένων με προεντεταμένα ελάσματα από ινοπλισμένα πολυμερή αυξήθηκε κατά 11%, σε σχέση με τη μη ενισχυμένη δοκό. Οι δοκοί αυτές αστόχησαν με διατμητική αποκόλληση.



Σχήμα 4.6: (πηγή 5) Προεντείνοντας πάνω στη δοκό προς

Ο Wight ανέπτυξε ένα τέτοιο σύστημα σε οπλισμένες και προεντεταμένες δοκούς από σκυρόδεμα, ανοίγματος 5m. Τα CFRP ελάσματα αρχικά προεντάθηκαν σε τάσεις μεγέθους μεταξύ 500 και 600 MPa. Ενεργός προένταση μεγέθους 250 MPa, που αντιπροσωπεύει το 20% της εγγυημένης αντοχής, ήταν εμφανής στα ελάσματα κατά τη διάρκεια του πειράματος. Το σύστημα αποτελούνταν από κυκλικού σχήματος ράβδους, που αγκυρώνονταν στα ελάσματα και τα οποία συνδέονταν με τα βλήτρα που υπήρχαν στα άκρα της δοκού. Η λειτουργικότητα των δοκών βελτιώθηκε και παρατηρήθηκε μικρή αύξηση στην αντοχή των μη προεντεταμένων ελασμάτων.

Ο El-Handa, βασιζόμενος στην παραπάνω μέθοδο, εφήρμοσε ένα βελτιωμένο σύστημα αγκύρωσης και προέντασης σε δοκούς από

σκυρόδεμα που είχαν υποστεί βλάβη και πρώιμη μορφή ρηγμάτωσης. Το σύστημα αγκύρωσης σχεδιάστηκε, χρησιμοποιώντας επίπεδα φύλλα για την προένταση των CFRP ελασμάτων. Τα ελάσματα αυτά αρχικά προεντάθηκαν σε τάση 650 MPa, αντιπροσωπεύοντας το 50% της συνολικής εφελκυστικής τους αντοχής.

Επίσης, εξετάστηκε η επίδραση της μακρόχρονης και βραχύχρονης έκθεσης των ελασμάτων σε θερμοκρασία δωματίου και σε χαμηλή θερμοκρασία (-28 °C). Κατά τη διάρκεια του πειράματος, το επίπεδο της ενεργού προέντασης εκτιμήθηκε περίπου στο 30% της ολικής αντοχής των ελασμάτων. Οι απώλειες προέντασης οφειλόμενες στην επίδραση της θερμοκρασίας ήταν αμελητέες (παρατηρήθηκε 4% διακύμανση στο επίπεδο της προέντασης λόγω θερμοκρασιακών μεταβολών). Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των βραχύχρονων πειραμάτων, εμφανίστηκε αύξηση της αντοχής των ενισχυμένων δοκών κατά 17% με έκθεση σε θερμοκρασία δωματίου και κατά 32% σε χαμηλή θερμοκρασία, ενώ τα αποτελέσματα των μακρόχρονων πειραμάτων έδειξαν αύξηση κατά 16 και 30%, αντίστοιχα.

Αντιθέτως, η ευκαμψία των ενισχυμένων δοκών δεν επηρεάστηκε από τη μείωση της θερμοκρασίας και δεν παρατηρήθηκε καμία βλάβη στη σύνδεση μεταξύ σκυροδέματος και ελασμάτων.

Τα αποτελέσματα αυτά υποδεικνύουν ότι μπορούν να χρησιμοποιηθούν προεντεταμένα CFRP ελάσματα για αύξηση της αντοχής προεντεταμένων δοκών από σκυρόδεμα που έχουν υποστεί βλάβη κάτω από ακραίες περιβαλλοντικές συνθήκες.

4.2.2.2.4 Σύγκριση των συστημάτων προέντασης

Ο εξοπλισμός που απαιτεί η μέθοδος των κυρτωμένων δοκών είναι οι σχετικά μεγάλοι υδραυλικοί ανυψωτήρες. Τα εργατικά είναι περιορισμένα, αλλά απαιτείται ειδική τεχνογνωσία για αποτελεσματική εφαρμογή. Επίσης, μπορεί να εφαρμοστεί σε δοκό οποιουδήποτε μήκους. Η προένταση η οποία επιτυγχάνεται είναι σχετικά χαμηλή και η αγκύρωση δεν είναι απαραίτητη.

Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου προέντασης πάνω στη δοκό προς ενίσχυση είναι ότι απαιτείται μόνο ελαφρύς εξοπλισμός (συγκεκριμένα,

απαιτείται μέσο για μεταφορά της τράπεζας προέντασης) και μπορεί να εφαρμοστεί σε πολλές περιπτώσεις, ακόμα και στην περίπτωση που η πρόσβαση στην τοποθεσία της κατασκευής είναι δύσκολη. Η ευελιξία της μεθόδου αυτής εξαρτάται από την εκάστοτε κατασκευή. Η προένταση που επιτυγχάνεται είναι υψηλή, το προφίλ της μπορεί να υπολογιστεί και εξαρτάται από την αγκύρωση.

Τα πλεονεκτήματα της προέντασης πάνω σε εξωτερική δοκό είναι ότι η αγκύρωση δεν τοποθετείται πάνω στην κύρια δοκό, με αποτέλεσμα την εξοικονόμηση στα εργατικά έξοδα. Η εξοικονόμηση αυτή μειώνεται, εάν εφαρμοστεί εγκάρσια ένταση για περίσφιξη του σκυροδέματος εκεί που τερματίζουν τα ελάσματα. Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται είναι σχετικά ελαφρύς και η πρόσβαση στο σημείο εργασίας μπορεί να γίνει και μέσω του φορέα της ίδιας της γέφυρας. Η επίτευξη υψηλής προέντασης είναι και σε αυτή τη μέθοδο εφικτή, με πολύ σημαντικό παράγοντα την αγκύρωση.

Τέλος, από άποψη κόστους, όλες οι παραπάνω μέθοδοι απαιτούν περισσότερα εργατικά από αυτές της εφαρμογής μη προεντεταμένων ελασμάτων και επομένως, τα πλεονεκτήματα που σχετίζονται με την προένταση πρέπει να εξισορροπούν τα επιπλέον έξοδα.

4.2.2.3 Επιταχυμένη σκλήρυνση με θέρμανση

Με τη χρήση ειδικών συσκευών θέρμανσης (θερμαντικά σώματα, θερμαντικά καλύμματα κ.λ.π.) και με παράλληλη εκμετάλλευση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας των ινών άνθρακα επιταχύνουμε τη σκλήρυνση της εποξειδικής ρητίνης στην διεπιφάνεια ελασμάτων – σκυροδέματος. Πλεονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι η αύξηση της θερμοκρασίας υαλώδους μετάπτωσης της ρητίνης.

4.2.2.4 Προκατασκευασμένα στοιχεία

Έχουμε τις εξής μορφές προκατασκευασμένων στοιχείων:

- a. Έλασμα πάχους 1 mm και πλάτους π.χ. 50 mm, 100 mm κ.λ.π.

- b. Γωνίες που χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές ενίσχυσης έναντι τέμνουσας (Σχήμα 4.7 γ)
- c. Μανδύας – κέλυφος που τοποθετείται περιμετρικά των υποστυλωμάτων, για την αύξηση της περίσφιγξης ή της διατμητικής αντοχής (Σχήμα 4.7 α,β)



Σχήμα 4.7: (πηγή 6)

Προκατασκευασμένα στοιχεία: (από αριστερά) α) εφαρμογή μανδύα μορφής κελύφους, β) εφαρμογή μανδύα σε τεμάχια, γ) γωνίες

4.2.2.5 Εφαρμογή σε εγκοπές

Αρκετές φορές χρησιμοποιούμε ράβδους ή ελάσματα που τοποθετούμε και επικολλούμε μέσω εποξειδικής ρητίνης σε εγκοπές. Στόχος αυτής της τεχνικής είναι η αύξηση της καμπτικής αντοχής υφισταμένων μελών σκυροδέματος. Η συγκεκριμένη μέθοδος παρουσιάζει ένα πλεονέκτημα έναντι της επιφανειακής επικόλλησης, το οποίο είναι η βελτιωμένη συνάφεια των σύνθετων υλικών με το σκυρόδεμα και η καλύτερη προστασία τους.

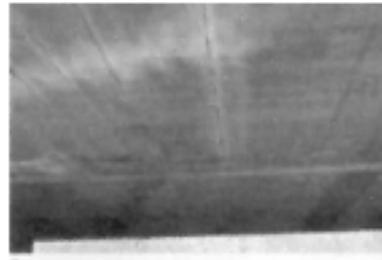
4.2.2.5.1 Τρόπος εφαρμογής

Η διαδικασία εφαρμογής της συγκεκριμένης τεχνικής είναι η ακόλουθη:

1. Δημιουργείται στην επιφάνεια του σκυροδέματος, του προς ενίσχυση στοιχείου, εγκοπή κατά την επιθυμητή διεύθυνση. Το μέγεθος της εγκοπής επιλέγεται τέτοιο, ώστε να είναι δυνατός ο καθαρισμός της καθώς και η ανάπτυξη της απαιτούμενης τάσης συνάφειας, εφόσον τοποθετηθεί η εποξειδική κόλλα (ρητίνη)

2. Με νερό ή αέρα υπό πίεση απομακρύνουμε τυχόν εναπομείναντα θραύσματα από την εγκοπή
3. Η εγκοπή γεμίζεται μέχρι το μέσον της με ρητίνη
4. Η ινοπλισμένη ράβδος πιέζεται ελαφρά μέσα στην εγκοπή
5. Τέλος, η εγκοπή γεμίζεται με επιπλέον ρητίνη ώστε να καλυφθεί κάθε κενό χωρίς να εγκλωβιστεί αέρας και λειαίνεται η επιφάνεια της (σχήμα 4.8) .

Κατά την εφαρμογή της μεθόδου είναι απαραίτητο να λαμβάνονται μέτρα προστασίας για τους εργάτες.



Σχήμα 4.8: (πηγή 7)

Εφαρμογή σε εγκοπές

4.2.2.5.2 Συνάφεια και παράμετροι που την επηρεάζουν

Η συνάφεια είναι ένας από τους πρωτεύοντες παράγοντες που πρέπει να εξετασθούν ώστε να επιτευχθεί σύμμεικτη δράση, καθώς αποτελεί το μέσο μεταβίβασης δυνάμεων μεταξύ σκυροδέματος και ινοπλισμένων ράβδων.

Μερικοί παράγοντες που επηρεάζουν τη συνάφεια είναι οι εξής:

- Το μήκος της ράβδου που συμβάλλει στη συνάφεια (συναπτόμενο μήκος)
- Η διάμετρος της ράβδου
- Ο τύπος των ινών του πολυμερούς υλικού της ράβδου
- Η επιφανειακή μορφή της ράβδου
- Το μέγεθος της εγκοπής
- Ο τύπος της ρητίνης
- Η αντοχή του σκυροδέματος

ΠΗΓΕΣ

1. Σπυράκος Κ., “Ενίσχυση κατασκευών για σεισμικά φορτία”, Εκδόσεις Τ.Ε.Ε., Αθήνα 2004
2. Τριανταφύλλου Α. Χ., “Ενισχύσεις Κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος με σύνθετα υλικά”, εκδόσεις Πανεπιστημίου Πατρών, 2^η έκδοση, Πάτρα 2004
3. Δήμητρα Κροντήρη-Γεωργία Χασκά, “Εφαρμογή επικολητών ελασμάτων (χάλυβας-ινοπλισμένα)”, 10^ο Φοιτητικό συνέδριο “Επισκευές κατασκευών 2004”, Πανεπιστήμιο Πατρών 2004
4. Σωτήριος Μακρής-Σπυριδούλα Πολίτη, “Εφαρμογή επικολητών ελασμάτων (χάλυβας-ινοπλισμένα)”, 10^ο Φοιτητικό συνέδριο “Επισκευές κατασκευών 2004”, Πανεπιστήμιο Πατρών 2004
5. Παπανικολάου Έλλη-Άννα, “Προεντεταμένα από ινοπλισμένα πολυμερή για ενίσχυση κατασκευών”, 9^ο Φοιτητικό συνέδριο “Επισκευές κατασκευών 2003”, Πανεπιστήμιο Πατρών 2003
6. Ντελμέκουρα Κωνσταντίνα, “Ενίσχυση κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα με χρήση σύνθετων υλικών ανόργανης μήτρας”, 11ο Φοιτητικό Συνέδριο “Επισκευές Κατασκευών 2005”, Πανεπιστήμιο Πατρών 2005
7. Παναγιωτοπούλου Βασιλική, “Ενίσχυση δοκών με NSM FRP ράβδους”, 11ο Φοιτητικό Συνέδριο “Επισκευές Κατασκευών 2005”, Πανεπιστήμιο Πατρών 2005
8. “Sika Carbodur Heating Device”, Sika A.B.E.E., 2005
9. “Prestressing Systems for Structural Strengthening with Sika Carbodur CFRP Plates”, Sika A.B.E.E., 2004
10. “Ολοκληρωμένα συστήματα ενίσχυσης κατασκευών με σύνθετα υλικά”, ISOMAT A.B.E.E., 2006

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΑΡΧΕΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ

Οι ενισχύσεις με σύνθετα υλικά ακολουθούν τη φιλοσοφία των σύγχρονων κανονισμών και περιλαμβάνουν όλους τους ελέγχους των οριακών καταστάσεων αντοχής και λειτουργικότητας, με τροποποιήσεις όπου λαμβάνεται υπ' όψη η συνεισφορά των σύνθετων υλικών.

5.1 Οριακή κατάσταση αντοχής

5.1.1 Πλήρης συνεργασία υλικών

Η συμπεριφορά των σύνθετων υλικών σε εφελκυσμό θεωρείται γραμμικά ελαστική μέχρι τη θραύση η οποία επέρχεται σε τάση:

$$\sigma_f = E_f \varepsilon_f \leq f_{fd} = f_{fk} / \gamma_f \quad \text{Εξ. (5-1)}$$

Το μέτρο ελαστικότητας προσδιορίζεται από το λόγο των χαρακτηριστικών τιμών εφελκυστικής αντοχής προς οριακή παραμόρφωση:

$$E_f = f_{fk} / \varepsilon_{fuk} \quad \text{Εξ. (5-2)}$$

Η ενεργή αντοχή σχεδιασμού f_{fde} για τα σύνθετα υλικά σε εφελκυσμό μπορεί να υπολογισθεί ως εξής:

$$f_{fde} = \varepsilon_{fue} f_{fk} / \varepsilon_{fum} \gamma_f = n_e f_{fd} \quad \text{Εξ. (5-3)}$$

Οι τιμές για το συντελεστή ασφαλείας των σύνθετων υλικών δίνονται στον πίνακα 5.1 και είναι ενδεικτικές.

ΤΥΠΟΣ ΙΝΩΝ	ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΥΠΟΥ Α ⁽¹⁾	ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΥΠΟΥ Β ⁽²⁾
ΑΝΘΡΑΚΑΣ	1,20	1,35
ΑΡΑΜΙΔΙΟ	1,25	1,45
ΓΥΑΛΙ	1,30	1,50

Πίνακας 5.1: (πηγή 1) Συντελεστές ασφαλείας σύνθετων υλικών, γ_f

(1) Χρήση ελασμάτων σε συνήθης συνθήκες
Χρήση υφασμάτων σε συνθήκες υψηλού βαθμού ποιοτικού ελέγχου

(2) Χρήση υφασμάτων σε συνθήκες συνηθισμένου βαθμού ποιοτικού ελέγχου
Χρήση οποιουδήποτε υλικού σε δύσκολες συνθήκες επί τόπου εφαρμογής.

5.1.2 Αποκόλληση

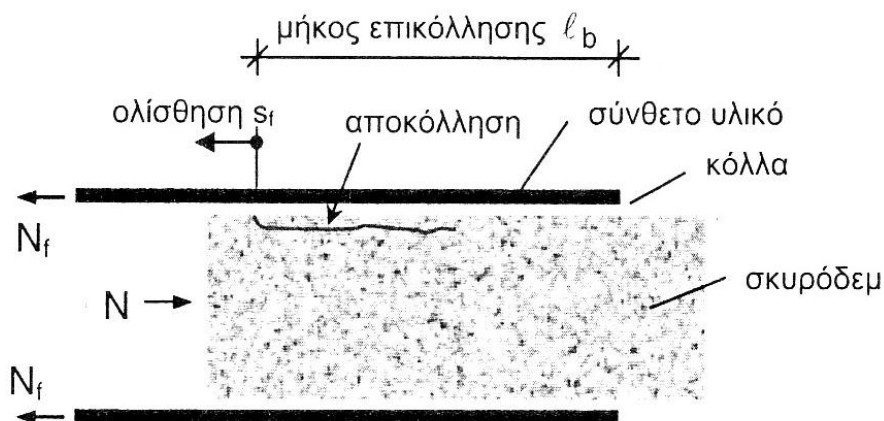
Πολλές φορές παρατηρείται αποκόλληση των σύνθετων υλικών από την επιφάνεια του σκυροδέματος, η οποία οφείλεται στην ανάπτυξη μεγάλων διατμητικών τάσεων στη διεπιφάνεια σκυροδέματος – σύνθετων υλικών και γίνεται κατά κανόνα μέσω του σκυροδέματος, λόγω του ότι έχει μικρότερη διατμητική αντοχή από τις εποξειδικές ρητίνες. Σε αυτές τις περιπτώσεις ο συντελεστής ασφαλείας υλικού αφορά το σκυροδέμα και λαμβάνεται $\gamma_b = 1,5$.

5.2 Οριακή κατάσταση λειτουργικότητας

εδώ το μέτρο ελαστικότητας των σύνθετων υλικών θεωρείται κατά προσέγγιση ίσο με αυτό που υπολογίζεται για την οριακή κατάσταση αστοχίας και οι συντελεστές ασφαλείας των υλικών είναι ίσοι με 1,0.

5.3 Συμπεριφορά σύνθετων υλικών – σκυροδέματος

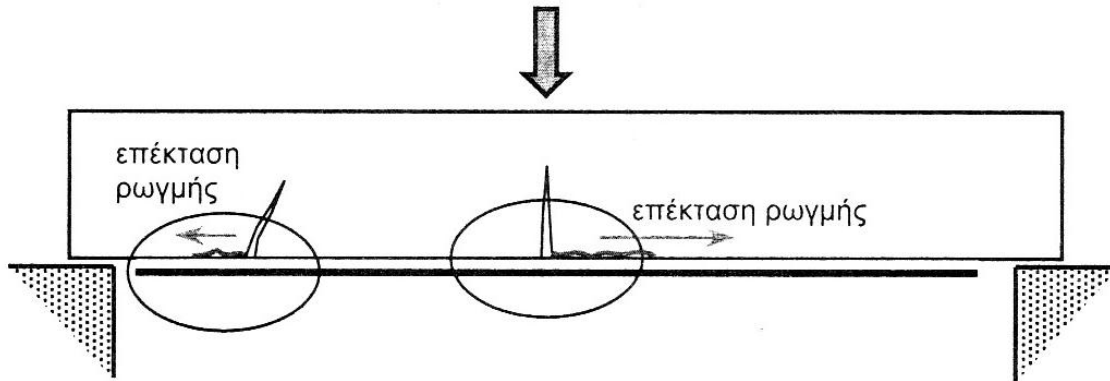
Ο δεσμός σύνθετων υλικών – σκυροδέματος μπορεί να γίνει κατανοητός μέσω απλών δοκιμών συνάφειας (Σχήμα 5.1).



Σχήμα 5.1: (πηγή 1) Δοκιμή συνάφειας σύνθετων υλικών – σκυροδέματος

Σε περιοχές ανάπτυξης ρωγμών (σχήμα 5.2) ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η σχέση μεταξύ μέσης διατμητικής τάσης τ_b στη διεπιφάνεια σύνθετων υλικών και σκυροδέματος συναρτήσει της ολίσθησης s_f .

Η θραύση των σύνθετων υλικών σπανίως προηγείται της αποκόλλησης, σε αντίθεση με τις ράβδους οπλισμού που μπορούν να σχεδιαστούν με επαρκές μήκος αγκύρωσης ώστε να εξασφαλίζεται η αστοχία τους πριν την αποκόλληση.



Σχήμα 5.2: (πηγή 1)

Ρηγμάτωση δοκού οπλισμένου σκυροδέματος και ενδεχόμενη αστοχία λόγω αποκόλλησης των σύνθετων υλικών

ΠΗΓΕΣ

1. Τριανταφύλλου Α. Χ., “Ενισχύσεις Κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος με σύνθετα υλικά”, εκδόσεις Πανεπιστημίου Πατρών, 2^η έκδοση, Πάτρα 2004
2. Σπυράκος Κ., “Ενίσχυση κατασκευών για σεισμικά φορτία”, Εκδόσεις Τ.Ε.Ε., Αθήνα 2004

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΣΕΙΣΜΙΚΕΣ ΒΛΑΒΕΣ ΚΑΙ ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΚΤΙΡΙΩΝ ΜΕ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ

Σε μια χώρα όπως η Ελλάδα που βρίσκεται σε μια έντονη σεισμική περιοχή, τα κτίρια καλούνται να δοκιμαστούν για τα φορτία (σεισμικά) που έχουν σχεδιαστεί. Καταλαβαίνουμε λοιπόν ότι η ύπαρξη βλαβών στις κατασκευές δεν μπορεί να αποφευχθεί. Αυτό γίνεται αποδεκτό και στον Ν.Ε.Α.Κ. όπου χαρακτηριστικά λέει, ότι ο φέρων οργανισμός της κατασκευής θα υποστεί βλάβες κατά τη δράση του σεισμού σχεδιασμού που θα πρέπει να είναι περιορισμένες και επισκευάσιμες, ενώ για ένα πολύ ισχυρότερο σεισμό προβλέπεται ότι η πιθανότητα κατάρρευσης πρέπει να είναι επαρκώς μικρή.

6.1 Ταξινόμηση βλαβών

Παρακάτω θα παραθέσουμε μια ταξινόμηση των βλαβών που παρουσιάζονται στα διάφορα δομικά στοιχεία μιας κατασκευής μετά από σεισμό .

Η ταξινόμηση περιλαμβάνει:

- **Τον χαρακτήρα των βλαβών**, που αναφέρεται στην κατασκευή ως σύνολο και συνδέεται με την ασφάλεια της κατασκευής ,την λήψη αποφάσεων (επιλογή μέτρων “θεραπείας”) και τον βαθμό επείγοντος λήψεως μέτρων και επεμβάσεων.
- **Τους τυπικούς βαθμούς βλάβης**, που αναφέρονται σε μεμονωμένα δομικά στοιχεία και συνδέονται άμεσα με εναπομένουσες αντοχές και διαθέσιμα περιθώρια ασφαλείας αυτών των βλαμμένων στοιχείων .

6.1.1 Χαρακτήρας βλαβών

- **Βλάβες γενικού χαρακτήρα** (καθολικές) για τον οργανισμό (φέροντα ή πλήρωσης) ενός ορόφου θεωρούνται αυτές που εκτείνονται στο σύνολο, σχεδόν, των στοιχείων (γραμμικών ή επιφανειακών) του οργανισμού.

- **Βλάβες μερικού χαρακτήρα** για τον οργανισμό (φέροντα ή πλήρωσης) ενός ορόφου θεωρούνται αυτές που εκτείνονται σε ποσοστό 1/3 έως 2/3 του συνόλου των στοιχείων (γραμμικών ή επιφανειακών) του οργανισμού.

- **Βλάβες τοπικού χαρακτήρα** για τον οργανισμό (φέροντα ή πλήρωσης) ενός ορόφου θεωρούνται αυτές που εμφανίζονται σε μεμονωμένα στοιχεία (γραμμικά ή επιφανειακά) του οργανισμού.

Ο χαρακτήρας των βλαβών , όσο αφορά δευτερεύοντα στοιχεία ενός κτιρίου (δευτερεύουσες κατασκευές, διακοσμητικά στοιχεία, υλικά εγκαταστάσεων, κ.λ.π.) εξαρτάται αφενός μεν από την επιρροή των βλαβών στη λειτουργικότητα των στοιχείων αυτών, αφετέρου δε από τον τυπικό βαθμό και το χαρακτήρα της βλάβης του οργανισμού πλήρωσης, με τον οποίο (συνήθως) “συνδέονται” τα δευτερεύοντα αυτά στοιχεία.

6.1.2 Τυπικοί βαθμοί βλάβης

α. Θεμελίωση

Προβλήματα υπεδάφους ή και θεμελίων (όπως ολισθήσεις, διαφορικές καθιζήσεις, βλάβη συνδετήριων δοκών κ.λ.π.) θεωρούνται σοβαρές έως βαριές βλάβες, επικίνδυνες για την ασφάλεια της κατασκευής ως συνόλου .Απαιτείται ιδιαίτερη και προσεκτική αντιμετώπιση και διατίθενται ειδικές τεχνικές επεμβάσεων.

b. Ανωδομή

b.1 Φέρων οργανισμός:

- Υποστυλώματα

Μετά από έναν ισχυρό σεισμό, οι βλάβες στα υποστυλώματα μιας κατασκευής είναι από τις πιο συχνές και συγχρόνως από τις πιο σοβαρές. Ο ρόλος τους μέσα στην κατασκευή είναι ιδιαίτερα σημαντικός και αποτελούν κύρια παράμετρο για την ασφάλειά της. Έτσι τυχόν αστοχία τους μπορεί να οδηγήσει σε τμηματική ή ολική κατάρρευση του δομήματος.

Οι βλάβες στα υποστυλώματα εμφανίζονται σε διάφορους βαθμούς όπως:

- **Βαθμού “Α”, ελαφρές βλάβες:** μεμονωμένες ρωγμές μικρού πλάτους (μικρότερου από 2,0 mm) κυρίως λόγω κάμψεως ή δευτερευόντων λόγων (π.χ. αρμοί διακοπής σκυροδετήσεως, ανεπαρκείς αγκυρώσεις, ελαφρές κρούσεις ,κ.λ.π.). Για να χαρακτηριστεί μια βλάβη ως βαθμού “Α” πρέπει να αποδειχθεί ότι δεν οφείλεται σε ανεπάρκεια διατομής, χάλυβα ή σκυροδέματος .

- **Βαθμού “Β”, ελαφρές βλάβες:** πολλές καμπτικές ρωγμές ή μεμονωμένες διατμητικές ρωγμές μικρού πλάτους (μικρότερου από 0.5 mm), με την προϋπόθεση ότι δεν παρατηρούνται εμφανείς μετακινήσεις του σκελετού.

- **Βαθμού “Γ”, σοβαρές βλάβες:** έντονη ρηγμάτωση μεγάλου πλάτους, τοπική αποδιοργάνωση του σκυροδέματος από θλίψη ή διάτμηση, εφόσον οι παραμένουσες παραμορφώσεις είναι πολύ μικρές.

- **Βαθμού “Δ”, βαριές βλάβες:** Θραύση του σκυροδέματος του στοιχείου, βλάβη των κυρίων οπλισμών, διακοπή της συνέχειας του στοιχείου χωρίς κατάρρευση. Οι παραμένουσες παραμορφώσεις είναι μικρές. Σοβαρή αποδιοργάνωση κόμβων θεωρείται επίσης βλάβη βαθμού “Δ”.

Υπάρχει και τυπικός βαθμός “Ε”, για δύσκολα επισκευάσιμες βλάβες, όταν οι μετακινήσεις του σκελετού είναι μέτριες έως μεγάλες, παρατηρούνται αποκολλήσεις ή μερικές καταρρεύσεις.

- **Δοκοί και πλάκες**

Οι βλάβες σε δοκούς από οπλισμένο σκυρόδεμα συναντιούνται συχνά σε μια κατασκευή σε αντίθεση με αυτές των πλακών .Η λειτουργία τους είναι κυρίως σε κάμψη και ισχύουν , σε γενικές γραμμές, οι ίδιοι τυπικοί βαθμοί βλάβης όπως και για τα κυρίως θλιβόμενα στοιχεία –υποστυλώματα. Επίσης , ισχύουν και οι ίδιες προϋποθέσεις για ανεπάρκεια (χάλυβα ή σκυροδέματος) ή μετακινήσεις των κόμβων (κατακόρυφες ή οριζόντιες).

Δεδομένου όμως του ότι οι δοκοί και οι πλάκες είναι από τα λιγότερο επιπνούμενα στοιχεία σε περίπτωση σεισμού , παρουσιάζονται συνήθως, μόνο ελαφρές έως σοβαρές βλάβες , εκτός και αν υπάρχει πρόβλημα διαφραγματικής λειτουργίας ή και μεταφοράς δυνάμεων στα στοιχεία ακαμψίας . Σε αυτές τις περιπτώσεις είναι δυνατόν να παρουσιαστούν σοβαρές βλάβες,

έντονες και διαμπερείς ρηγματώσεις, μερικές αποκολλήσεις, κ.λ.π. που απαιτούν ιδιαίτερη και προσεκτική αντιμετώπιση.

