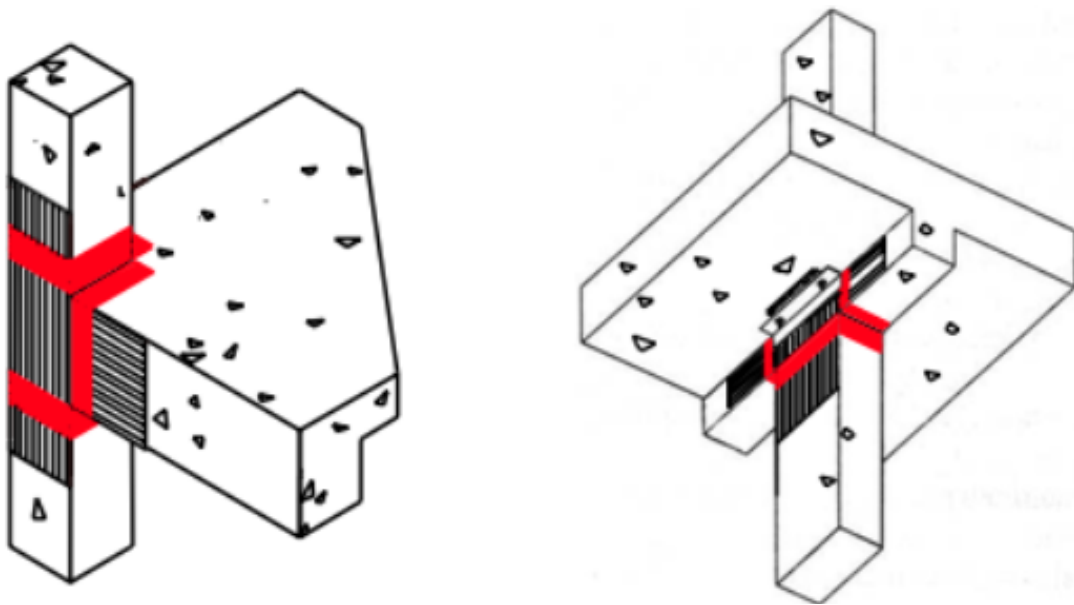


ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ  
ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΑΠΟ  
ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΑ ΠΟΛΥΜΕΡΗ**



ΣΠΟΥΔΑΣΤΡΙΑ: ΕΙΡΗΝΗ ΠΡΩΤΟΠΑΠΑ

ΕΙΣΗΓΗΣΗ – ΕΠΙΒΛΕΨΗ : ΔΙΟΝΥΣΙΟΣ ΜΠΙΣΚΙΝΗΣ

ΠΑΤΡΑ, 2020

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΤΕΧΝΙΚΕΣ**

- 1.1 Γενικά
- 1.2 Ίνες
- 1.3 Μήτρα
- 1.4 Κόλλα
- 1.5 Συστήματα ενίσχυσης
- 1.6 Τεχνικές ενίσχυσης

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΒΑΣΕΙΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ**

- 2.1 Γενικά
- 2.2 Καταστατικοί νόμοι των υλικών
  - 2.2.1 Υπολογισμός αντιστάσεων – Πλήρης συνεργασία υλικών
  - 2.2.2 Υπολογισμός αντιστάσεων – Αποκόλληση
  - 2.2.3 Οριακή κατάσταση λειτουργικότητας
- 2.3 Συνάφεια σύνθετων υλικών – Υποστρώματος
  - 2.3.1 Γενικά, Συμπεριφορά
  - 2.3.2 Αναλυτικό προσομοίωμα

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΣΕ ΚΑΜΨΗ**

- 3.1 Γενικά
- 3.2 Αρχική κατάσταση
- 3.3 Οριακή κατάσταση αντοχής-μηχανισμοί αστοχίας
- 3.4 Υπολογισμοί για την οριακή κατάσταση της αντοχής
  - 3.4.1 Μηχανισμοί πλήρους συνεργασίας
    - 3.4.1.1. Διαρροή εφελκυσόμενου χάλυβα, σύνθλιψη σκυροδέματος
    - 3.4.1.2. Διαρροή εφελκυσόμενου χάλυβα, θραύση σύνθετων υλικών
    - 3.4.1.3. Σύνθλιψη σκυροδέματος
  - 3.4.2 Μηχανισμοί με απώλεια της πλήρους συνεργασίας
    - 3.4.2.1. Αποκόλληση στην ακραία ρωγμή
    - 3.4.2.2. Αποκόλληση στην ενδιάμεση καμπτική ρωγμή
    - 3.4.2.3. Διατμητική αστοχία στο άκρο-αποκόλληση της επικάλυψης
- 3.5 Απαιτήσεις πλαστιμότητας
- 3.6 Παράδειγμα
- 3.7 Οριακή κατάσταση λειτουργικότητας
- 3.8 Υποστυλώματα

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΣΕ ΔΙΑΤΜΗΣΗ**

- 4.1 Γενικά
- 4.2 Ανάλυση τέμνουσας από τα σύνθετα υλικά
- 4.3 Κόμβοι

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΠΕΡΙΣΦΙΓΞΗ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ**

- 5.1 Συμπεριφορά
- 5.2 Αναλυτικό προσομοίωμα σχεδιασμού
- 5.3 Γωνία στροφής χορδής και πλαστιμότητα
- 5.4 Παράδειγμα
- 5.5 Ένωση ράβδων με παράθεση άκρων (ματίσεις)
  - 5.4.1. Συμπεριφορά και αναλυτικό προσομοίωμα
  - 5.4.2. Επιρροή της ένωσης ράβδων με παράθεση στην γωνία στροφής χορδής
- 5.6 Λυγισμός ράβδων

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ**

- 6.1 Γενικά
- 6.2 Θερμοκρασιακές επιδράσεις
- 6.3 Υγρασία
- 6.4 Υπεριώδης ακτινοβολία
- 6.5 Αλκαλικό και όξινο περιβάλλον
- 6.6 Γαλβανική διάβρωση
- 6.7 Ερπυσμός
- 6.8 Θραύση υπό τάση, διάβρωση υπό τάση
- 6.9 Κόπωση
- 6.10 Κρούση
- 6.11 Αξιολόγηση τύπου ινών

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΣΥΓΧΡΟΝΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ**

- 7.1 Περίσφιγξη άοπλων και οπλισμένων δοκιμίων
- 7.2 Αύξηση πλαστιμότητας σε υποστυλώματα
- 7.3 Ενίσχυση έναντι τέμνουσας
- 7.4 Ενίσχυση έναντι κάμψης

## 1. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΤΕΧΝΙΚΕΣ

### 1.1. Γενικά

Τα τελευταία χρόνια έχει αναπτυχθεί μία νέα τεχνική ενίσχυσης η οποία βασίζεται στην χρήση προηγμένων υλικών που αποτελούνται από τον συνδυασμό οργανικών ή ανόργανων ινών (ίνες γυαλιού, αραμιδίου και άνθρακα με διάμετρο 5-25  $\mu\text{m}$ ) σε μήτρα εποξειδικής ρητίνης. Τα υλικά αυτά είναι γνωστά ως ινοπλισμένα πολυμερή (Fiber Polymers –FRP) ή αλλιώς σύνθετα υλικά. Η εφαρμογή τους ως οπλισμός ενίσχυσης στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος συνίσταται στην μέσω εποξειδικών ρητινών επικόλληση τους σε εξωτερική επιφάνεια δομικών στοιχείων με κατεύθυνση των ινών τέτοια ώστε να παραλαμβάνουν σημαντικές εφελκυστικές δυνάμεις.

### 1.2. Ίνες

Κύριο χαρακτηριστικό των ινών είναι η υψηλή εφελκυστική αντοχή τους και η γραμμικά ελαστική συμπεριφορά ως την θραύση τους. Οι κυριότεροι τύποι ινών που χρησιμοποιούνται στα FRP είναι:

Οι ίνες γυαλιού με πυκνότητα 2300-2500  $\text{kg}/\text{m}^3$ , παράγονται από λιωμένο γυαλί και έχουν σαν πλεονέκτημα το χαμηλό κόστος.

Οι ίνες αραμιδίου με πυκνότητα 1450  $\text{kg}/\text{m}^3$ . Παράγονται από αρωματικό πολυαραμίδιο (Κέβλαρ, Twaron) είτε από αρωματικό πολυαιθεραμίδιο (Technora) και έχουν σαν μειονέκτημα την αντοχή τους σε κρουστικά φορτία.

Οι ίνες άνθρακα με πυκνότητα 1800-1900  $\text{kg}/\text{m}^3$  και διακρίνονται σε αυτές που προέρχονται από την θερμική κατεργασία του πολυακρυλονιτριλίου (PAN) και σε αυτές που παράγονται μέσω απόσταξης κάρβουνου (pitch), με αντοχή και μέτρο ελαστικότητας μικρότερα από τις πρώτες.

### 1.3. Μήτρα

Η μήτρα είναι η συγκολλητική ύλη μεταξύ των ινών στα σύνθετα υλικά. Ο πιο συνηθισμένος τύπος μήτρας είναι οι εποξειδικές ρητίνες, όπου υπερέχουν των άλλων τύπων μήτρας εξαιτίας των μηχανικών χαρακτηριστικών και της υψηλής ανθεκτικότητας σε δύσκολες περιβαλλοντικές επιδράσεις. Ο ρόλος της μήτρας στα σύνθετα υλικά είναι αρκετά σημαντικός διότι:

- Συγκρατεί τις ίνες στην επιθυμητή διεύθυνση και θέση
- Εξασφαλίζει την μεταφορά των φορτίων στις δύσκαμπτες ίνες
- Προστατεύει τις ίνες από εξωτερικούς παράγοντες που μπορεί να προκαλέσουν φθορά
- Καθορίζει αρκετές από τις μηχανικές ιδιότητες των σύνθετων υλικών.

### 1.4. Κόλλα

Η κόλλα, η οποία είναι κατά κανόνα εποξειδική ρητίνη δύο συστατικών, εφαρμόζεται μεταξύ του υποστρώματος και του σύνθετου υλικού, εξασφαλίζοντας έτσι τη συνεργασία τους και τη μεταφορά τάσεων από το πρώτο στο δεύτερο. Οι παράγοντες οι οποίοι σχετίζονται με την χρήση των εποξειδικών ρητινών είναι:

- Ο χρόνος εργασιμότητας (pot life)
- Ο χρόνος εφαρμογής (open time)
- Η θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης  $T_g$  (glass transition temperature).

Ο χρόνος εργασιμότητας είναι αυτός που έχει κανείς στην διάθεσή του για να χρησιμοποιήσει την κόλλα με ευκολία πριν αρχίσει να αυξάνεται το ιξώδες της και να σκληρύνεται στο δοχείο όπου έγινε η ανάμιξη. Εξαρτάται από τον τύπο κόλλας, από την θερμοκρασία περιβάλλοντος, αλλά και από την ποσότητα κόλλας που προκύπτει με την ανάμιξη των δύο συστατικών. Ενδεικτικοί χρόνοι για ποσότητα τυπικής κόλλας 5 kg είναι 90 min σε 15°C και 30 min σε 35°C. Παρατηρούμε ότι όσο αυξάνεται η θερμοκρασία, ο χρόνος εργασιμότητας μειώνεται. Ο χρόνος εφαρμογής αντιπροσωπεύει το χρονικό διάστημα μέσα στο οποίο η κόλλα είναι ενεργή, δηλαδή έχει ικανοποιητικές συγκολλητικές ιδιότητες. Μέσα σε αυτό το διάστημα θα πρέπει να ολοκληρώνεται η επικόλληση του οπλισμού ενίσχυσης στην επιφάνεια του υποστρώματος.

## 1.5. Συστήματα Ενίσχυσης

Τα σύνθετα υλικά εφαρμόζονται σε κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα έτσι ώστε να ενισχυθούν τα μέλη τους έναντι κάμψης, διάτμησης και περίσφιξής τους.

- Για την αύξηση της καμπτικής αντοχής επικολλώνται στο εφελκυσμένο πέλμα υφάσματα ή ελάσματα σε τέτοια διεύθυνση ώστε να παραλαμβάνουν τις εφελκυστικές δυνάμεις λόγω κάμψης.
- Για την αύξηση της διατμητικής αντοχής επικολλώνται στην επιφάνεια του μέλους υφάσματα ή ελάσματα με βέλτιστη κατεύθυνση των ινών κάθετα στις πιθανές ρωγμές.
- Σε θλιβόμενα στοιχεία εφαρμόζουμε μανδύες από σύνθετα υλικά πετυχαίνοντας αύξηση αντοχής και παραμορφωσιμότητας λόγω των αναπτυσσόμενων τάσεων περίσφιξης.

Τα συστήματα ενίσχυσης με σύνθετα υλικά χωρίζονται σε δύο κατηγορίες:

**A. Προκατασκευασμένα**, όπου η μήτρα έχει σκληρυνθεί πριν την εφαρμογή τους οπότε προκύπτουν

- Ευθύγραμμα ελάσματα, τα οποία επικολλώνται μέσω ρητίνης στην επιφάνεια του σκυροδέματος, παρέχοντας το πρώτο σύστημα ενίσχυσης. Διατίθενται σε μορφή ρολών και παράγονται με την μέθοδο εξέλασης όπου οι ίνες είναι συνεχείς και παράλληλες στην διεύθυνση των ελασμάτων.
- Κελύφη, μανδύες, τα οποία επικολλώνται επίσης μέσω ρητίνης, στην επιφάνεια του σκυροδέματος.

**B. Συστήματα υγρής εφαρμογής ή επιτόπου σκλήρυνσης της μήτρας**, όπου οι ίνες δεν έχουν προεμποτιστεί στην μήτρα. Ο εμποτισμός τους γίνεται με την εφαρμογή του υλικού της μήτρας στο στοιχείο από σκυρόδεμα, είτε με τον προεμποτισμό τους πριν εφαρμοστούν στο στοιχείο και την άμεση επικόλλησή τους.

- Φύλλα ή υφάσματα αποτελούμενα από συνεχείς ίνες μίας διεύθυνσης, χωρίς μήτρα. Για την εφαρμογή τους απαιτείται η τοποθέτηση ρητίνης στο σκυρόδεμα και η απευθείας τοποθέτηση των ινών στη ρητίνη.
- Υφάσματα αποτελούμενα από συνεχείς ίνες σε δύο τουλάχιστον διευθύνσεις, χωρίς μήτρα. Η εφαρμογή τους γίνεται όπως περιγράφεται στις παραπάνω δύο περιπτώσεις.
- Φύλλα ή υφάσματα αποτελούμενα από συνεχείς ίνες μίας (κυρίως) διεύθυνσης, προεμποτισμένα με ρητίνη σε μη σκληρυμένη μορφή. Η εφαρμογή τους γίνεται με ή χωρίς επί πλέον ρητίνη.