Καμπτικές βλάβες στο πάνω πέλμα των δοκών είναι πολύ πιθανό να εμφανιστούν κοντά στις στηρίξεις από σεισμικές ή μακροχρόνιες δράσεις. Παρόμοιες ρωγμές μπορεί να εμφανιστούν και στο κάτω πέλμα από ισχυρή σεισμική ένταση ή από ανεπαρκή αγκύρωση που είναι και το πιο πιθανό.

- Τοιχώματα, κόμβοι

Λόγω της σπουδαιότητας του ρόλου των στοιχείων αυτών του σκελετού μιας κατασκευής στην αντισεισμική συμπεριφορά του συνόλου, κάθε βλάβη και ρηγμάτωση, έστω και απλή – πολύ μικρού ανοίγματος, θεωρείται επικίνδυνη (επηρεάζει την ασφάλεια της όλης κατασκευής) και αντιμετωπίζεται τουλάχιστον ως σοβαρή βλάβη (βαθμού “Γ”) ή βαριά βλάβη (βαθμού “Δ”) αν έχει συμβεί και αποδιοργάνωση του σκυροδέματος ή και βλάβη των οπλισμών. Οι βλάβες των τοιχωμάτων είναι διατμητικής και καμπτικής μορφής.

Οι τυπικοί βαθμοί βλάβης είναι ίδιοι με αυτούς των υποστυλωμάτων με τη διαφορά ότι οι βαθμοί “Α” και “Β” θεωρούνται “Γ” και οι βαθμοί “Γ” και “Δ” θεωρούνται “Δ”.

b.2 Οργανισμός πλήρωσης:

- Ελαφρές βλάβες: απλή ρηγμάτωση με άνοιγμα ρωγμών μικρότερο από 1,0 mm, κυρίως στις γωνίες κουφωμάτων, αποκολλήσεις –αποσυνδέσεις οργανισμού πλήρωσης και σκελετού.

- Σοβαρές βλάβες: έντονη ρηγμάτωση, ρωγμές διαγώνιες ή χιαστί, με άνοιγμα μέχρι 5,0 mm, αποδιοργάνωση της τοιχοποιίας , βλάβη των διαζωμάτων, σοβαρές βλάβες στα διακοσμητικά στοιχεία και στις εγκαταστάσεις.

- Βαριές βλάβες: θλιπτοδιατμητική θραύση, μεγάλες (~ 10 mm) και ανοικτές ρωγμές, διαγώνιες ή χιαστί, σπάσιμο τούβλων, θραύση των διαζωμάτων, αποκλίσεις, βαριές βλάβες στα διακοσμητικά στοιχεία και στις εγκαταστάσεις.

b.3 - Δευτερεύουσες κατασκευές

(καμινάδες, πατάρια, υαλοστάσια, κ.λ.π.).

- Διακοσμητικά στοιχεία

(επενδύσεις, αψίδες, στηθαία, κ.λ.π.).

- Εγκαταστάσεις

(υδραυλικές, ηλεκτρικές, κ.λ.π.).

Για αυτά τα στοιχεία μιας κατασκευής δεν διακρίνονται τυπικοί βαθμοί βλάβης. Η κατάταξη των βλαβών τους γίνεται ανάλογα με τον χαρακτήρα τους, δηλαδή με το αν είναι τοπικού, μερικού ή γενικού χαρακτήρα.

6.2 Παραμένουσα αντοχή μεμονωμένων στοιχείων

Οι τυπικοί βαθμοί αλλά και ο χαρακτήρας των βλαβών συνδέονται άμεσα, εκτός των άλλων , και με την παραμένουσα αντοχή και τα διαθέσιμα περιθώρια ασφαλείας των βλαμμένων δομικών στοιχείων και της κατασκευής ως συνόλου.

Στον Πίνακα 6.1 παρουσιάζεται μια εκτίμηση παραμενουσών αντοχών (ως ποσοστών της αρχικής αντοχής) για μεμονωμένα δομικά στοιχεία ,και, κυρίως για υποστυλώματα, ανάλογα με τον τυπικό βαθμό βλάβης από σεισμό που παρουσιάζουν και την ηλικία της κατασκευής. Ανάλογες εκτιμήσεις μπορούν να γίνουν και για βλαμμένα τοιχώματα

Η εκτίμηση της παραμένουσας αντοχής της κατασκευής στο σύνολό της είναι δύσκολη. Πρέπει να ληφθούν υπόψη όλα τα μεμονωμένα δομικά στοιχεία , ο τυπικός βαθμός βλάβης , ο χαρακτήρας των βλαβών, η παραμένουσα αντοχή και ο ρόλος τους στην συμπεριφορά του κτιρίου. Ακόμη πρέπει να εκτιμηθεί η δυνατότητα ανακατανομών της έντασης και να ληφθούν υπόψη κατάλληλοι συντελεστές βαρύτητας για τα μεμονωμένα κατακόρυφα στοιχεία , ανάλογοι με την επικινδυνότητά τους, δηλαδή με τις γενικότερες επιπτώσεις που προκαλεί ενδεχόμενη βαριά βλάβη τους. Επισημαίνεται ότι τέτοιες ψευδο-ποσοτικές εκτιμήσεις της παραμένουσας αντοχής των στοιχείων (βλ. Πίνακα 9.1) είναι ιδιαίτερα χρήσιμες.

ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ	ΒΑΘΜΟΣ ΒΛΑΒΗΣ			
	A	B	Γ	Δ
Νέα	0,95	0,75	0,45	0,15
Παλιά	0,80	0,60	0,30	0,00

Πίνακας 6.1: (πηγή 1) Εκτιμήσεις παραμενουσών αντοχών για βλαμμένα δομικά στοιχεία (υποστυλώματα και τοιχώματα).

- Η παραμένουσα αντοχή συνδέεται άμεσα με τον βαθμό επείγοντος λήψεως μέτρων. Για τιμές κάτω του 0.50 ,περίπου, απαιτούνται άμεσα μέτρα, έστω προσωρινά, ενώ για τιμές που πλησιάζουν το 1.00 οι επεμβάσεις μπορούν να γίνουν αργότερα (π.χ. μέσα σε μια 10-ετία).
- Η παραμένουσα αντοχή συνδέεται άμεσα και με την απόφαση για απλή επισκευή ή για ενίσχυση του στοιχείου ή της κατασκευής, με την προϋπόθεση ότι η αρχική μελέτη δεν έχει χονδροειδή σφάλματα (κυρίως στη μόρφωση)και η κατασκευή δεν παρουσιάζει κακοτεχνίες. Τότε μπορεί να γίνει μόνο επισκευή αν η απώλεια αντοχής είναι μέχρι 15%, ενώ επιβάλλεται ενίσχυση αν η απώλεια αντοχής είναι μεγαλύτερη από 20%.

6.3 Τρόποι Επέμβασης

Οι τρόποι επέμβασης εξαρτώνται από την παραμένουσα αντοχή, τον βαθμό επείγοντος και από τεχνικο-οικονομικές θεωρήσεις. Μερικοί γενικοί τρόποι επέμβασης είναι οι εξής:

1. Καθαίρεση ανώτερων ορόφων ή τμημάτων του κτιρίου(απαλλαγή από μεγάλα φορτία ή από δυσμενή λειτουργία)
2. Περιορισμός χρήσεως (μείωση ωφελίμου φορτίου)
3. Τροποποίηση δομικού συστήματος (π.χ. μετατροπή αμφιέριστων τμημάτων δοκών σε συνεχή δοκό ,κτλ)
4. Αποκατάσταση φέρουσας ικανότητας ή ακαμψίας δομικού στοιχείου
5. Αντικατάσταση βαριά βλαμμένου δομικού στοιχείου
6. Ενίσχυση του κτιρίου

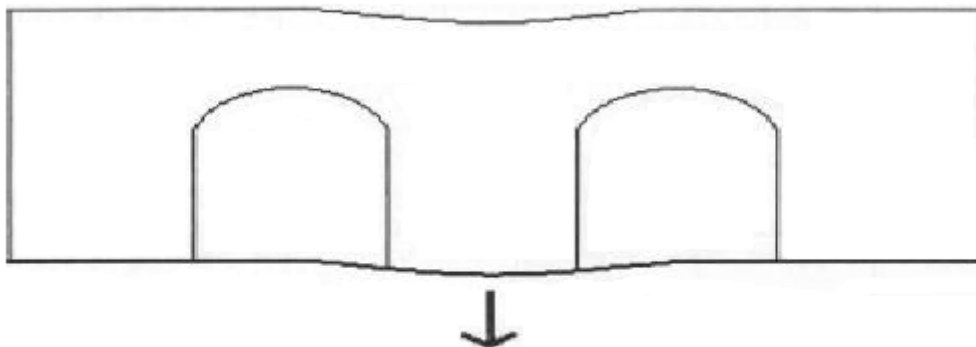
6.4 Έρευνα και ανάλυση

Πριν πάμε στην αποκατάσταση των βλαβών απαιτείται προηγουμένως ένα σύνολο ερευνητικών εργασιών που θα μας καταστήσουν βέβαιους και ικανούς στον τρόπο δράσης και επέμβασης.

Καταρχήν πρέπει να γίνει γεωμετρική και μορφολογική αποτύπωση του κτιρίου. Με αλλά λόγια να καταγράφουν τα υλικά, ο τρόπος δόμησης καθώς επίσης το ιστορικό του κτιρίου. Δηλαδή την παρακολούθηση της εξέλιξης του κτιρίου (φάσεις κατασκευής, μεταγενέστερες επεμβάσεις).

Ακολουθεί η ανάλυση των φυσικών και χημικών χαρακτηριστικών των υλικών (ειδικό βάρος, φυσική υγρασία, πυκνότητα, περιεκτικότητα σε χημικά συστατικά) κι ο προσδιορισμός των μηχανικών χαρακτηριστικών τους (θλιπτική αντοχή, αντοχή σ' εφελκυσμό, κάμψη, συνάφεια, μέτρο ελαστικότητας).

Πολύ σημαντική είναι η γεωτεχνική έρευνα καθώς η συμπεριφορά του εδάφους αποτελεί ίσως τον κύριο παράγοντα της συνολικής ευστάθειας του κτιρίου. Ειδικότερα εξετάζεται η φέρουσα ικανότητα του εδάφους, αν και το πρόβλημα συνήθως δεν είναι εκεί διότι το κτίριο με την ύπαρξη του αποδεικνύει ότι η φέρουσα ικανότητα του εδάφους είναι ικανοποιητική. Κυρίως ελέγχουμε αν μεταγενέστερες επεμβάσεις έχουν δημιουργήσει νέα δεδομένα. Επεμβάσεις όπως επιχωματώσεις ή εκσκαφές, νεότερα κτίσματα πολύ κοντά στο μνημείο καθώς επίσης και μεταγενέστερες προσθήκες σε αυτό οι οποίες οδηγούν σε αύξηση του φορτίου και προκαλούν μεταβολές στην ακαμψία του αλλά και πρόσθετες καθιζήσεις με ταυτόχρονη μετατόπιση τμημάτων της τοιχοποιίας (Σχήμα 6.1).



Σχήμα 6.1 (πηγή 4)

Το ίδιο σημαντικό είναι κι ο έλεγχος της αντισεισμικής επάρκειας του κτιρίου. Η στατική μελέτη υπάρχοντος κτίσματος έχει γενικώς διαφορετικό χαρακτήρα από ότι για μια νέα κατασκευή. Στη νέα κατασκευή ο υπολογισμός των εντατικών μεγεθών γίνεται με σκοπό την κατάλληλη επιλογή των υλικών και διαστασιολόγηση των φορέων ώστε οι αναπτυσσόμενες τάσεις να μην

υπερβαίνουν τις επιτρεπόμενες και οι συντελεστές ασφάλειας να έχουν τις επιθυμητές τιμές. Στο υπάρχον κτίσμα οι διαστάσεις και τα υλικά είναι δεδομένα οπότε ο υπολογισμός των εντατικών μεγεθών οδηγεί μόνο σε διαπιστώσεις.

Η εκπόνηση μιας στατικής μελέτης προϋποθέτει τη μελέτη της συμπεριφοράς του φέροντος οργανισμού υπό φορτικές καταστάσεις που υπήρξαν ή μπορούν να υπάρξουν. Για το σκοπό αυτό μορφοποιούνται μοντέλα στατικής λειτουργίας διαφορετικά για κάθε είδος καταπόνησης λαμβάνοντας υπόψη όσο είναι εφικτό και το ιστορικό, δηλαδή τις φορτικές καταστάσεις που έχει βρεθεί στο παρελθόν το κτίριο. Η απουσία πολλές φορές πληροφοριών για την ιστορία της φόρτισης αλλά και η αβεβαιότητα των πραγματικών τιμών αντοχής υλικών και δομικών στοιχείων μειώνει σημαντικά την ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Γι' αυτό το λόγο κατά τη μελέτη λαμβάνονται όσο το δυνατόν περισσότερες πιθανές τιμές αντοχών προκειμένου να περιοριστούν οι αβεβαιότητες των αποτελεσμάτων.

6.5 Ενισχύσεις

Ενίσχυση στοιχείου ή κατασκευής είναι το σύνολο των μέτρων που λαμβάνονται ώστε το στοιχείο ή η κατασκευή να αυξήσει την αντοχή του έναντι συγκεκριμένου συνδυασμού δράσεων. Στην περίπτωση που οι βλάβες προέρχονται από σεισμικές δράσεις, η ενίσχυση συνδυάζεται και με την επισκευή. Είναι δε απαραίτητη γιατί σε παρόμοια καταπόνηση της κατασκευής, αν γίνει μόνο επισκευή, είναι σχεδόν βέβαιο ότι θα παρουσιαστούν οι ίδιες βλάβες με αυτές που είχαμε πριν την επισκευή. Οι μέθοδοι ενίσχυσης των κατασκευών ως συνόλου μπορούν να διακριθούν, ανάλογα με τον επιδιωκόμενο στόχο σε τρεις κατηγορίες:

- Μέθοδοι ακαμψίας και της αντοχής της κατασκευής
- Μέθοδοι αύξησης της πλαστιμότητας της κατασκευής
- Μέθοδοι αύξησης αμφοτέρων

Στα ακόλουθα κεφάλαια θα γίνει εκτενέστατη ανάλυση όσον αφορά τις ενισχύσεις των κατασκευών με σύνθετα υλικά.

ΠΗΓΕΣ

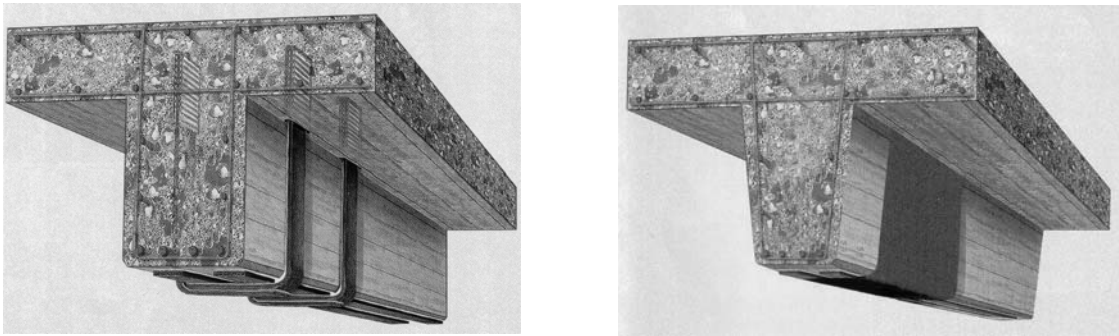
1. Χασάπης Ευθύμιος-Χριστάκη Αιμιλία, “Βλάβες από σεισμό και τρόποι επέμβασης σε κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα”, 6^ο Φοιτητικό συνέδριο “Επισκευές κατασκευών 2000”, Πανεπιστήμιο Πατρών 2000
2. Δρίτσος Σ. Η. ,”Επισκευές και ενισχύσεις κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα”, εκδόσεις Πανεπιστημίου Πατρών, Πάτρα 1998
3. Τριανταφύλλου Α. Χ., “Προηγμένες τεχνολογίες υλικών & κατασκευών”, εκδόσεις Πανεπιστημίου Πατρών, Πάτρα 2003
4. Θεοδωράτος Ανδρέας-Παπαδόπουλος Θανάσης, “Ιστορικά κτίρια: Ενίσχυση και Επισκευή τους με χρήση FRP”, 8^ο Φοιτητικό συνέδριο “Επισκευές κατασκευών 2002”, Πανεπιστήμιο Πατρών 2002

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΣΕ ΚΑΜΨΗ

7.1 Γενικά

Τα προς ενίσχυση σε κάμψη στοιχεία μιας κατασκευής είναι συνήθως οι δοκοί ή οι πλάκες. Τα σύνθετα υλικά που χρησιμοποιούμε για την ενίσχυση σε κάμψη είναι ελάσματα ή υφάσματα (κυρίως ινών άνθρακα), τα οποία επικολλούμε στο εφελκόμενο πέλμα με διεύθυνση ινών τέτοια ώστε να παραλαμβάνουν τις λόγω κάμψης εφελκυστικές δυνάμεις (Σχήμα 7.1).

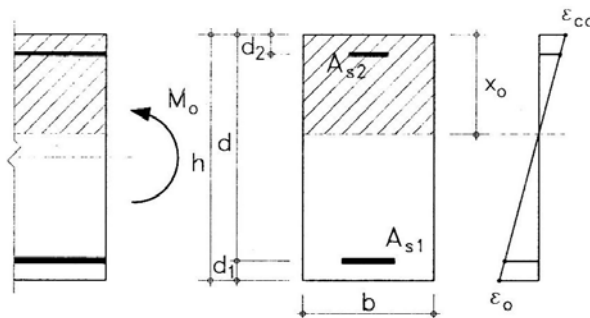


Σχήμα 7.1 : (πηγή 3) ενίσχυση δοκού σε κάμψη

7.2 Αρχική κατάσταση

Ο υπολογισμός των απαιτούμενων ποσοτήτων σύνθετων υλικών προϋποθέτει τη γνώση των παραμορφώσεων στα υπό ενίσχυση δομικά στοιχεία, τη στιγμή εκείνη που λαμβάνει χώρα η ενίσχυση.

Στο Σχήμα 7.2 φαίνεται η φάση ενίσχυσης στη κρίσιμη διατομή της δοκού, που καταπονείται σε ροπή $M_o > M_{cr}$.



Σχήμα 7.2 (πηγή 1)

Από την ισορροπία δυνάμεων στη διατομή προκύπτει το ύψος της θλιβόμενης ζώνης x_o :

$$1/2 b x_o^2 + (\alpha_s - 1) A_{s2} (x_o - d_2) = \alpha_s A_{s1} (d - x_o) \quad \text{Εξ. (7-1)}$$

όπου:

A_{s1} = εμβαδόν του εφελκυσμένου χάλυβα

A_{s2} = εμβαδόν θλιβόμενου χάλυβα

d = στατικό ύψος

d_1 = απόσταση κ.β. διατομής εφελκυσμένου χάλυβα από την ακραία εφελκυσόμενη ίνα

d_2 = απόσταση κ.β. διατομής εφελκυσμένου χάλυβα από την ακραία θλιβόμενη ίνα

h = ύψος διατομής

b = πλάτος διατομής

$\alpha_s = E_s / E_c$ = λόγος μέτρου ελαστικότητας χάλυβα προς μέτρο ελαστικότητας σκυροδέματος

Η παραμόρφωση στην ακραία θλιβόμενη ίνα σκυροδέματος ισούται με:

$$\epsilon_{co} = M_o x_o / (E_c I_{o2}) \quad \text{Εξ. (7-2)}$$

όπου:

I_{o2} = ροπή αδράνειας ρηγματωμένης διατομής

Η ροπή αδράνειας της ρηγματωμένης διατομής ισούται με:

$$I_{o2} = b x_o^3 / 3 + (\alpha_s - 1) A_{s2} (x_o - d_2)^2 + \alpha_s A_{s1} (d - x_o)^2 \quad \text{Εξ. (7-3)}$$

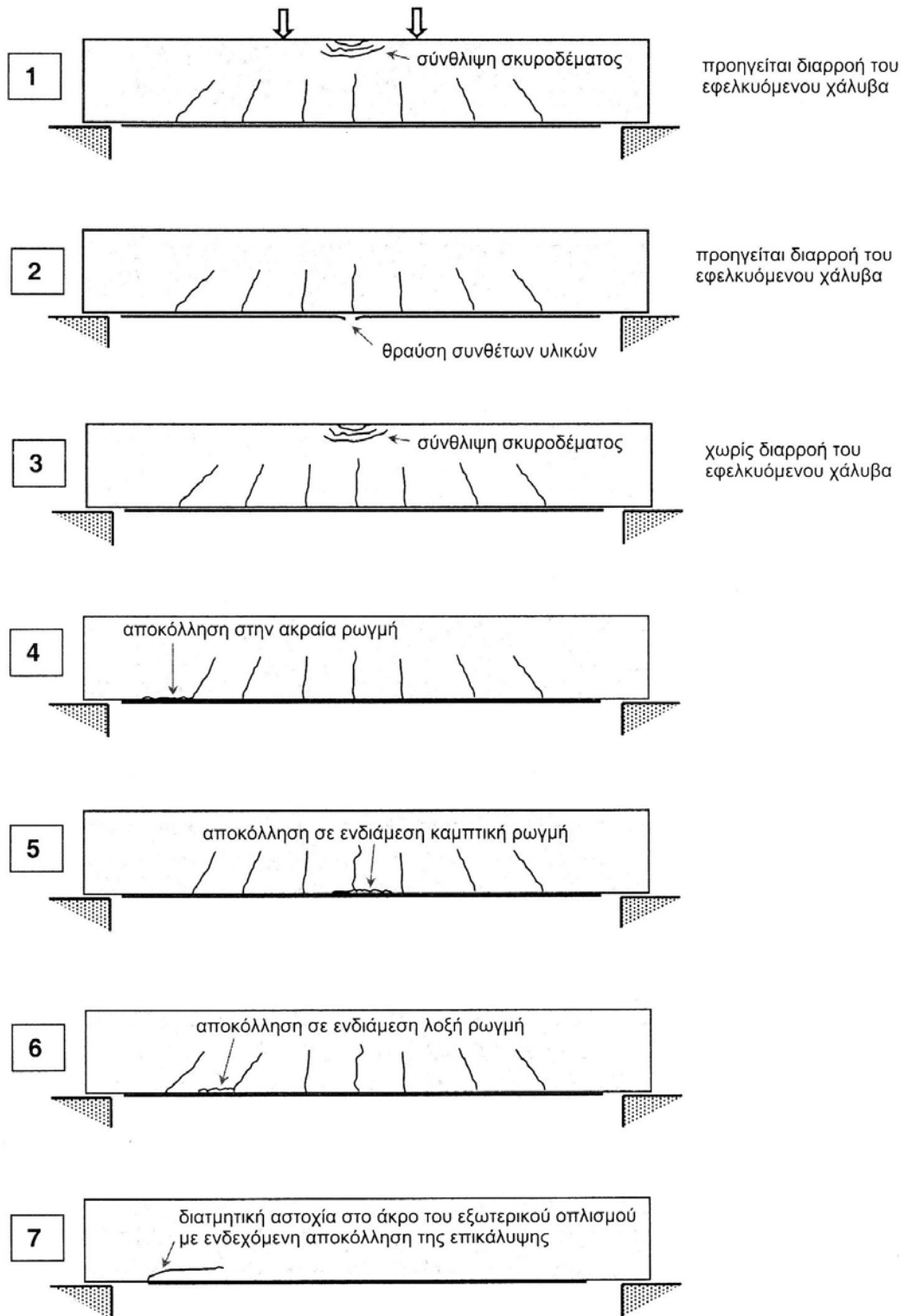
Η παραμόρφωση ϵ_o στην ακραία εφελκυσόμενη ίνα υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\epsilon_o = \epsilon_{co} (h - x_o) / x_o \quad \text{Εξ. (7-4)}$$

Το ϵ_o αποτελεί την αρχική παραμόρφωση στη θέση επικόλλησης του οπλισμού ενίσχυσης.

7.3 Μορφές αστοχίας

Οι συνηθέστερες μορφές αστοχίας στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος, ενισχυμένων σε κάμψη με σύνθετα υλικά φαίνονται στο Σχήμα 7.3.



Σχήμα 7.3 (πηγή 1)

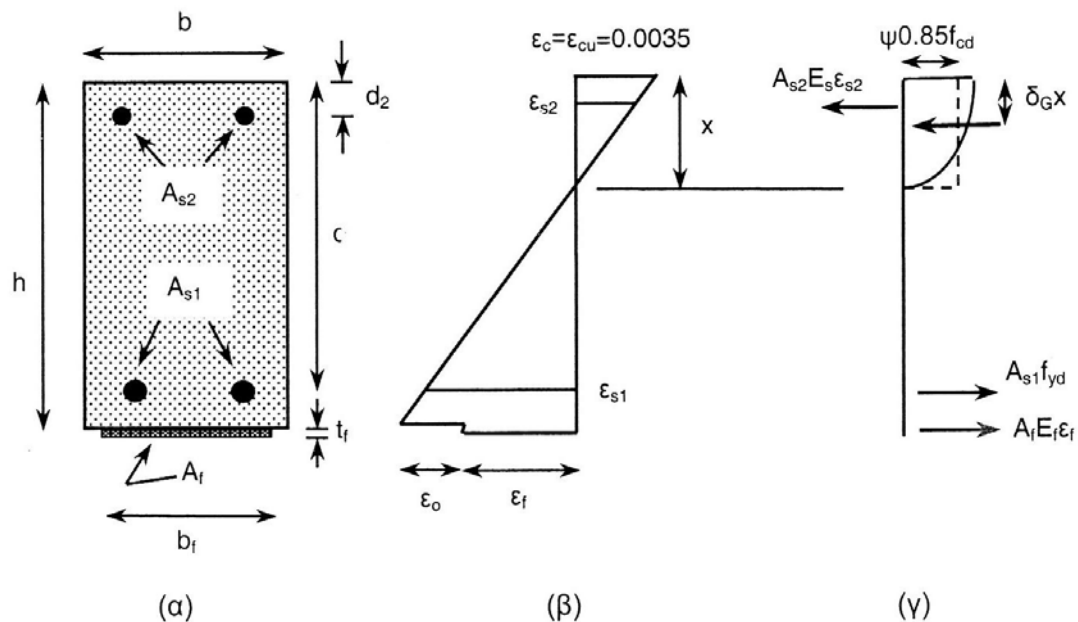
Στις παραπάνω μορφές αστοχίας, έχουμε τους μηχανισμούς πλήρους συνεργασίας σκυροδέματος – σύνθετων υλικών και τους μηχανισμούς με απώλεια πλήρους συνεργασίας.

7.3.1 Μηχανισμοί πλήρους συνεργασίας

7.3.1.1 Διαρροή εφελκόμενου χάλυβα και σύνθλιψη σκυροδέματος

Σε αυτή τη μορφή αστοχίας, πρώτα διαρρέει ο διαμήκης οπλισμός σε εφελκυσμό και ακολούθως συνθλίβεται το σκυρόδεμα, χωρίς να υπάρχει αστοχία ή αποκόλληση των σύνθετων υλικών.

Η ροπή αντοχής στη κρίσιμη διατομή του μέλους (Σχήμα 7.4) γίνεται βάσει ισορροπίας των εσωτερικών δυνάμεων και του συμβιβαστού των παραμορφώσεων.



Σχήμα 7.4: (πηγή 1) 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:

$$0,85 \psi f_{cd} b x + A_{s2} E_s \varepsilon_{s2} = A_{s1} f_{yd} + A_f E_f \varepsilon_f \quad \text{Εξ. (7-5)}$$

όπου:

$$\psi = 0,8$$

f_{cd} = θλιπτική αντοχή σκυροδέματος

x = ύψος θλιβόμενης ζώνης

f_{yd} = τάση διαρροής χάλυβα

A_f = εμβαδόν διατομής σύνθετων υλικών

$$\varepsilon_{s2} = \text{παραμόρφωση θλιβόμενου χάλυβα} = \varepsilon_c (x - d_2) / x \quad \text{Εξ. (7-6)}$$

$$\varepsilon_f = \text{παραμορφώσεις σύνθετων υλικών} = \varepsilon_c [(h - x) / x] - \varepsilon_o \quad \text{Εξ. (7-7)}$$

Υπολογισμός ροπής αντοχής:

$$M_{Rd} = A_{s1} f_{yd} (d - \delta_G x) + A_f E_f \varepsilon_f (h - \delta_G x) + A_{s2} E_s \varepsilon_{s2} (\delta_G x - d_2) \quad \text{Εξ. (7-8)}$$

όπου:

$$\delta_G = 0,4$$

Για να ισχύουν οι παραπάνω τύποι πρέπει:

$$\varepsilon_{s1} = \varepsilon_c (d - x) / x \geq f_{yd} / E_s \quad \text{Εξ. (7-9)}$$

$$\varepsilon_f = \varepsilon_c [(h - x) / x] - \varepsilon_o \leq \varepsilon_{f, \text{lim}} \quad \text{Εξ. (7-10)}$$

όπου:

$$\varepsilon_c = \varepsilon_{cu} = \text{οριακή παραμόρφωση σκυροδέματος (0,0035)}$$

7.3.1.2 Διαρροή εφελκυόμενου χάλυβα και θραύση σύνθετων υλικών

Αυτή η μορφή αστοχίας είναι πολύ σπάνια. Εδώ η ανάλυση της κρίσιμης διατομής, περιγράφεται από τις εξισώσεις (7-5) και (7-10) με τις εξής αλλαγές:

- Η μέγιστη θλιπτική παραμόρφωση σκυροδέματος δεν είναι απαραίτητα ίση με την οριακή

- Η παραμόρφωση των σύνθετων υλικών ισούται με την οριακή ($\epsilon_f = \epsilon_{fud}$)
- Οι συντελεστές ψ και δ_G δίνονται από τις σχέσεις:

$$\begin{aligned} \psi &= 1000 \epsilon_c (0,5 - 1000 \epsilon_c / 12) && \text{για } \epsilon_c \leq 0,002 \\ \psi &= 1 - 2 / 3000 \epsilon_c && \text{για } 0,002 \leq \epsilon_c \leq 0,0035 \end{aligned} \quad \text{Εξ. (7-11)}$$

$$\begin{aligned} \delta_G &= [1000 \epsilon_c (3000 \epsilon_c - 4) + 2] / 2000 \epsilon_c (3000 \epsilon_c - 2) && \text{για } 0,002 \leq \epsilon_c \leq 0,0035 \\ \delta_G &= 8 - 1000 \epsilon_c / 4(6 - 1000 \epsilon_c) && \text{για } \epsilon_c \leq 0,002 \end{aligned} \quad \text{Εξ. (7-12)}$$

7.3.1.3 Σύθλιψη σκυροδέματος

Εδώ έχουμε ψαθυρή συμπεριφορά, κάτι που δεν το θέλουμε. Για την αποφυγή αυτού του φαινομένου περιορίζουμε το εμβαδό των σύνθετων υλικών κάτω από μια κρίσιμη τιμή ώστε να επιτύχουμε διαρροή του εφελκυσμένου χάλυβα.

7.3.2 Μηχανισμοί με απώλεια πλήρους συνεργασίας

7.3.2.1 Αποκόλληση στην ακραία ρωγμή

Σε αυτή τη μορφή αστοχίας έχουμε αποκόλληση στην ακραία ρωγμή. Για να αποφύγουμε αυτό το φαινόμενο θα πρέπει να αγκυρώσουμε τα άκρα των σύνθετων υλικών.

Η αγκύρωση των σύνθετων υλικών γίνεται στη θέση με εφελκυστική δύναμη N_{fad} . Το μήκος αγκύρωσης είναι L_b . Η N_{fad} προσδιορίζεται βάσει ισορροπίας εσωτερικών εντατικών μεγεθών ως εξής:

$$M_{sd} / z = N_{fad} [1 + (A_{s1} E_s \epsilon_{s1}) / (A_f E_f \epsilon_f)] \approx N_{fad} [1 + (A_{s1} E_s) / (A_f E_f)] \quad \text{Εξ. (7-13)}$$

Πρέπει η $N_{fad} \leq N_{fad,max}$ και επίσης να υπάρχει επαρκής διαθέσιμος χώρος για το μήκος αγκύρωσης L_b .

Αν το μήκος αγκύρωσης δεν επαρκεί θα πρέπει είτε να αυξηθεί το πλάτος και να μειωθεί το πάχος των ελασμάτων, είτε να βελτιωθεί η αγκύρωση με μηχανικό τρόπο.

7.3.2.2 Αποκόλληση σε ενδιάμεση καμπτική ροπή

Η μέγιστη επιτρεπόμενη παραμόρφωση στα σύνθετα υλικά για αποκόλληση σε περιοχές καμπτικών ροπών είναι:

για $L_b \geq L_{b,max}$:

$$\varepsilon_{fbd,fl} = (\alpha_{fl} 0,5 k_c k_b / \gamma_b) \sqrt{(f_{ctm} / E_f t_f)} \quad \text{Εξ. (7-14)}$$

για $L_b < L_{b,max}$:

$$\varepsilon_{fbd,fl} = (\alpha_{fl} 0,5 k_c k_b / \gamma_b) \sqrt{(f_{ctm} / E_f t_f)} L_b / L_{b,max} (2 - L_b / L_{b,max}) \quad \text{Εξ. (7-15)}$$

όπου

$$\alpha_{fl} = 1,30.$$

Η ροπή αντοχής υπολογίζεται όπως και στις προηγούμενες μορφές με $\varepsilon_f = \varepsilon_{fbd,fl}$.

7.3.2.3 Αποκόλληση σε ενδιάμεση λοξή ρωγμή

Εδώ η μέγιστη επιτρεπόμενη παραμόρφωση των σύνθετων υλικών μπορεί να είναι:

για $L_b \geq L_{b,max}$:

$$\varepsilon_{fbd,fl-sh} = \alpha_{fl-sh} 0,5 k_c k_b / \gamma_b) \sqrt{(f_{ctm} / E_f t_f)} \quad \text{Εξ. (7-16)}$$

για $L_b < L_{b,max}$:

$$\varepsilon_{fbd,fl-sh} = (\alpha_{fl-sh} 0,5 k_c k_b / \gamma_b) \sqrt{(f_{ctm} / E_f t_f)} L_b / L_{b,max} (2 - L_b / L_{b,max}) \quad \text{Εξ. (7-17)}$$

όπου:

$$\alpha_{fl-sh} = 1,25$$

Η ροπή αντοχής υπολογίζεται όπως και στις προηγούμενες μορφές με $\epsilon_f = \epsilon_{fbd,fl-sh}$.

7.3.2.4 Διατμητική αστοχία στο άκρο – Αποκόλληση της επικάλυψης

Είναι η πιο συνηθισμένη μορφή αστοχίας και οφείλεται στην ανάπτυξη σημαντικών οριζόντιων διατμητικών αλλά και κάθετων στον άξονα του οπλισμού ενίσχυσης εφελκυστικών τάσεων.

Η μέθοδος αντιμετώπισης του φαινομένου αυτού περιλαμβάνει τους παρακάτω ελέγχους:

$$V_{sd,end} \leq 1,4 V_{cd} \quad \text{Εξ. (7-18)}$$

$$M_{sd,end} \leq 2/3 M_{Rd} \quad \text{Εξ. (7-19)}$$

όπου:

$V_{sd,end}$ = δρώσα τέμνουσα στη διατομή που τερματίζουν τα σύνθετα υλικά

$M_{sd,end}$ = δρώσα ροπή στη διατομή που τερματίζουν τα σύνθετα υλικά

V_{cd} = διατμητική αντοχή του μέλους

M_{Rd} = ροπή αντοχής του μέλους.

7.4 Πλαστιμότητα

Απαραίτητη προϋπόθεση είναι η ενεργοποίηση μηχανισμού αστοχίας όπου η διαρροή του εφελκυσμένου χάλυβα θα προηγείται οποιασδήποτε άλλης αστοχίας, ώστε να εξασφαλίζεται μία ελάχιστη τιμή πλαστιμότητας καμπυλοτήτων. Αυτό σημαίνει ότι η εφελκυστική παραμόρφωση των σύνθετων υλικών στην κρίσιμη διατομή κατά την οριακή κατάσταση αντοχής, $\epsilon_{fu,c}$, θα πρέπει να είναι $\epsilon_{fu,c} > \epsilon_{f,min}$, και να έχει ως άνω όριο είτε την παραμόρφωση θραύσης ϵ_{fud} , είτε την παραμόρφωση αποκόλλησης.

Η $\epsilon_{f,min}$ για δεδομένη πλαστιμότητα καμπυλοτήτων μ_ϕ , δίνεται από την εξίσωση:

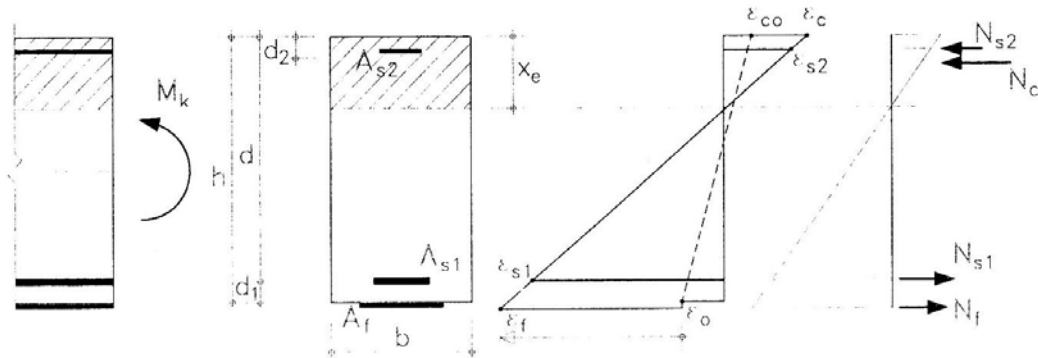
$$\epsilon_{f,min} = \{\epsilon_{yd} \mu_\phi h / [(d/h) - (x_y/h)] d\} - \epsilon_{cu} - \epsilon_o \quad \text{Εξ. (7-20)}$$

όπου:

x_y = ύψος θλιβόμενης ζώνης κατά την έναρξη διαρροής του χάλυβα.

7.5 Οριακή κατάσταση λειτουργικότητας

Στη γραμμικά ελαστική συμπεριφορά των υλικών στηρίζονται οι έλεγχοι για την οριακή κατάσταση λειτουργικότητας, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 7.5.



Σχήμα 7.5 (πηγή 1)

Το ύψος της θλιβόμενης ζώνης x_e της ρηγματωμένης διατομής υπολογίζεται με βάσει τις παρακάτω εξισώσεις:

$$\frac{1}{2}bx_e^2 + (\alpha_s - 1)A_{s2}(x_e - d_2) = \alpha_s A_{s1}(d - x_e) + \alpha_f A_f \left[h - \left(1 + \frac{\epsilon_o}{\epsilon_c} \right) x_e \right] \quad \text{Εξ. (7-21)}$$

$$E_c \epsilon_c = \frac{M_k}{\frac{1}{2}bx_e \left(h - \frac{x_e}{3} \right) + (\alpha_s - 1)A_{s2} \frac{(x_e - d_2)}{x_e} (h - d_2) - \alpha_s A_{s1} \frac{d - x_e}{x_e} (h - d)} \quad \text{Εξ. (7-22)}$$

όπου:

$$\alpha_f = E_f / E_c$$

M_k = χαρακτηριστική ροπή κάμψης στη διατομή.

Για τους ελέγχους τάσεων του σκυροδέματος και του χάλυβα, θα πρέπει να ικανοποιείται η συνθήκη:

$$\sigma_f = E_f \{ \epsilon_c [(h - x_e)/x_e] - \epsilon_o \} \leq \eta f_{fk} \quad \text{Εξ. (7-23)}$$

όπου:

σ_f = τάση σύνθετων υλικών για μακροχρόνιο συνδυασμό δράσεων

$\eta < 1$ = μειωτικός συντελεστής, που δηλώνει μείωση αντοχής σύνθετων υλικών υπό μακροχρόνια ένταση.

7.6 Υποστυλώματα

Εδώ πρέπει να λαμβάνεται υπ' όψη η αλληλεπίδραση ροπής κάμψης – αξονικής δύναμης. Η ανάλυση της διατομής γίνεται με βάση τα παραπάνω, με βασική διαφορά τη προσθήκη ενός επιπλέον όρου, αυτού που αντιστοιχεί στην αξονική δύναμη της διατομής (N_{sd}), στο δεξί μέλος της εξίσωσης (7-5) και $N_{sd} [(h / 2) - \delta_G x]$ στο δεξί μέλος της εξίσωσης (7-8).

ΠΗΓΕΣ

1. Τριανταφύλλου Α. Χ., “Προηγμένες τεχνολογίες υλικών & κατασκευών”, εκδόσεις Πανεπιστημίου Πατρών, Πάτρα 2003
2. Σπυράκος Κ., “Ενίσχυση κατασκευών για σεισμικά φορτία”, Εκδόσεις Τ.Ε.Ε., Αθήνα 2004
3. “Structural Strengthening Systems”, Sika A.B.E.E., 2005
4. Σπάθης Σπύρος-Δρόσος Βασίλης, , “Ενίσχυση υποστυλώματος με FRP για σεισμικά φορτία”, 11ο Φοιτητικό Συνέδριο “Επισκευές Κατασκευών 2005”, Πανεπιστήμιο Πατρών 2005

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8

ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΣΕ ΔΙΑΤΜΗΣΗ

8.1 Γενικά

Για την ενίσχυση στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος σε διάτμηση με σύνθετα υλικά, χρησιμοποιούμε υφάσματα ή ελάσματα, τα οποία επικολλούμε στις εξωτερικές επιφάνειες με διεύθυνση ινών παράλληλη στις τροχιές των κύριων τάσεων. Βέβαια επειδή αυτό είναι δύσκολο, οι ίνες συνήθως έχουν διεύθυνση κάθετη στον άξονα των δομικών μελών που ενισχύουμε. Στο Σχήμα 8.1 έχουμε εφαρμογές σε δοκό και υποστύλωμα, ενώ στο Σχήμα 8.2 φαίνονται διάφορες διατάξεις ενίσχυσης σε διάτμηση.

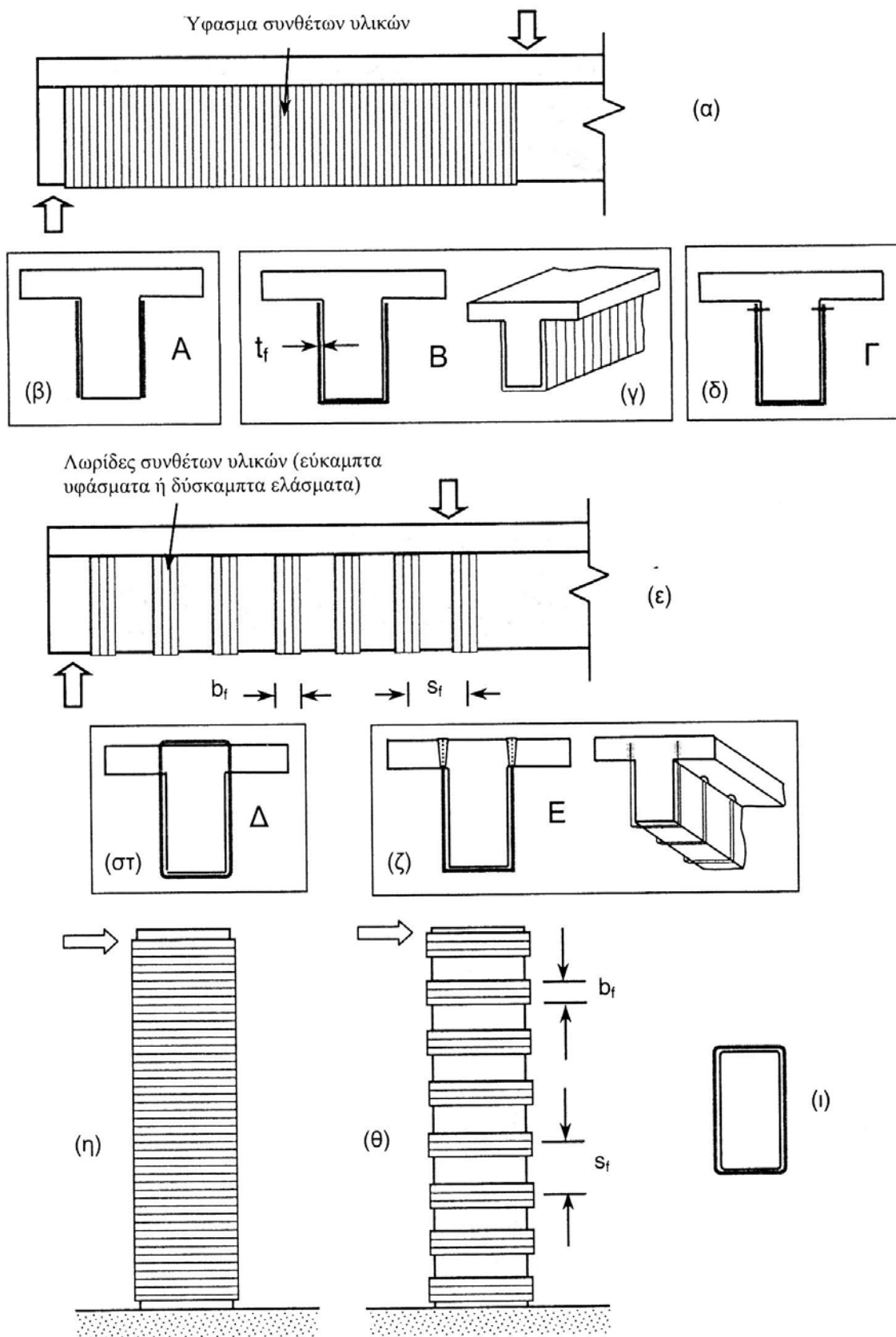


α)



β)

Σχήμα 8.1: (πηγές 4,5)
α) Ενίσχυση κρίσιμης περιοχής δοκού,
β) ενίσχυση υποστυλώματος



Σχήμα 8.2: (πηγή 1)
 Διατάξεις ενίσχυσης: α) - ζ) δοκού, η) - ι) υποστυλώματος

8.2 Ανάλυση τένουσας από τα σύνθετα υλικά

Στη διατμητική αστοχία οι ίνες που διαπερνούν μία λοξή ρωγμή, ενεργοποιούνται και παραλαμβάνουν δυνάμεις σε συνεργασία με τους εσωτερικούς συνδετήρες.

Η τένουσα δύναμη σχεδιασμού που παραλαμβάνεται από τα σύνθετα υλικά δίνεται από τη παρακάτω σχέση:

$$V_{fd} = (2 t_f b_f / s_f) d_f (\epsilon_{fe,d} E_f) (\cot\theta + \cot\alpha) \sin\alpha \quad \text{Εξ. (8-1)}$$

όπου:

t_f = πάχος λωρίδας

b_f = πλάτος λωρίδας

s_f = αποστάσεις μεταξύ λωρίδων σύνθετων υλικών

d_f = ύψος μανδύα που διαπερνάται από τη ρωγμή

θ = γωνία ρωγμής ως προς τον άξονα του μέλους

α = γωνία διεύθυνσης ινών ως προς τον άξονα του μέλους

E_f = μέτρο ελαστικότητας σύνθετων υλικών παράλληλα στη διεύθυνση των ινών

$\epsilon_{fe,d}$ = μέση τιμή κατά μήκος της ρωγμής, της παραμόρφωσης στα σύνθετα υλικά, παράλληλα στη διεύθυνση των ινών, κατά την οριακή κατάσταση αστοχίας λόγω τένουσας.

Στη περίπτωση συνεχούς υφάσματος η εξίσωση (8-1) γίνεται:

$$V_{fd} = 2 t_f d_f (\epsilon_{fe,d} E_f) (\cot\theta + \cot\alpha) \sin^2\alpha \quad \text{Εξ. (8-2)}$$

Επιπλέον τα σύνθετα υλικά συνήθως εφαρμόζονται με τις ίνες κάθετες στον άξονα του μέλους ($\alpha=90^\circ$), άρα:

$$V_{fd} = 2 t_f d_f (\epsilon_{fe,d} E_f) \cot\theta \quad \text{Εξ. (8-3)}$$

Η ενεργή παραμόρφωση ισούται με:

$$\varepsilon_{fe,d} = D_f \varepsilon_{fd,max} = (1 - 0,5d_f/0,9d) \varepsilon_{fd,max} \quad \text{Εξ. (8-4)}$$

Η παραμόρφωση $\varepsilon_{fd,max}$ στην οριακή κατάσταση αστοχίας λόγω τέμνουσας εξαρτάται από τη μορφή αστοχίας. Οι μορφές αστοχίας αναλύονται παρακάτω.

8.2.1 Θραύση σύνθετων υλικών

Αυτό συμβαίνει σε επαρκώς αγκυρωμένους μανδύες (Σχήμα 8.2 στ, ζ, ι) και ισχύει :

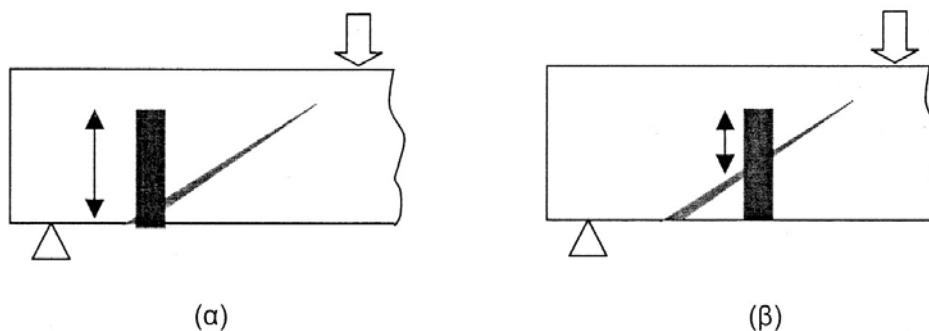
$$\varepsilon_{fd,max} = f_{fde} / E_f \quad \text{Εξ. (8-5)}$$

όπου:

f_{fde} = αντοχή σχεδιασμού (Εξ. 5-3)

8.2.2 Αποκόλληση σύνθετων υλικών

Στους μανδύες ανοιχτού τύπου (Σχήμα 8-2 β, γ) υπάρχει μικρή πιθανότητα αστοχίας με θραύση του μανδύα. Συνήθως συμβαίνει αποκόλληση των σύνθετων υλικών. Για τρίπλευρο μανδύα το καλύτερα αγκυρωμένο τμήμα σύνθετων υλικών είναι στο κάτω τμήμα (Σχήμα 8.3α), ενώ στο δίπλευρο μανδύα το μήκος αγκύρωσης είναι μέγιστο στο μέσο της ρωγμής (Σχήμα 8.3β).



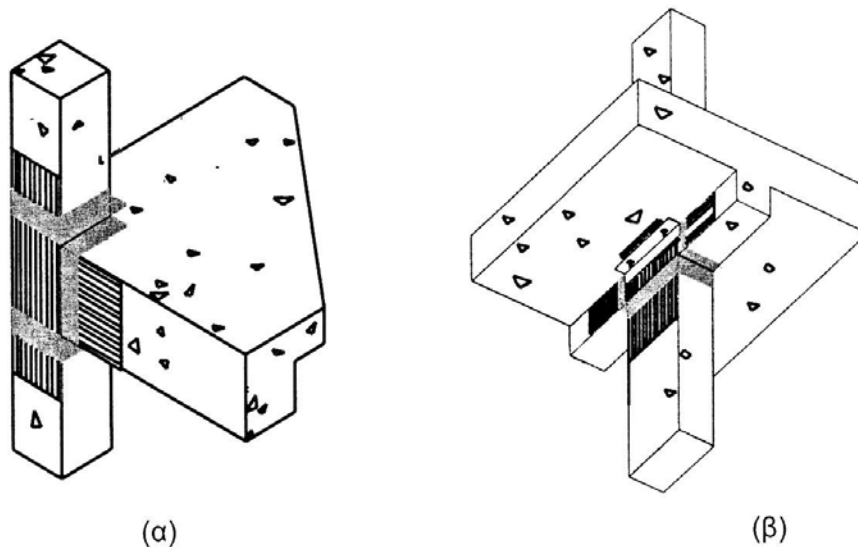
Σχήμα 8.3: (πηγή 1)

8.2.3 Πρόωρη αστοχία λόγω μεγάλου ανοίγματος λοξής ρωγμής

Μεγάλο άνοιγμα ρωγμής μπορεί να επιφέρει μείωση στους μηχανισμούς ανάληψης τέμνουσας, με αποτέλεσμα να βρεθεί το μέλος στην οριακή κατάσταση αστοχίας λόγω τέμνουσας, πριν αστοχήσουν τα σύνθετα υλικά. Για αυτό θα πρέπει $\varepsilon_{fd,max} = 0,6\%$.

8.3 Κόμβοι

Πρόσφατες μελέτες έδειξαν ότι ακόμα και μικρές ποσότητες σύνθετων υλικών καλά αγκυρωμένων έξω από τις περιοχές των κόμβων, επαρκούν για αύξηση διαμητρικής αντοχής αυτών μέχρι και 80-100%. Για να συμβεί αυτό θα πρέπει να διατάξουμε τις ίνες των υλικών παράλληλα στη διεύθυνση των μελών (Σχήμα 8.4).



Σχήμα 8.4: (πηγή 1)
Ενίσχυση κόμβων με σύνθετα υλικά σε δύο διευθύνσεις και αγκύρωση αυτών εκτός περιοχής κόμβου: α) Εξωτερικός κόμβος, β) Εσωτερικός κόμβος

ΠΗΓΕΣ

1. Τριανταφύλλου Α. Χ., “Προηγμένες τεχνολογίες υλικών & κατασκευών”, εκδόσεις Πανεπιστημίου Πατρών, Πάτρα 2003
2. Σπυράκος Κ., “Ενίσχυση κατασκευών για σεισμικά φορτία”, Εκδόσεις Τ.Ε.Ε., Αθήνα 2004

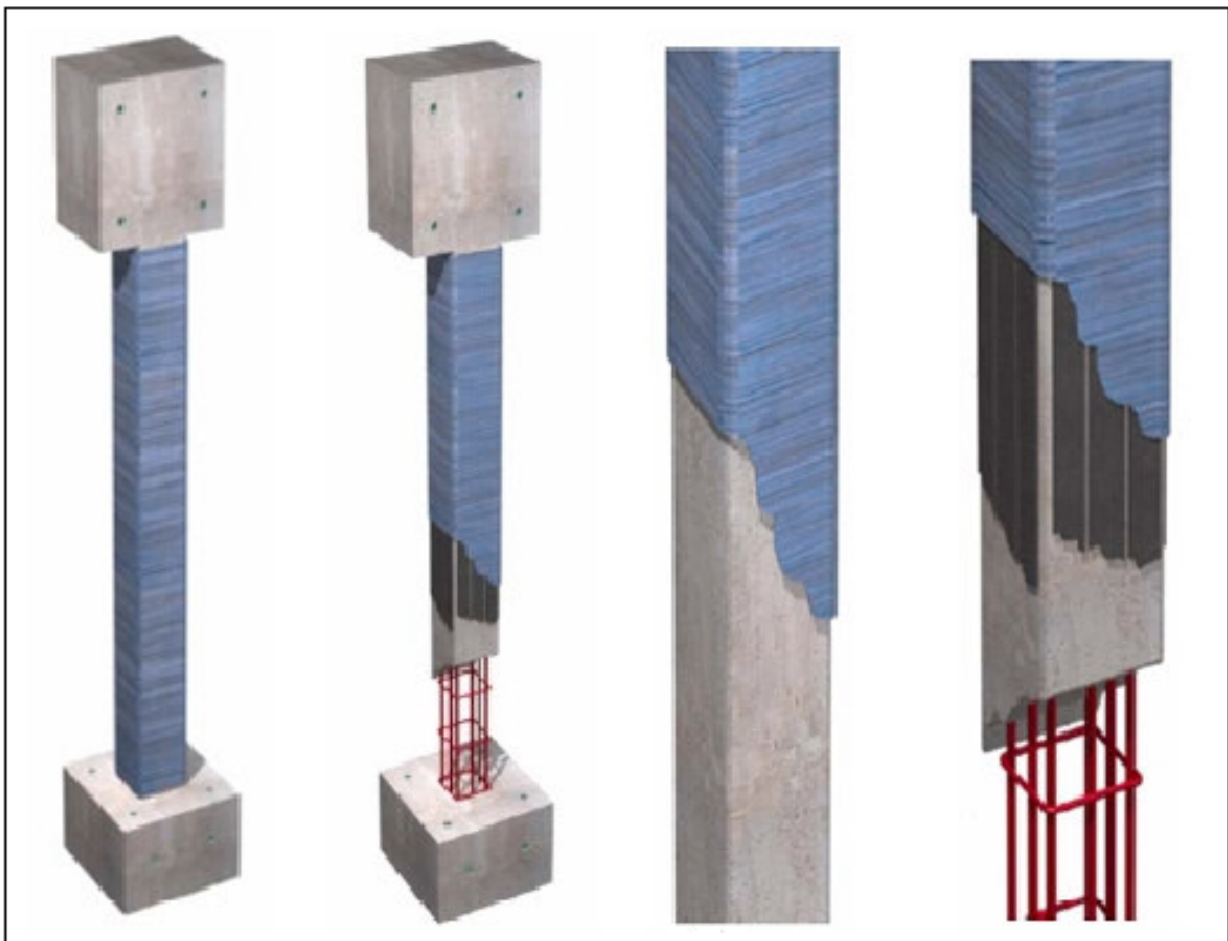
3. Σπάθης Σπύρος-Δρόσος Βασίλης, , “Ενίσχυση υποστυλώματος με FRP για σεισμικά φορτία”, 11ο Φοιτητικό Συνέδριο "Επισκευές Κατασκευών 2005", Πανεπιστήμιο Πατρών 2005
4. Κρητικού Κωνσταντούλα-Λογοθέτη Ευθυμία, “Ενίσχυση δοκών με φύλλα FRP και μεταλλικά ελάσματα”, 11ο Φοιτητικό Συνέδριο "Επισκευές Κατασκευών 2005", Πανεπιστήμιο Πατρών 2005
5. Παππά Ελένη-Ποταμού Λυδία, “Ενίσχυση υποστυλωμάτων με μανδύες από Ο.Σ. και FRP”, 11ο Φοιτητικό Συνέδριο "Επισκευές Κατασκευών 2005", Πανεπιστήμιο Πατρών 2005

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9

ΠΕΡΙΣΦΙΓΞΗ

9.1 Γενικά

Γενικά η περίσφιγξη εφαρμόζεται σε μέλη που βρίσκονται σε θλίψη, με σκοπό να ενισχυθεί η αντοχή τους, σε περιπτώσεις αντισεισμικής αναβάθμισης να αυξηθεί η πλαστιμότητα τους, να αποτραπεί πιθανός τοπικός λυγισμός των οπλισμών και να βελτιώσει τη συνάφεια σε κρίσιμες περιοχές ενώσεων των οπλισμών με μάτιση. Επίσης, αποτρέπει την ολίσθηση και την κάμψη της επιμήκους ενίσχυσης. Σε προβλήματα σεισμού, οι υπάρχουσες τεχνικές αναβάθμισης (είτε ενίσχυσης είτε μετασκευής) βασίζονται συνήθως στην αύξηση της πίεσης της περίσφιγξης, είτε της ενδεχόμενης περιοχής πλαστικής άρθρωσης, είτε ολόκληρου του μέλους. Θα πρέπει να τονιστεί ότι σε ορισμένες περιπτώσεις, η αύξηση της αντοχής



Σχήμα 9.1: (πηγή 4) Στάδια τοποθέτησης μανδύα FRP

δεν είναι τόσο σημαντική, όσο η αύξηση της πλαστιμότητας.