- 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 επί πλέον ρητίνη.
- Συνεχείς ίνες χωρίς μήτρα, συγκεντρωμένες σε μορφή νήματος, το οποίο εμποτίζεται με ρητίνη ενώ τυλίγεται (π.χ. με αυτοματοποιημένο τρόπο) στο υπό ενίσχυση δομικό μέλος.
- Προεμποτισμένες συνεχείς ίνες, συγκεντρωμένες σε μορφή νήματος, το οποίο ενώ τυλίγεται (π.χ. με αυτοματοποιημένο τρόπο) στο υπό ενίσχυση μέλος, υφίσταται ενδεχομένως και πρόσθετο εμποτισμό.

## **1.6. Τεχνικές ενίσχυσης**

Η πιο συνηθισμένη τεχνική εφαρμογής των σύνθετων υλικών είναι η επιφανειακή επικόλληση (με το χέρι) των υφασμάτων, φύλλων, πλεγμάτων ινών ή προκατασκευασμένων στοιχείων μέσω εποξειδικής ρητίνης στα στοιχεία οπλισμένου σκυροδέματος. Επίσης, η επικόλληση ράβδων ή ελασμάτων στις εγκοπές, που αποσκοπεί στην αύξηση της καμπτικής αντοχής, πλεονεκτεί της επιφανειακής επικόλλησης ως προς την βελτιωμένη συνάφεια των σύνθετων υλικών με το σκυρόδεμα. Στην χώρα μας, δεν υπάρχουν τεχνικές οι οποίες να τυγχάνουν ευρείας εφαρμογής, όπως η αυτοματοποιημένη περιτύλιξη νημάτων, η προένταση των ελασμάτων η οποία αυξάνει την αποτελεσματικότητα της ενίσχυσης και η επιταχυμένη σκλήρυνση με θέρμανση της ρητίνης στην επιφάνεια ελασμάτων με σκοπό την ταχύτερη διεκπεραίωση της ενίσχυσης.

## **2. ΒΑΣΕΙΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ**

### **2.1 Γενικά**

Ο σχεδιασμός ενισχύσεων με σύνθετα υλικά ακολουθεί τη φιλοσοφία των σύγχρονων κανονισμών (π.χ. ΕΚΩΣ 2000, ΕΑΚ 2000, Ευρωκώδικες 2, 6 και 8, ΚΑΝΕΠΕ), και περιλαμβάνει όλους τους γνωστούς ελέγχους των οριακών καταστάσεων, με τροποποιήσεις όπου χρειάζεται ώστε να ληφθεί υπόψη η συμβολή των συνθέτων υλικών. Ειδική μνεία χρειάζεται μόνον η ακραία περίπτωση πρόωρης αστοχίας των οπλισμών ενίσχυσης, π.χ. λόγω πυρκαγιάς. Η περίπτωση αυτή αντιμετωπίζεται ως τυχηματική δράση (και κατά πάσα πιθανότητα δεν απαιτούνται ειδικά μέτρα πυροπροστασίας, όπως π.χ. σε πολλές εφαρμογές αντισεισμικών ενισχύσεων), σε ειδικές όμως περιπτώσεις που πρέπει να ικανοποιούνται συγκεκριμένες απαιτήσεις πυροπροστασίας, η μελέτη ενίσχυσης θα πρέπει να περιλαμβάνει τον σχεδιασμό αντιστοίχων συστημάτων (π.χ. ειδικά επιχρίσματα ή γυψοσανίδες).

### **2.2 Καταστατικοί νόμοι των υλικών**

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

### 2.2.1 Υπολογισμός αντιστάσεων – πλήρης συνεργασία υλικών

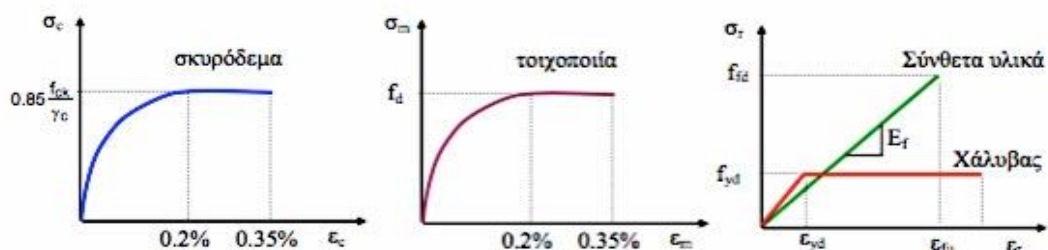
Για το σκυρόδεμα, την τοιχοποιία και τον χάλυβα οι τιμές σχεδιασμού των αντοχών υπολογίζονται διαιρώντας την αντιπροσωπευτική τιμή  $X_k$  της αντοχής με τον συντελεστή ασφαλείας υλικού  $\gamma_m$ . Αν ο έλεγχος ασφαλείας γίνεται σε όρους εντατικών μεγεθών (δυνάμεις), ως αντιπροσωπευτικές τιμές λαμβάνονται οι μέσες τιμές μειωμένες ως εξής: (α) Κατά τον Ευρωκώδικα 8 διαιρούνται (ή πολλαπλασιάζονται, αν είναι δυσμενέστερο) με διορθωτικό συντελεστή “αξιοπιστίας” που εξαρτάται από την ποσότητα και αξιοπιστία των διαθέσιμων στοιχείων για την αποτίμηση της υφιστάμενης κατασκευής. (β) Κατά τον ΚΑΝΕΠΕ αφαιρείται από τη μέση τιμή μία τυπική απόκλιση. Αν ο έλεγχος ασφαλείας γίνεται σε όρους παραμορφωσιακών μεγεθών (π.χ. μετακινήσεις, στροφές), ως αντιπροσωπευτικές τιμές λαμβάνονται οι μέσες τιμές. Σε κάθε μία από τις παραπάνω περιπτώσεις, ο συντελεστής  $\gamma_m$  ( $\gamma_c$ ,  $\gamma_m$  και  $\gamma_s$  για το σκυρόδεμα, την τοιχοποιία και τον χάλυβα, αντίστοιχα) εξαρτάται από τη στάθμη αξιοπιστίας των δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση αντοχών. Για την θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος είναι  $f_{cd} = f_{ck} / \gamma_c$ , όπου  $f_{ck}$  = αντιπροσωπευτική αντοχή και  $\gamma_c$  = συντελεστής ασφαλείας για το σκυρόδεμα. Αντίστοιχα για την φέρουσα τοιχοποιία έχουμε  $f_d = f_k / \gamma_m$  όπου  $f_k$  = αντιπροσωπευτική αντοχή και  $\gamma_m$  = συντελεστής ασφαλείας υλικού για την τοιχοποιία. Τέλος για τον χάλυβα είναι  $f_{yd} = f_{yk} / \gamma_s$ , όπου  $f_{yk}$  = αντιπροσωπευτική τιμή τάσης διαρροής και  $\gamma_s$  = συντελεστής ασφαλείας για τον χάλυβα.

Τα σύνθετα υλικά, ως “προστιθέμενα” σε υφιστάμενα δομικά στοιχεία, αντιπροσωπεύονται από τις χαρακτηριστικές τιμές αντοχής αν ο έλεγχος ασφαλείας γίνεται σε όρους εντατικών μεγεθών και από τις μέσες τιμές αν γίνεται σε όρους παραμορφωσιακών μεγεθών. Η συμπεριφορά τους σε εφελκυσμό θεωρείται γραμμικά ελαστική μέχρι την θραύση, η οποία έρχεται σε τάση (σχεδιασμού)  $f_{fd} = f_{fk} / \gamma_f$  :

$$\sigma_f = E_f \varepsilon_f \leq f_{fd} \quad (2.1)$$

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

Οι καταστατικοί νόμοι σχεδιασμού για τα διάφορα υλικά δίδονται στο Σχ. 2.1.



**Σχ. 2.1** Σχέσεις τάσης-παραμόρφωσης υλικών για τον υπολογισμό αντιστάσεων.

Θα πρέπει να επισημανθεί ότι η επί τόπου εφελκυστική αντοχή των συνθέτων υλικών είναι μικρότερη αυτής που προκύπτει από δοκιμές εφελκυσμού στο εργαστήριο. Αυτό οφείλεται σε συγκεντρώσεις τάσεων, σε ενδεχόμενη πολυαξονικότητα της εντατικής κατάστασης στα σύνθετα υλικά, στην ύπαρξη σημαντικού αριθμού στρώσεων, στην επίδραση διαφόρων παραγόντων του περιβάλλοντος, στον τρόπο δράσης των φορτίων κλπ. Μπορεί δε να ληφθεί υπόψη στους υπολογισμούς θεωρώντας ότι η αστοχία επέρχεται όταν η παραμόρφωση στα σύνθετα υλικά ισούται με μία “ενεργή” παραμόρφωση,  $\epsilon_{fue}$ , η οποία είναι μικρότερη από την μέση οριακή παραμόρφωση αστοχίας,  $\epsilon_{fum}$  (η τελευταία προσδιορίζεται μέσω δοκιμής εφελκυσμού). Βάσει των παραπάνω, η ενεργή αντοχή σχεδιασμού  $f_{fde}$  για τα σύνθετα υλικά σε εφελκυσμό μπορεί να υπολογισθεί ως εξής:

$$f_{fde} = \frac{\epsilon_{fue}}{\epsilon_{fum}} \frac{f_{fk}}{\gamma_f} = \eta_e f_{fd} \quad (2.2)$$

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

Οι τιμές για τον συντελεστή ασφάλειας των συνθέτων υλικών δίνονται στον Πίνακα 2.1 (fib 2001), με επισημάνση ότι αποτελούν ακόμα αντικείμενο τρέχουσας έρευνας, γι’ αυτό και θα πρέπει να θεωρούνται ως ενδεικτικές. Ας σημειωθεί πάντως ότι ο Ευρωκώδικας 8 προτείνει, επί το απλούστερον και εν γένει επί το συντηρητικότερον, την ενιαία τιμή  $\gamma_f = 1.50$ .

Πίνακας 1. Συντελεστής ασφάλειας υλικού για τα σύνθετα υλικά  $\gamma_f$ .

Τύπος ινών	Εφαρμογή τύπου A <sup>(1)</sup>	Εφαρμογή τύπου B <sup>(2)</sup>
------------	---------------------------------	---------------------------------



Άνθρακας	1.20	1.35
Αραμίδιο	1.25	1.45
Γυαλί	1.30	1.50

- (1) Χρήση ελασμάτων (προκατασκευασμένων) σε συνήθεις συνθήκες. Χρήση υφασμάτων σε συνθήκες υψηλής στάθμης ποιοτικού ελέγχου της εφαρμογής.
- (2) Χρήση υφασμάτων σε συνθήκες συνήθους στάθμης ποιοτικού ελέγχου. Χρήση οποιοδήποτε υλικού σε δύσκολες συνθήκες επιτόπου εφαρμογής.

## 2.2.2 Υπολογισμός αντιστάσεων – αποκόλληση

Σε ορισμένες περιπτώσεις ο μηχανισμός της εφελκυστικής αστοχίας των σύθετων υλικών δεν ενεργοποιείται, αλλά αντ'αυτού παρατηρείται αποκόλληση τους από την επιφάνεια του σκυροδέματος ή της τοιχοποιίας. Η αποκόλληση αυτή αφείλεται στην ανάπτυξη σημαντικών διατμητικών τάσεων στη διεπιφάνεια υποστρώματος (σκυροδέματος ή τοιχοποιίας) – συνθέτων υλικών και γίνεται κατά κανόνα μέσω του υποστρώματος, δεδομένου ότι αυτό έχει μικρότερη διατμητική αντοχή από τις συνήθεις εποξειδικές ρητίνες καλής ποιότητας (Neubauer and Rostásy 1999). Σε τέτοιες περιπτώσεις ο συντελεστής ασφάλειας υλικού αφορά στο υπόστρωμα, και λαμβάνεται ίσος με  $\gamma_{fb} = 1.50$ .

## 2.2.3 Οριακή κατάσταση λειτουργικότητας

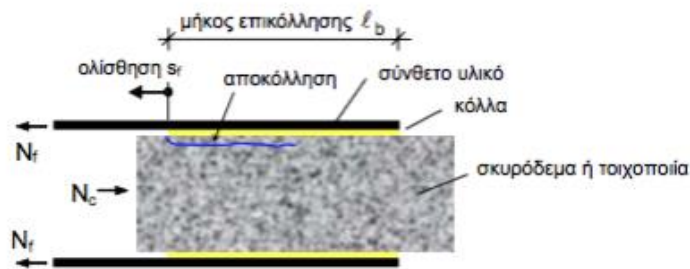
Για την οριακή κατάσταση λειτουργικότητας το μέτρο ελαστικότητας των συνθέτων υλικών μπορεί να θεωρηθεί κατά προσέγγιση ίσο με αυτό που υπολογίζεται για την οριακή κατάσταση αστοχίας.

## 2.3 Συνάφεια συνθέτων υλικών – υποστρώματος

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

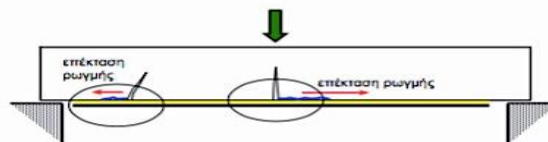
### 2.3.1 Γενικά, συμπεριφορά

Η συμπεριφορά του δεσμού συνθέτων υλικών – υποστρώματος μπορεί να γίνει εύκολα κατανοητή μέσω απλών δοκιμών συνάφειας, όπως αυτή του Σχ. 2.2, η οποία αντιπροσωπεύει την εντατική και παραμορφωσιακή κατάσταση σε περιοχές ρωγμών, όπως δείχνεται για παράδειγμα στη δοκό του Σχ. 2.3.