Η περίσφιγξη επιτυγχάνεται με τον εγκιβωτισμό του σκυροδέματος μέσω του μανδύα σύνθετων υλικών (Σχήμα 9.1). Η αποτελεσματικότητα ενός μανδύα σύνθετων υλικών στον εγκιβωτισμό του σκυροδέματος, εξαρτάται από το συνολικό πάχος του μανδύα, από την εφελκυστική αντοχή του μανδύα κατά την έννοια της περιμέτρου και από τη γεωμετρία της εγκιβωτισμένης διατομής.

9.2 Σύνθετα υλικά που χρησιμοποιούνται στην εφαρμογή της περίσφιγξης

Αυτή η τεχνική εφαρμόζεται κυρίως σε υποστυλώματα κτιρίων και βάρθρα γεφυρών. Τα σύνθετα υλικά που χρησιμοποιούνται στην εφαρμογή της περίσφιγξης μπορούν να έχουν μία από τις παρακάτω μορφές:

- Ολόσωμοι μανδύες που αποτελούνται από στρώσεις ινοπλισμένων πολυμερών και επικολλούνται εξωτερικά σε όλο το ύψος του ενισχυόμενου στοιχείου
- Μανδύες περιορισμένου ύψους (κολάρα) που αποτελούνται από μεμονωμένες λωρίδες ινοπλισμένων πολυμερών
- Προεντεταμένοι μανδύες περιορισμένου ύψους με μορφή ταινιών (πακετάρισμα)
- Ινοπλισμένα πολυμερή με μορφή σπειροειδούς σπλισμού που περιελίσσεται στην εξωτερική επιφάνεια του ενισχυόμενου στοιχείου

9.3 Κανόνες εφαρμογής της περίσφιγξης με ινοπλισμένα πολυμερή

Κάποιοι σημαντικοί κανόνες για την εφαρμογή και αποτελεσματικότητα της περίσφιγξης με σύνθετα υλικά αναφέρονται παρακάτω:

α) Απαιτείται επιμελημένη προετοιμασία της επιφάνειας που πρόκειται να γίνει επικόλληση των σύνθετων υλικών, όπως αφαίρεση των χαλαρών τμημάτων και πλήρωση των ρωγμών. Για τα εύκαμπτα υφάσματα θα πρέπει η εφαρμογή των υλικών να πραγματοποιείται, έτσι ώστε, οι ίνες να είναι απόλυτα ευθύγραμμες.

β) Για την ανάληψη των πρόσθετων εντατικών μεγεθών, τα σύνθετα υλικά δρουν μόνο ως εφελκόμενος οπλισμός, παραλαμβάνοντας δυνάμεις μόνο κατά τη διεύθυνση των ινών.

γ) Η αύξηση του αριθμού των στρώσεων του σύνθετου υλικού μετά από κάποιο όριο δεν συνεπάγεται βελτίωση της ενίσχυσης. Έχει βρεθεί ότι ο μέγιστος αριθμών στρώσεων FRP, που μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε ένα στοιχείο πρέπει να είναι μικρότερος από 20 ή αλλιώς όπως προτείνεται από τον προμηθευτή των υλικών.

δ) Χρήσιμη, επίσης, θεωρείται η δημιουργία ασυνεχειών κατά την τοποθέτηση των σύνθετων υλικών, για λόγους εξάτμισης.

ε) Στα εύκαμπτα υφάσματα, οι υπολογισμοί θα πρέπει να γίνονται βάσει της ονομαστικής διατομής των υφασμάτων και όχι του “τελειωμένου” σύνθετου υλικού, λόγω της σχετικής αβεβαιότητας ως προς το βαθμό εμποτισμού της ρητίνης, η οποία εφαρμόζεται επί τόπου.

στ) Επισημαίνεται ότι για υποστυλώματα με ορθογωνικές διατομές, στα οποία ο λόγος των οριζοντίων διαστάσεων είναι μεγαλύτερος από 1.5, η δράση του εγκιβωτισμού είναι εξαιρετικά περιορισμένη.

9.4 Μοντέλο τάσης-παραμόρφωσης περισφιγμένου σκυροδέματος με σύνθετα υλικά

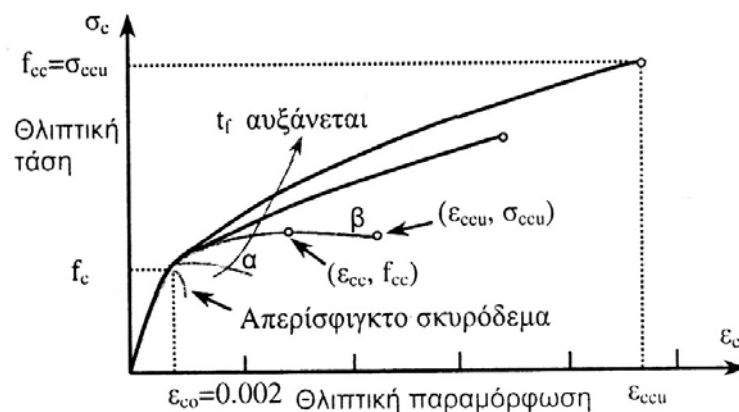
Υπάρχουν αρκετές εξισώσεις, οι οποίες περιγράφουν τις σχέσεις τάσης-παραμόρφωσης για το σκυρόδεμα κάτω πολυαξονικές συνθήκες φόρτισης. Το πρότυπο του Mander, που βασίζεται σε εκείνο του Popovics (1973), στο οποίο η μέγιστη τάση υπολογίζεται βάση της τάσης λόγω περισφιγξης, έχει αποδειχθεί ως η πιο αποτελεσματική όταν εξετάζεται η μονοαξονική περίπτωση. Πρόσφατα οι μελετητές έχουν κάνει προσπάθειες να επεκτείνουν το μοντέλο αυτό για να προβλέψουν την συμπεριφορά του σκυροδέματος λαμβάνοντας υπ’όψη την περισφιγξη που εφαρμόζεται από τα σύνθετα υλικά. Ένα σημαντικό εμπόδιο στο πρότυπο Popovics- Mander, είναι ότι βασίζεται σε μία σταθερή τιμή της πίεσης περισφιγξης κατά τη διάρκεια της φόρτισης. Στην πραγματικότητα, η παθητική περισφιγξη με ινοπλισμένα πολυμερή, αυξάνει καθώς το σκυρόδεμα επεκτείνεται πλευρικά, και η τιμή της εξαρτάται από το νόμο τάσης – παραμόρφωσης της τεχνικής περισφιγξης, που

χρησιμοποιείται. Στην περίπτωση περίσφιξης με συνδετήρες από χάλυβα, η υπόθεση σταθερής πίεσης περίσφιξης είναι ρεαλιστική όταν ο χάλυβας διαρρεύσει. Και για το λόγο αυτό το μοντέλο του Mander αντιπροσωπεύει σωστά την συμπεριφορά του σκυροδέματος περισφιγμένου με χάλυβα (εκτός από την αρχική φάση όταν ο χάλυβας συμπεριφέρεται ακόμα ελαστικά). Αντίθετα, το FRP είναι ελαστικό μέχρι την αστοχία του, και κατόπιν η πίεση που προέρχεται από το εσωτερικό συνεχώς αυξάνει, και έτσι η υπόθεση αυτή δεν είναι κατάλληλη.

Η σχέση θλιπτικής τάσης – παραμόρφωσης για περισφιγμένο με μανδύα σύνθετων υλικών σκυρόδεμα φαίνεται στο σχήμα 9.2.

Ως συμπεράσματα πειραματικών αποτελεσμάτων μπορούν να διατυπωθούν οι παρακάτω παρατηρήσεις:

- Η καμπύλη τάσης – παραμόρφωσης είναι περίπου διγραμμική, με αλλαγή κλίσης στη παραμόρφωση ($\epsilon_{co} \approx 0,002$) που αντιστοιχεί στην αντοχή του απερίσφιγκτου σκυροδέματος (f_c)
- Μανδύες εξαιρετικά μικρού πάχους αυξάνουν μόνο τη μέγιστη παραμόρφωση ϵ_{ccu} (καμπύλη α, σχήμα 9.2)
- Για μανδύες σχετικά μικρού πάχους η αντοχή του περισφιγμένου σκυροδέματος f_{cc} αντιστοιχεί σε παραμόρφωση ϵ_{cc} μικρότερη από τη μέγιστη (ϵ_{ccu}) (καμπύλη β, σχήμα 9.2)
- Για δεδομένο τύπο σύνθετων υλικών η αντοχή f_{cc} και η μέγιστη



Σχήμα 9.2: (πηγή 1) Καμπύλες θλιπτικής τάσης – παραμόρφωσης για σκυρόδεμα περισφιγμένο με σύνθετα υλικά

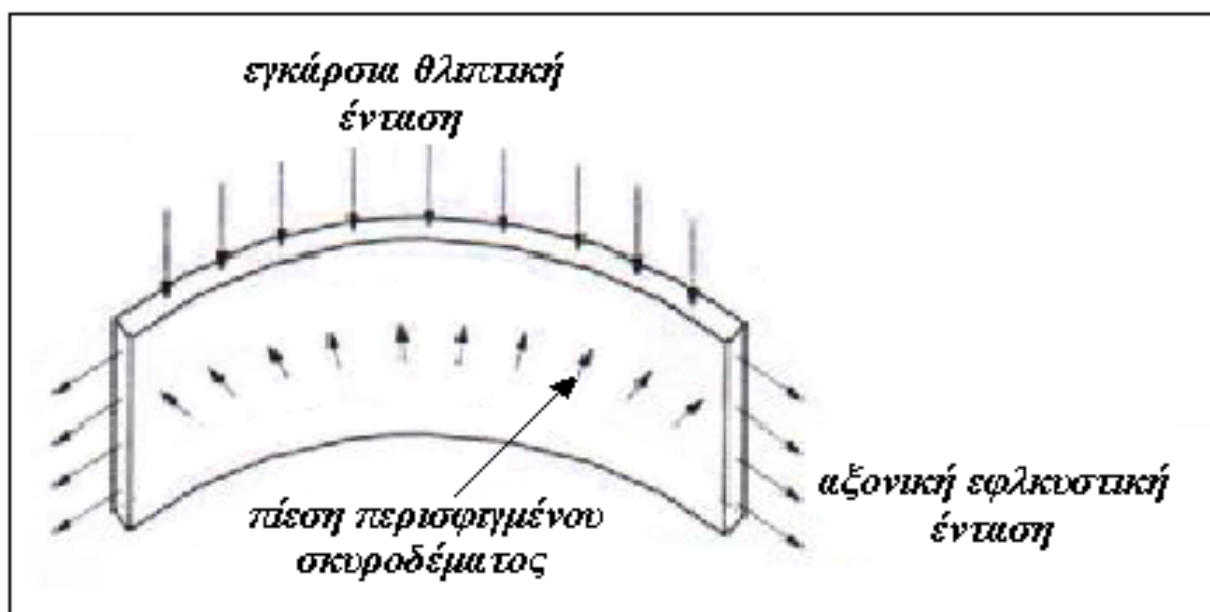
παραμόρφωση ϵ_{ccu} του περισφιγμένου σκυροδέματος αυξάνονται με το πάχος του μανδύα

- Για μανδύες ίσου πάχους αλλά διαφορετικού τύπου ινών (π.χ. άνθρακας, γυαλί) η αντοχή f_{cc} αυξάνεται με την αντοχή του μανδύα f_{fde} , ενώ η μέγιστη παραμόρφωση του σκυροδέματος ϵ_{ccu} αυξάνεται με την αντοχή του μανδύα f_{fde} αλλά κυρίως με τη μέγιστη παραμόρφωση του, $\epsilon_{fud,e}$
- Για μανδύες ίσης δυστένειας, η αντοχή f_{cc} αυξάνεται με τη μέγιστη παραμόρφωση του μανδύα $\epsilon_{fud,e}$

9.5 Μέγιστη δραστική περιφερειακή παραμόρφωση

Η μέγιστη αντοχή για το περισφιγμένο σκυρόδεμα σχετίζεται άμεσα με την παραμόρφωση αστοχίας της ενισχυτικής επένδυσης FRP στο περισφιγμένο στοιχείο. Πειραματικές αποδείξεις δείχνουν ότι αυτή η περιφερειακή παραμόρφωση κατά την αστοχία συνήθως συμβαίνει σε παραμορφώσεις μικρότερες από την μέγιστη εφελκυστική παραμόρφωση ϵ_{fu} , η οποία υπολογίζεται εργαστηριακά σε μία επίπεδη επιφάνεια FRP. Η μείωση αυτή οφείλεται σε ποικίλους λόγους :

1) Στην τριαξονική κατάσταση της τάσης στην ενισχυτική επένδυση. Αυτό φαίνεται και από το Σχήμα 9.3, όπου εισάγεται η ιδέα της σύνθετης δράσης, η



Σχήμα 9.3: (πηγή 3) Τριαξονική κατάσταση τάσης σε μανδύα FRP

οποία δηλώνει την ικανότητα του μανδύα από FRP, να παρέχει εγκάρσια περίσφιγξη και ταυτόχρονα, ικανότητα αντοχής σε φορτίο κατά τον επιμήκη άξονα. Η μείωση της εφελκυστικής παραμόρφωσης εξαρτάται από την κατανομή των ινών και των χαρακτηριστικών συνδέσεων συνάφειας, τα οποία με την σειρά τους εξαρτώνται από ένα μεγάλο αριθμό παραγόντων (όπως είναι η ακαμψία του σύνθετου υλικού και οι συνθήκες προετοιμασίας της επιφάνειας). Στην περίπτωση όπου δεν συμβαίνει σύνθετη δράση, η επένδυση υπόκειται σε εγκάρσιες παραμορφώσεις και για το λόγο αυτό αστοχεί λόγω εφελκυσμού, εξαιτίας είτε της θραύσης των ινών είτε του διαχωρισμού σε στρώματα μεταξύ των συνδέσεων, με παραμόρφωση ελαφρά μικρότερη από την ϵ_{fu} . Στην περίπτωση της σύνθετης δράσης, η επένδυση υπόκειται ταυτόχρονα σε εγκάρσιες και επιμήκειες παραμορφώσεις. Η απόλυτη παραμόρφωση και τάση τότε ελαττώνονται, με αποτέλεσμα την ενδεχόμενη ανάπτυξη κάμψης και διαχωρισμού της σε στρώματα. Και για το λόγο αυτό, αστοχία του στοιχείου συμβαίνει ακόμα και σε μικρότερες παραμορφώσεις από ότι στην περίπτωση της μη σύνθετης δράσης.

2) Στην ποιότητα της εκτέλεσης. Αναφέρεται, στην περίπτωση όπου οι ίνες είναι τοποθετημένες με μη αποτελεσματικό τρόπο εξαιτίας των κενών ή της ακατάλληλης προετοιμασίας της επιφάνειας. Τότε ένα μέρος από την περιφερειακή παραμόρφωση χρησιμοποιείται για να τεντώσει τις ίνες. Επίσης, οι ίνες μπορούν να καταστραφούν από άκρα που δεν έχουν στρογγυλευτεί σωστά ή από τοπικές προεξοχές.

3) Στο καμπύλο σχήμα της ενισχυτικής επένδυσης, ειδικότερα σε γωνίες με χαμηλές ακτίνες

4) Σε επιδράσεις μεγέθους όταν εφαρμόζονται πολλαπλά στρώματα.

9.6 Πλευρική πίεση περίσφιγξης

Για μη αξονική φόρτιση κυλινδρικού στοιχείου, που βρίσκεται περισφιγμένο είτε με κλειστούς συνδετήρες, είτε με σπειροειδή επένδυση, η μέγιστη πίεση περίσφιγξης, f_i , υπολογίζεται σαν συνάρτηση του εγκάρσιου ογκομετρικού ποσοστού συνδετήρων ρ_{st} , και της τάσης διαρροής, f_y :

$$f_l = \frac{1}{2} K_e \rho_{st} f_y, \quad \text{όπου} \quad \rho_{st} = \frac{4 \cdot A_{st}}{s \cdot d_s} \quad \text{Εξ. (9-1)}$$

όπου K_e ο συντελεστής επίδρασης, όπου s η απόσταση μεταξύ των συνδετήρων και d_s η διάμετρος των συνδετήρων.

Για την περίπτωση κυλινδρικών δοκιμίων από σκυρόδεμα, περισφιγμένων με μανδύα ινοπλισμένου πολυμερούς, με ίνες τοποθετημένες περιφερειακά, που καλύπτουν ολόκληρη την επιφάνεια του σκυροδέματος, η πίεση περίσφιγξης σ_i , μπορεί να αξιολογηθεί σε αναλογία με την εξίσωση (9-1) όπως:

$$\sigma_i = \frac{1}{2} \rho_j \sigma_j = \frac{1}{2} \rho_j E_j \varepsilon_j, \quad \text{όπου} \quad \rho_j = \frac{4t_j}{d_j} \quad \text{Εξ. (9-2)}$$

όπου ρ_j = το ογκομετρικό ποσοστό του οπλισμού FRP, σ_j = η τάση στην επένδυση FRP, E_j = το μέτρο ελαστικότητας του υλικού σύνθεσης της επένδυσης, ε_j = η περιφερειακή παραμόρφωση σε ένα μανδύα FRP (θεωρούμενο ως ίσο με την πλευρική παραμόρφωση στο σκυρόδεμα), t_j = το πάχος της επένδυσης FRP και d_j = η διάμετρος της επένδυσης FRP. Θα πρέπει να σημειώσουμε ότι $k_e=1$ αφού ο κύλινδρος είναι ολοκληρωτικά περιβλημένος. Η πίεση περίσφιγξης που εξασκείται από τον μανδύα σύνθετων υλικών υπολογίζεται βάση της τάσης $\sigma_j = E_j \varepsilon_j \leq f_j = E_j \varepsilon_{ju}$, ενώ η μέγιστη πίεση περίσφιγξης f_l δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$f_l = \frac{1}{2} \rho_j E_j \varepsilon_{ju}, \quad \text{Εξ. (9-3)}$$

9.7 Επίδραση μερικής επένδυσης

Στην περίπτωση που το σκυρόδεμα είναι μερικώς περισφιγμένο, η αποτελεσματικότητα της περίσφιγξης δεν είναι τόσο μεγάλη, καθώς υπάρχουν τόσο ενισχυμένη όσο και μη ενισχυμένη ζώνη. Σ' αυτήν την περίπτωση η πίεση περίσφιγξης υπολογίζεται από την εξίσωση (8-1) εισάγοντας ένα συντελεστή αποδοτικότητας της περίσφιγξης, ($K_e \leq 1$), στον τύπο για την ακαμψία της FRP-ενίσχυσης:

$$K_{\text{conf}} = \frac{1}{2} K_e \rho_j E_j \quad \text{Εξ. (9-4)}$$

Ο συντελεστής αποδοτικότητας χρησιμοποιείται γιατί θεωρείται ότι η περίσφιγξη δεν είναι το ίδιο αποτελεσματική σε όλη τη διατομή, μεταξύ των περισφιγμένων ζωνών. Η μη ενισχυμένη περιοχή περιγράφεται, από μία παραβολή με αρχική κλίση 45° . Επομένως, μεταξύ δύο διαδοχικών ζωνών ενίσχυσης, η περιοχή επίδρασης της περίσφιγξης δίνεται από τον τύπο:

$$A_e = \frac{\pi}{4} \left(D - \frac{s'}{2 \cdot D} \right)^2 \quad \text{Εξ. (9-5)}$$

όπου $s' = s - b_f$ είναι το καθαρό άνοιγμα μεταξύ των διαδοχικών ζωνών ενίσχυσης. Στη συνέχεια, υπολογίζεται ο συντελεστής αποδοτικότητας της περίσφιγξης K_e , που βρίσκεται αφού υπολογιστεί πρώτα το κλάσμα A_e/A_c , όπου $A_c = A_g - A_s$.

$$K_e = \frac{\left(1 - \frac{s'}{2 \cdot D} \right)^2}{1 - \rho_{sg}} \approx \left(1 - \frac{s'}{2 \cdot D} \right)^2 \quad \text{Εξ. (9-6)}$$

όπου: $\rho_{sg} = A_s/A_g$, είναι ο λόγος ενίσχυσης, ο λόγος δηλαδή του εμβαδού οπλισμού χάλυβα (συνδετήρες) προς το εμβαδό της διατομής.

9.8 Επίδραση του προσανατολισμού των ινών

Όταν οι ίνες εφαρμόζονται με ελικοειδή διάταξη, η περίσφιγξη του υποστρώματος είναι λιγότερο αποτελεσματική στην παρεμπόδιση διόγκωσης του σκυροδέματος. Όμοια, με την προηγούμενη παράγραφο, εισάγεται ένας μειωτικός συντελεστής. Υποθέτοντας ομοιόμορφη εφελκυστική δύναμη N_f στο FRP, η πίεση περίσφιγξης δίνεται από τον τύπο:

$$\sigma_{l,h} = \frac{N_f}{b_f \cdot R} \quad \text{Εξ. (9-7)}$$

όπου R η καμπυλότητα της ελικοειδούς ενίσχυσης

$$R \approx \frac{k^2 + r^2}{r} \quad \text{Εξ. (9-8)}$$

με $k = r/2\pi$, r είναι το βήμα της έλικας και r η ακτίνα της.

Με ένα παρόμοιο τρόπο, εξάγεται ότι η πίεση περίσφιγξης που εξασκείται από μία κυκλική FRP ενίσχυση είναι:

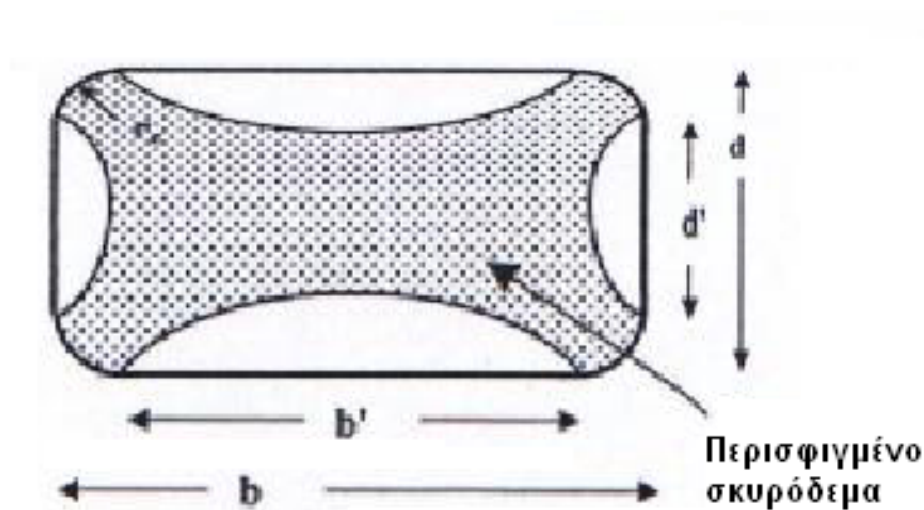
$$\sigma_{l,e} = \frac{N_f}{b_f \cdot r} \quad \text{Εξ. (9-9)}$$

Βάσει των εξισώσεων (9-7)-(9-9), ο συντελεστής αποτελεσματικότητας της περίσφιγξης K_e , μπορεί να οριστεί ως εξής:

$$K_e = \frac{\sigma_{l,h}}{\sigma_{l,e}} = \left[1 + \left(\frac{p}{\pi \cdot D} \right)^2 \right]^{-1} \quad \text{Εξ. (9-10)}$$

9.9. Επίδραση του σχήματος του υποστυλώματος

Η μορφή του σχήματος του υποστυλώματος έχει άμεση επίδραση στην αποτελεσματικότητα της περίσφιγξης. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η περίπτωση ορθογωνικών υποστυλωμάτων, στα οποία η εφαρμογή της τεχνικής ενίσχυσης είναι λιγότερο αποδοτική απ' ό,τι στα κυκλικά. Στα ορθογωνικά υποστυλώματα απαιτείται πριν την ενίσχυση κατάλληλη



Σχήμα 9.4: (πηγή 3) Αποτελεσματικά περισφιγμένος πυρήνας για μη κυκλικές διατομές

εξομάλυνση των γωνιών, έτσι ώστε να αποκτήσουν καμπυλότητα.

Για τετραγωνικά ή ορθογωνικά υποστυλώματα, λοιπόν, ενισχυμένα με FRP (Σχήμα 9.4), με στρογγυλεμένες γωνίες ακτίνας r_c , θεωρούμε πάλι ότι ισχύει η υπόθεση της παραβολικής δράσης πλήρους περίσφιγξης στην διατομή του υποστυλώματος. Αντίθετα, με μία κυκλική διατομή, η οποία είναι

ολοκληρωτικά περισφιγμένη, στην περίπτωση ορθογωνικής διατομής, ένα τμήμα της παραμένει μη περισφιγμένο.

Παίρνοντας το σύνολο των διάφορων παραβολών, η συνολική περιοχή του μη περισφιγμένου σκυροδέματος δίνεται από το τύπο :

$$A_u = \sum_{i=1}^4 \frac{(w_i')^2}{6} = \frac{b'^2 + d'^2}{3} \quad \text{Εξ. (9-11)}$$

όπου w_i' είναι η καθαρή απόσταση μεταξύ των στρογγυλεμένων γωνιών και $b' = b - 2 r_c$. Λαμβάνοντας υπ'όψη το κλάσμα $(A_c - A_u)/A_c$, ο συντελεστής αποτελεσματικότητας της περισφιγξης K_e , δίνεται από το τύπο :

$$K_e = 1 - \frac{b'^2 + d'^2}{3 \cdot A_g \cdot (1 - \rho_{sg})} \quad \text{Εξ. (9-12)}$$

Όμοια με την εξίσωση (9-1) για κυκλική διατομή, οι πιέσεις περισφιγξης που προκαλούνται από την επένδυση FRP σε μία τετραγωνική ή ορθογωνική διατομή δίνονται από τις σχέσεις :

$$\begin{aligned} \sigma_{lx} &= K_{confx} \varepsilon_{ju} & \text{όπου : } K_{confx} &= \rho_{jx} K_e E_j \\ \sigma_{ly} &= K_{confy} \varepsilon_{ju} & \text{όπου : } K_{confy} &= \rho_{jy} K_e E_j \end{aligned} \quad \text{Εξ. (9-13)}$$

όπου τα κλάσματα ρ_{jx} και ρ_{jy} , αποτελούν το ογκομετρικό ποσοστό οπλισμού της εγκάρσιας περισφικτικής ενίσχυσης στην κατεύθυνση x και y, και δίνονται από:

$$\rho_{jx} = \frac{2 \cdot b_f \cdot t_j}{s \cdot d} \quad \text{και : } \rho_{jy} = \frac{2 \cdot b_f \cdot t_j}{s \cdot b} \quad \text{Εξ. (9-14)}$$

Τα παραπάνω εφαρμόζονται σε περιπτώσεις όπου η διατομή δεν είναι δυνατόν να γίνει κυκλική. Στην περίπτωση των ορθογωνικών υποστυλωμάτων, που οι γωνίες τους έχουν διαδοχικά στρογγυλοποιηθεί, ο μανδύας έχει μία μεταβαλλόμενη ακτίνα καμπυλότητας σε διαφορετικές κατευθύνσεις φόρτισης. Έτσι, λοιπόν, αν πάρουμε τις μέσες ακτίνες των κύριων καμπύλων, είναι δυνατόν να εξαχθεί μία ισοδύναμη διάμετρος κυκλικού υποστυλώματος. Στις περιπτώσεις αυτές, η δραστική πλευρική πίεση περισφιγξης, $\sigma_{l,eff}$ που εξασκείται από το μέσο περισφιγξης, εξισώνεται με την πίεση περισφιγξης σ_l και με τον ίδιο τρόπο, η μέγιστη πίεση περισφιγξης $f_{l,eff}$, εξισώνεται με την f_l .

9.10 Ευνοϊκή δράση της περίσφιγξης

9.10.1 Πλαστιμότητα

Κύριο μέλημα μας, όσον αφορά το τομέα των αντισεισμικών ενισχύσεων, είναι η αύξηση της πλαστιμότητας, που εκφράζεται μέσω του δείκτη πλαστιμότητας μετατοπίσεων μ_{Δ} (ή γωνιών στροφής χορδής μ_{θ}):

$$\mu_{\Delta} = \Delta_u / \Delta_y (= \mu_{\theta} = \theta_u / \theta_y) \quad \text{Εξ. (9-15)}$$

όπου Δ_u η μετατόπιση κατά την αστοχία του μέλους και Δ_y η μετατόπιση κατά τη διαρροή του διαμήκους οπλισμού (οι αντίστοιχες γωνίες στροφής χορδής είναι θ_u και θ_y).

Αύξηση του δείκτη πλαστιμότητας μ_{Δ} μπορεί να επιτευχθεί μέσω της κατασκευής μανδύα σύνθετων υλικών στις κρίσιμες περιοχές. Δηλαδή σε περιοχές όπου μπορεί να επέλθει σημαντική παραμόρφωση στο χάλυβα και στο σκυρόδεμα και κατά συνέπεια εμφάνιση μεγάλης καμπυλότητας. Άρα μέσω της περίσφιγξης επιτυγχάνουμε αύξηση της μέγιστης παραμόρφωσης του σκυροδέματος, επομένως αύξηση της πλαστιμότητας.

Για την επίτευξη δεδομένης πλαστιμότητας, ο σχεδιασμός του μανδύα πρέπει να γίνει με βάση τη συσχέτιση του μ_{Δ} με τα χαρακτηριστικά του μανδύα. Αυτό γίνεται ακολουθώντας την εξής διαδικασία:

1. Εκτίμηση του απαιτούμενου δείκτη πλαστιμότητας μετατοπίσεων μ_{Δ} βάσει της μετατόπισης κατά τη διαρροή Δ_y και της επιθυμητής μετατόπισης κατά την αστοχία Δ_u
2. Υπολογισμός του μήκους πλαστικής άρθρωσης L_p βάσει της γεωμετρίας του μέλους και των χαρακτηριστικών των διαμήκων ράβδων οπλισμού

$$L_p = 0,08L_s + 0,022f_y d_b \geq 0,044f_y d_b \quad \text{Εξ. (9-16)}$$

όπου L_s = διαμητικό μήκος, f_y = τάση διαρροής του διαμήκους οπλισμού, 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, μ_ϕ ($= \phi_u / \phi_y$) από τη σχέση:

$$\mu_\Delta = 1 + 3(\mu_\phi - 1)L_p / L_s(1 - 0,5 L_p / L_s) \quad \text{Εξ. (9-17)}$$

4. Υπολογισμός της καμπυλότητας της διατομής κατά τη διαρροή ϕ_y . Το βήμα αυτό προϋποθέτει ανάλυση της διατομής
5. Υπολογισμός της καμπυλότητας της διατομής κατά την αστοχία $\phi_u = \mu_\phi \phi_y$
6. Υπολογισμός της μέγιστης παραμόρφωσης στο σκυρόδεμα κατά την αστοχία $\epsilon_{ccud} = \phi_u x_u$, όπου x_u = ύψος θλιβόμενης ζώνης κατά την αστοχία
7. Εφαρμογή του αναλυτικού προσομοιώματος περίσφιγξης για τη συσχέτιση του ϵ_{ccud} με τα χαρακτηριστικά του μανδύα.

Η συσχέτιση των χαρακτηριστικών του μανδύα με τη πλαστιμότητα (μ_Δ) μπορεί εναλλακτικά να γίνει και βάσει της παρακάτω σχέσης:

$$\mu_\Delta = 1,3 + 12,4(\sigma_{lud} / f_{cd} - 0,1) \geq 1,3 \quad \text{Εξ. (9-18)}$$

όπου σ_{lud} η τάση περίσφιγξης στο σκυρόδεμα κατά την οριακή κατάσταση αστοχίας.

9.10.2 Λυγισμός ράβδων οπλισμού

Σε υποστυλώματα όπου ο λόγος $M/Vd > 4$ (M = η μέγιστη δρώσα ροπή κάμψης, V = η μέγιστη δρώσα τέμνουσα και d = 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 μια κρίσιμη τιμή, τότε υπάρχει ενδεχόμενο λυγισμού των διαμήκων ράβδων λόγω υψηλής τιμής αξονικού φορτίου.

Σημαντική αύξηση του χρόνου εμφάνισης του λυγισμού των ράβδων οπλισμού επιτυγχάνουμε όταν ο μανδύας σύνθετων υλικών που επιβάλλει τάσεις περίσφιξης στο υποστύλωμα έχει πάχος τουλάχιστον:

$$t_f = 0,45 n f_s^2 d / 4 E_{ds} E_f K_e \quad \text{Εξ. (9-19)}$$

όπου n ο συνολικός αριθμός των διαμήκων ράβδων στη διατομή, f_s τάση στο διαμήκη οπλισμό για παραμόρφωση ίση με 0,04 και E_{ds} το “διπλό” μέτρο ελαστικότητας του διαμήκους οπλισμού που δίνεται από τη σχέση:

$$E_{ds} = 4 E_s E_i / (\sqrt{E_s} + \sqrt{E_i})^2 \quad \text{Εξ. (9-20)}$$

όπου E_s τέμνον μέτρο ελαστικότητας του διαμήκους χάλυβα από τη τάση f_s στη τάση f_u και E_i το αρχικό μέτρο ελαστικότητας του διαμήκους χάλυβα.

Παρατήρηση: στην εξίσωση (9-19) η ποσότητα $0,45f_s^2/E_{ds}$ μπορεί να ληφθεί προσεγγιστικά ίση με 40 Mpa. Άρα:

$$t_f = 10 n d / E_f K_e \quad \text{Εξ. (9-21)}$$

9.10.3 Ματίσεις

Πολλά προβλήματα στην αντισεισμική συμπεριφορά της κατασκευής δημιουργούνται λόγω του μηχανισμού συνάφειας μεταξύ των ράβδων οπλισμού και σκυροδέματος σε περιοχές ματίσεων. Συνήθη αίτια αστοχίας σε περιοχές ματίσεων είναι το μικρό μήκος μάτισης ή η χρήση λείων ράβδων. Η δράση της περίσφιξης που παρέχουν οι μανδύες σύνθετων υλικών σε αυτές τις περιοχές είναι πολύ ευνοϊκή.

Η δύναμη F που μπορεί να αναπτυχθεί σε ράβδο οπλισμού εμβαδού A_b στη περιοχή μάτισης μήκους L_s εξισορροπείται από τη διατμητική τάση συνάφειας τ_b που αναπτύσσεται στη περιφέρεια της ράβδου. Απουσία εγκάρσιου οπλισμού στο μήκος μάτισης, η εγκάρσια τάση αναλαμβάνεται μόνο από την εφελκυστική αντοχή της επικάλυψης του οπλισμού αναπτύσσοντας

ρωγμή διαδρομής ρ_c (Σχήμα 9.5β,γ). Η δύναμη F που αναπτύσσεται σε αυτή τη περίπτωση είναι:

$$F = \rho_c (\mu f_{ctm}) L_s \quad \text{Εξ. (9-22)}$$

Για το σχεδιασμό μανδύα σύνθετων υλικών σε περιοχές ματίσεων αρκεί να ισχύει:

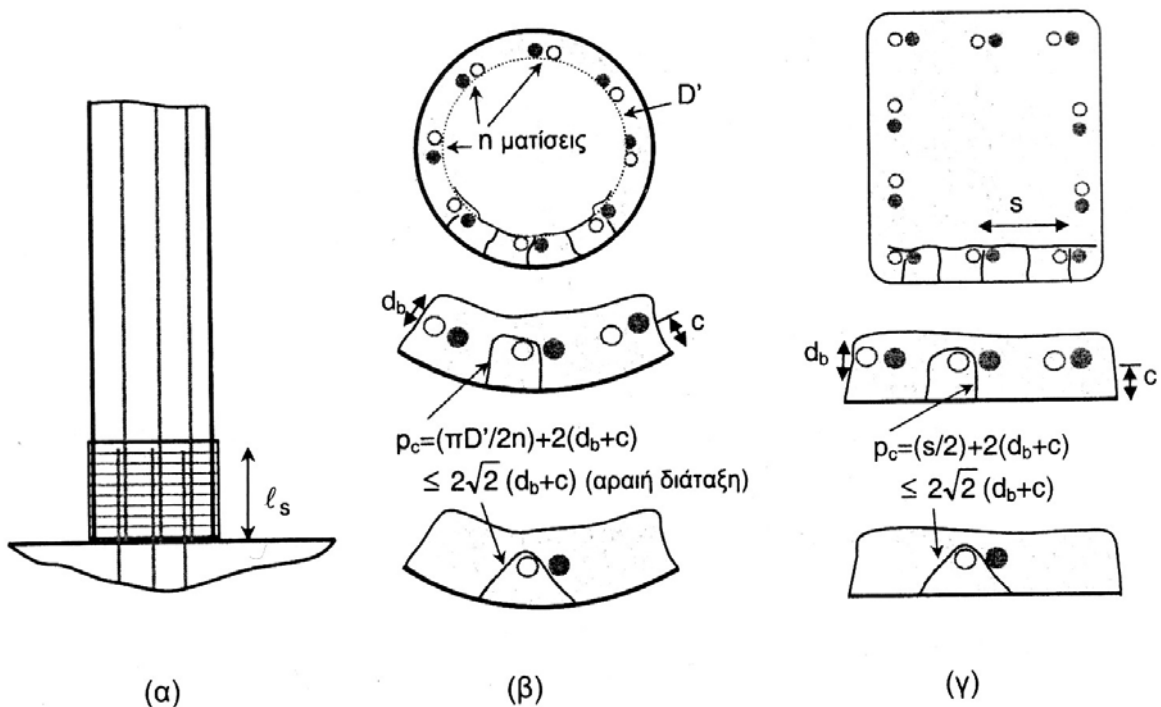
$$A_b f_{yd} = \rho_c \mu \sigma_L L_s \quad \text{Εξ. (9-23)}$$

όπου σ_L η τάση περίσφιγξης που παρέχει ο μανδύας των σύνθετων υλικών κατά την οριακή κατάσταση αστοχίας ($\sigma_L = \sigma_{Lud}$).

Το απαιτούμενο πάχος μανδύα ώστε να αποφεύγεται η απώλεια συνάφειας σε περιοχές ματίσεων δίνεται από το τύπο:

$$t_f = b d A_b f_{yd} / (b + d) \rho_c \mu f_{tde} L_s \quad \text{Εξ. (9-24)}$$

όπου A_b εμβαδόν διατομής μιας εφελκυσμένης ράβδου και ρ_c η διαδρομή ρηγμάτωσης που αντιστοιχεί στη ράβδο.



Σχήμα 9.5: (πηγή 1) α) Περίσφιγξη υποστυλώματος σε περιοχή μάτισης, β) Ανάπτυξη ρωγμών στη εφελκυσμένη περιοχή κυκλικού υποστυλώματος λόγω αστοχίας συνάφειας και ορισμός της κρίσιμης διαδρομής ρηγμάτωσης, γ) ομοίως για ορθογωνικά υποστυλώματα

Για την εξασφάλιση της συνάφειας μεταξύ ράβδου οπλισμού και σκυροδέματος θα πρέπει η εγκάρσια παραμόρφωση να μην ξεπερνά μια κρίσιμη τιμή γύρω στο 0,001 – 0,002. Άρα η ενεργή τάση σχεδιασμού των σύνθετων υλικών θα πρέπει να είναι:

$$f_{fde} \leq 0,0015 E_f$$

Εξ. (9-25)

ΠΗΓΕΣ

1. Σπυράκος Κ., “Ενίσχυση κατασκευών για σεισμικά φορτία”, Εκδόσεις Τ.Ε.Ε., Αθήνα 2004
2. Τριανταφύλλου Α. Χ., “Ενισχύσεις Κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος με σύνθετα υλικά”, εκδόσεις Πανεπιστημίου Πατρών, 2^η έκδοση, Πάτρα 2004
3. Βρυώνης Ανδρέας-Δημόπουλος Γεώργιος, “Περίσφιγξη υποστυλώματος Ο.Σ. με σύνθετα υλικά”, 8^ο Φοιτητικό συνέδριο “Επισκευές κατασκευών 2002”, Πανεπιστήμιο Πατρών 2002
4. Γερεουδάκη Αντωνία-Χαλκιαδάκης Γεώργιος, “Μανδύες ως μέσο επισκευής-ενίσχυσης υποστυλωμάτων”, 11^ο Φοιτητικό συνέδριο “Επισκευές κατασκευών 2005”, Πανεπιστήμιο Πατρών 2005
5. Τριανταφύλλου Α. Χ., “Προηγμένες τεχνολογίες υλικών & κατασκευών”, εκδόσεις Πανεπιστημίου Πατρών, Πάτρα 2003

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10

ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΕΣ ΕΝΙΣΧΥΣΕΙΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΩΝ ΠΟΛΥΜΕΡΩΝ

10.1 Ενισχύσεις με σύνθετα υλικά στη Θεσσαλονίκη

Όπως προαναφέρθηκε, το επιστημονικό και τεχνικό δυναμικό της Θεσσαλονίκης υπήρξε πρωτοπόρο στη μελέτη και εφαρμογή των σύνθετων υλικών σε έργα προσεισμικής ενίσχυσης (seismic retrofit) κατασκευών. Οι ενισχυμένες με σύνθετα υλικά κατασκευές καλύπτουν χρονικά μία ευρεία περίοδο της κατασκευαστικής ιστορίας της πόλης. Η ενότητα αυτή παρουσιάζει έναν κατάλογο των σημαντικότερων έργων στα οποία εφαρμόστηκαν σύνθετα υλικά και περιλαμβάνει αναλυτικότερη αναφορά σε ορισμένα από τα έργα αυτά με τεχνικές λεπτομέρειες και αναφορές στα ιδιαίτερα προβλήματα και τις ιδιομορφίες κάθε έργου.

Τα σημαντικότερα έργα στα οποία εφαρμόστηκαν σύνθετα υλικά στη Θεσσαλονίκη παρουσιάζονται κατά χρονολογική σειρά στις επόμενες παραγράφους. Τα έργα εκτελέστηκαν από την εταιρεία εξειδικευμένων αντισεισμικών εφαρμογών exelTEK A.E. από το αρχείο της οποίας αντλήθηκαν τα παρακάτω στοιχεία.

1. [1998] Κτίριο Αγροτικής Τράπεζας Θεσσαλονίκης, Οδός Τσιμισκή και Ρογκότη, Προσεισμική ενίσχυση δοκών και υποστυλωμάτων κτιρίου στα επίπεδα του υπογείου, ισογείου και 1ου ορόφου (mezzanine).
2. [1999] Πολυώροφο Κτίριο Σταθμού Αυτοκινήτων, Οδός Δωδεκανήσου και Λέοντος Σοφού, Σεισμική αναβάθμιση (seismic upgrade) κτιρίου με την προσεισμική ενίσχυση 138 υποστυλωμάτων στους 6 ορόφους του κτιρίου.
3. [2000] Υδατόπυργος στη Μηχανιώνα Θεσ/νίκης, Ενίσχυση φέροντος οργανισμού της κατασκευής.
4. [2000] Κτίριο Χ.Α.Ν.Θ., Πλατεία Χ.Α.Ν.Θ., Ενίσχυση υποστυλωμάτων, δοκών και κόμβων κυρίας αίθουσας κολυμβητηρίου.
5. [2000] Κτίριο Γερμανικής Σχολής, Οδός Βασ. Όλγας, Ενίσχυση υποστυλωμάτων (πεσσών) και δοκών στους 3 ορόφους του κτιρίου.

6. [2000] Πολυώροφο Κτίριο Κατοικιών, Οδός Θεμ. Σοφούλη 13, Προσεισμική ενίσχυση όλων των υποστυλωμάτων, τοιχείων και δοκών pilotis.
7. [2000] Πολυώροφο Κτίριο Κατοικιών, Οδός Ευζώνων, Ενίσχυση κοντών υποστυλωμάτων και δοκών υπογείου.
8. [2001] Ιερός Ναός Αναλήψεως Θεσ/νίκης, Ενίσχυση υποστυλωμάτων (πεσσών).
9. [2001] Κτίριο στην Περαία Θεσ/νίκης, Ενίσχυση κλιμάκων εισόδου του παραθεριστικού συγκροτήματος.
10. [2001] Δεξαμενές καθιζήσεως και επεξεργασίας πόσιμου ύδατος στο Καλοχώρι Θεσ/νίκης (ΕΥΑΘ), Ενίσχυση υποστυλωμάτων της κατασκευής.

Στις επόμενες παραγράφους παρουσιάζονται στοιχεία από τα πιο ενδιαφέροντα έργα σεισμικών ενισχύσεων με σύνθετα υλικά στη Θεσσαλονίκη.

10.1.1 Κτίριο Χ.Α.Ν.Θ.

Το έργο αφορούσε στην αποκατάσταση και ενίσχυση του φέροντος οργανισμού του κολυμβητηρίου της Χ.Α.Ν.Θ.

Το κτίριο περιλαμβάνει υπόγειο και τρεις ορόφους. Η μελέτη ανέγερσης του κτιρίου άρχισε το 1925 και η κατασκευή του ξεκίνησε το 1926. Οι εργασίες κατασκευής ολοκληρώθηκαν το 1932. Ο σεισμός του 1978 στη Θεσσαλονίκη προκάλεσε ελαφρές και σοβαρότερες βλάβες στο φέροντα οργανισμό του κτιρίου οι οποίες επιδιορθώθηκαν με ρητινενέσεις και υποστηρίξεις με μεταλλικά υποστυλώματα. Μετά την πάροδο περίπου 25 ετών, το κτίριο παρουσίαζε σημαντικές βλάβες στο φέροντα οργανισμό του από αποσάθρωση και ενανθράκωση του σκυροδέματος και οξείδωση των οπλισμών.

Στο κεντρικό τμήμα του κτιρίου λειτουργεί συνεχώς από το 1981 πισίνα. Λόγω της συγκέντρωσης μεγάλων ποσοστών υγρασίας στο εσωτερικό του κτιρίου, παρατηρήθηκαν απολεπίσεις και αποσαθρώσεις στο σκυρόδεμα του φέροντα οργανισμού (πλάκες, δοκοί, υποστυλώματα). Για την αντιμετώπιση της έντονης αποσάθρωσης (η οποία είχε αρχίσει να δημιουργεί καταπτώσεις τμημάτων του σκυροδέματος οροφής) κατασκευάστηκε το 1990 μανδύας από εκτοξευμένο σκυρόδεμα (gunite) σε όλη την οροφή του χώρου της πισίνας.

Τα προβλήματα οξειδωσης οπλισμών και αποσάθρωσης σκυροδέματος μεγάλωσαν κατά τα τελευταία χρόνια, και έτσι, ο φέρων οργανισμός του κτιρίου (υποστυλώματα και δοκοί) παρουσίαζε πριν από τις επεμβάσεις αποκατάστασης εντονότατα σημάδια διάβρωσης οπλισμών και ενανθράκωσης σκυροδέματος. Σε αρκετές περιπτώσεις το βάθος προσβολής της ενανθράκωσης και της οξειδωσης ήταν πλέον των 10 cm ενώ η έντονη οξειδωση είχε δημιουργήσει απώλεια διατομής οπλισμού. Για την αντιμετώπιση των προβλημάτων αυτών εκπονήθηκε κατάλληλη μελέτη εφαρμογής με γνώμονα την αποκατάσταση των προβλημάτων διάβρωσης και ενανθράκωσης και την ενίσχυση της φέρουσας ικανότητας των υφιστάμενων διατομών. Για την αποκατάσταση των βλαβών και την ενίσχυση του φέροντα οργανισμού χρησιμοποιήθηκαν ειδικά χημικά και εποξειδικά κονιάματα σε συνδυασμό με σύνθετα υλικά.

Τα βασικά στοιχεία της αποκατάστασης και ενίσχυσης του κτιρίου είναι:

- i. Οι βλάβες του φέροντα οργανισμού αποκαταστάθηκαν πλήρως με την εφαρμογή των παρακάτω μέτρων :
 - Σε στοιχεία με αποσάθρωση σκυροδέματος και οξειδωση / διάβρωση οπλισμών έγινε επιμελής καθαρισμός των οξειδίων του σιδήρου (σκουριάς) και επικάλυψη των ράβδων με ειδική εποξειδική ρητίνη.
 - Σε στοιχεία χωρίς αποσάθρωση σκυροδέματος έγινε επιμελής καθαρισμός της επιφάνειας του σκυροδέματος και επάλειψή του με ειδικούς αναστολείς διάβρωσης που παρουσιάζουν υψηλή διεισδυτικότητα στο σκυροδεμα και χημική έλξη με το χάλυβα οπλισμού ώστε να μειωθεί σημαντικά ο ρυθμός οξειδωσης.
 - Σε όλα τα δομικά στοιχεία έγινε γεωμετρική αποκατάστασης της διατομής τους με χρήση κατάλληλων μη συρρικνούμενων κονιαμάτων υψηλής αντοχής.
- ii. Αφού ολοκληρώθηκαν οι εργασίες αποκατάστασης, τα δομικά στοιχεία του κτιρίου (υποστυλώματα και δοκοί) ενισχύθηκαν με μανδύες σύνθετων υλικών (υαλοϋφάσματα XL-Wrap®). Τα σύνθετα υλικά τοποθετήθηκαν σε δύο στρώσεις και λειτουργούν: (α) για την αποτελεσματική περίσφιξη των υποστυλωμάτων (αυξάνοντας ουσιαστικά τη διαθέσιμη πλαστιμότητά τους, τη διατμητική αντοχή και

την αντοχή τους σε αξονικά φορτία), και (β) για την αύξηση της διατμητικής αντοχής των δοκών.

10.1.2 Κτίριο Γερμανικής Σχολής

Το έργο αποκατάστασης και ενίσχυσης του Κτιρίου της Γερμανικής Σχολής Θεσσαλονίκης εκτελέσθηκε το 2000 από την εταιρεία exelTEk A.E. Τη μελέτη της ενίσχυσης είχαν αναλάβει οι Δρ. Πολ. Μηχανικοί Χρήστος Ιγνατάκης και Κοσμάς Στυλιανίδης, ενώ τεχνική υποστήριξη στα θέματα των ενισχύσεων με σύνθετα υλικά παρείχε η exelTEk A.E. Η εταιρεία APXITEX A.T.E., είχε αναλάβει τις γενικότερες εργασίες ολοκλήρωσης του έργου.

Το κτίριο της Γερμανικής σχολής κατασκευάσθηκε μεταξύ 1926 – 1928. Μεταξύ των ετών 1949 – 1955 λειτούργησε ως κτίριο Στρατιωτικής Ιατρικής ενώ σήμερα, όπως υποδηλώνει και το όνομά του , φιλοξενεί τη Γερμανική Σχολή της πόλης (Ινστιτούτο Goethe). Η θεμελίωση του κτιρίου βρίσκεται στη στάθμη της θάλασσας και τα κατακόρυφα υποστυλώματά του (πεσσοί) καταλήγουν σε πέτρινη θεμελίωση κάτω από το δάπεδο του ισογείου. Είναι μια κατασκευή αποτελούμενη από πλάκες και δοκούς από σκυρόδεμα, ενώ οι πεσσοί είναι από αμμότουβλο.

Κατά το στάδιο της μελέτης και για την ορθολογική διαστασιολόγηση των απαιτούμενων ενισχύσεων, αποτυπώθηκαν η γεωμετρία και οι οπλισμοί των υφιστάμενων δομικών στοιχείων. Επίσης έγινε δειγματοληψία και δοκιμασία πυρήνων για τον προσδιορισμό της ποιότητας του σκυροδέματος. Λόγω της ύπαρξης πλίνθων στο φέροντα οργανισμό ήταν απαραίτητη η δοκιμασία αυτών για τον προσδιορισμό της θλιπτικής τους αντοχής. Το κτίριο συμπεριφέρθηκε καλά στο σεισμό της Θεσσαλονίκης της 20ης Ιουνίου 1978 και οι όποιες βλάβες εντοπίστηκαν στις αμφιέριστες δοκούς οπλισμένου σκυροδέματος και στους λεπτούς πεσσούς φέρουσας πλινθοδομής. Η χρήση του κτιρίου δεν άλλαξε μετά την ενίσχυση.

Από τις έρευνες για την ποιότητα του σκυροδέματος διαπιστώθηκε ότι το κτίριο της Γερμανικής Σχολής Θεσσαλονίκης έχει σκυρόδεμα που κατατάσσεται στην κατηγορία B160 (ή την αντίστοιχη C12/15 του νέου Ελληνικού Κανονισμού Τεχνολογίας Σκυροδέματος). Η ποιότητα του χάλυβα που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή ήταν λείες ράβδοι οπλισμού με

διάμετρο από $\varnothing 6$ έως $\varnothing 25$. Από σχετικές έρευνες για την ποιότητα του χάλυβα που χρησιμοποιήθηκε σε κτίρια της Θεσσαλονίκης την περίοδο του μεσοπολέμου έχει διαπιστωθεί ότι ο χάλυβας αυτός έχει αντοχές που κυμαίνονται μεταξύ των κατηγοριών StI και StII. Έτσι, για τις ανάγκες της μελέτης, θεωρήθηκε ότι οι οπλισμοί του κτιρίου μπορούν να χαρακτηριστούν ότι ανήκουν στην ποιότητα S220 των Ελληνικών Κανονισμών.

Η θλιπτική αντοχή πλήρων πλίνθων διαστάσεων 7 x 10 x 21cm υπό μονοαξονική καταπόνηση " στη θέση δόμησης" είναι ίση προς $f_b = 10 \text{ Mpa}$. Ο Ευρωκώδικας 6 κατατάσσει τους πλίνθους αυτούς στην ομάδα 1 των λιθοσωμάτων. Το κονίαμα που χρησιμοποιήθηκε ήταν εύθρυπτο ασβεστοκονίαμα με μικρή ποσότητα τσιμέντου και με αντοχή που δεν ξεπερνά τα 15 Kg/cm^2 .

Οι σημαντικότερες επεμβάσεις στο κτίριο είναι :

i. Θεμελίωση :

- Κατά την εκτέλεση των εργασιών καθαίρεσης διαπιστώθηκε έντονη διατάραξη τμημάτων της λιθοδομής θεμελίωσης των τοιχοποιιών. Για την αντιμετώπισή τους έγινε τοπική καθαίρεση και συμπλήρωση των διαταραγμένων τμημάτων της λιθοδομής θεμελίωσης από "πέδιλο" οπλισμένου σκυροδέματος με οδοντωτή εμπλοκή του με την υφιστάμενη λιθοδομή.
- Διαπιστώθηκαν αποφλοιώσεις και οξειδώσεις οπλισμών σε δοκούς Ο.Σ. του φέροντος δαπέδου του ισογείου οι οποίες και αποκαταστάθηκαν πλήρως.

ii. Στοιχεία Φέροντος Οργανισμού :

- Ενίσχυση πεσσών στην περίμετρο του κτιρίου με τοποθέτηση δύο στρώσεων σύνθετων υλικών (υαλοϋφασμα XL-Wrap®).
 1. Στρογγύλευση των ακμών της πλινθοδομής στο ελεύθερο ύψος των πεσσών. Εφαρμογή επιχρίσματος εξομάλυνσης από μη συρρικνούμενο υψηλής αντοχής κονίαμα στις επιφάνειες της περιμέτρου των πεσσών.
 2. Περίδεση του ελεύθερου ύψους των πεσσών με δύο στρώσεις σύνθετων υλικών (υαλοϋφασμα XL-Wrap®). Η τελική επιφάνεια των υαλοϋφασμάτων επιχρίστηκε και

βάφηκε σύμφωνα με τις αρχιτεκτονικές απαιτήσεις. Η επέμβαση εφαρμόστηκε στους περιμετρικούς πεσσούς (30 συνολικά) στο ισόγειο, στον 1ο και 2ο όροφο του κτιρίου.