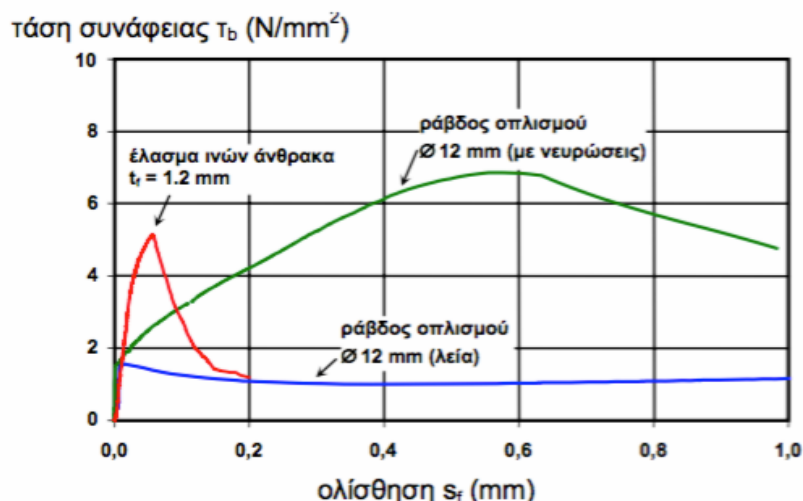


**Σχ. 2.2** Δοκιμή συνάφειας συνθέτων υλικών – υποστρώματος

Στις περιοχές ανάπτυξης ρωγμών, όπως αυτές στο παράδειγμα του Σχ. 2.3, ο εξωτερικός οπλισμός παραλαμβάνει εφελκυστική δύναμη  $N_f$  (Σχ. 2.2), η οποία μεταφέρεται στο υπόστρωμα μέσω διάτμησης. Ιδιαίτερο πρακτικό ενδιαφέρον παρουσιάζει η σχέση μεταξύ της μέσης διατμητικής τάσης  $\tau_b$  στη διεπιφάνεια συνθέτων υλικών και υποστρώματος (ίση με  $N_f / l_b b_f$  στο Σχ. 2.2, όπου  $b_f$  το πλάτος του ελάσματος) συναρτήσεως της ολίσθησης  $s_f$ . Η σχέση αυτή εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, μεταξύ των οποίων είναι η αντοχή του υποστρώματος, η ποιότητα της κόλλας, τα χαρακτηριστικά των συνθέτων υλικών (π.χ. πάχος, μέτρο ελαστικότητας) και το μήκος επικόλλησης. Μπορεί να παρασταθεί γραφικά όπως το Σχ. 2.4, στο οποίο δίνονται για λόγους σύγκρισης και ενδεικτικές σχέσεις τάσης συνάφειας – ολίσθησης για ράβδους οπλισμού με ή χωρίς νευρώσεις σε σκυρόδεμα.

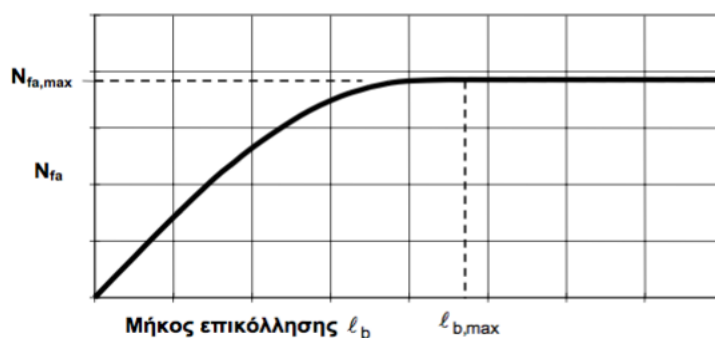


**Σχ. 2.3** Ρηγμάτωση δοκού και ενδεχόμενη αστοχία λόγω αποκόλλησης των συνθέτων υλικών (τα βέλη δείχνουν τη φορά επέκτασης της αποκόλλησης).



**Σχ. 2.4** Σχέσεις τάσης συνάφειας – ολίσθησης

Κύριο χαρακτηριστικό της συμπεριφοράς του δεσμού συνθέτων υλικών – σκυροδέματος (ή τοιχοποιίας) είναι ότι η θραύση των συνθέτων υλικών σπάνια προηγείται της αποκόλλησης, σε αντίθεση με τις ράβδους οπλισμού στο σκυρόδεμα, οι οποίες μπορούν να σχεδιαστούν με επαρκές μήκος αγκύρωσης ώστε να εξασφαλιστεί η αστοχία τους – διαρροή τους – πριν την απώλεια συνάφειας. Η δύναμη που απαιτείται για την αποκόλληση (η οποία γίνεται λόγω ρηγμάτων του υποστρώματος κοντά στη στρώση της κόλλας, δεδομένου ότι η διατμητική αντοχή αυτής ξεπερνά κατά πολύ αυτήν του υποστρώματος), δηλαδή η μέγιστη δύναμη “αγκύρωσης”,  $N_{fa}$ , αυξάνεται με το μήκος επικόλλησης  $l_b$ , μέχρις ότου αυτό λάβει μία οριακή τιμή  $l_{b,max}$ , πέρα από την οποία η δύναμη αποκόλλησης παραμένει πρακτικά αμετάβλητη, ίση με  $N_{fa,max}$  (Σχ. 2.5).



**Σχ. 2.5** Σχέση δύναμης αποκόλλησης συνθέτων υλικών συναρτήσει του μήκους επικόλλησης.

### 2.3.2. Αναλυτικό προσομοίωμα

Για σύνθετα υλικά επί σκυροδέματος, η σχέση δύναμης αποκόλλησης (χαρακτηριστική τιμή) – μήκους επικόλλησης του Σχ. 2.5 μπορεί να περιγραφεί μαθηματικά από τις παρακάτω σχέσεις (Holzenkämpfer 1994, Brosens and Van Gemert 1999):

$$\text{για } l_b \geq l_{b,\max} : \quad N_{fa} = N_{fa,\max} = b_f \sqrt{0.6 k_b E_f f_{ctm} t_f} \quad (\text{N}) \quad (2.3\alpha)$$

$$\text{για } l_b < l_{b,\max} : \quad N_{fa} = N_{fa,\max} \frac{l_b}{l_{b,\max}} \left( 2 - \frac{l_b}{l_{b,\max}} \right) \quad (\text{N}) \quad (2.3\beta)$$

$$l_{b,\max} = 0.6 \sqrt{\frac{E_f t_f}{f_{ctm} k_b}} \quad (\text{mm}) \quad (2.4)$$

όπου  $k_b$  ο συντελεστής κάλυψης, ίσος με

$$k_b = \sqrt{\frac{1.5 \left( 2 - \frac{b_f}{b} \right)}{1 + \frac{b_f}{100}}} \geq 1 \quad (2.5)$$

Στις παρακάτω σχέσεις είναι  $b_f$  = πλάτος ελάσματος (mm),  $b$  = πλάτος διατομής στοιχείου σκυροδέματος στο οποίο έχει επικολληθεί το έλασμα (mm),  $f_{ctm}$  = μέση εφελκυστική αντοχή σκυροδέματος ( $\text{N/mm}^2$ ),  $E_f$  = μέτρο ελαστικότητας συνθέτων υλικών ( $\text{N/mm}^2$ ) και  $t_f$  = πάχος ελάσματος συνθέτων υλικών (mm).

Σε όρους τάσεων, από τις παραπάνω σχέσεις προκύπτει ότι η αποκόλληση των συνθέτων υλικών επέρχεται όταν η εφελκυστική τάση σχεδιασμού σε αυτά ( $N_{fad} / b_f t_f$ ) γίνει ίση με την αντοχή που αντιστοιχεί σε αποκόλληση,  $f_{fbd}$  :

$$\text{για } l_b \geq l_{b,\max} : \quad f_{fbd} = \frac{1}{\gamma_{fb}} \sqrt{\frac{0.6 E_f f_{ctm} k_b}{t_f}} \quad (\text{N, mm}) \quad (2.6\alpha)$$

$$\text{για } l_b < l_{b,\max} : \quad f_{fbd} = \frac{1}{\gamma_{fb}} \sqrt{\frac{0.6 E_f f_{ctm} k_b}{t_f}} \frac{l_b}{l_{b,\max}} \left( 2 - \frac{l_b}{l_{b,\max}} \right) \quad (\text{N, mm}) \quad (2.6\beta)$$

### 3. ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΣΕ ΚΑΜΨΗ

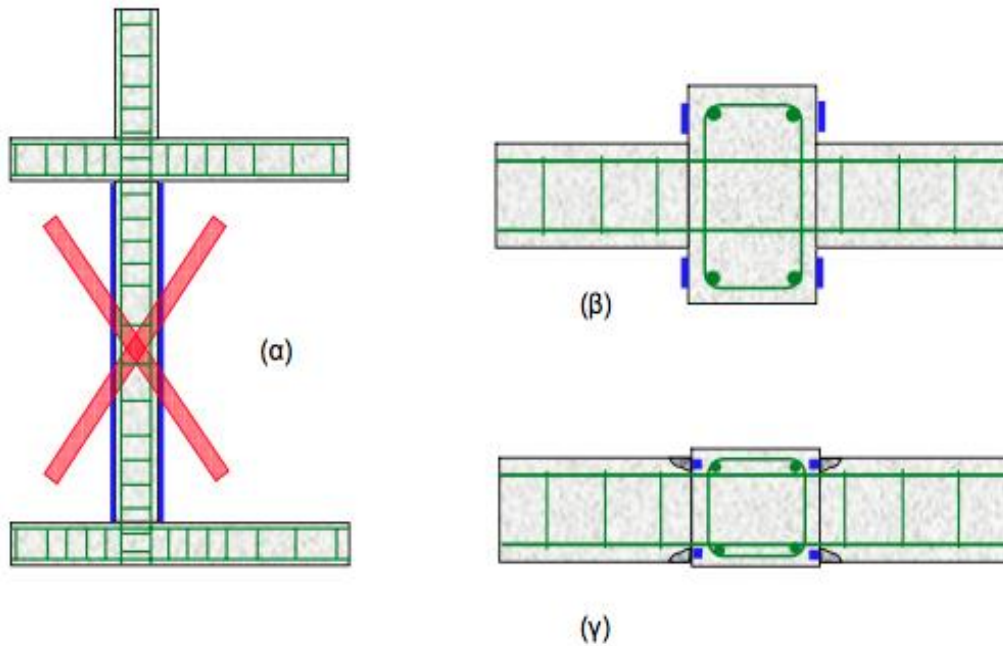
#### 3.1 Γενικά

Η εφαρμογή συνθέτων υλικών για ενισχύσεις έναντι κάμψης (Σχ. 3.1) γίνεται κυρίως σε στοιχεία τύπου δοκού ή πλάκας, μέσω ελασμάτων ή υφασμάτων (ή ακόμα και ράβδων σε εγκοπές), τα οποία επικολλούνται στο εφελκυσμένο πέλμα με διεύθυνση των ινών τέτοια ώστε να παραλαμβάνουν τις λόγω κάμψης εφελκυστικές δυνάμεις (π.Χ. παράλληλα στον άξονα του μέλους, για την περίπτωση δοκών, σε δύο κάθετες μεταξύ τους διευθύνσεις για την περίπτωση πλακών). Στην περίπτωση υποστυλωμάτων με κρίσιμες σε κάμψη τις ακραίες διατομές, η εφαρμογή των συνθέτων υλικών σε μορφή ελασμάτων ή υφασμάτων είναι γενικά δύσκολη, δεδομένου ότι στις περιπτώσεις αυτές πρέπει να εξασφαλισθεί η συνέχεια (αγκύρωση) των οπλισμών εντός των κόμβων. Αυτό γίνεται εφικτό όταν οι δοκοί έχουν μικρότερο πλάτος από τα υποστυλώματα ή όταν χρησιμοποιούνται οπλισμοί συνθέτων υλικών μικρού πλάτους (π.Χ. μορφής ράβδων) σε εγκοπές (Σχ. 3.2).



**Σχ. 3.1** Παραδείγματα εφαρμογής ελασμάτων για την καμπτική ενίσχυση δοκών.

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



**Σχ. 3.2** Ενδεικτικές διατάξεις καμπτικής ενίσχυσης υποστυλωμάτων για μέγιστη ροπή στα άκρα. (α) Εσφαλμένη εφαρμογή, (β) συνέχεια οπλισμού τύπου ελάσματος μέσω της πλάκας, (γ) συνέχεια οπλισμού τύπου ράβδου σε εγκοπές μέσω του κόμβου.

### 3.2 Αρχική κατάσταση

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

Ας υποθέσουμε ότι κατά τη φάση της ενίσχυσης η κρίσιμη διατομή μια δοκού (Σχ. 3.3) καταπονείται σε ροπή  $M_o$ , μεγαλύτερη από τη ροπή ρηγμάτωσης  $M_{cr}$  (αν είναι μικρότερη, η επίδραση της  $M_o$  είναι αμελητέα). Από ισορροπία δυνάμεων στην διατομή προκύπτει το ύψος της θλιβόμενης ζώνης  $x_o$ :

$$\frac{1}{2}bx_o^2 + (\alpha_s - 1)A_{s2}(x_o - d_2) = \alpha_s A_{s1}(d - x_o) \quad (3.1)$$

όπου  $A_{s1}$  = εμβαδόν εφελκόμενου χάλυβα,  $A_{s2}$  = εμβαδόν θλιβόμενου χάλυβα,  $d_2$  = απόσταση κέντρου βάρους διατομής θλιβόμενου χάλυβα από την ακραία θλιβόμενη ίνα,  $d$  = στατικό ύψος,  $h$  = ύψος διατομής,  $d_1$  = απόσταση κέντρου βάρους διατομής εφελκόμενου χάλυβα από την ακραία εφελκόμενη ίνα (=  $h - d$ ),  $b$  = πλάτος διατομής και  $\alpha_s = E_s / E_c$  = λόγος μέτρου ελαστικότητας χάλυβα προς μέτρο ελαστικότητας σκυροδέματος. Η παραμόρφωση  $\epsilon_{co}$  στην ακραία θλιβόμενη ίνα σκυροδέματος είναι

$$\epsilon_{co} = \frac{M_o x_o}{E_c I_{o2}} \quad (3.2)$$

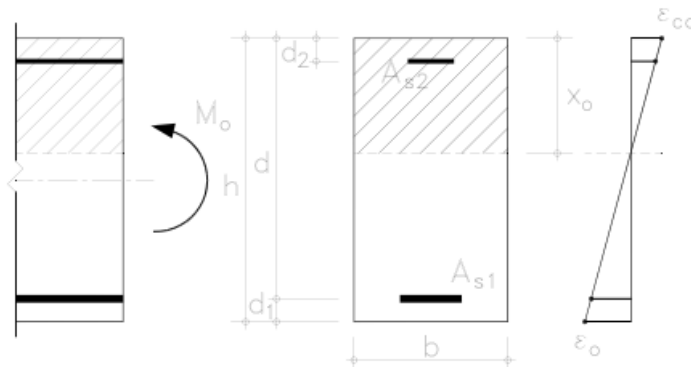
όπου  $I_{o2}$  είναι η ροπή αδράνειας της ρηγματωμένης διατομής, ίσης με

$$I_{o2} = \frac{bx_0^3}{3} + (a_s - 1)^2 A_{s2} (x_0 - d_2) + a_s A_{s1} (d - x_0)^2 \quad (3.3)$$

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

$$\epsilon_o = \epsilon_{co} \frac{h - x_0}{x_0} \quad (3.4)$$

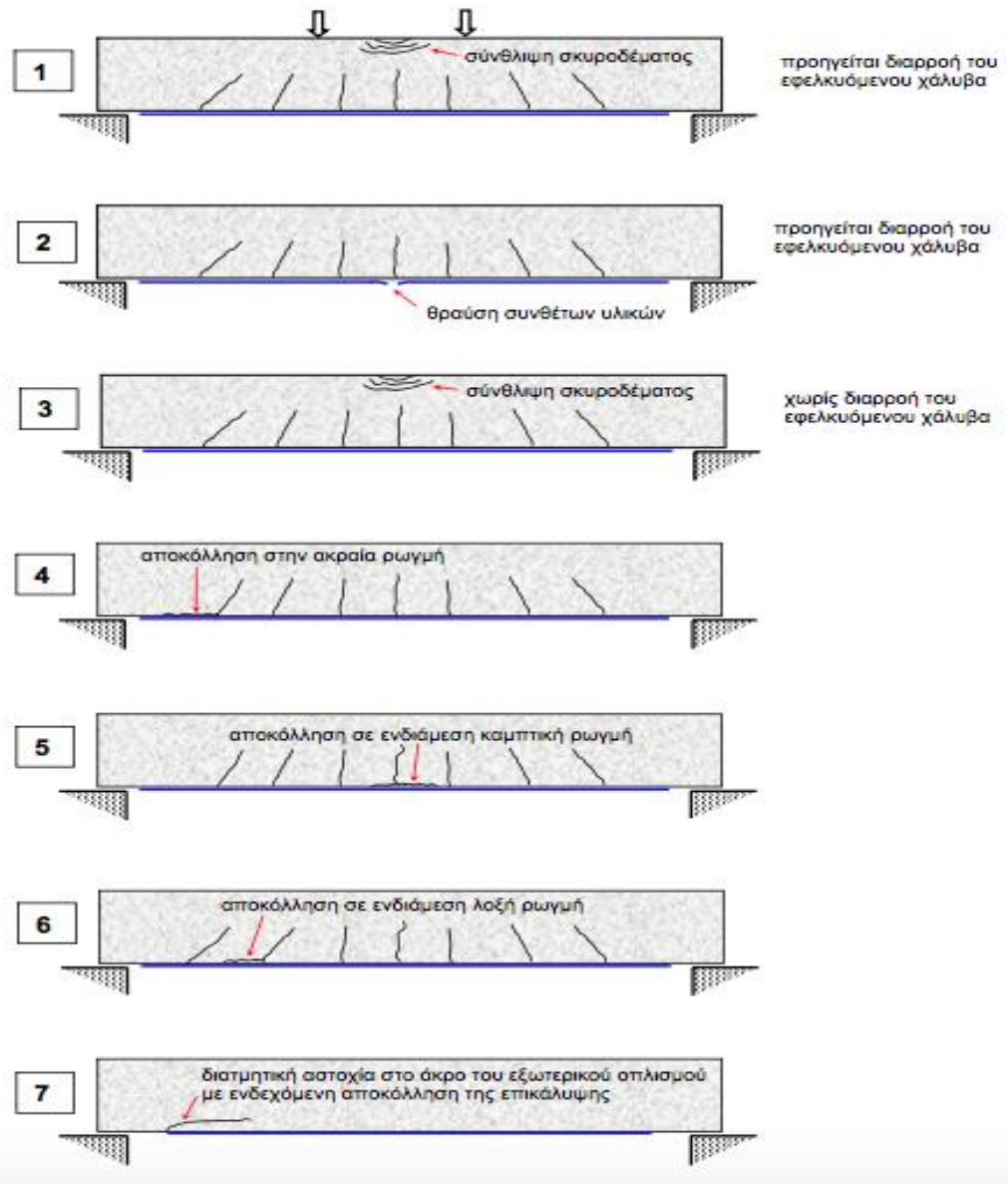
Το  $\epsilon_o$  που προσδιορίζεται από την εξίσωση (3.4) αποτελεί την αρχική παραμόρφωση στη θέση επικόλλησης του οπλισμού ενίσχυσης.



**Σχ. 3.3** Παραμορφώσεις σε ορθογωνική διατομή δοκού υπό ροπή  $M_o$  κατά τη φάση ενίσχυσης.

### 3.3 Οριακή κατάσταση αντοχής – μηχανισμοί αστοχίας

Οι πιθανότεροι μηχανισμοί αστοχίας στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος ενισχυμένων σε κάμψη με σύνθετα υλικά περιγράφονται παραστατικά στο Σχ. 3.4 Η διαδικασία υπολογισμών για τον κάθε μηχανισμό δίνεται στην επόμενη ενότητα.



Σχ. 3.4 Μορφές αστοχίας δοκού ενισχυμένης σε κάμψη με σύνθετα υλικά.

### 3.4 Υπολογισμοί για την οριακή κατάσταση

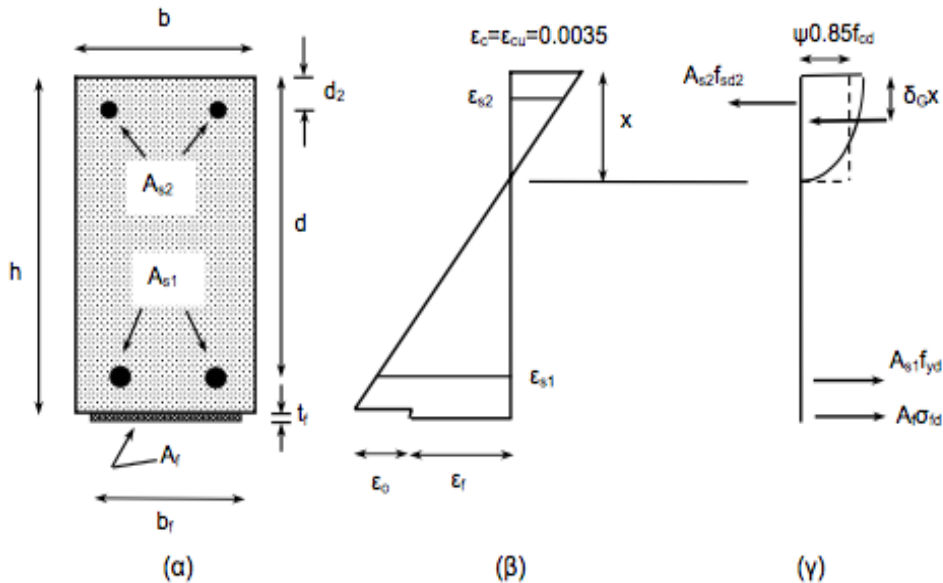
Οι τρεις πρώτοι από τους παρακάτω μηχανισμούς δεν σχετίζονται με πρόωρες αστοχίες (π.Χ. αποκολλήσεις των συνθέτων υλικών). Έτσι το ενισχυμένο στοιχείο μπορεί να μελετηθεί ως ένα σύμμικτο στοιχείο, στο οποίο υπάρχει πλήρης συνεργασία μεταξύ του σκυροδέματος και των εξωτερικών οπλισμών. Όλοι οι υπόλοιποι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



### 3.4.1 Μηχανισμοί πλήρους συνεργασίας

#### 3.4.1.1 Διαρροή εφελκόμενου χάλυβα, σύνθλιψη σκυροδέματος

Σύμφωνα με το μηχανισμό αυτό, ο οποίος είναι και ο πλέον επιθυμητός αλλά ενεργοποιείται σπάνια, πρώτα διαρρέει ο διαμήκης οπλισμός σε εφελκυσμό και ακολούθως υφίσταται σύνθλιψη το σκυροδέμα στη θλιβόμενη ζώνη, χωρίς να υπάρχει αστοχία ή κάποιου είδους αποκόλληση στα σύνθετα υλικά. Ο υπολογισμός της ροπής αντοχής στην κρίσιμη διατομή του μέλους (Σχ. 3.5) γίνεται βάσει ισορροπίας των εσωτερικών δυνάμεων και του συμβιβαστού των παραμορφώσεων:



**Σχ. 3.5** Ανάλυση διατομής στην οριακή κατάσταση αντοχής. (α) Γεωμετρικά χαρακτηριστικά, (β) κατανομή παραμορφώσεων καθ' ύψος της διατομής, (γ) κατανομή εσωτερικών δυνάμεων

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

$$\psi 0.85 f_{cd} b x + A_{s2} f_{SD2} = A_{s1} f_{yd} + A_f \sigma_{fd} \quad (3.5)$$

όπου  $\psi = 0.85$ ,  $f_{cd}$  = τιμή σχεδιασμού θλιπτικής αντοχής σκυροδέματος,  $x$  = ύψος θλιβόμενης ζώνης,  $f_{yd}$  = τάση διαρροής χάλυβα (τιμή σχεδιασμού) και  $A_f$  = εμβαδόν διατομής συνθέτων υλικών.  $F_{SD2}$  και  $\sigma_{fd}$  είναι οι τάσεις του θλιβόμενου χάλυβα και των συνθέτων υλικών, αντίστοιχα, οι οποίες δίνονται από τις ακόλουθες σχέσεις (συμβιβαστό παραμορφώσεων):

$$f_{SD2} = E_s \left( \varepsilon_c \frac{x - d_2}{x} \right) \quad (3.6)$$

$$\sigma_{fd} = E_f \left( \varepsilon_c \frac{h - x}{x} - \varepsilon_o \right) \quad (3.7)$$

Στις παρακάτω σχέσεις  $\varepsilon_c = \varepsilon_{cu}$  είναι η οριακή παραμόρφωση του σκυροδέματος ίσο με 0.0035 και  $\varepsilon_o$  η αρχική παραμόρφωση στην ακραία εφελκόμενη ίνα [εξ. (3.4)]. Επισημαίνεται ότι η τάση  $f_{sd2}$  στον θλιβόμενο χάλυβα δεν θα πρέπει να λαμβάνεται πάνω από  $f_{yd}$ .

Υπολογισμός καμπτικής αντίστασης (τιμή σχεδιασμού):

$$M_{Rd} = \frac{1}{\gamma_{Rd}} [A_{s1} f_{yd} (d - \delta_G x) + A_f \sigma_{fd} (h - \delta_G x) + A_{s2} f_{sd2} (\delta_G x - d_2)] \quad (3.8)$$

όπου  $\delta_G=0.4$ ,  $\gamma_{Rd}$ = συντελεστής ασφάλειας για τον υπολογισμό της καμπτικής αντίστασης σχεδιασμού σε διατομή υφιστάμενου δομικού στοιχείου (γενικά  $\gamma_{Rd} \geq 1$ ). Προϋποθέσεις για την εφαρμογή των παραπάνω εξισώσεων είναι ότι ο εφελκόμενος χάλυβας έχει διαρρεύσει και ότι η παραμόρφωση στα σύνθετα υλικά είναι μικρότερη της οριακής,  $\varepsilon_{f,lim}$  (αυτής που αντιστοιχεί στη θραύση ή αποκόλλησή τους) δηλαδή:

$$\varepsilon_{s1} = \varepsilon_c \frac{d-x}{x} \geq \frac{f_{yd}}{E_s} \quad (3.9)$$

$$\varepsilon_f = \varepsilon_c \frac{h-x}{x} - \varepsilon_o \leq \varepsilon_{f,lim} \quad (3.10)$$

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

### 3.4.1.2 Διαρροή εφελκόμενου χάλυβα, θραύση συνθέτων υλικών

Ο μηχανισμός αστοχίας κατά τον οποίο μετά τη διαρροή του εφελκόμενου χάλυβα ακολουθεί θραύση των συνθέτων υλικών είναι γενικά σπάνιος (ενδέχεται να εμφανιστεί αν το εμβαδόν διατομής των συνθέτων υλικών είναι πάρα πολύ μικρό). Η ανάλυση της κρίσιμης διατομής στην περίπτωση αυτή γίνεται όπως τα παραπάνω [ισχύουν οι εξ. (3.5) – (3.8)], με τις παρακάτω τροποποιήσεις: (α) Η μέγιστη θλιπτική παραμόρφωση στο σκυρόδεμα  $\varepsilon_c$  δεν είναι πάντα ίση με την οριακή. (β) Η τάση στα σύνθετα υλικά είναι ίση με την εφελκυστική τους αντοχή, δηλαδή  $\sigma_{fd} = f_{ide}$ . (γ) Οι συντελεστές  $\psi$  και  $\delta_G$  είναι:

$$\psi = \begin{cases} 1000\varepsilon_c \left( 0.5 - \frac{1000}{12} \varepsilon_c \right) & \text{για } \varepsilon_c \leq 0.002 \\ 1 - \frac{2}{3000\varepsilon_c} & \text{για } 0.002 \leq \varepsilon_c \leq 0.0035 \end{cases} \quad (3.11)$$

$$\delta_G = \begin{cases} \frac{8-1000\varepsilon_c}{4(6-1000\varepsilon_c)} & \text{για } \varepsilon_c \leq 0.002 \\ \frac{1000\varepsilon_c(3000\varepsilon_c-4)+2}{2000\varepsilon_c(3000\varepsilon_c-2)} & \text{για } 0.002 \leq \varepsilon_c \leq 0.0035 \end{cases} \quad (3.12)$$

Έτσι, για τον υπολογισμό της ροπής αντοχής απαιτείται η επίλυση των εξ. (3.5) – (3.8) (αφού προηγηθούν οι προαναφερθείσες τροποποιήσεις) με αγνώστους τα  $x$ ,  $\varepsilon_c$  και  $M_{Rd}$ . Αυτό μπορεί να γίνει είτε υπολογιστικά είτε βάσει διαδοχικών δοκιμών.

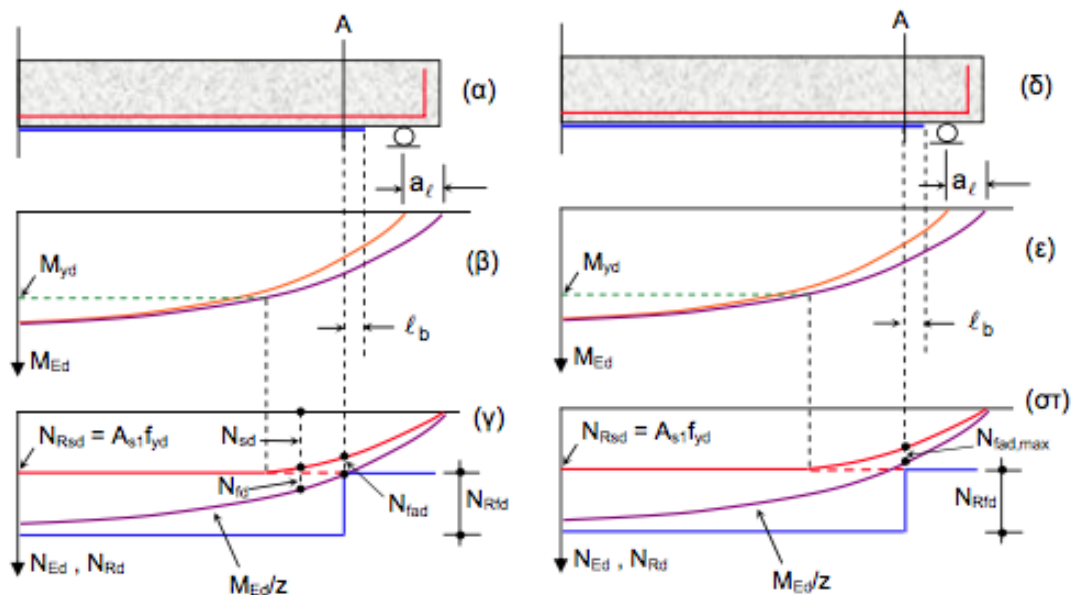
### 3.4.1.3 Σύνθλιψη σκυροδέματος

Ο μηχανισμός σύμφωνα με τον οποίο η θραύση του σκυροδέματος στη θλιβόμενη ζώνη προηγείται οποιασδήποτε άλλης αστοχίας αντιστοιχεί σε ψαθυρή συμπεριφορά και δεν είναι αποδεκτός, γι' αυτό και δεν αναλύεται περαιτέρω. Η μη ενεργοποίηση του εν λόγω μηχανισμού επιτυγχάνεται περιορίζοντας το εμβαδόν των συνθέτων υλικών κάτω από μία κρίσιμη τιμή, έτσι ώστε να εξασφαλιστεί η διαρροή του εφελκυσμένου χάλυβα.