- Ενίσχυση φέρουσας ικανότητας τοιχοποιιών με ενσωμάτωση σε αυτές χαλύβδινων στύλων μορφής HEB 200.
- Ενίσχυση καμπτικής αντοχής δοκών Ο/Σ με επικόλληση δύο λωρίδων σύνθετων υλικών (ανθρακοϋφασμα XL-Wrap®). Η επέμβαση εφαρμόστηκε σε οκτώ (8) αμφιέριστες δοκούς ισογείου και σε οκτώ (8) αμφιέριστες δοκούς και (5) ζυγώματα δίστυλων πλαισίων του 1ου ορόφου. Οι εργασίες που εκτελέστηκαν είναι :
 1. Αφαίρεση επιχρίσματος και αποκολλημένων / αποσαθρωμένων τεμαχίων σκυροδέματος επικάλυψης κατά μήκος του τμήματος της κάτω παρειάς των δοκών, όπου προβλεπόταν ενίσχυση με σύνθετα υλικά. Καθαρισμός των οξειδωμένων οπλισμών του κάτω πέλματος με σκληρή συρματοβουρτσα και εφαρμογή προστασίας οπλισμού στους διαβρωμένους οπλισμούς.
 2. Αποκατάσταση της διατομής δοκών με εφαρμογή μη συρρικνούμενων κονιαμάτων αυξημένης αντοχής και προσεκτική επιπέδωση της κάτω παρειάς.
 3. Επικόλληση λωρίδων ενίσχυσης ανθρακοϋφάσματος XL-Wrap® , πλάτους όσο το κάτω πέλμα της δοκού και μήκους κατά περίπτωση σύμφωνα με τη μελέτη.

Η τοποθέτηση των λωρίδων έγινε με χρήση ειδικής εποξειδικής ρητίνης XL- Roxy®. Η τελική επιφάνεια των ανθρακοϋφασμάτων επιχρίστηκε και βάφηκε σύμφωνα με τις αρχιτεκτονικές απαιτήσεις.

- Ενίσχυση της διατμητικής αντοχής αμφιέριστων δοκών Ο/Σ με τοποθέτηση σύνθετων υλικών (υαλοϋφασμα XL-Wrap®) στην περιοχή των στηρίξεων. Η επέμβαση εφαρμόστηκε στις ίδιες δοκούς (και με διαδικασία ανάλογη με εκείνη της προηγούμενης παραγράφου) ως εξής:

- a. Εκτελέσθηκαν οι εργασίες σύμφωνα με την περιγραφή της προηγούμενης παραγράφου, σε όλη την επιφάνεια της νεύρωσης των δοκών.
- b. Επικολλήθηκαν τα υαλοϋφάσματα XL-Wrap® σε επαρκές μήκος σύμφωνα με τη μελέτη. Τα υαλοϋφάσματα επικολλήθηκαν με τις κύριες ίνες κάθετα στον άξονα της δοκού.
- c. Κατά μήκος του πέρατος των σύνθετων υλικών στη μασχάλη πλάκας – νεύρωσης δοκού τοποθετήθηκαν ειδικά αγκύρια σε αποστάσεις που καθορίστηκαν από τη διάμετρο των αγκυρίων και το πάχος των υαλοϋφασμάτων ενίσχυσης σύμφωνα με τις προδιαγραφές.

10.1.3 Ιερός Ναός Αναλήψεως

Ο Ι.Ν. Αναλήψεως αποτελεί τη μεγαλύτερη ενορία της Θεσσαλονίκης με συνολικό αριθμό ενοριτών περί τις 100.000. Ο ναός ανήκει διοικητικά στην Ιερά Μητρόπολη Θεσσαλονίκης. Αποτελείται από δύο τμήματα (Α' και Β') τα οποία κατασκευάστηκαν σε διαφορετικές χρονικές περιόδους, έχουν διαστάσεις σε κάτοψη 10 x 30 m και ύψος 9.0 m.

Το τμήμα Α', που αποτελεί και τον κυρίως ναό, κτίσθηκε το 1894 εκτός των τότε ορίων της πόλεως Θεσσαλονίκης (εκτός του ιστορικού κέντρου της πόλης). Το τμήμα αυτό του Ναού κατασκευάστηκε από το Γερμανό Αρχιτέκτονα Μηχανικό Zieler. Η θεμελίωσή του έγινε το 1894 και τα εγκαίνιά του το 1919. Η θεμελίωση σε εμπηγνυόμενους πασσάλους έγινε με χρήση ξύλινων πασσάλων προστατευμένων με πίσσα. Η αρχιτεκτονική του Ναού είναι Βασιλική Τρίκλιτος με 2 καμπαναριά. Ο Ναός έχει την ίδια αρχιτεκτονική με τον Ι.Ν. της Μητρόπολης της Παναγίας Φανερωμένης στο Αίγιο καθώς και με τον Ι.Ν. Γρηγορίου του Παλαμά στη Θεσσαλονίκη (Μητρόπολη Θεσ/νίκης).

Ο Ναός έχει κατασκευασθεί με τοιχοποιίες πλάτους 80cm, αποτελούμενες από πέτρα και σιδηρά στοιχεία. Τα «υποστυλώματά» του είναι πεσσοί με λάσπη και εσωτερικά μπουντρέλια από σίδερο.

Το Β' Τμήμα του Ναού είναι προσθήκη κατ' επέκταση που κατασκευάστηκε τις περιόδους 1986 – 1987 και 1995. Ο Ναός δεν παρουσίασε

ιδιαίτερα προβλήματα κατά τον σεισμό του 1978. Κατά την εκτέλεση πρόσφατων εργασιών ανακαίνισης του Ναού και μετά την καθαίρεση των μαρμάρινων επενδύσεων των πεσσών διαπιστώθηκαν εκτεταμένες ρηγματώσεις των πεσσών οι οποίες καθιστούσαν αναγκαία την επισκευή και ενίσχυσή τους.

Για την επισκευή και ενίσχυση των πεσσών ακολουθήθηκε διαδικασία παρόμοια με αυτή που περιγράφεται στην προηγούμενη ενότητα (Γερμανική Σχολή Θεσσαλονίκης).

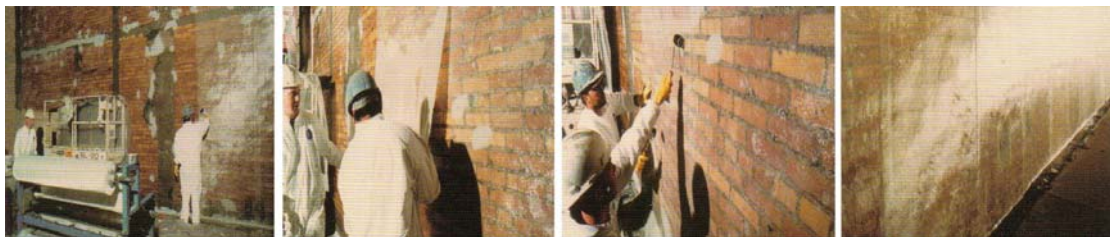
10.2 Ενίσχυση κατασκευών από την εταιρία Sika

Στη συγκεκριμένη παράγραφο θα γίνουν κάποιες αναφορές ενισχύσεων κατασκευών με σύνθετα υλικά από την εταιρία Sika.

10.2.1 Ενισχύσεις τοιχοποιίας

- **Αναφορά έργου:** Παλαιά αποθήκη του Λιμενικού. Salt Lake City, Utah (USA).

Αντιμετώπιση της Sika: Οι άοπλες τοιχοποιίες σε αυτό το έργο ενισχύθηκαν έναντι σεισμού με δύο στρώσεις υαλοϋφάσματος $\pm 45^\circ$ SikaWrap[®] -116G έτσι ώστε να ανθίστανται στις εντός επιπέδου διατμητικές καταπονήσεις (Σχήμα 10.1).



Σχήμα 10.1 (πηγή 3)

- **Αναφορά έργου:** Ενίσχυση τοιχοποιίας πληρώσεως έναντι εκτός επιπέδου κάμψης σε σεισμική δράση. Gebze, Kocaeli (TR).

Αντιμετώπιση της Sika: Το ύφασμα με ίνες άνθρακα SikaWrap[®] Hex-230C εφαρμόστηκε σε μορφή πλέγματος πάνω στην τοιχοποιία. Η αγκύρωση των υφασμάτων πάνω στο πλαίσιο του φορέα επιτεύχθηκε με τη χρήση γωνιακών μεταλλικών ελασμάτων στα τελειώματα τους. Οι ποσότητες των

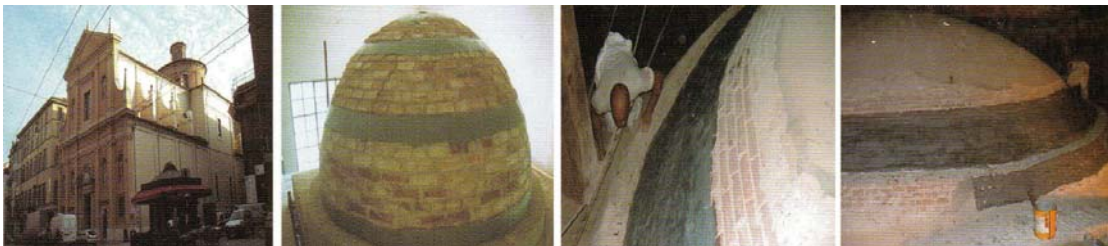
υλικών που χρησιμοποιήθηκαν είναι: 2000m² SikaWrap[®] Hex-230C και 2100kg Sikadur-330[®], ως ρητίνη εμποτισμού (Σχήμα 10.2).



Σχήμα 10.2 (πηγή 3)

- **Αναφορά έργου:** Ενίσχυση τρούλου κατασκευασμένου με οπτόπλινθους λόγω ρηγματώσεων από σεισμική δραστηριότητα. Saint Vitale Church, Parma (ITA).

Αντιμετώπιση της Sika: Οι κατακόρυφες ρωγμές με εύρος έως και 10mm πληρώθηκαν χρησιμοποιώντας εποξειδικές ρητίνες Sikadur[®]. Δύο στρώσεις ανθρακούφασματος SikaWrap[®] Hex-230C τοποθετήθηκαν περιμετρικά στη βάση του τρούλου με εποξειδική ρητίνη Sikadur-330[®]. Ένα εργαστηριακό μοντέλο κατασκευάστηκε και στην συνέχεια φορτίστηκε στο τοπικό πανεπιστήμιο μέχρι να εμφανιστούν οι πρώτες ρωγμές. Ακολούθησε ενίσχυση και δεύτερη δοκιμή επιτυχημένης φόρτισης (Σχήμα 10.3).



Σχήμα 10.3 (πηγή 3)

10.2.2 Σιλό, Πυλώνες και Πύργοι

- **Αναφορά έργου:** Ενίσχυση σιλό. Albany (AUS).

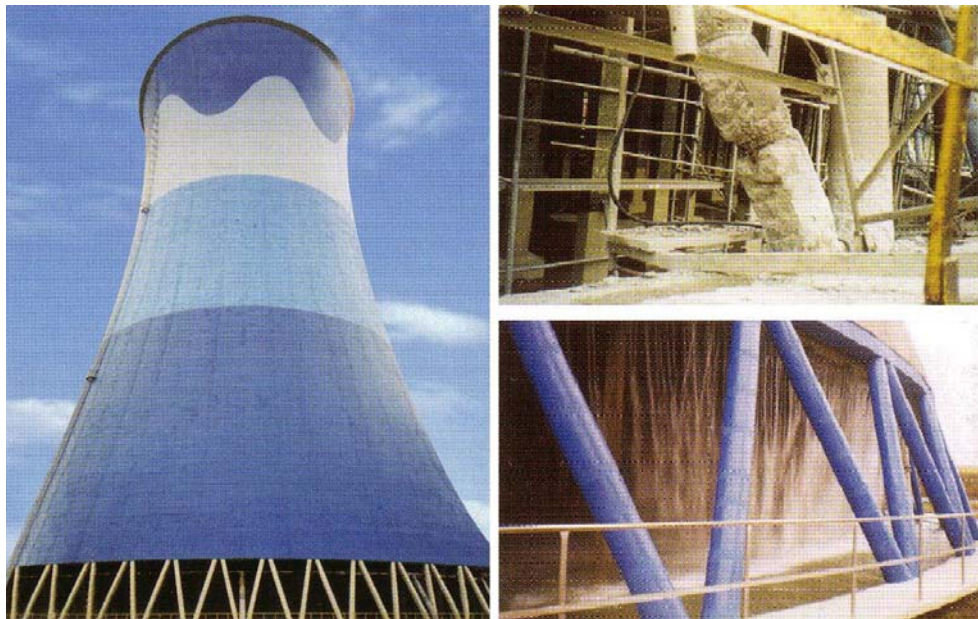
Αντιμετώπιση της Sika: Μεγάλες κατακόρυφες ρωγμές εμφανίστηκαν σε τοιχεία λόγω ανεπαρκούς σχεδιαστικής τιμής από τις οριζόντιες πιέσεις. Οι ποσότητες των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν είναι: 16000m² SikaWrap[®] Hex-230C και 22000kg Sikadur-330[®] (Σχήμα 10.4).



Σχήμα 10.4 (πηγή 3)

- **Αναφορά έργου:** Αποκατάσταση των 92 σοβαρά κατεστραμμένων υποστυλωμάτων που στηρίζουν τον πύργο ψύξης. Laziska Power Plant (PL).

Αντιμετώπιση της Sika: Αρχικά αποκαταστάθηκαν όλα τα υποστυλώματα με εκτοξευμένο σκυρόδεμα, κάνοντας χρήση της τεχνολογίας επισκευαστικών Sika[®] MonoTop και σφράγιση πορώδους Sikagard[®]-720 Erocem[®]. Ακολούθησε ενίσχυση με ανθρακοϋφάσματα SikaWrap[®] Hex-230C, εμποτισμένα με εποξειδική ρητίνη Sikadur-330[®]. Τέλος όλες οι επιφάνειες προστατεύθηκαν με το σύστημα βαφής προστασίας Sikagard[®]-680S το οποίο και προσέδωσε την τελική αισθητική εικόνα και ανθεκτικότητα στην κατασκευή (Σχήμα 10.5).



Σχήμα 10.5 (πηγή 3)

- **Αναφορά έργου:** Ενίσχυση πύργων μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Brauchburg, New Jersey (USA).

Αντιμετώπιση της Sika: Οι ρωγμές που υπήρχαν εξ' αρχής πληρώθηκαν με ενέσιμη εποξειδική ρητίνη Sikadur[®] χαμηλού ιξώδους. Στην συνέχεια οι προκατασκευασμένοι πύργοι ΩΣ περιτυλίχτηκαν με 3 στρώσεις

ανθρακούφασματος SikaWrap®-103C έτσι ώστε να αποκτήσουν επιπρόσθετη αντοχή και σταθερότητα (Σχήμα 10.6).

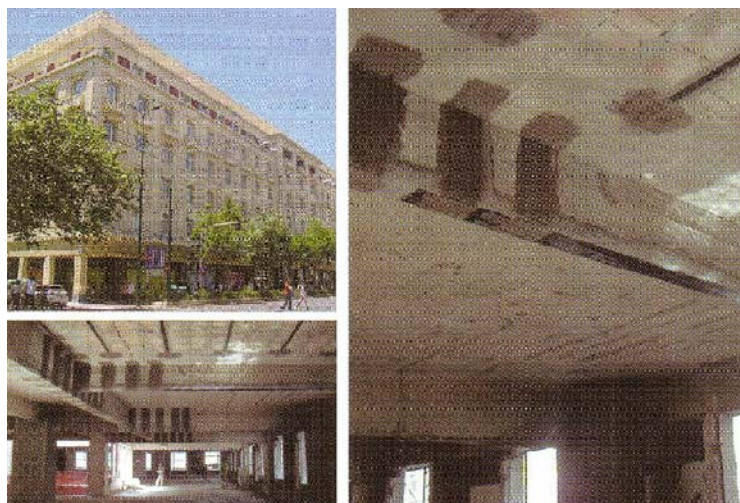


Σχήμα 10.6 (πηγή 3)

10.2.3 Περίσφιγξη και διατμητική ενίσχυση

- **Αναφορά έργου:** Αποκατάσταση εμπορικού κέντρου και γραφείων Μετοχικού ταμείου στρατού. Αθήνα (GR).

Αντιμετώπιση της Sika: Οι υψηλότερες τιμές φορτίων που θα επιβαρύνουν την κατασκευή θα δημιουργήσουν διατμητικές και καμπτικές τάσεις στους κόμβους πολύ μεγαλύτερες από αυτές για τις οποίες το κτίριο είχε αρχικά κατασκευαστεί. Η διατμητική ενίσχυση των δοκών πλησίον στους κόμβους δοκού-υποστυλώματος και δοκού-δοκού πραγματοποιήθηκε με ανθρακούφασμα SikaWrap® 300C HiMod NW και εποξειδική ρητίνη εμποτισμού Sikadur-300® και Sikadur-330® (Σχήμα 10.7).



Σχήμα 10.7 (πηγή 3)

▪ **Αναφορά έργου:** Διατμητική ενίσχυση δοκών στις γέφυρες Karababa και Goksu. Bozova-Adiyaman Road (TR).

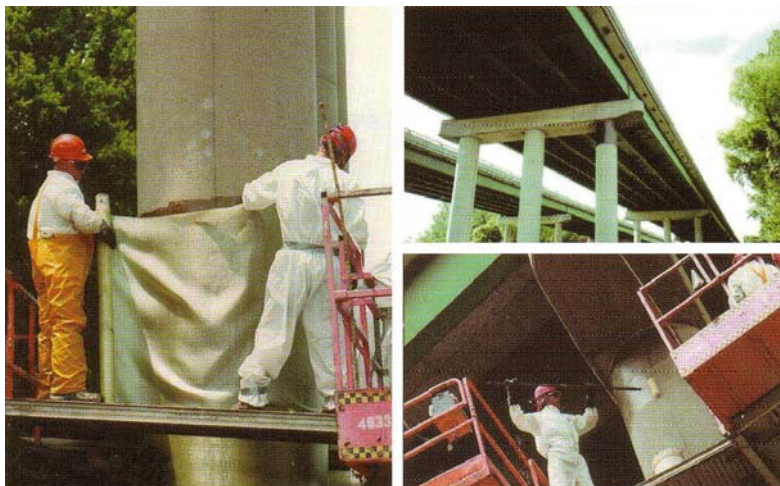
Αντιμετώπιση της Sika: Τουρμπίνες μεγάλου βάρους, περίπου 270tons έπρεπε να περάσουν πάνω από τις γέφυρες, υπαγορεύοντας έτσι μέτρα ενίσχυσης τους. Καμπτική ενίσχυση με ανθρακοελάσματα Sika® CarboDur® και διατμητική ενίσχυση με ανθρακοϋφάσματα SikaWrap® Hex-230C. Οι ποσότητες των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν είναι: 3800m² SikaWrap® Hex-230C και 6250m Sika® CarboDur® S1012 (Σχήμα 10.8).



Σχήμα 10.8 (πηγή 3)

▪ **Αναφορά έργου:** Προσεισμική (παθητική) ενίσχυση γέφυρας I-57. Cairo, Illinois (USA).

Αντιμετώπιση της Sika: Προσεισμική ενίσχυση συνολικά 50 βάθρων και 158 υποστυλωμάτων με υαλοϋφασμα SikaWrap® -100G και εποξειδική ρητίνη εμποτισμού Sikadur-300®, ακολουθούμενη από δύο στρώσεις βαφής για προστασία έναντι περιβαλλοντικών δράσεων. Η ποσότητα του υλικού που χρησιμοποιήθηκε είναι: 9000m² SikaWrap®-100G (Σχήμα 10.9).



Σχήμα 10.9 (πηγή 3)

10.3 Ενίσχυση Ιστορικών κτιρίων με σύνθετα υλικά

Η Ελλάδα είναι μια χώρα αμιγώς ιστορική κύριο χαρακτηριστικό της οποίας είναι ο πλούτος της σε ιστορικά μνημεία, τα οποία χρήζουν προστασίας

και διατήρησης. Με τον όρο όμως ιστορικά μνημεία εννοούμε κάθε κατασκευή ιδιαίτερα σημαντική λόγω του ιστορικού, αρχαιολογικού, κοινωνικού προφίλ της. Κάθε κτίριο, δηλαδή, που έχει συνδεθεί μ' ένα ιστορικό πρόσωπο ή γεγονός, ή αποτελεί χαρακτηριστικό δείγμα λαϊκής αρχιτεκτονικής καθώς επίσης και κτίρια που δίδουν πληροφορίες για τον τρόπο ζωής κι εργασίας του παρελθόντος (βιομηχανικά κτίρια, βαμβαουργία, ελαιοτριβεία). Η ανάγκη διατήρησης των παραπάνω κρίνεται επιτακτική αν θέλουμε να προστατεύσουμε την πολιτιστική μας κληρονομιά αλλά και να την κληροδοτήσουμε ως παρακαταθήκη στις επόμενες γενεές. Στο παρών κεφάλαιο θα ασχοληθούμε αποκλειστικά με τη χρήση ινοπλισμένων πολυμερών στον τρόπο ενίσχυσης κι επισκευής των ιστορικών μνημείων, αλλά πριν φθάσουμε εκεί πρέπει να εξετάσουμε το θέμα των επισκευών διεξοδικά.

10.3.1 Ανάλυση βλαβών από σεισμό σε ιστορικά κτίρια

Οι βλάβες που θα προκληθούν από κάποιο σεισμό σε ιστορικά κτίρια εξαρτώνται κατά κύριο λόγο από τα υλικά τα οποία έχουν χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή τους. Εφόσον ο λόγος γίνεται για ιστορικά κτίρια – μνημεία, τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για την δόμηση αυτών ήταν συνήθως η πέτρα, το ξύλο, το τούβλο-πλίνθος κι επίσης το σκυρόδεμα και ο χάλυβας στα μεταγενέστερα μνημεία του 20^{ου} αιώνα.

Τα εν λόγω υλικά (πέτρα, ξύλο, πλίνθος) είναι πολύ αδύνατα σε εφελκυσμό. Παράλληλα η πλειονότητα των ιστορικών κτιρίων είναι φέροντες οργανισμοί οι οποίοι αποτελούνται από φέροντες τοίχους. Αναλυτικότερα αποτελούνται από:

- Πεσσούς (κατακόρυφα τμήματα μεταξύ των ανοιγμάτων όταν η απόσταση είναι μικρή)
- Τοίχους (κατακόρυφα τμήματα χωρίς ανοίγματα)
- Συνδετικές δοκοί (οριζόντια τμήματα μεταξύ των ανοιγμάτων)

Εν συνεχεία οι βλάβες μπορούν να ταξινομηθούν σε δυο κατηγορίες:

- **Έμμεσες:** βλάβες δευτερευόντων κατασκευαστικών στοιχείων όπως εσωτερικοί διαχωριστικοί τοίχοι, σκαλοπάτια και οι οποίες δεν επηρεάζουν τη γενικότερη στατική λειτουργία του κτιρίου.

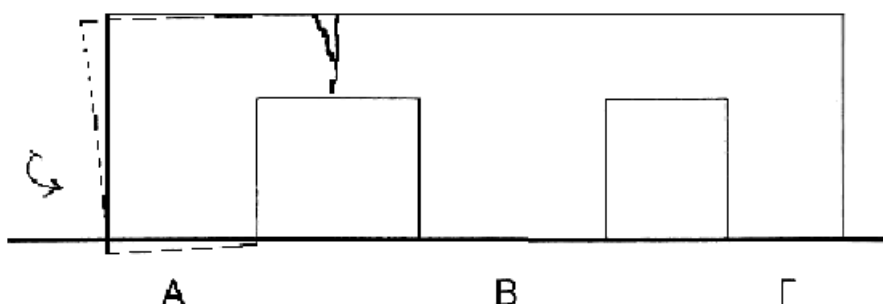
- **Άμεσες:** βλάβες της φέρουσας τοιχοποιίας οι οποίες διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στη στατική συμπεριφορά του κτιρίου και δημιουργούνται από μετακινήσεις, παραμορφώσεις ή ρηγματώσεις του κτιρίου.

Ειδικότερα μετακίνηση της φέρουσας τοιχοποιίας έχουμε όταν μετακινηθεί από την αρχική της θέση χωρίς να αλλάξει μορφή.

Παραμόρφωση έχουμε όταν κάτω από την δράση ισχυρών τάσεων (διατμητικές, εφελκυστικές) παρατηρούνται αλλαγές στην μορφή της τοιχοποιίας π.χ. από καθιζήσεις θεμελίων.

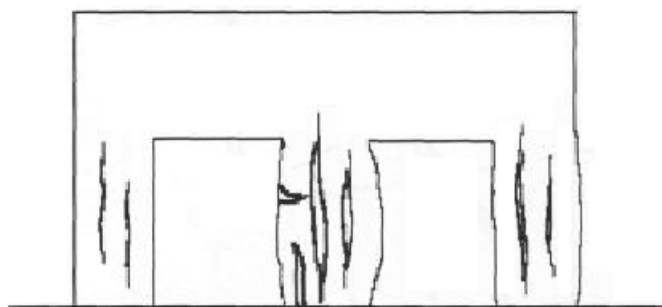
Ρηγματώσεις των τοίχων παρουσιάζονται όταν σημειωθεί μετατόπιση διαφόρων σημείων του υλικού. Τις ρηγματώσεις μπορούμε να τις διακρίνουμε σε:

- Ρηγματώσεις εφελκυσμού οι οποίες προκαλούνται είτε από μια σχετική μετατόπιση μεταξύ δυο τοίχων είτε από καθίζηση του θεμελίου και στρέψη του κτιρίου (Σχήμα 10.10)



Σχήμα 10.10: (πηγή 4) Ρηγμάτωση εφελκυσμού

- Ρηγματώσεις θλίψης οι οποίες παρουσιάζονται όπου υπάρχει υπέρβαση της αντοχής σε θλίψη από κάμψη και συνοδεύονται από φουσκώματα και σε πιο προχωρημένο στάδιο σε συνδυασμό με οριζόντιες ρωγμές (Σχήμα 10.11). Όταν διαπιστώνουμε ρωγμές θλίψης υπάρχει σοβαρός κίνδυνος κατάρρευσης.