### 3.4.2 Μηχανισμοί με απώλεια της πλήρους συνεργασίας

#### 3.4.2.1 Αποκόλληση στην ακραία ρωγμή

Ο υπολογισμός του απαιτούμενου μήκους αγκύρωσης στα άκρα των συνθέτων υλικών πραγματοποιείται ώστε να μην επέλθει αποκόλληση στην περιοχή της αγκύρωσης. Ας θεωρήσουμε, για παράδειγμα, τη δοκό του Σχ. 3.6α, με διάγραμμα ροπών αυτό του Σχ. 3.6β (το διάγραμμα ροπών πρέπει να μετατεθεί κατά  $a_t$ , βάσει του μηχανισμού ισοδύναμου δικτυώματος για τον μηχανισμό ανάληψης τέμνουσας). Το Σχ. 3.6γ δίνει τις δυνάμεις που ασκούνται τόσο στον εφελκυσμένο χάλυβα ( $N_{sd}$ ) όσο και στα σύνθετα υλικά ( $N_{fd}$ ) σε κάθε διατομή, με αποτέλεσμα τη δρώση ροπής σχεδιασμού  $M_{sd}$ . Προσεγγιστικά, η συνολική εφελκυστική δύναμη (σε ράβδους οπλισμού και σύνθετα υλικά), δηλαδή το άθροισμα  $N_{sd}+N_{fd}$ , ισούται με  $M_{Ed}/z$ , όπου  $z$  ο μοχλοβραχίονας της δύναμης αυτής, ο οποίος είναι ίσος περίπου με  $0.95d$ .



Σχ. 3.6 Αγκύρωση συνθέτων υλικών.

Βάσει του Σχ. 4.6γ, η θέση (διατομή A) πέρα από την οποία υπολογίζεται το μήκος αγκύρωσης των συνθέτων υλικών προσδιορίζεται εκεί όπου η καμπύλη της συνολικής εφελκυστικής δύναμης  $M_{Ed}/z$  τέμνει τη μέγιστη δύναμη που μπορεί να παραληφθεί από το χάλυβα μόνο  $N_{Rsd}=A_s \cdot f_{yd}$ . Στη θέση αυτή η εφελκυστική δύναμη στα σύνθετα υλικά είναι  $N_{fad}$ , ενώ το αντίστοιχο μήκος αγκύρωσης είναι  $l_b$ . Η προς αγκύρωση

δύναμη  $N_{fad}$  (τιμή σχεδιασμού) μπορεί να προσεγγιστεί βάσει ισορροπίας εσωτερικών εντατικών μεγεθών ως εξής:

$$\frac{M_{Ed}}{z} = N_{fad} \left( 1 + \frac{A_{s1} E_s \varepsilon_{s1}}{A_f E_f \varepsilon_f} \right) \approx N_{fad} \left( 1 + \frac{A_{s1} E_s}{A_f E_f} \right) \quad (3.13)$$

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

Η  $N_{fad}$  δεν πρέπει να ξεπερνά την  $N_{fad,max}$  (εξ. 2.3α, με συντελεστή ασφαλείας  $\gamma_{fd}$ ) και θα πρέπει να υπάρχει επαρκής διαθέσιμος χώρος για το μήκος αγκύρωσης  $l_b$ . Α αυτό δεν συμβαίνει, η διατομή  $A$  θα πρέπει να ορισθεί παραπέρα (προς την κατεύθυνση όπου μειώνεται η ροπή κάμψης, δηλαδή κοντά στη στήριξη), Σχ. 3.6δ-στ, έτσι ώστε ή να μειωθεί η  $N_{fad}$  μέχρι την τιμή  $N_{fad,max}$ , ή να απαιτείται μικρότερο  $l_b$  (όπως φαίνεται στο Σχ. 2.3, μικρή σχετικά μείωση στη  $N_{fad}$  επιφέρει σημαντική μείωση στο  $l_b$ ). Αν το μήκος αγκύρωσης και πάλι δεν επαρκεί, θα πρέπει είτε να αυξηθεί το πλάτος και να μειωθεί το πάχος των ελασμάτων, είτε να βελτιωθεί η αγκύρωση με μηχανικό τρόπο.

### 3.4.2.2 Αποκόλληση σε ενδιάμεση καμπτική ρωγμή

Και εδώ μπορεί να εφαρμοστεί το αναλυτικό προσομοίωμα της Ενότητας 2.3, στο οποίο όμως πρέπει να γίνει μια διόρθωση, δεδομένου ότι η πραγματική εντατική κατάσταση στη διεπιφάνεια συνθέτων υλικών –σκυροδέματος στις περιοχές δοκών με κατακόρυφη ρηγμάτωση (χαμηλή τιμή τέμνουσας δύναμης) διαφέρει ως προς αυτήν της πειραματικής διάταξης του Σχ. 2.2. Λεπτομερείς αναλύσεις με πεπερασμένα στοιχεία αλλά και πειραματικά αποτελέσματα δείχνουν ότι για αποκολλήσεις σε περιοχές πολύ μικρής ή μηδενικής τέμνουσας η μέγιστη σιαμητική τάση στη διεπιφάνεια είναι μικρότερη σε σχέση με αυτήν της διάταξης του Σχ. 2.2. Με βάση τα διαθέσιμα αποτελέσματα απο την διεθνή βιβλιογραφία (π.χ Teng et al. 2001), προτείνεται μια τροποποίηση του προσομοιώματος της ενότητας 2.3.2, η οποία συνίσταται στην προσαύξηση της δύναμης που προκαλεί αποκόλληση κατά 150%.

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

$$\text{για } l_b \geq l_{b,max}: \quad \varepsilon_{fb,fl} = \frac{\alpha_{al}}{\gamma_{fb}} \sqrt{\frac{0.6f_{ctm}k_b}{E_f t_f}} \quad (3.14\alpha)$$

$$\text{για } l_b < l_{b,max}: \quad \varepsilon_{fb,fl} = \frac{\alpha_{fl}}{\gamma_{fb}} \sqrt{\frac{0.6f_{ctm}k_b}{E_f t_f} \frac{l_b}{l_{b,max}}} \left( 2 - \frac{l_b}{l_{b,max}} \right) \quad (3.14\beta)$$

όπου  $\alpha_{fl}=2.5$ .

Οι υπολογισμοί για τη ροπή αντοχής γίνονται όπως ακριβώς στην παραπάνω περίπτωση (3.4.1.2), με  $\sigma_{fd}=E_f \varepsilon_{fb,fl}$ .

### 3.4.2.4 Διαμητική αστοχία στο άκρο – αποκόλληση της επικάλυψης

Η αποκόλληση των συνθέτων υλικών λόγω της ανάπτυξης διατμητικής ρωγμής (Σχ. 3.7) στο άκρο με κατεύθυνση επέκτασης περίπου οριζόντια (μεταξύ της κάτω στρώσης οπλισμού χάλυβα και της κόλλας), αποτελεί έναν από τους πιο συνηθισμένους μηχανισμούς αστοχίας δοκών και πλακών ενισχυμένων σε κάμψη. Ο μηχανισμός αυτός, ο οποίος οφείλει τη γένεσή του κατά βάση στην ανάπτυξη σημαντικών οριζοντίων διατμητικών αλλά και κάθετων στον άξονα του οπλισμού ενίσχυσης εφελκυστικών τάσεων, στην στρώση επικάλυψης του σκυροδέματος, έχει αποτελέσει αντικείμενο μελέτης δεκάδων ερευνητών (π.χ. Oehlers 1992, Ziraba et al. 1994, Jansze 1997, Roof and Hassanen 2000). Μία απλή και σχετικά αξιόπιστη μέθοδος αντιμετώπισης περιλαμβάνει την παρακάτω σειρά ελέγχων:

$$V_{Ed,end} \leq 1.4V_{Rd,c} \quad (3.15)$$

$$M_{Ed,end} \leq \frac{2}{3}M_{Rd} \quad (3.16)$$

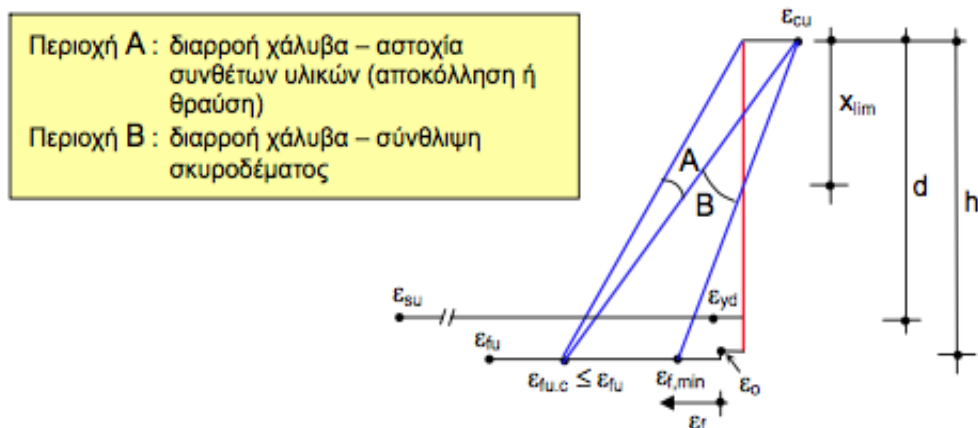
όπου  $V_{Ed,end}$  και  $M_{Ed,end}$  είναι η δρώσα τέμνουσα και ροπή (τιμές σχεδιασμού), αντίστοιχα, στην διατομή απόληξης των συνθέτων υλικών,  $V_{Rd,c}$  είναι η διατμητική αντοχή του μέλους αγνοώντας την συμβολή οπλισμών διάτμησης (συνδετήρες) και  $M_{Rd}$  είναι η ροπή αντοχής του μέλους, δηλαδή η ελάχιστη τιμή εξ αυτών που αντιστοιχούν στους μηχανισμούς (3.4.1.1.), (3.4.1.2.), (3.4.2.2.), (3.4.2.3.). Επίσης, η ικανοποίηση της συνθήκης (3.16) γίνεται εύκολα, π.χ. ρυθμίζοντας τη θέση απόληξης των συνθέτων υλικών. Αν όμως δεν ικανοποιείται η συνθήκη (3.15), τότε απαιτείται ενίσχυση του μέλους (στην περιοχή κοντά στα άκρα των συνθέτων υλικών) έναντι τέμνουσας.



**Σχ. 3.7** Διατμητική αστοχία στη θέση τερματισμού των εξωτερικών οπλισμών.

### 3.5 Απαιτήσεις πλαστιμότητας

Βασική απαίτηση πλαστιμότητας αποτελεί η ενεργοποίηση μηχανισμού αστοχίας κατά τον οποίο η διαρροή του εφελκυσμένου χάλυβα θα προηγείται οποιασδήποτε άλλης αστοχίας, έτσι ώστε να εξασφαλίζεται μία ελάχιστη τιμή πλαστιμότητας καμπυλοτήτων ( $\mu_\phi$ ). Αυτό σημαίνει ότι η εφελκυστική παραμόρφωση των συνθέτων υλικών στην κρίσιμη διατομή κατά την οριακή κατάσταση αντοχής  $\epsilon_{fu,c}$ , θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη από μία ελάχιστη τιμή,  $\epsilon_{f,min}$ , ενώ έχει ως άνω όριο είτε την παραμόρφωση θραύσης,  $\epsilon_{fu}$ , είτε την παραμόρφωση εκείνη η οποία αντιστοιχεί σε αποκόλληση.



**Σχ. 3.8** Κατανομή παραμορφώσεων καθ' ύψος της κρίσιμης διατομής.

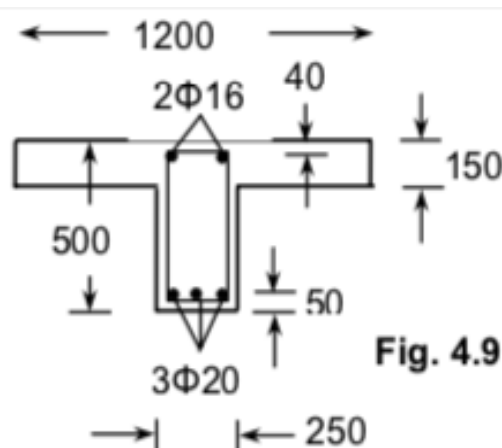
Η ελάχιστη επιτρεπόμενη τιμή παραμόρφωσης στα σύνθετα υλικά κατά την οριακή κατάσταση αντοχής,  $\epsilon_{f,min}$ , για δεδομένη πλαστιμότητα καμπυλοτήτων,  $\mu_\phi$ , υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$\epsilon_{f,min} = \epsilon_{yd} \frac{\mu_\phi}{\left(\frac{d}{h} - \frac{x_y}{h}\right)} \frac{h}{d} - \epsilon_{cu} - \epsilon_o \quad (3.17)$$

όπου  $x_y$  το ύψος της θλιβόμενης ζώνης κατά την εκκίνηση διαρροής του χάλυβα. Σημειώνεται πάντως ότι η επίτευξη μεγάλης πλαστιμότητας δεν είναι πάντα εφικτή, ιδιαίτερα όταν η απαιτούμενη ποσότητα συνθέτων υλικών καθορίζεται από τις απαιτήσεις της οριακής λειτουργικότητας, οπότε το μέλος είναι υπερ-διαστασιολογημένο σε όρους αντοχής.

### 3.6 Παράδειγμα

Θεωρούμε αμφιέριστη πλακοδοκό ανοίγματος 6 m όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Η δοκός φορτίζεται με ομοιόμορφα κατανεμημένο φορτίο 65 kN/m.



**Υλικά:**

$$f_{cd} = 20/1.5 = 13.5 \text{ MPa,}$$

$$f_{ctm} = 2.2 \text{ MPa},$$

$$f_{yd} = 500/1.15 = 435 \text{ MPa}.$$

Να γίνουν οι υπολογισμοί καμπτικής ενίσχυσης για δρώσα ροπή  $M_{Ed} = 240 \text{ kNm}$ . Θεωρούμε ελάσματα συνθέτων υλικών πάχους  $t_f = 1.1 \text{ mm}$ , πλάτους  $50 \text{ mm}$ , μέτρου ελαστικότητας  $E_f = 150 \text{ GPa}$  και οριακής παραμόρφωσης αστοχίας (τιμή σχεδιασμού)  $\varepsilon_{fu} = 0.01$ . Η ροπή κάμψης κατά την διάρκεια των εργασιών ενίσχυσης θεωρείται  $M_o = 45 \text{ kNm}$ . Να ληφθεί  $\gamma_{Rd} = 1$ .

Γεωμετρικά στοιχεία:

$$A_{s1} = 1016 \text{ mm}^2, \text{ για } 4\Phi 18$$

$$A_{s2} = 402 \text{ mm}^2, \text{ για } 2\Phi 16$$

$$h = 550 \text{ mm},$$

$$d = 500 \text{ mm},$$

$$d_1 = 50 \text{ mm},$$

$$d_2 = 40 \text{ mm και}$$

$$b = 1200 \text{ mm}.$$

Για όλους τους χάλυβες οπλισμένου σκυροδέματος το μέτρο ελαστικότητας μπορεί να ληφθεί ίσο με  $200 \text{ GPa}$  ( $E_s$ ) ενώ το  $E_c$  που αφορά το μέτρο ελαστικότητας του σκυροδέματος λαμβάνεται σύμφωνα με τον παρακάτω πίνακα όπου στη δική μας περίπτωση είναι 29, δεδομένου ότι το  $f_{ck}$  είναι 20. Ο λόγος λοιπόν  $\alpha_s = E_s / E_c$  είναι  $200/29 = 6.9$ .

$f_{ck}$	12	16	20	25	30	35	40	45	50
$E_{cm}$	26	27.5	29	30.5	32	33.5	35	36	37

Επιλύοντας την Εξ.(1)

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

προκύπτει:  $x_o = 0.07 \text{ m}$ .

Η παραμόρφωση  $\varepsilon_{co}$  στην ακραία θλιβόμενη ίνα σκυροδέματος είναι:

$$\varepsilon_{co} = \frac{M_o x_o}{E_c I_{o2}} \quad (2)$$

η ροπή αδράνειας της ρηγματωμένης διατομής, ίση με:

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

$$I_{o2} = 0.001436 \text{ m}^4$$

Οπότε η Εξ.(2) δίνει:

$$\varepsilon_{co} = 7.57 * 10^{-5}$$

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

$$\varepsilon_o = \varepsilon_{co} \frac{h - x_o}{x_o} \quad (4)$$

βρίσκουμε  $\varepsilon_o = 5.19 * 10^{-4}$ .

Το  $\varepsilon_o$  που προσδιορίζεται από την εξίσωση (4) αποτελεί την αρχική παραμόρφωση στη θέση επικόλλησης του σπλισμού ενίσχυσης.

Θεωρώντας  $k_b \approx 1$ , η εξίσωση (5) για αποκόλληση στην περιοχή της μεσαίας διατομής (όπου η ροπή είναι μέγιστη και η τέμνουσα μηδέν) δίνει:

$$\text{για } \ell_b \geq \ell_{b,max} : \quad \varepsilon_{fb,fl} = \frac{\alpha_{fl}}{\gamma_{fb}} \sqrt{\frac{0.6f_{ctm}k_b}{E_f t_f}} \quad (5)$$

$$\varepsilon_{fb,fl} = \frac{2.5}{1.5} \sqrt{\frac{0.6 * 2.2 * 1}{150000 * 1.1}} = 0.0047, \text{ οπότε } \varepsilon_{fb,fl} = \min(0.01, 0.0047) = 0.0047.$$

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

Στη συνέχεια επιλύονται οι παρακάτω εξισώσεις με δοκιμές

$$\psi 0.85f_{cd}bx + A_{s2}f_{sd2} = A_{s1}f_{yd} + A_f\sigma_{fd} \quad (6)$$

$$\delta_G = \begin{cases} \frac{8 - 1000\varepsilon_c}{4(6 - 1000\varepsilon_c)} & \text{if } \varepsilon_c \leq 0.002 \\ \frac{1000\varepsilon_c(3000\varepsilon_c - 4) + 2}{2000\varepsilon_c(3000\varepsilon_c - 2)} & \text{if } 0.002 \leq \varepsilon_c \leq 0.0035 \end{cases} \quad (7)$$

ελέγχοντας εάν μετά τη διαρροή του εφελκυσμένου χάλυβα εμφανίζεται σύνθλιψη του σκυροδέματος ή αστοχία των σύνθετων υλικών.

Εάν τοποθετηθεί μόνο ένα έλασμα εμβαδού  $A_f = 55\text{mm}^2$ , οι παραπάνω εξισώσεις δίνουν λύση για  $x = 78\text{mm}$  και  $\varepsilon_c = 0.001$ , έχουμε δηλαδή αστοχία σύνθετων υλικών σε παραμόρφωση  $\varepsilon_{fb,fl} = 0.0047$  (αποκόλληση σε ενδιάμεση καμπτική ρωγμή) πριν τη



σύνθλιψη του σκυροδέματος. Στην περίπτωση αυτή η ροπή αντοχής είναι  $M_{Rd} = 228.5$  kNm, μικρότερη απ' την απαιτούμενη  $M_{Ed} = 240$  kNm. Εάν τοποθετηθούν δύο ελάσματα, το ένα δίπλα στο άλλο, με συνολικό εμβαδόν  $A_f = 110\text{mm}^2$ , οι παραπάνω εξισώσεις δίνουν λύση για  $x = 84\text{mm}$  και  $\varepsilon_c = 0.001$  και η ροπή αντοχής είναι  $M_{Rd} = 247.8$  kNm, που καλύπτει την απαιτούμενη  $M_{Ed} = 240$  kNm. Τοποθετούνται επομένως δύο ελάσματα.

Ακολουθεί ο υπολογισμός της αγκύρωσης στα άκρα.

$$N_{Rsd} = A_{s1} \cdot f_{yd} = 1016 \cdot 435 = 441,96 \text{ kN}$$

Ισχύει η παρακάτω εξίσωση:

$$\frac{M_{Ed}}{z} = N_{fad} \left( 1 + \frac{A_{s1} E_s \varepsilon_{s1}}{A_f E_f \varepsilon_f} \right) \approx N_{fad} \left( 1 + \frac{A_{s1} E_s}{A_f E_f} \right) \quad (8)$$

που για  $M_{Ed}/z = N_{Rsd}$  δίνει:

$$441,96 \approx N_{fad} \left( 1 + \frac{1016 \times 200}{110 \times 150} \right) \rightarrow N_{fad} \approx 33,19 \text{ kN}$$

Με συντελεστή ασφαλείας  $\gamma_{fb} = 1.5$  και  $k_b = 1$ , αντικατάσταση των μεγεθών στην παρακάτω εξίσωση δίνει:

$$\text{Για } l_b \geq l_{b,max} : \quad N_{fa} = N_{fa,max} = b_f \cdot 0.6 k_b E_f f_{ctm} t_f \quad (9)$$

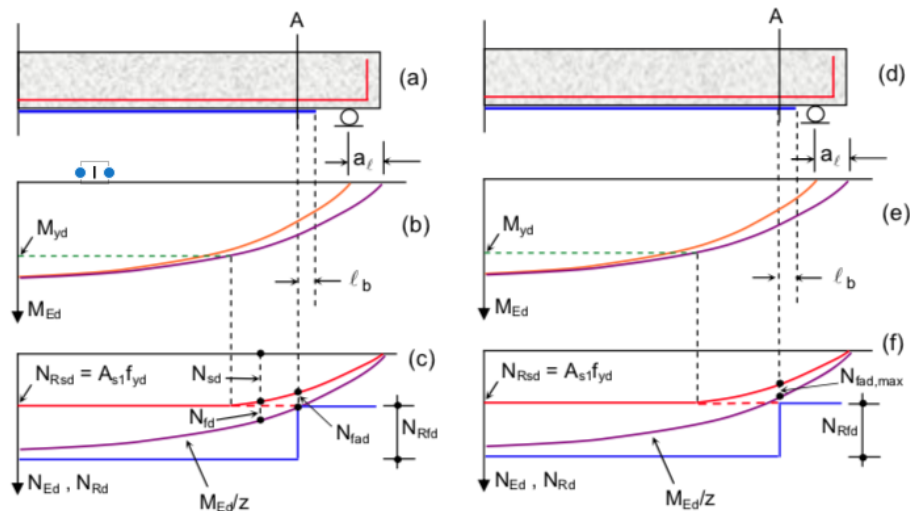
$$\rightarrow N_{fa,max} = \frac{100}{1.50} \sqrt{0.6 \times 1.0 \times 150000 \times 2.2 \times 1.1} \times 10^{-3} = 31,11 \text{ kN}$$

Το  $l_{b,max}$  προκύπτει απ' την εξίσωση:

$$l_{b,max} = 0.6 \sqrt{\frac{E_f t_f}{f_{ctm} k_b}} \quad (10)$$

$$\rightarrow l_{b,max} = 0.6 \sqrt{\frac{150000 \times 1.1}{\sqrt{2.2 \times 1.0}}} = 200.1 \text{ mm} \rightarrow 0.20\text{m}$$

Η  $N_{fad}$  ξεπερνά τη  $N_{fa,max}$  και επομένως η διατομή Α θα πρέπει να ορισθεί όπως στα Σχήματα a-f.



Για  $N_{fad} = N_{fad,max}$  λαμβάνουμε:

$$M_{Ed/z} \approx 31.11 \left( 1 + \frac{1016 \times 200}{110 \times 150} \right) \rightarrow M_{Ed/z} \approx 414.2 \text{ kN}$$

Για  $z = 0.95d = 0.95 \times 0.5 \rightarrow z = 0.475\text{m}$ , έχουμε:

$$M_{Ed} = 414.2 \times 0.475 = 196.75 \text{ kNm}$$

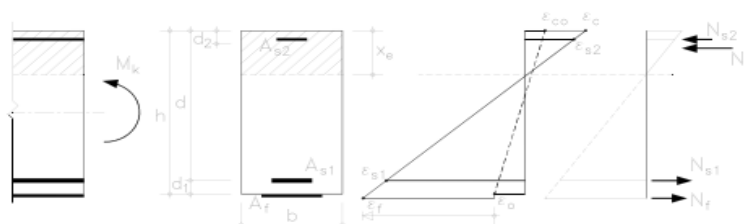
Η τιμή αυτή της ροπής, βάσει του σχήματος, λαμβάνει χώρα σε απόσταση 1.27m απ' το μέσον της δοκού και για  $l_b = l_{b,max} = 0.2\text{m}$  χρειάζεται συνολικό μήκος επικόλλησης των ελασμάτων 2.94m. Υλοποιούνται τελικά 3m.

$$M_{Ed,end} \leq \frac{2}{3} M_{Rd}$$

$$V_{Ed,end} \leq 1.4 V_{Rd,c}$$

### 3.7 Οριακή κατάσταση λειτουργικότητας

Οι υπολογισμοί για την οριακή κατάσταση λειτουργικότητας μπορούν να βασιστούν σε γραμμικά ελαστική συμπεριφορά των υλικών όπως δείχνει το Σχ. 3.9.



**Σχ. 3.9** Ανάλυση ρηγματωμένης διατομής βάσει γραμμικά ελαστικής συμπεριφοράς των υλικών.

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

$$\frac{1}{2}bx_e^2 + (\alpha_s - 1)A_{s2}(x_e - d_2) = \alpha_s A_{s1}(d - x_e) + \alpha_f A_f \left[ h - \left( 1 + \frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_c} \right) x_e \right] \quad (3.19)$$

$$E_c \varepsilon_c = \frac{M_k}{\frac{1}{2}bx_e^2 \left( h - \frac{x_e}{3} \right) + (\alpha_s - 1)A_{s2} \frac{(x_e - d_2)}{x_e} (h - d_2) - \alpha_s A_{s1} \frac{d - x_e}{x_e} (h - d)} \quad (3.20)$$

όπου  $\alpha_f = E_f/E_c$  και  $M_k$  η χαρακτηριστική ροπή κάμψης στη διατομή. Οι παραπάνω δύο εξισώσεις μπορούν να επιλυθούν για τους αγνώστους  $x_e$  και  $\varepsilon_c$ . Η ροπή αδράνειας της ρηγματωμένης διατομής δίνεται από τη σχέση:

$$I_2 = \frac{bx_e^3}{3} + (\alpha_s - 1)A_{s2}(x_e - d_2)^2 + \alpha_s A_{s1}(d - x_e)^2 + \alpha_f A_f (h - x_e)^2 \quad (3.21)$$

ενώ της αρηγμάτωσης μπορεί να ληφθεί ως:

$$I_1 \approx \frac{bh^3}{12} \quad (3.22)$$

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

$$\sigma_f = E_f \left( \varepsilon_c \frac{h-x_e}{x_e} - \varepsilon_0 \right) \leq \eta f_{fk} \quad (3.23)$$

όπου ο μειωτικός συντελεστής  $\eta < 1$  και βάσει πειραματικών δεδομένων (π.χ Yamaguchi et al. 1998), ενδεικτικές τιμές για είναι 0.8, 0.5 και 0.3 για υλικά με ίνες άνθρακα, αραμιδίου και γυαλιού, αντίστοιχα.

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

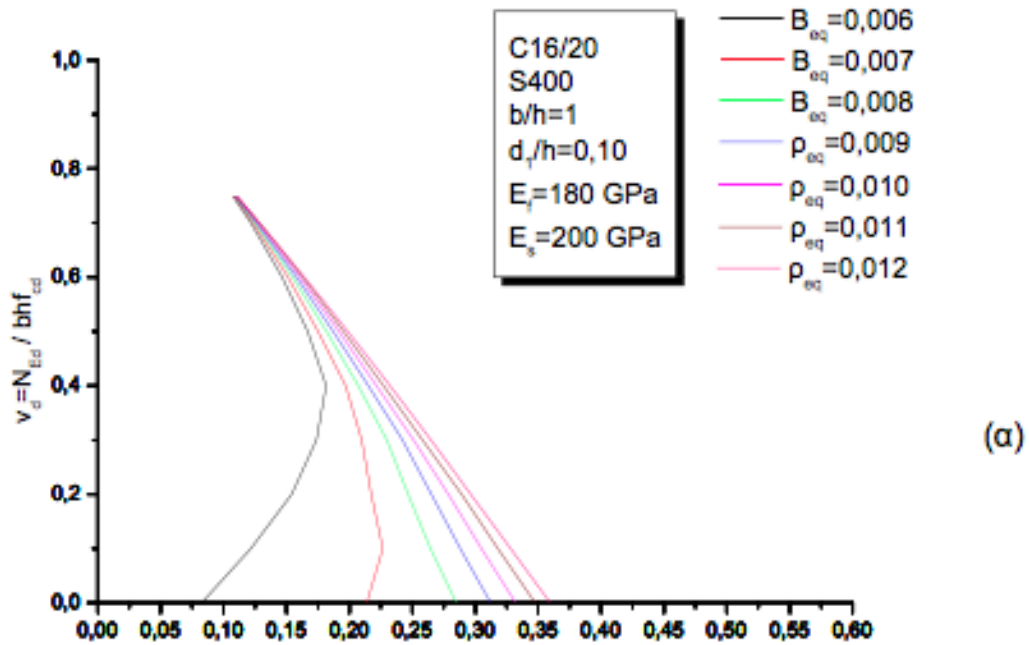
### 3.8 Υποστυλώματα

Η ανάλυση διατομών για τις οποίες πρέπει να ληφθεί υπόψη η αλληλεπίδραση ροπής κάμψης – αξονικής δύναμης (υποστυλώματα) γίνεται σε πλήρη αντιστοιχία με τα προαναφερθέντα, με βασική διαφορά την προσθήκη ενός επιπλέον όρου στις εξισώσεις ισορροπίας δυνάμεων και υπολογισμού ροπών, αυτού που αντιστοιχεί στην αξονική δύναμη (τιμή σχεδιασμού) που ασκείται στη διατομή, δηλαδή  $N_{Ed}$  στο δεξιό μέλος της εξίσωσης (3.5) και  $N_{Ed}[(h/2) - \delta_0 x]$  στο δεξιό μέλος της εξίσωσης (3.8). Επιπλέον μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα η συμβολή των συνθέτων υλικών σε θλίψη.