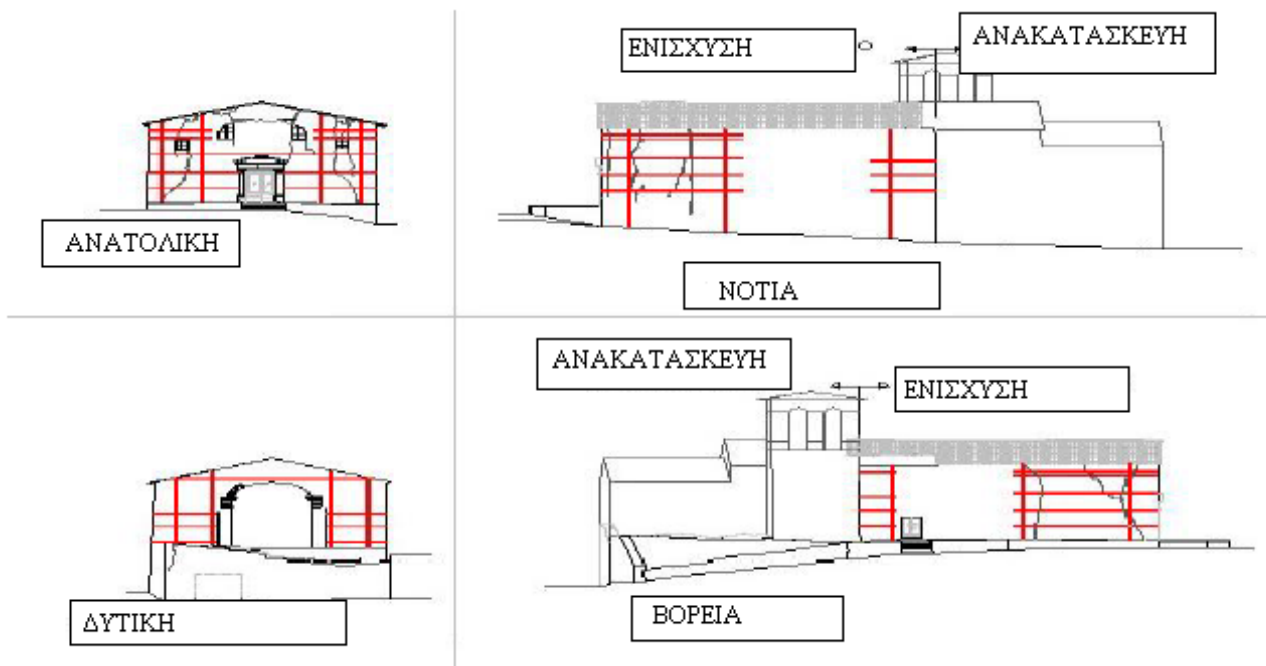
Σχήμα 10.11: (πηγή 4) Ρηγματώσεις θλίψης

10.3.2 Ενίσχυση ιστορικών κτιρίων με ινοπλισμένα πολυμερή

Μέχρι στιγμής πιστεύουμε ότι έχουμε κάνει κατανοητή την ανάγκη που μας επιβάλλει την όσο το δυνατόν προσεκτικότερη και καλύτερη αντιμετώπιση των ιστορικών κτιρίων. Τα ινοπλισμένα πολυμερή είναι κατά την άποψη της επιστημονικής κοινότητας τα ιδανικότερα υλικά για την ενίσχυση κι επισκευή των ιστορικών κτιρίων-μνημείων. Τα τελευταία χρόνια πάρα πολλά ιστορικά κτίρια και μνημεία έχουν ενισχυθεί με τη χρήση συνθετικών υλικών. Ως μηχανικοί κατά την ενίσχυση των ιστορικών κατά βάση κτιρίων επιζητούμε την ανάληψη των φορτίων που επιφέρουν εφελκυστικές τάσεις και επιπλέον την εξασφάλιση επαρκούς διαπνοής έτσι ώστε να αποφεύγονται βλάβες σε επιζωγραφήσεις και τοιχογραφίες. Άρα χρειαζόμαστε χρήση υλικών που να εκπληρώνουν αυτές τις προϋποθέσεις όπως είναι τα ανθρακονήματα. Τα εφελκυστικά φορτία μπορούν να επιφέρουν διάφορες συνέπειες όπως απόκλιση από την κατακόρυφη λόγω καθίζηση των θεμελίων, έλλειψη αντίδρασης στις ωθήσεις της στέγης, εφελκυστικά φορτία σε θόλους, τρούλους, κτλ.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί τα ανθρακονήματα θα πρέπει να είναι σε θέση να παραλαμβάνουν όλες τις τάσεις που δεν παραλαμβάνουν τα παραδοσιακά υλικά (κυρίως εφελκυστικές). Έχει διαπιστωθεί από εργαστηριακές αναλύσεις ότι ένα δομικό στοιχείο από παραδοσιακά υλικά που ενισχύεται από ινοπλισμένα πολυμερή ή από κάποιο άλλο συνθετικό υλικό, ο ουδέτερος άξονας τείνει να μετατοπισθεί προς το μέρος του ενισχύοντος συστήματος. Η μετατόπιση αυτή είναι ανάλογη με το λόγο του μέτρου ελαστικότητας του ενισχύοντος προς το μέτρο ελαστικότητας του ενισχυόμενου. Έτσι αυξάνεται η αντοχή του στοιχείου δεδομένου ότι το μέτρο ελαστικότητας των ανθρακονημάτων είναι πάρα πολύ υψηλό.

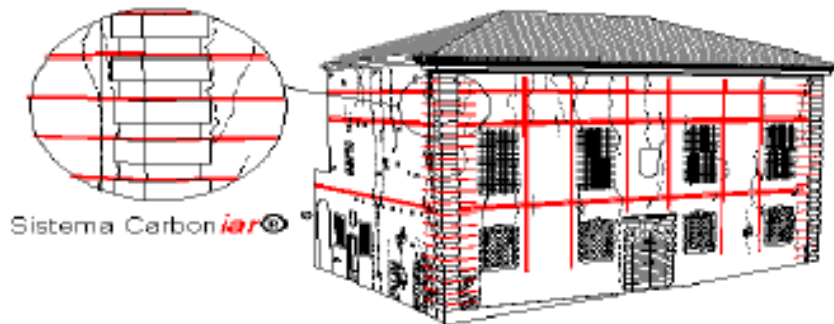
Μια τυπική διαδικασία εφαρμογής ανθρακονημάτων σε ιστορικό κτίριο αναφέρεται στο βιβλίο (Δρίτσος 2001). Τα φύλλα αυτά μπορούν να τοποθετηθούν είτε στη μία πλευρά είτε και στις δύο του ενισχύοντος τοίχου. Όλα τα φύλλα συνδέονται στη τοιχοποιία και αγκυρώνονται στα άκρα τους. Στα σχήματα (Σχήμα 10.12) που ακολουθούν παρουσιάζεται η εφαρμογή των ανθρακονημάτων σε μια παλιά μικρή εκκλησία, όπου τα ανθρακονήματα απορροφούν όλες τις οριζόντιες τάσεις. Επιπλέον για την περίδεση πεσσών,



Σχήμα 10.12 (πηγή 4)

για ν'

αποφευχθεί το τρύπημα των ιστορικών κτιρίων-μνημείων και την τοποθέτηση χαλύβδινων συνδετήρων εταιρίες παραγωγής ινοπλισμένων πολυμερών παράγουν ταινίες πολύ λεπτού πλάτους που τοποθετούνται κατά μήκος των αρμών. Παρακάτω παρατηρούμε ένα τέτοιο παράδειγμα σε κάποιο ιστορικό

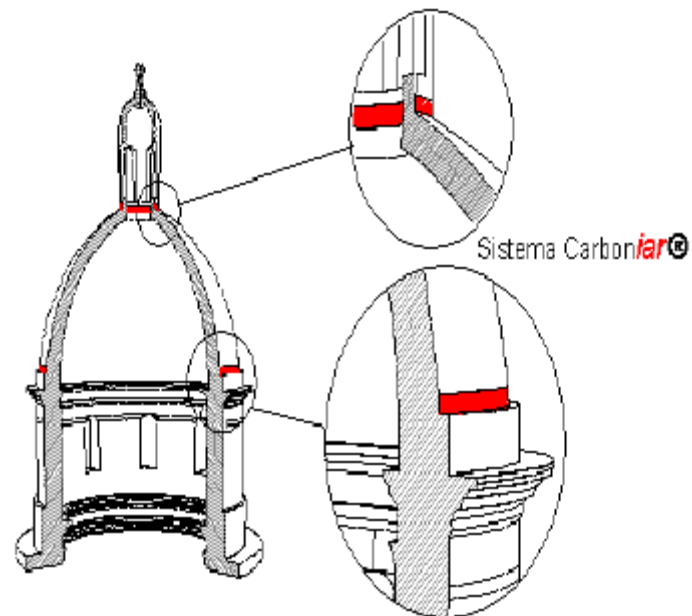


Σχήμα 10.13 (πηγή 4)

κτίριο (Σχήμα 10.13).

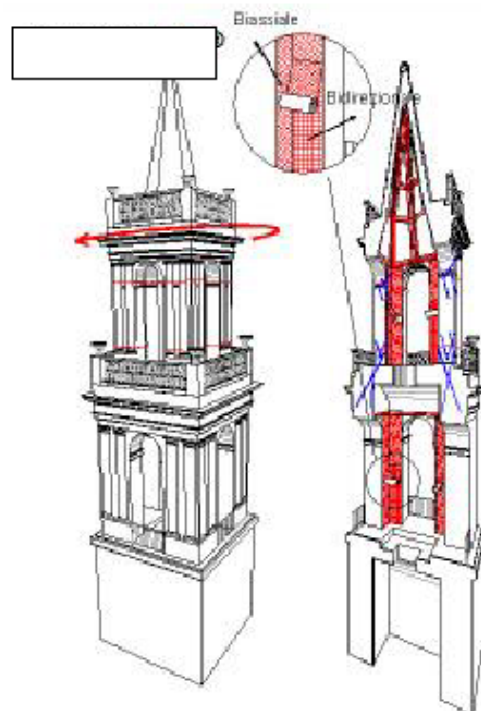
Στα ιστορικά κτίρια συναντάμε πολύ συχνά τρούλους, θόλους ξύλινες δοκούς στοιχεία τα οποία επιζητούν ειδική μεταχείριση. Για την ενίσχυση τρούλων συχνά χρησιμοποιούμε την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων για τον όσο το δυνατόν ακριβέστερο υπολογισμό της εντατικής τους κατάστασης. Όπως παρατηρούμε και στα κατωτέρω σχήματα (μέθοδο Carboniar) (Σχήμα

10.14) τοποθετούμε ανθρακονήματα στην βάση του τρούλου ή και στην κορυφή εφόσον υπάρχει φεγγίτης.



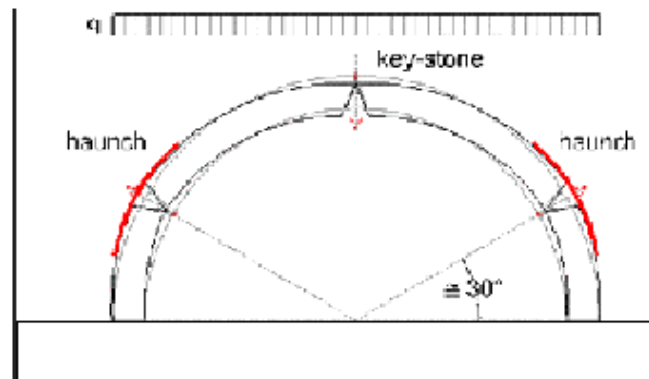
Σχήμα 10.14 (πηγή 4)

Στην περίπτωση των καμπαναριών, λόγω της σύνθετης εφελκυστικής καταστάσεως χρησιμοποιούμε ανθρακονήματα και εσωτερικά σε δύο επάλληλες στρώσεις, μια κατηγορίας ύφανσης κατά δύο διευθύνσεις 0-90° και μία κατηγορίας ύφανσης 45° (Σχήμα 10.15)



Σχήμα 10.15 (πηγή 4)

Όσον αφορά τους θόλους, εκεί παρατηρείται το εξής φαινόμενο: λόγω των ρηγματώσεων δημιουργούνται αυτόματα τρεις αρθρώσεις εκ των οποίων η μία στο κλειδί του θόλου και οι άλλες δύο κοντά στ' αντερείσματα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την μετατροπή της κατασκευής από υπερστατικής σε ισοστατική και ο θόλος μπορεί να θεωρηθεί σαν τριαρθρωτό τόξο. Χαρακτηριστικό είναι το σχήμα που ακολουθεί (Σχήμα 10.16).



Σχήμα 10.16 (πηγή 4)

Επιπλέον στα περισσότερα τόξα των ναών στο επίπεδο των γενέσεων υπάρχουν τένοντες οι οποίοι εμφανίζουν απώλειες αγκύρωσης. Εάν χρειαστούν νέοι τένοντες αυτοί αγκυρώνονται εσωτερικά στο σώμα της τοιχοποιίας με κατάλληλα αγκύρια και εποξειδικές ρητίνες, τοποθετούνται στο ύψος των γενέσεων των τόξων πάνω από τους υπάρχοντες και έχουν τις ίδιες διαστάσεις με αυτούς.

Στις ξύλινες κατασκευές (ξύλινες δοκοί, πατώματα, σκεπές κτλ) η βιομηχανία έχει παράγει διάφορα ειδικά συνθετικά υλικά που διασφαλίζουν όλες τις προϋποθέσεις ενίσχυσης των κτιρίων. Συνήθως η εργασία πάνω σε ξύλινη κατασκευή προϋποθέτει την απουσία ενεργού φορτίου κατά την διάρκεια τουλάχιστον της συγκόλλησης. Αυτό επιτυγχάνεται κυρίως με την χρήση ειδικών γρύλων. Το ξύλο λόγω προβλημάτων που δημιουργούνται εξ' αιτίας της αργής παραμόρφωσης που οφείλεται στην γήρανση παρά σε έλλειψη αντοχής, μας υποχρεώνει να χρησιμοποιούμε ειδικές ουσίες (διαλύματα) για την προστασία του από κάθε είδους αίτιο.

Με την ενίσχυση των κτιρίων με ινοπλισμένα πολυμερή εκτός από την αρχιτεκτονική διασφάλιση της ιστορικότητας και της μνημειακής αξίας τους, βελτιώνουμε και τη στατική τους λειτουργία. Συγκεκριμένα έχουν αύξηση της σεισμικής τους αντοχής κατά ένα συντελεστή 4.3 και μεγαλύτερη ενδοτικότητα.

Επιπλέον οι εκκεντρότητες που αναπτύσσονται έχουν μικρή επιρροή στην αντοχή του φέροντος τοίχους. Τα φύλλα ξεκολλούν από την τοιχοποιία στις μεγάλες μετακινήσεις όμως μπορούν ακόμα να δεχθούν εφελκυστικές δυνάμεις που τις μεταφέρουν στα άκρα της τοιχοποιίας μέσω των σημείων αγκύρωσης.

ΠΗΓΕΣ

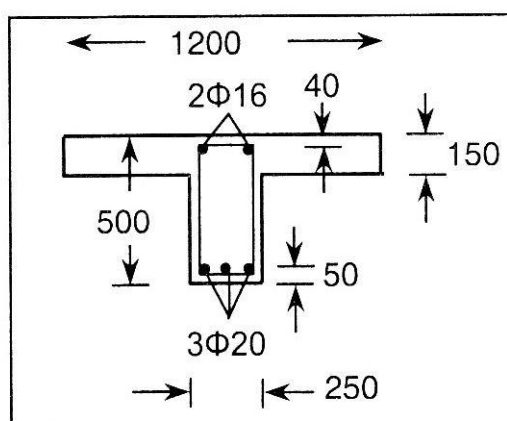
3. Κουτσούκος Π. Κ., “ Αντισεισμικές ενισχύσεις με σύνθετα υλικά” , Δελτίο ΣΠΜΕ, Νο 291, 2001
4. Νομικός Ε. Μιχαήλ, “Αποκατάσταση Επανάχρηση Ιστορικών Κτιρίων και Συνόλων”, Τμήμα Αρχιτεκτόνων Α.Π.Θ. , Θεσσαλονίκη 1997
5. “Δομητικές ενισχύσεις με συστήματα υφασμάτων SikaWrap”, Sika A.B.E.E., 2005
6. Θεοδωράτος Ανδρέας-Παπαδόπουλος Θανάσης, “Ιστορικά κτίρια: Ενίσχυση και Επισκευή τους με χρήση FRP”, 8^ο Φοιτητικό συνέδριο “Επισκευές κατασκευών 2002”, Πανεπιστήμιο Πατρών 2002

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 11

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ

11.1 Κάμψη

Θεωρούμε αμφιέριστη πλακοδοκό (Σχήμα 11.1) ανοίγματος 5 m. Στην οποία ασκείται ομοιόμορφα κατανεμημένο φορτίο $g_d = 15 \text{ KN/m}$ (μόνιμο) και $q_d = 30 \text{ KN/m}$ (κινητό). Σκυρόδεμα C20/25 χάλυβας S500s. Να γίνουν οι υπολογισμοί καμπτικής ενίσχυσης με στόχο την αύξηση του κινητού φορτίου σχεδιασμού σε 50 KN/m . Θα χρησιμοποιηθούν ελάσματα πάχους $1,1 \text{ mm}$, πλάτους 80 mm , μέτρο ελαστικότητας $E_f = 150 \text{ GPa}$ και οριακή παραμόρφωση αστοχίας $\varepsilon_{fud} = 0,01$.



Σχήμα 11.1

Λύση

Γεωμετρικά στοιχεία: $A_{s1} = 940 \text{ mm}^2$, $A_{s2} = 400 \text{ mm}^2$, $h = 500 \text{ mm}$, $d = 450 \text{ mm}$, $d_1 = 50 \text{ mm}$, $d_2 = 40 \text{ mm}$, $b = 1200 \text{ mm}$.

Η ροπή κάμψης κατά τη διάρκεια εργασιών ενίσχυσης είναι:

$$M_o = 15 \times 5^2 / 8 = 46,9 \text{ KNm.}$$

Ο λόγος $\alpha_s = E_s / E_c = 200 / 29 = 6,9$. Επιλύοντας τις εξισώσεις (7-1)-(7-4) βρίσκουμε $\varepsilon_o = 0,00066$. 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 εξίσωση (7-14) για αποκόλληση στην περιοχή της μεσαίας διατομής δίνει:

$\varepsilon_{fbd,fl} = (1,3 \times 0,5 \times 1,2 / 1,5) (\sqrt{2,2 / 150000 \times 1,1}) = 0,002$, οπότε $\varepsilon_{f,lim} = \min(0,01, 0,002) = 0,002$. Αυτή είναι η τιμή παραμόρφωσης στα σύνθετα υλικά στη διατομή όπου η ροπή είναι μέγιστη, κατά την οριακή κατάσταση αστοχίας.

Εν συνεχεία από τις εξισώσεις (7-5)-(7-12), υπολογίζεται $x = 105 \text{ mm}$, $\varepsilon_c = 0,00071$ και $A_f = 246,9 \text{ mm}^2$. Το εμβαδό κάθε ελάσματος είναι 88 mm^2 , άρα απαιτούνται συνολικά 3 ελάσματα, συνολικού εμβαδού 264 mm^2 που αντιστοιχούν σε $M_{Rd} = 205,83 \text{ kNm}$, $x = 106 \text{ mm}$ και $\varepsilon_c = 0,00072$. Τα ελάσματα θα τοποθετηθούν το ένα δίπλα στο άλλο, για να αποφευχθεί ο σχηματισμός διπλής στρώσης.

Βάσει του υπολογισμού αγκύρωσης στα άκρα (Σχήμα 11.2), προκύπτει ότι τα ελάσματα θα πρέπει να επικολληθούν σε μήκος 4,1 m.

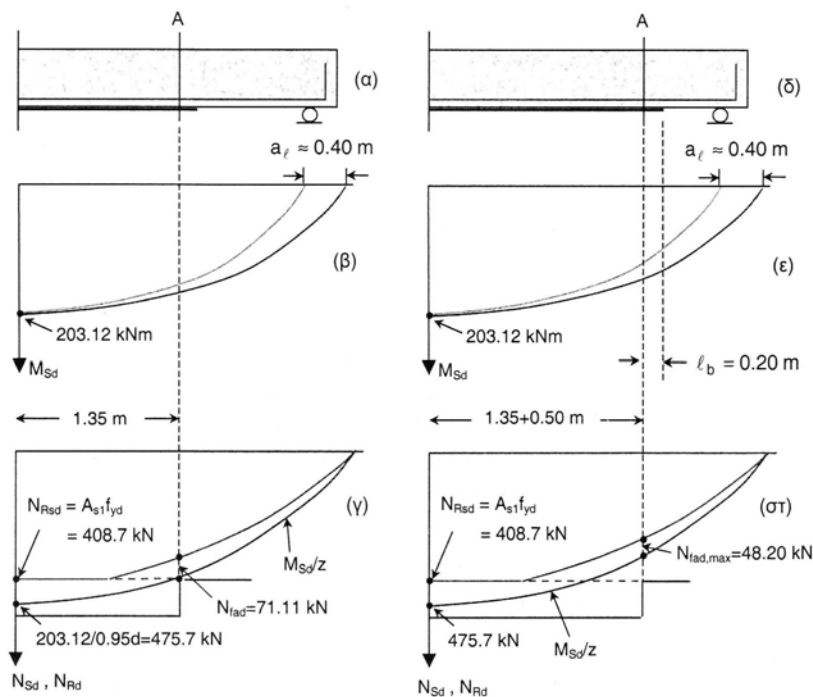
Τέλος ελέγχουμε τη διατμητική αστοχία στο άκρο:

$$V_{sd,end} = 65(5/2 - 0,45) = 133,25 \text{ kN}$$

$$M_{sd,end} = 65 \times 0,45 \times (5/2 - 0,45/2) = 66,54 \text{ kNm}$$

$$1,4V_{cd} = 1,4\tau_{Rd} \max(1, 1,6 - d) \min(2, 1,2 + 1,4\rho_L) b_w d = 1,4 \times 0,26 \times 1,15 \times 1,2024 \times 0,25 \times 0,25 \times 0,45 \times 10^3 = 56,62 \text{ kN}.$$

Παρατηρούμε ότι η σχέση (7-18) δεν ισχύει, άρα απαιτείται ενίσχυση στα άκρα για τέμνουσα δύναμη $133,25 - 56,62 = 76,63 \text{ kN}$



Σχήμα 11.2: Υπολογισμός αγκύρωσης

$$408,7 \approx N_{fad} (1 + 940 \times 200 / 264 \times 150) \rightarrow N_{fad} = 71,11 \text{ KN}$$

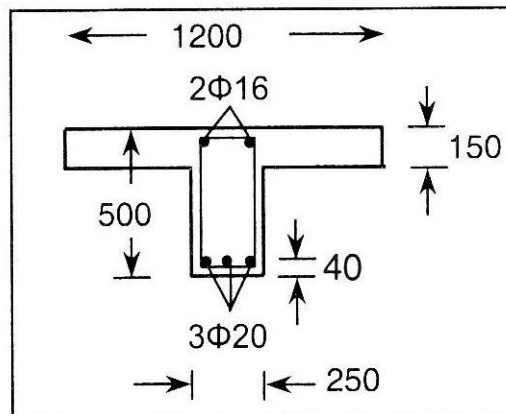
$$N_{fad,max} = 0,264 \times [(0,5 \times 1 \times 1 / 1,5) (\sqrt{2,2 \times 150000 / 1,1})] = 48,2 \text{ KN}$$

$$L_{b,max} = \sqrt{150000 \times 1,1 / 2 \times 2,2} = 193,6 \text{ mm} = 0,2 \text{ m}$$

11.2 Διάτμηση

11.2.1 Ελάσματα

Θεωρούμε τη πλακοδοκό του Σχήματος 11.3. Ζητείται ο σχεδιασμός συστήματος διατμητικής ενίσχυσης, το οποίο θα βασίζεται στη χρήση ελασμάτων (ανά αποστάσεις), επαρκώς αγκυρωμένων στη θλιβόμενη ζώνη (Σχήμα 8.2ζ). Η ενίσχυση αποσκοπεί στην αύξηση της τέμνουσας σχεδιασμού κατά 75 KN. Θεωρούμε ότι έχουμε στη διάθεση μας ελάσματα με ίνες άνθρακα, πλάτους 40 mm, πάχους 1,4 mm, μέτρου ελαστικότητας $E_f = 120 \text{ GPa}$ και εφελκυστική αντοχή σχεδιασμού 1700 MPa.



Σχήμα 11.3

Λύση

Η αντοχή σχεδιασμού (1700 MPa), μειωμένη κατά 20%, δίνει την αντοχή σχεδιασμού του κάθε ελάσματος: $f_{fde} = 1360 \text{ MPa}$.

Από εξίσωση (8-5) έχουμε: $\epsilon_{fd,max} = f_{fde} / E_f = 1360 / 120000 = 0,0113$.

Τελικά λαμβάνεται $\epsilon_{fd,max} = \min(0,0113, 0,0060) = 0,0060$.

Επειδή $d_f = 0,9d$ η εξίσωση (8-4) γίνεται:

$$\epsilon_{fe,d} = D_f \epsilon_{fd,max} = (1 - 0,5d_f / 0,9d) \epsilon_{fd,max} = 0,5 \times \epsilon_{fd,max} = 0,5 \times 0,0060 = 0,003$$

Υπολογισμός απόστασης ελασμάτων, εξίσωση (8-1) :

$$V_{fd} = (2 t_f b_f / s_f) d_f (\varepsilon_{fe,d} E_f) = (2 \times 1,4 \times 40 / s_f) 0,9 \times 460 \times (0,003 \times 120) > 75 \text{ KN} \rightarrow$$

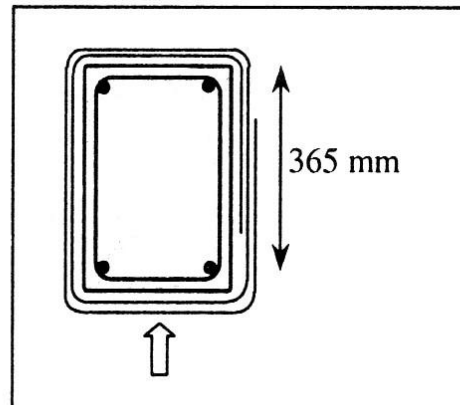
$$\rightarrow s_f < 223 \text{ mm}$$

$$s_{f,max} = 0,5 \times 0,9 \times 460 = 207 \text{ mm.}$$

Τελικά προτείνεται η χρήση των ελασμάτων ανά αποστάσεις 200 mm.

11.2.2 Σχεδιασμός μανδύα

Θεωρούμε υποστύλωμα ορθογωνικής διατομής 250x400 mm, με στατικό ύψος 365 mm (Σχήμα 11.4). Η εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος εκτιμάται γύρω στα 2 Mpa. Ζητείται ο σχεδιασμός μανδύα σύνθετων υλικών έτσι ώστε το υποστύλωμα να παραλάβει



Σχήμα 11.4

πρόσθετη τέμνουσα 100 kN παράλληλα στη μεγάλη πλευρά. Θεωρούμε ότι έχουμε στη διάθεση μας ύφασμα σύνθετων υλικών, πάχους 0,12 mm, με ίνες άνθρακα, μέτρο ελαστικότητας $E_f = 230 \text{ GPa}$ και εφελκυστική αντοχή σχεδιασμού $f_{fd} = 3200 \text{ Mpa}$.

Λύση

Η αντοχή σχεδιασμού (3200 Mpa), μειωμένη κατά 20%, δίνει την αντοχή σχεδιασμού του κάθε ελάσματος: $f_{fde} = 2560 \text{ Mpa}$.

$$\text{Από εξίσωση (8-5) έχουμε: } \varepsilon_{fd,max} = f_{fde} / E_f = 2560 / 230000 = 0,0111.$$

$$\text{Τελικά λαμβάνεται } \varepsilon_{fd,max} = \min(0,0111, 0,0060) = 0,0060.$$

Επειδή $d_f = 0,9d$ η εξίσωση (8-4) γίνεται:

$$\varepsilon_{fe,d} = D_f \varepsilon_{fd,max} = (1 - 0,5d_f/0,9d) \varepsilon_{fd,max} = 0,5 \times \varepsilon_{fd,max} = 0,5 \times 0,0060 = 0,003$$

Υπολογισμός απαιτούμενου αριθμού στρώσεων, εξίσωση (8-2):

$$V_{fd} = 2 \times (n \times 0,12) \times 0,9 \times 365 \times (0,003 \times 230) \geq 100 \text{ KN} \rightarrow n \geq 1,84$$

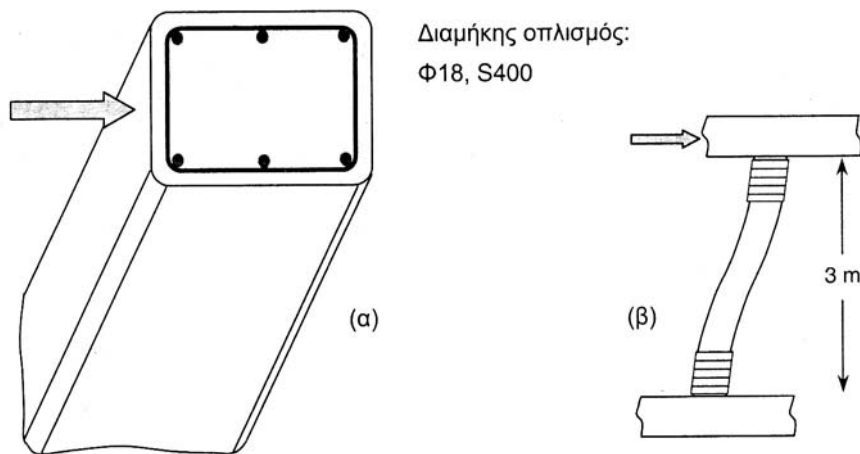
Συνεπώς χρειάζονται 2 στρώσεις (αντιστοιχούν σε πρόσθετη τέμνουσα

$$V_{fd} = 108,8 \text{ KN}).$$

11.3 Περίσφιγξη

11.3.1 Πλαστιμότητα

Θεωρούμε υποστυλώμα ορθογωνικής διατομής $0,30 \times 0,40$ m, για το οποίο η σεισμική φόρτιση δρα παράλληλα στη μεγάλη πλευρά (Σχήμα 11.5). Υποθέτουμε ότι οι γωνίες του υποστυλώματος έχουν στρογγυλεωθεί 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 $E_f = 230$ Gra, εφελκυστική αντοχή $f_{fk} = 3500$ 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.