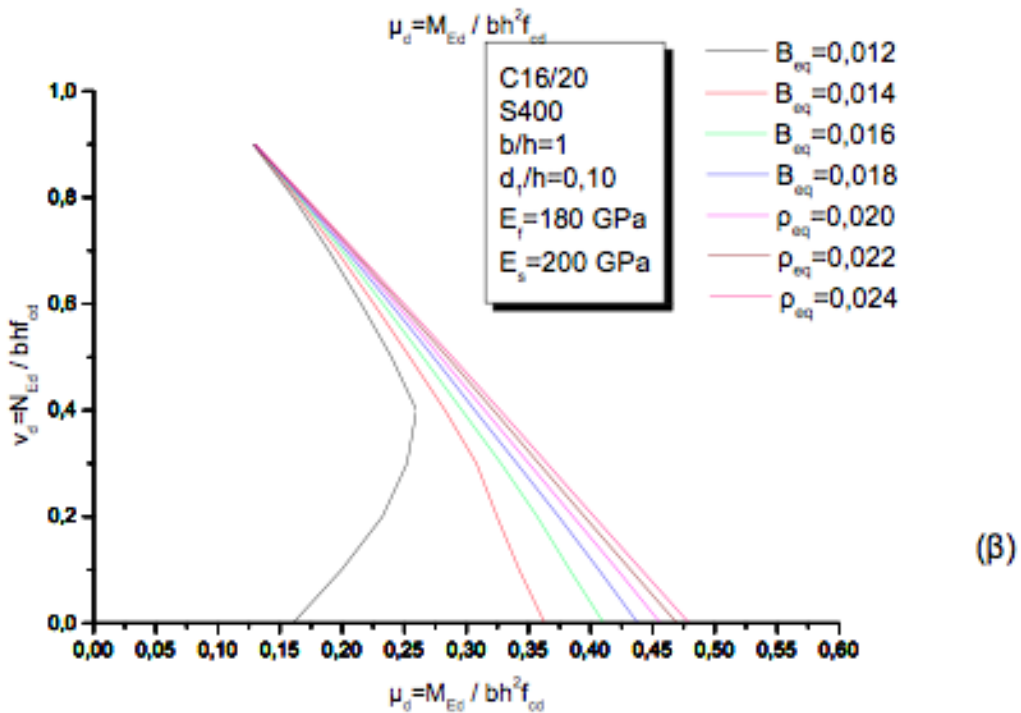
Ο μηχανισμός αστοχίας στην περίπτωση αυτή θα είναι ένας από τους παρακάτω:

- Διαρροή εφελκόμενου χάλυβα ( $\varepsilon_{s1} \geq f_{yd}/E_s$ ), σύνθλιψη σκυροδέματος ( $\varepsilon_c = \varepsilon_{cu}$ )
- Διαρροή εφελκόμενου χάλυβα ( $\varepsilon_{s1} \geq f_{yd}/E_s$ ), αποκόλληση ή θραύση συνθέτων υλικών [ $\varepsilon_f = \varepsilon_{f,lim} = \min(\varepsilon_{fu}, \varepsilon_{fb}, \varepsilon_{f-sh})$ ]

- Σύνθλιψη σκυροδέματος ( $\epsilon_c = \epsilon_{cu}$ )  
 Ο συνδυασμός ροπής – αξονικής δύναμης κατά την αστοχία της κρίσιμης διατομής μπορεί να παρασταθεί γραφικά μέσω διαγραμμάτων αλληλεπίδρασης, όπως για παράδειγμα αυτά του Σχ. 3.10α-β.



(α)



(β)

**Σχ. 3.10** Διάγραμμα αλληλεπίδρασης τετραγωνικής διατομής ( $b=h$ ) για μονοαξονική δύναμη. Σκυρόδεμα C16/20, χάλυβας S400,  $d_1/h=0.10$ ,  $E_f=180$  GPa. (α)  $A_{s,tot}=0.006$ , (β)  $A_{s,tot}=0.012$ .

Στα παρακάτω διαγράμματα το ισοδύναμο γεωμετρικό ποσοστό οπλισμού,  $\rho_{eq}$ , ορίζεται ως

$$\rho_{eq} = \rho_s + \rho_f \frac{E_f}{E_s} = \frac{A_{s,tot}}{bd} + \frac{A_{f,tot}}{bd} \frac{E_f}{E_s} \quad (3.24)$$

όπου  $A_{s,tot} = 2A_{s1} = 2A_{s2}$  και  $A_{f,tot} = 2A_f$ . Επίσης, υποθετικά  $\epsilon_{f,min} = 0.008$ .

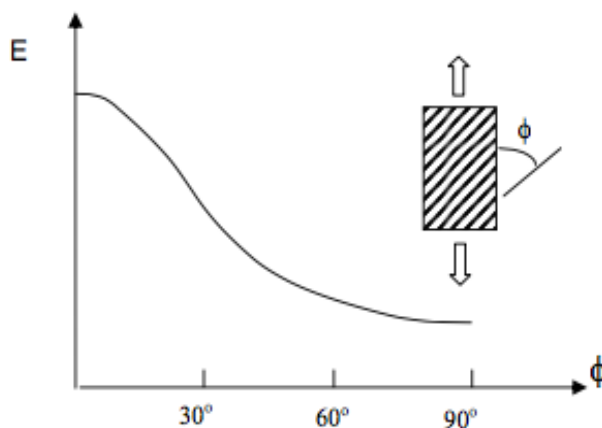
Από τα παραπάνω διαγράμματα αλληλεπίδρασης φαίνεται ότι η αποτελεσματικότητα των συνθέτων υλικών στην αύξηση της ροπής αντοχής εξαρτάται σημαντικά από το μέγεθος του αξονικού φορτίου και μειώνεται όσο αυξάνεται. Επίσης φαίνεται ότι οι καμπύλες αλληλεπίδρασης συγκλίνουν προς το σημείο πάνω από το οποίο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

Συμπερασματικά μπορούμε να αναφέρουμε ότι η εφαρμογή των συνθέτων υλικών για την αύξηση της καμπτικής αντοχής υποστυλωμάτων δεν είναι πάντα κατασκευαστικά εφικτή, ενώ είναι γενικά περιορισμένης αποτελεσματικότητας, εκτός και αν η αξονική δύναμη διατηρείται σε χαμηλά επίπεδα.

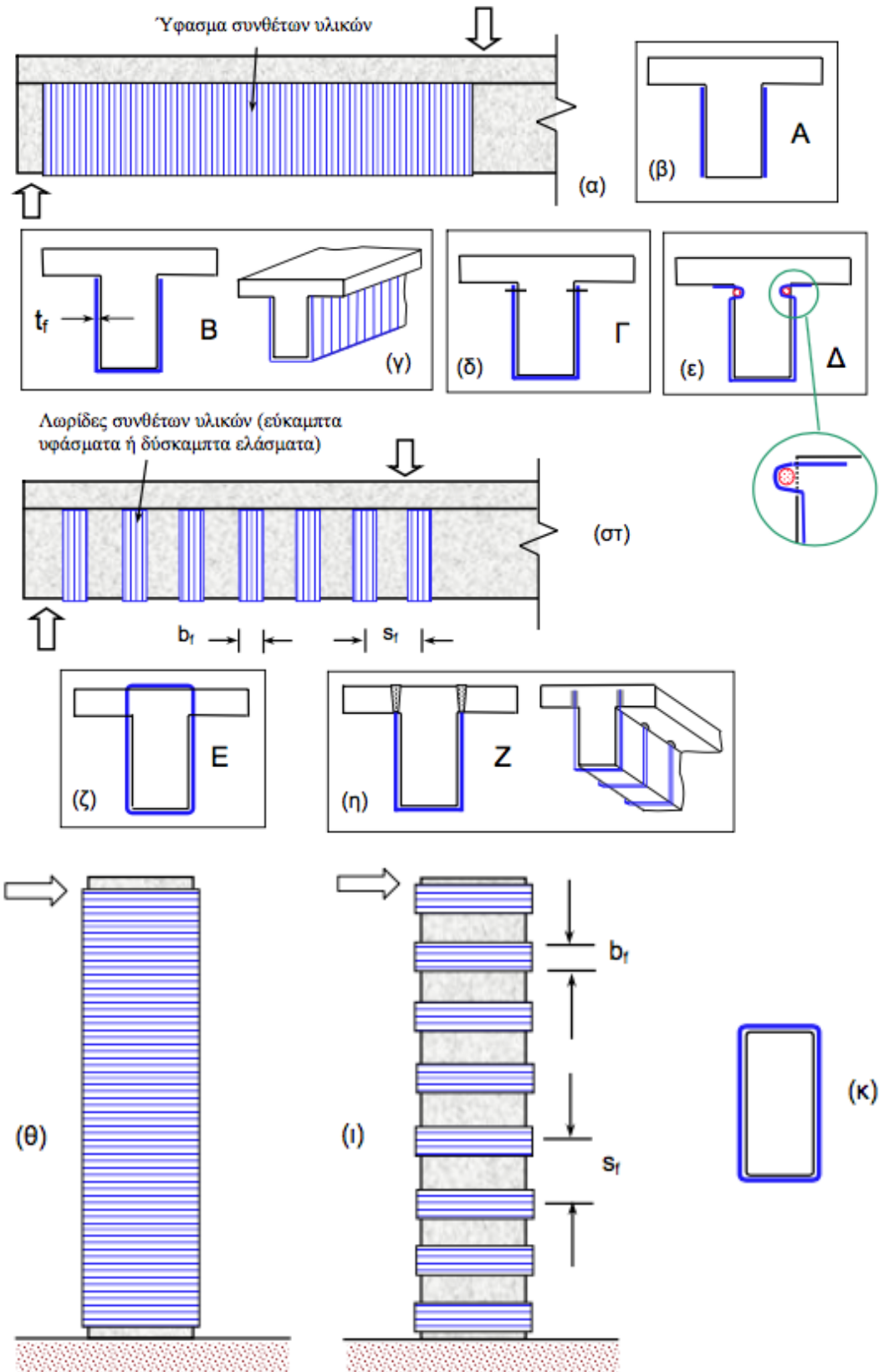
## 4. ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΣΕ ΔΙΑΤΜΗΣΗ

### 4.1 Γενικά

Η ενίσχυση στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος σε διάτμηση με σύνθετα υλικά επιτυγχάνεται μέσω της επικόλλησης υφασμάτων ή ελασμάτων (σπανιότερα), τα οποία επικολλούνται στις εξωτερικές επιφάνειες με τις ίνες κατά το δυνατόν παράλληλες στις τροχιές των κυρίων τάσεων, δηλαδή περίπου κάθετα σε πιθανές ρωγμές. Αυτό δεν είναι γενικά εφικτό, γι' αυτό οι ίνες εφαρμόζονται στις πιο πολλές περιπτώσεις με διεύθυνση κάθετη στον άξονα δομικών μελών. Για σύνθετα υλικά με ίνες μίας διεύθυνσης, η σχέση διεύθυνσης ινών – αποτελεσματικότητας ως προς την ανάληψη φορτίων φαίνεται στο Σχ. 4.1, ενώ ενδεικτικές διατάξεις ενίσχυσης δομικών στοιχείων σε τέμνουσα φαίνονται στο Σχ. 4.2. Στο Σχ. 4.3. δίνονται φωτογραφίες εφαρμογών.



**Σχ. 4.1** “Φαινόμενο” μέτρο ελαστικότητας (παράλληλα στη διεύθυνση φόρτισης) συνθέτων υλικών με ίνες μίας διεύθυνσης συναρτήσεως της γωνίας των ινών ως προς τη διεύθυνση φόρτισης.



Σχ. 4.2 Ενδεικτικές διατάξεις ενίσχυσης: (α)-(η) δοκού, (θ)-(κ) υποστύλωματος.



(α)

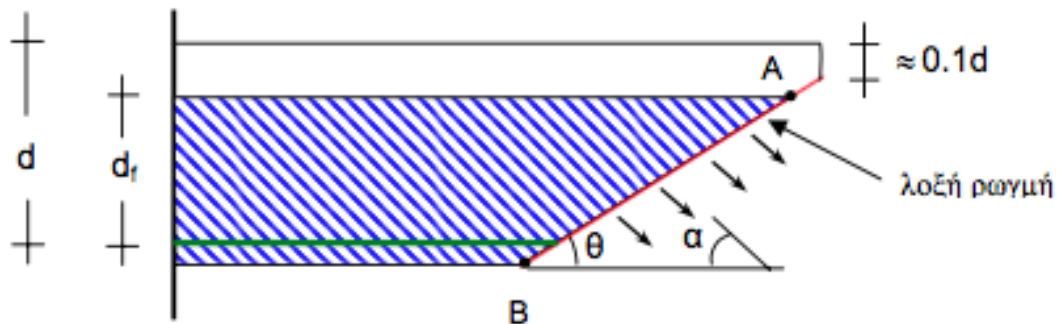


(β)

**Σχ. 4.3** Ενίσχυση (α) κρίσιμης περιοχής δοκού και (β) υποστυλώματος σε διάτμηση.

## 4.2 Ανάλυση τέμνουσας από τα σύνθετα υλικά

Κατά την οριακή κατάσταση διατμητικής αστοχίας οι ίνες που διαπερνούν μία λοξή ρωγή «ενεργοποιούνται και παραλαμβάνουν δυνάμεις κατ' αντιστοιχία με τους εσωτερικούς συνδετήρες, Σχ. 4.4, βάσει του προσομοιώματος του ισοδύναμου δικτύωματος Mörsch-Ritter.