Σχήμα 11.5: α) φόρτιση υποστυλώματος και β) διάταξη ενίσχυσης με στόχο την αύξηση της πλαστιμότητας μετατοπίσεων

Λύση

Για το υλικό του μανδύα είναι $f_{fde} = \eta_e (f_{fk} / \gamma_f) = 0,90 (3500 / 1,20) = 2625$ Mpa.
Εύρεση συντελεστή αποτελεσματικότητας: $A_g = 1195$ cm², $A_s = 15,25$ cm²

$$K_{e1} = A_e/A_g = 1 - [(b'^2 + d'^2) / 3A_g(1 - A_s/A_g)] = 1 - [(35^2 + 25^2) / 3 \times 1195 \times (1 - 15,25/1195)] = 0,48$$

Από την εξίσωση (9-18) έχουμε:

$$4 = 1,3 + 12,4 \{ [(0,48 \times 2t_f / 300 \times 2625) / 10,67] - 0,1 \} \quad \text{άρα} \quad t_f = 0,40 \text{ mm}$$

Δηλαδή απαιτούνται $0,40/0,12 = 3,3 \rightarrow 4$ στρώσεις ($t_f = 4 \times 0,12 \text{ mm} \rightarrow \mu_{\Delta} = 4,75$).

11.3.2 Λυγισμός ράβδων οπλισμού

Θεωρώντας το υποστύλωμα του Σχήματος 11.5, για σύνθετα υλικά με $E_f = 230 \text{ Gra}$ και πάχος υφάσματος $0,12 \text{ mm}$, ζητείται το απαιτούμενο πάχος μανδύα για την αποφυγή λυγισμού.

Λύση

Το απαιτούμενο πάχος μανδύα για την αποφυγή λυγισμού είναι, εξίσωση (9-21):

$$t_f = 10 \times 6 \times 400 / 230000 \times 0,48 = 0,22 \text{ mm}$$

Δηλαδή $0,22/0,12 = 1,83 \rightarrow 2$ στρώσεις.

11.3.3 Ματίσεις

Θεωρούμε το υποστύλωμα του Σχήματος 11.5, που καταπονείται σε σεισμική φόρτιση οι οποία ενδέχεται να δρα παράλληλα, είτε στη μεγάλη, είτε στη μικρή πλευρά. Υποθέτουμε ότι οι γωνίες του υποστυλώματος έχουν στρογγυλευτεί ώστε να είναι $r_c = 25 \text{ mm}$ και η επικάλυψη του σκυροδέματος είναι $c = 30 \text{ mm}$. Το σκυρόδεμα έχει αντοχή σχεδιασμού $f_{cd} = 10,67 \text{ Mpa}$. Οι διαμήκεις ράβδοι του υποστυλώματος θεωρούνται ματισμένες στη βάση σε μήκος $0,60 \text{ m}$. Έστω ότι διαθέτουμε ύφασμα ινών άνθρακα με μέτρο ελαστικότητας $E_f = 230 \text{ Gra}$, εφελκυστική αντοχή $f_{fk} = 3500 \text{ Mpa}$ και πάχος

0,12 mm, προκειμένου να το χρησιμοποιήσουμε για την κατασκευή μανδύα στη περιοχή 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 δοκιμίων (δηλαδή $\eta_e = 0,90$). Ζητούμενο του προβλήματος είναι ο προσεγγιστικός υπολογισμός του απαιτούμενου αριθμού στρώσεων.

Λύση

α) Σεισμική φόρτιση παράλληλα στη μεγάλη πλευρά

Κρίσιμη διαδρομή ρηγμάτωσης:

$$r_c = \min\{[(220/2) + 2(18+30)], 2\sqrt{2} (18+30)\} = 136 \text{ mm}$$

Εμβαδόν διατομής ράβδου:

$$A_b = \pi 18^2/4 = 255 \text{ mm}^2$$

Ενεργή εφελκυστική αντοχή σχεδιασμού σύνθετων υλικών:

$$f_{fde} = \min[0,90(3500/1,20), 0,0015 \times 230000] = \min(2625, 345) = 345 \text{ Mpa}$$

Απαιτούμενο πάχος μανδύα:

$$t_f = (300 \times 400 \times 255 \times 400 / 1,15) / [(300+400) \times 136 \times 1,4 \times 345 \times 600] = 0,38 \text{ mm}$$

Απαιτούμενος αριθμός στρώσεων:

$$0,38/0,12 = 3,16 \rightarrow 4 \text{ στρώσεις.}$$

β) Σεισμική φόρτιση παράλληλα στη μικρή πλευρά

Κρίσιμη διαδρομή ρηγμάτωσης:

$$\rho_c = \min\{[(150/2) + 2(18+30)], 2\sqrt{2} (18+30)\} = 136 \text{ mm}, A_b = 255 \text{ mm}^2, f_{fde} = 345 \text{ Mpa}$$

Απαιτούμενο πάχος μανδύα:

$$t_f = (300 \times 400 \times 255 \times 400 / 1,15) / [(300+400) \times 136 \times 1,4 \times 345 \times 600] = 0,38 \text{ mm}$$

Απαιτούμενος αριθμός στρώσεων:

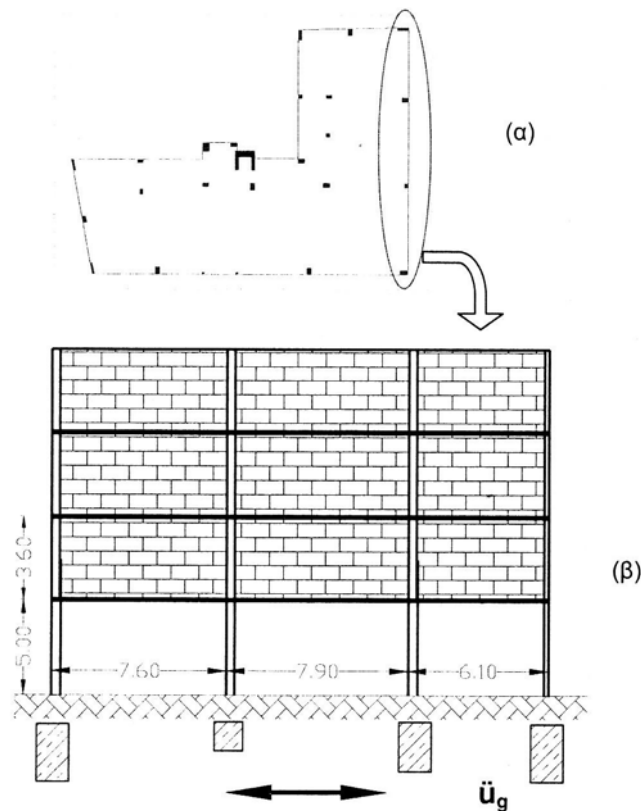
$$0,38 / 0,12 = 3,16 \rightarrow 4 \text{ στρώσεις.}$$

Άρα θα χρησιμοποιηθεί ο ίδιος αριθμός στρώσεων και στις δύο περιπτώσεις σεισμικής φόρτισης.

11.4 Γενικό παράδειγμα αντισεισμικών ενισχύσεων με σύνθετα υλικά

Το 2002, οι Tastani and Pantazopoulou εφήρμοσαν τις αρχές διαστασιολόγησης ενισχύσεων υφιστάμενων κατασκευών στο τετραώροφο πλαίσιο με πιλοτή του Σχήματος 11.6, τις οποίες παρουσιάζουμε παρακάτω.

Οι



Σχήμα 11.6 (πηγή 1)

διαστάσεις των υποστυλωμάτων λαμβάνονται ως 0,40x0,70 m, 0,35x0,35 m, 0,40x0,60 m και 0,40x0,70 m στη πιλοτή και 0,35x0,60 m, 0,35x0,35 m, 0,35x0,50 m και 0,35x0,60 m στους ανώτερους ορόφους. Ο ισχυρός άξονας των υποστυλωμάτων είναι κάθετος στο επίπεδο του πλαισίου με αποτέλεσμα κατά τη σεισμική δράση η κάμψη να ασκείται περί τον ασθενή άξονα της διατομής. Οι ονομαστικές αντοχές των υλικών είναι C25/30 και S400, ενώ ως οπλισμός διάτμησης θεωρούνται συνδετήρες S220 με διάταξη Φ6/300 mm. Τα ποσοστά διαμήκους οπλισμού 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 λυγηρότητας 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 λυγηρά, ενώ τα ενδιάμεσα με $\lambda = 47,6 \text{ \& } 41,6 \leq \max(15\sqrt{v_d}, 75/\sqrt{v_d})$ είναι μεν λυγηρά αλλά επιτρέπεται να αναλυθούν με τη θεωρία του μεμονωμένου υποστυλώματος ($v_d =$ ανοιγμένο αξονικό φορτίο που μεταβιβάζει η ανωδομή σε κάθε κατακόρυφο στοιχείο).

Προκειμένου να προσδιοριστούν τα δυναμικά χαρακτηριστικά της κατασκευής απαιτείται ο προσδιορισμός των συγκεντρωμένων μαζών στη στάθμη των ορόφων 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 από τη σχέση $K_i = 12EI/h^3$ όπου το EI λαμβάνεται ως η τέμνουσα δυσκαμψία στο στάδιο διαρροής M_y/Φ_y . Από την ανάλυση της διατομής υπολογίζεται η ροπή διαρροής M_y και η ροπή καμπυλότητας Φ_y και για μήκος στοιχείου $h=5\text{m}$, προκύπτει $K_{\text{πιλοτής}} = 9300 \text{ KN/m}$.

Η ροπή διαρροής για στοιχεία σε προέχουσα κάμψη ισούται με $A_{s1}zdf_y$, όπου $A_{s1} =$ εμβαδόν εφελκόμενου 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 εφελκόμενη ζώνη), $z =$ αδιάστατος αριθμός που κυμαίνεται μεταξύ 0,75 και 0,85 ανάλογα με τα χαρακτηριστικά της διατομής, $d =$ στατικό ύψος διατομής και $f_y =$ τάση διαρροής εφελκόμενου χάλυβα. Η καμπυλότητα διαρροής Φ_y δίνεται από τις παρακάτω σχέσεις, ανάλογα με το σχήμα της

διατομής: $\Phi_y h = 2,15f_y/E_s$ (ορθογωνική διατομή) και $\Phi_y D = 2,45f_y/E_s$ (κυκλική διατομή).

Η δυσκαμψία των τοιχοπληρώσεων των ανώτερων ορόφων ορίζεται ως $E_m t_m / [4 (h_i / L_{mi})^3 + (h_i / L_{mi})]$, όπου E_m και t_m το μέτρο ελαστικότητας και το πάχος τοιχοπλήρωσης, h_i το ύψος του ορόφου και L_{mi} το μήκος του κάθε ανοίγματος το οποίο στους υπολογισμούς λαμβάνεται ως το μισό του ανοίγματος ώστε εμμέσως να ληφθούν υπ' όψη τα κενά. Άρα η δυσκαμψία του κάθε ορόφου είναι: $K_{op.} = K_{up.} + K_{τοιχ.} = 830000 \text{ KN/m} = 89 K_{\piλοτής}$ και το αντίστοιχο διάνυσμα δυσκαμψιών της κατασκευής είναι:

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

Τα δυναμικά χαρακτηριστικά της κατασκευής είναι:

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

Με χρήση του ελαστικού φάσματος απόκρισης επιταχύνσεων μετατοπίσεων (Σχήμα 11.7 – $\mu = 1$) προκύπτει ότι για $T = 1,24 \text{ sec}$ η σεισμική επιτάχυνση $S_a = 0,088g$ και η αντίστοιχη ελαστική μετατόπιση του μονοβάθμιου συστήματος $S_d^{el} = S_a / \omega^2 = 33,7 \text{ mm}$. Ο συντελεστής συμμετοχής της πρώτης ιδιομορφής υπολογίστηκε $\lambda = 0,993$, άρα $S_d^{\piλαισίου} = S_d^{el} / \lambda = 33,9 \text{ mm}$. Η ελαστική τέμνουσα βάσης είναι $V_{el} = K_{\piλοτής} S_d^{\piλαισίου} \Phi_1 = 310,23 \text{ KN}$.

Το επόμενο βήμα είναι η εύρεση αντοχής της πιλοτής σε οριζόντια δύναμη. Η συνολική τέμνουσα δύναμη προσδιορίζεται από τη συμβολή οπλισμού και σκυροδέματος των τεσσάρων υποστυλωμάτων:

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

Ακολουθώς υπολογίζεται η αθροιστική τέμνουσα διαρροής (πίνακας 11.1) ίση με $378,49 \text{ KN}$, η οποία είναι πολύ μεγαλύτερη από την αντοχή του φορέα ($174,87 \text{ KN}$). 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 την υπερβολική στροφή βάσης, πρέπει να βρεθεί ότι επαρκεί η

διατήρηση της δυσκαμψίας και η αύξηση της ικανότητας για παραμόρφωση των επιμέρους στοιχείων. Δηλαδή, διατηρώντας τη λειτουργία “μαλακού ορόφου” αλλά αποτρέποντας την αστοχία των υποστυλωμάτων σε διάτμηση, η εκτιμώμενη τέμνουσα βάσης είναι ίση με τη τέμνουσα διαρροής $V_y = 378,49$ KN. Στον πίνακα 11.1 υπολογίζεται η μετατόπιση κάθε υποστυλώματος Δ_y , κατά τη διαρροή στη στάθμη του πρώτου ορόφου καθώς και η ανοιγμένη δυσκαμψία K_i κάθε υποστυλώματος ως προς τη συνολική δυσκαμψία ορόφου. Κατά τη διαρροή των πλέον δύσκαμπτων υποστυλωμάτων K_1 , K_3 , K_4 η οριζόντια μετάθεση του ορόφου εκτιμάται προσεγγιστικά σε $0,5(35,96 + 40,70) = 38,33$ mm, που αντιστοιχεί σε στροφή βάσης περίπου 0,8%, ενώ το υποστυλώμα K_2 παραμένει ελαστικό. Η αναπτυσσόμενη οριζόντια δύναμη σε αυτό το επίπεδο μετατόπισης για το K_2 είναι $V_{sd2} = K_2 38,33 = 44,83$ KN, επομένως η συνολική πλευρική δύναμη $V_{sd,tot}$ για την οποία θα σχεδιαστεί η ενίσχυση είναι 348,59 KN. Μέσω της σύγκρισης της διαθέσιμης αντοχής και της αντοχής διαρροής προκύπτει η διαθέσιμη πλαστιμότητα μόλις $\approx 0,5$, γεγονός που δηλώνει τη πρώιμη διατμητική αστοχία. Επιπλέον θα πρέπει να σημειωθεί ότι η παραπάνω τιμή τέμνουσας διαρροής προσεγγίζει την ελαστική τέμνουσα βάσης του τροποποιημένου ελαστικού φάσματος επιταχύνσεων – μετατοπίσεων, γεγονός που οδηγεί σε $\mu_{απατούμενο} \approx 1$.

Υποστυλώμα	V_{Rd} (KN)	V_y (KN)	Δ_y (mm)	$k_i = k_i/\Sigma k_j$	V_{sd} (KN)	N_{sd} (KN)	$M_{P-\Delta}/M_y$
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%
Σύνολα	174,87	378,49	-	1,00	348,59	-	-

Πίνακας 11.1: (πηγή 1) Συγκεντρωτικά στοιχεία ανάλυση

Η διαστασιολόγηση της ενίσχυσης θα πρέπει να συμβαδίζει με τις απαιτήσεις των νέων κανονισμών περί πλαστιμής συμπεριφοράς κατά την αστοχία, οπότε θα πρέπει να επιλεγεί τιμή 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. Λαμβάνοντας υπ' όψη τα παραπάνω αποφασίζεται

ως απαιτούμενη τιμή $\mu_{\Delta} = 2,5$ (που αντιστοιχεί σε οριακή πραγματοποιούμενη στροφή βάσης $2,5 \times 38,33 / 5000 = 1,9\%$).

Εν συνεχεία θα πρέπει να υπολογιστεί ο απαιτούμενος αριθμός στρώσεων μανδύα για την επίτευξη $\mu_{\Delta} = 2,5$, αλλά και για την αποφυγή διαφόρων μορφών αστοχίας ψαθυρού τύπου, βάσει της μεθοδολογίας του Κεφαλαίου 9 και του Κεφαλαίου 8. Για την εφαρμογή της ενίσχυσης επιλέγονται σύνθετα υλικά ινών άνθρακα με $E_f = 230 \text{ Gpa}$, $f_{fk} = 3500 \text{ Mpa}$ και πάχος $0,13 \text{ mm}$. 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 είναι:

$$f_{fde} = \eta_e (f_{fk} / \gamma_f) = 0,90 (3500 / 1,20) = 2625 \text{ Mpa}$$

Ο απαιτούμενος αριθμός στρώσεων για την επίτευξη $\mu_{\Delta} = 2,5$ φαίνεται στο πίνακα 11.2. Ας σημειωθεί ότι για τις υπόλοιπες περιπτώσεις (διάτμηση, λυγισμός κ.λ.π.) οι υπολογισμοί (εδώ παραλείπονται) δίνουν μικρό αριθμό στρώσεων (1-3).

Υποστύλωμα	Πλαστιμότητα $\mu_{\Delta} = 2,5$		
	σ_{Iud} / f_{cd}	k_{e1}	Αρ. στρώσεων
K ₁ (40/70)	0,2	0,34	10,05 → 10
K ₂ (35/35)	0,2	0,50	3,42 → 4
K ₃ (40/60)	0,2	0,40	7,33 → 8
K ₄ (40/70)	0,2	0,34	10,05 → 10

Πίνακας 11.2: (πηγή 1) Αριθμός στρώσεων για πλαστιμότητα $\mu_{\Delta} = 2,5$

ΠΗΓΕΣ

1. Τριανταφύλλου Α. Χ., “Ενισχύσεις Κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος με σύνθετα υλικά”, εκδόσεις Πανεπιστημίου Πατρών, 2^η έκδοση, Πάτρα 2004

ΕΠΙΛΟΓΟΣ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η ενίσχυση - αποκατάσταση της φέρουσας ικανότητας κτιρίων από οπλισμένο σκυρόδεμα μέχρι πρόσφατα αποτελούσε μείζον πρόβλημα, καθώς απαιτούσε σημαντικό χρόνο, χώρο και κόπο για να επιλυθεί. Κύριο μειονέκτημα των έως τώρα επεμβάσεων ήταν η δυσκολία εφαρμογής τους. Τα σύνθετα υλικά πλεονεκτούν έναντι των παραδοσιακών μεθόδων ενίσχυσης κτιρίων διότι παρουσιάζουν:

- Εξαιρετικά μεγάλη εφελκυστική αντοχή, πολλαπλάσια του χάλυβα
- Μικρό βάρος, ευκαμψία και διαθεσιμότητα σε διάφορα μήκη, που τα καθιστούν κατάλληλα για εύκολη και γρήγορη εφαρμογή
- Αύξηση της αντοχής και πλαστιμότητας της κατασκευής, χωρίς μεταβολή της γεωμετρίας ή της δυσκαμψίας της
- Ανθεκτικότητα σε διαβρωτικά περιβάλλοντα και μεγάλη διάρκεια ζωής
- Ιδιαίτερα ανταγωνιστικό κόστος επέμβασης.

Η ενίσχυση με σύνθετα υλικά μπορεί να γίνει σε στοιχεία από οπλισμένο σκυρόδεμα, όπως δοκάρια, πλακοδοκοί, πλάκες, υποστυλώματα, τοιχεία, κόμβοι, καθώς και σε στοιχεία από ξύλο.

Με τα ινοπλισμένα πολυμερή μπορούμε να ενισχύσουμε ρηγματωμένα δομικά στοιχεία, να προστατεύσουμε τις κατασκευές μας από τη διάβρωση του οπλισμού και την αποσάθρωση του σκυροδέματος. Επίσης χρησιμοποιούνται για την ενίσχυση γεφυρών είτε για την αύξηση της αντοχής, είτε για την προστασία τους σε κρούση (ίνες πολυαραμίδης). Τα σύνθετα υλικά είναι μια επαρκής λύση σε σχέση με τις σύγχρονες απαιτήσεις αντισεισμικότητας. Προσδίδουν αντοχή και παραμορφωσιμότητα χωρίς να αυξάνουν τη δυσκαμψία των ενισχυμένων στοιχείων. Γι' αυτό το λόγο θα πρέπει να αποφεύγετε η χρήση των υλικών αυτών σε κατασκευές, οι οποίες σύμφωνα με τον αντισεισμικό κανονισμό απαιτούν αύξηση της δυσκαμψίας τους. Αξίζει να σημειωθεί ότι τα ενισχυμένα με ινοπλισμένα πολυμερή στοιχεία έχουν αύξηση της σεισμικής τους αντοχής κατά ένα συντελεστή 4.3 (στοιχεία EMPA) και μεγαλύτερη ενδοτικότητα. Επιπλέον οι εκκεντρότητες που αναπτύσσονται έχουν μικρή επιρροή στην αντοχή του φέροντος τοίχους. Τα φύλλα ξεκολλούν από την τοιχοποιία στις μεγάλες μετακινήσεις όμως μπορούν ακόμα να

δεχθούν εφελκυστικές δυνάμεις που τις μεταφέρουν στα άκρα της τοιχοποιίας μέσω των σημείων αγκύρωσης. Η εφαρμογή των σύνθετων υλικών είναι πολύ σημαντικό να γίνεται από εξειδικευμένο προσωπικό και με μεγάλη επιμέλεια.

Παρατηρούμε λοιπόν ότι ο ρόλος των FRP θα είναι πρωταγωνιστικός στις ενισχύσεις κι επισκευές και γενικότερα στο χώρο του Πολιτικού Μηχανικού.

ΠΗΓΕΣ

INTERNET

1. <http://www.episkeves.civil.upatras.gr/ergasies%202000/2.pdf>
2. <http://www.episkeves.civil.upatras.gr/ergasies%202001/A6.pdf>
3. <http://www.episkeves.civil.upatras.gr/ergasies%202001/A12.pdf>
4. <http://www.episkeves.civil.upatras.gr/ergasies%202003/10.pdf>
5. <http://www.episkeves.civil.upatras.gr/synedria.htm>
6. <http://www.episkeves.civil.upatras.gr/2000.htm>
7. <http://www.episkeves.civil.upatras.gr/2001.htm>
8. <http://www.episkeves.civil.upatras.gr/2002.htm>
9. <http://www.episkeves.civil.upatras.gr/2003.htm>
10. <http://www.episkeves.civil.upatras.gr/2004.htm>
11. <http://www.episkeves.civil.upatras.gr/2005.htm>
12. <http://www.isomat.gr>
13. <http://www.sika.gr>
14. http://www.strombergarchitectural.com/material_links_pages/gfrp.php

BIBΛΙΑ

7. Δρίσος Σ. Η. ,”Επισκευές και ενισχύσεις κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα”, εκδόσεις Πανεπιστημίου Πατρών, Πάτρα 1998
8. Κουτσούκος Π. Κ., “ Αντισεισμικές ενισχύσεις με σύνθετα υλικά” , Δελτίο ΣΠΜΕ, No 291, 2001
9. Νομικός Ε. Μιχαήλ, “Αποκατάσταση Επανάχρηση Ιστορικών Κτιρίων και Συνόλων”, Τμήμα Αρχιτεκτόνων Α.Π.Θ. , Θεσσαλονίκη 1997
10. Σπυράκος Κ., “Ενίσχυση κατασκευών για σεισμικά φορτία”, Εκδόσεις Τ.Ε.Ε., Αθήνα 2004
11. Τριανταφύλλου Α. Χ., “Προηγμένες τεχνολογίες υλικών & κατασκευών”, εκδόσεις Πανεπιστημίου Πατρών, Πάτρα 2003
12. Τριανταφύλλου Α. Χ., “Ενισχύσεις Κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος με σύνθετα υλικά”, εκδόσεις Πανεπιστημίου Πατρών, 2^η έκδοση, Πάτρα 2004

ΕΡΓΑΣΙΕΣ ΦΟΙΤΗΤΩΝ

7. Βρυώνης Ανδρέας-Δημόπουλος Γεώργιος, “Περίσφιγξη υποστυλώματος Ο.Σ. με σύνθετα υλικά”, 8^ο Φοιτητικό συνέδριο “Επισκευές κατασκευών 2002”, Πανεπιστήμιο Πατρών 2002
8. Γερεουδάκη Αντωνία-Χαλκιαδάκης Γεώργιος, “Μανδύες ως μέσο επισκευής-ενίσχυσης υποστυλωμάτων”, 11^ο Φοιτητικό συνέδριο “Επισκευές κατασκευών 2005”, Πανεπιστήμιο Πατρών 2005
9. Θεοδωράτος Ανδρέας-Παπαδόπουλος Θανάσης, “Ιστορικά κτίρια: Ενίσχυση και Επισκευή τους με χρήση FRP”, 8^ο Φοιτητικό συνέδριο “Επισκευές κατασκευών 2002”, Πανεπιστήμιο Πατρών 2002
10. Κρητικού Κωνσταντούλα-Λογοθέτη Ευθυμία, “Ενίσχυση δοκών με φύλλα FRP και μεταλλικά ελάσματα”, 11^ο Φοιτητικό Συνέδριο “Επισκευές Κατασκευών 2005”, Πανεπιστήμιο Πατρών 2005
11. Κροντήρη Δήμητρα-Χασκά Γεωργία, “Εφαρμογή επικολητών ελασμάτων (χάλυβας-ινοπλισμένα)”, 10^ο Φοιτητικό συνέδριο “Επισκευές κατασκευών 2004”, Πανεπιστήμιο Πατρών 2004
12. Μακρής Σωτήριος-Πολίτη Σπυριδούλα, “Εφαρμογή επικολητών ελασμάτων (χάλυβας-ινοπλισμένα)”, 10^ο Φοιτητικό συνέδριο “Επισκευές κατασκευών 2004”, Πανεπιστήμιο Πατρών 2004
13. Μαμούνας Απόστολος-Τερζής Δημήτριος, “Ενίσχυση δοκών από οπλισμένο σκυρόδεμα με ινοπλισμένα πλαστικά”, 6^ο Φοιτητικό συνέδριο “Επισκευές κατασκευών 2000”, Πανεπιστήμιο Πατρών 2000
14. Νικολόπουλος Παναγιώτης, “Τεχνολογία νέων υλικών σε επισκευές-ενισχύσεις κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα”, 6^ο Φοιτητικό συνέδριο “Επισκευές κατασκευών 2000”, Πανεπιστήμιο Πατρών 2000
15. Ντελμέκουρα Κωνσταντίνα, “Ενίσχυση κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα με χρήση σύνθετων υλικών ανόργανης μήτρας”, 11^ο Φοιτητικό Συνέδριο “Επισκευές Κατασκευών 2005”, Πανεπιστήμιο Πατρών 2005
16. Παναγιωτοπούλου Βασιλική, “Ενίσχυση δοκών με NSM FRP ράβδους”, 11^ο Φοιτητικό Συνέδριο “Επισκευές Κατασκευών 2005”, Πανεπιστήμιο Πατρών 2005

17. Παππά Ελένη-Ποταμού Λυδία, “Ενίσχυση υποστυλωμάτων με μανδύες από Ο.Σ. και FRP”, 11ο Φοιτητικό Συνέδριο “Επισκευές Κατασκευών 2005”, Πανεπιστήμιο Πατρών 2005
18. Παπανικολάου Έλλη-Άννα, “Προεντεταμένα από ινοπλισμένα πολυμερή για ενίσχυση κατασκευών”, 9^ο Φοιτητικό συνέδριο “Επισκευές κατασκευών 2003”, Πανεπιστήμιο Πατρών 2003
19. Σπάθης Σπύρος-Δρόσος Βασίλης, “Ενίσχυση υποστυλώματος με FRP για σεισμικά φορτία”, 11ο Φοιτητικό Συνέδριο “Επισκευές Κατασκευών 2005”, Πανεπιστήμιο Πατρών 2005
20. Χασάπης Ευθύμιος-Χριστάκη Αιμιλία, “Βλάβες από σεισμό και τρόποι επέμβασης σε κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα”, 6^ο Φοιτητικό συνέδριο “Επισκευές κατασκευών 2000”, Πανεπιστήμιο Πατρών 2000

ΕΝΗΜΕΡΩΤΙΚΑ ΦΥΛΛΑΔΙΑ

1. “Δομητικές ενισχύσεις με συστήματα υφασμάτων SikaWrap”, Sika A.B.E.E., 2005
2. “Ολοκληρωμένα συστήματα ενίσχυσης κατασκευών με σύνθετα υλικά”, ISOMAT A.B.E.E., 2006
3. “Prestressing Systems for Structural Strengthening with Sika Carbodur CFRP Plates”, Sika A.B.E.E., 2004
4. “Seismic Upgrading of Buildings with Sika[®] Composite Strengthening Systems”, Sika A.B.E.E., 2005
5. “Sika Carbodur Heating Device”, Sika A.B.E.E., 2005
6. “Structural Strengthening Systems”, Sika A.B.E.E., 2005