**Σχ. 4.4** Μηχανισμός ανάληψης τέμνουσας από τα σύνθετα υλικά σε λοξή ρωγή (Triantafyllou 1998).

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

$$V_{Rd,f} = \frac{2t_f b_f}{s_f} d_f \sigma_{fed} (\cot\theta + \cot\alpha) \sin\alpha \quad (4.1)$$

όπου  $d_f$  = ύψος του μανδύα που διαπερνάται από τη ρωγμή, μετρούμενο από τη στάθμη του διαμήκους οπλισμού (και ίσο με  $0.9 d$  στην περίπτωση που ο οπλισμός διάτμησης καλύπτει πλήρως τις πλευρές, π.χ. Σχ. 4.2ζ, η, κ),  $\theta$  = γνία ρωγμής ως προς τον άξονα του μέλους (μπορεί να ληφθεί ίση με  $45^\circ$ , βάσει του κλασικού δικτυώματος Mörsch-Ritter),  $\alpha$  = γωνία διεύθυνσης ινών ως προς τον άξονα του μέλους,  $\sigma_{fed}$  = μέση τιμή, κατά μήκος της ρωγμής, της ορθής τάσης στα σύνθετα υλικά παράλληλα στη διεύθυνση των ινών, κατά την οριακή κατάσταση αστοχίας λόγω τέμνουσας (“ενεργή” τάση).

Οι μόνες διαφορές της εξ. 4.1 με την αντίστοιχη για τη συμβολή  $V_{Rd,s}$  του συμβατικού οπλισμού διάτμησης (συνδετήρες), είναι:  $2t_f b_f$  αντί  $A_{sw}$  (εμβαδόν διατομής συνδετήρων),  $s_f$  αντί  $s_h$  (απόσταση συνδετήρων) και  $\sigma_{fed}$  αντί  $f_{ywd}$  (τάση διαρροής συνδετήρων).

Στην πιο συνηθισμένη περίπτωση εφαρμογής συνεχούς υφάσματος αντί λωρίδων (οπότε  $b_f = s_f \sin \alpha$ ), η εξ. (4.1) γράφεται:

$$V_{Rd,f} = 2t_f d_f \sigma_{fed} (\cot \theta + \cot \alpha) \sin^2 \alpha \quad (4.2)$$

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

$$V_{Rd,f} = 2t_f d_f \sigma_{fed} \cot \theta \quad (4.3)$$

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

*Μανδύες κλειστού τύπου ή επαρκώς αγκυρωμένοι στη θλιβόμενη ζώνη*

$$\sigma_{fed} = f_{fbd} \left[ 1 - \left( 1 - \frac{2}{\pi} \right) \frac{l_{b,max} \sin \alpha}{2d_f} \right] + \frac{1}{2} [f_{fu,w}(R) - f_{fbd}] \left[ 1 - \frac{l_{b,max} \sin \alpha}{d_f} \right] \quad (4.4\alpha)$$

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

$$f_{fu,w}(R) = f_{fbd} + \langle \eta_R f_{fd} - f_{fbd} \rangle \quad (4.5)$$

Στην εξίσωση (4.5) αν η ποσότητα εντός των είναι αρνητική, τότε ο δεύτερος όρος λαμβάνεται ίσος με το μηδέν. Ο συντελεστής  $\eta_R$  είναι (Campione and Miraglia 2003):

$$\eta_R = 0.2 + 1.6 \frac{R}{b_w} \quad 0 \leq \frac{R}{b_w} \leq 0.5 \quad (4.6)$$

*Μανδύες τύπου U (τρίπλευροι)*

$$\sigma_{fed} = f_{fbd} \left[ 1 - \left( 1 - \frac{2}{\pi} \right) \frac{l_{b,max} \sin \alpha}{d_f} \right] \quad (4.4\beta)$$



### Μανδύες τύπου (δίπλευροι)

$$\sigma_{fed} = f_{fbd} \frac{d_f - l_{b,max} \sin \alpha + \frac{k_b E_f}{3f_{fbd}} \sin \alpha}{d_f} \left[ 1 - \sqrt{\frac{\left(1 - \frac{2}{\pi}\right) k_b E_f \sin \alpha}{3f_{fbd} \left(d_f - l_{b,max} \sin \alpha + \frac{k_b E_f}{3f_{fbd}} \sin \alpha\right)}} \right] \quad (4.4\gamma)$$

Σημειώνεται ότι τα  $l_{b,max}$ ,  $k_b$  και  $f_{fbd}$  στις παραπάνω σχέσεις δίνονται από τις εξ. (2.4), (2.5) και (2.6α), αντίστοιχα, θέτοντας  $b = s_f \sin \alpha$ . Επίσης, αν τα σύνθετα υλικά καλύπτουν πλήρως τις πλευρές του μέλους, το  $d_f$  θα λαμβάνεται ίσο με  $0.9d$ .

Η βελτίωση των συνθηκών αγκύρωσης τρίπλευρου μανδύα όπως δείχνει το Σχ. 4.2ε, δηλαδή μέσω της δημιουργίας εσοχής στο άνω τμήμα του κορμού, στην οποία γίνεται “έμπηξη” του υφάσματος μέσω ράβδου αποτελεί ενδιαφέρουσα λύση, με αποτελεσματικότητα (π.χ. σε όρους ενεργής παραμόρφωσης) ενδιαμέση αυτής του κλειστού (Σχ. 4.2ζ-η) και του ανοικτού (Σχ. 4.2γ) μανδύα. Για την περίπτωση αυτή θα μπορούσε να γίνει χρήση των σχέσεων για ανοικτό μανδύα, με προσαύξηση της  $\sigma_{fed}$ , όπως αυτή προκύπτει από την εξ. (4.4β), κατά περίπου 30%.

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

## 4.4 Κόμβοι

Τυπικές διατμητικές αστοχίες (εξωτερικών) κόμβων δοκών-υποστυλωμάτων δίνονται στο Σχ. 4.5. Η μελέτη της ενίσχυσης κόμβων σε διάτμηση με σύνθετα υλικά κατέδειξε ότι ακόμα και σχετικά μικρά ποσοστά συνθέτων υλικών (π.χ. 2-3 στρώσεις υφάσματος με ίνες άνθρακα, συνολικού πάχους της τάξης των 0.25-0.3 mm) επαρκώς αγκυρωμένων έξω από τις περιοχές των κόμβων αρκούν για την αύξηση της διατμητικής αντοχής των κόμβων σε ποσοστά μέχρι και 80-100%. Για να γίνει αυτό εφικτό θα πρέπει η διάταξη των συνθέτων υλικών να περιλαμβάνει υφάσματα τοποθετημένα με τη διεύθυνση των ινών παράλληλη κατά προτεραιότητα στις δοκούς, αλλά όπου είναι δυνατόν και στα υποστυλωματα (π.χ. Σχ. 4.6).

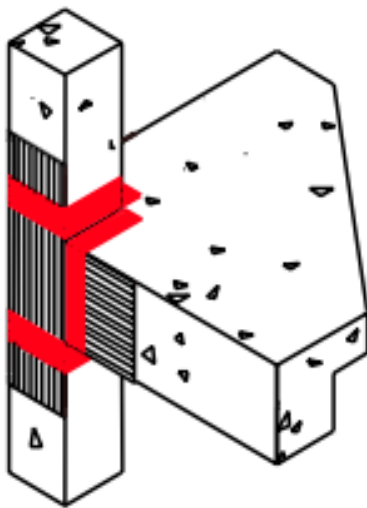


(α)

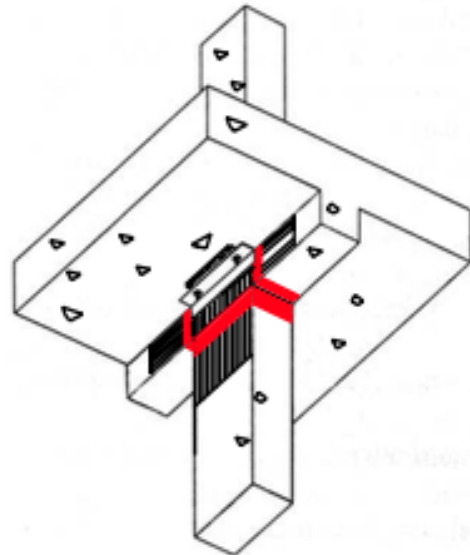


(β)

**Σχ. 4.5** Διαμητική αστοχία εξωτερικών κόμβων: (α) Σεισμός Hyogo-ken Nanbu, Ιαπωνία, 1995 και (β) Σεισμός Καλαμάτας, 1986 (*fib* 2003).

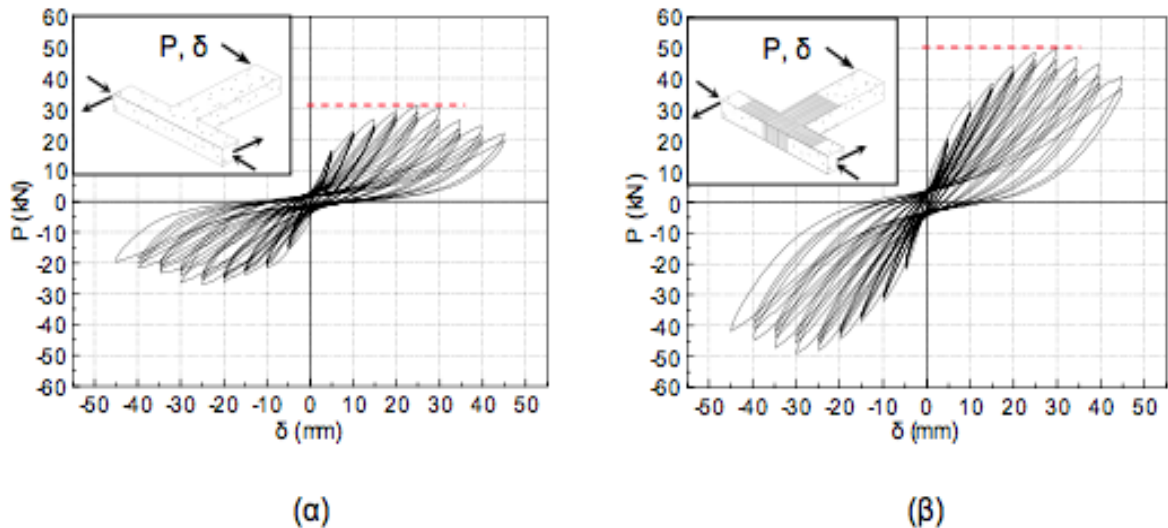


(α)



(β)

**Σχ. 4.6** Ενδεικτικές διατάξεις ενίσχυσης κόμβων με σύνθετα υλικά σε δύο διευθύνσεις (δοκού, υποστυλώματος) και αγκύρωση των υλικών εκτός περιοχής κόμβου. (α) Εξωτερικός κόμβος, (β) εσωτερικός κόμβος.



**Σχ. 4.7** Καμπύλες δύναμης-μετατόπισης για κόμβο οπλισμένου σκυροδέματος με ανεπαρκή οπλισμό διάτμησης (έλλειψη συνδετήρων στην περιοχή του κόμβου). (α) Μη ενισχυμένο δοκίμιο. (β) Αύξηση διατμητικής αντοχής της τάξης του 70% για το ενισχυμένο δοκίμιο.

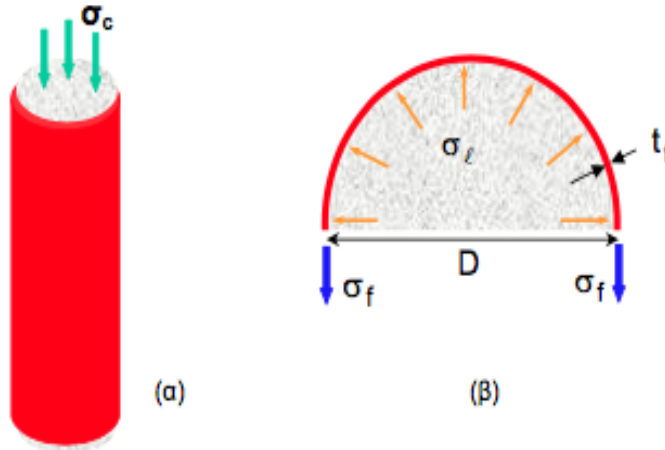
Η σημαντική αύξηση της διατμητικής αντοχής κόμβων μέσω της ενίσχυσης με σύνθετα υλικά αποσαφηνίζεται μέσω των αποτελεσμάτων του Σχ. 4.7, το οποίο δίνει την καμπύλη φορτίου-μετατόπισης μη ενισχυμένου και ενισχυμένου (με δύο στρώσεις υφάσματος ινών άνθρακα) δοκίμιου μορφής κόμβου σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση (Antonopoulos and Triantafillou 2003).

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

## 5. ΠΕΡΙΣΦΙΓΞΗ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

### 5.1 Συμπεριφορά

Ας θεωρήσουμε ένα κυλινδρικό στοιχείο από σκυρόδεμα (Σχ. 5.1α), με διάμετρο  $D$ , το οποίο περιβάλλεται από μανδύα συνθέτων υλικών πάχους  $t_f$  και μέτρου ελαστικότητας (παράλληλα στη διεύθυνση των ινών, δηλαδή κατά την έννοια της περιμέτρου)  $E_f$ .



**Σχ. 5.1** (α) Αξονική καταπόνηση υποστυλώματος με μανδύα συνθέτων υλικών (β) Ανάπτυξη εγκάρσιων τάσεων λόγω διόγκωσης.

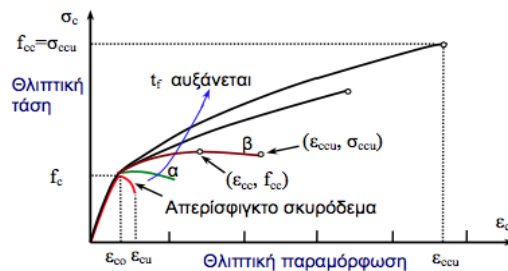
Οι λόγω διόγκωσης εγκάρσιες (κατά την ακτινική διεύθυνση) τάσεις στο μανδύα (ίσες και αντίθετες ασκούνται στο σκυρόδεμα),  $\sigma_l$ , δίνονται από τη σχέση:

$$\sigma_l = \frac{2t_f}{D} \sigma_f = \frac{2t_f}{D} E_f \varepsilon_f = \frac{1}{2} \rho_f E_f \varepsilon_f \quad (5.1)$$

όπου  $\sigma_f$  και  $\varepsilon_f$  = εφελκυστική τάση και παραμόρφωση στον μανδύα, αντίστοιχα, και  $\rho_f$  = γεωμετρικό ποσοστό οπλισμού συνθέτων υλικών. Αποτέλεσμα των τάσεων περίσφιξης  $\sigma_l$  είναι η παρεμπόδιση της ρηγματώσης και άρα η αύξηση της αντοχής και της παραμορφωσιμότητας, έως ότου η εφελκυστική τάση  $\sigma_f$  (αντίστοιχη παραμόρφωση  $\varepsilon_f$ ) στον μανδύα φθάσει την αντοχή του,  $f_{fde}$  (αντίστοιχη παραμόρφωση  $\varepsilon_{fue}$ ), οπότε θα προκληθεί θραύση του μανδύα (Σχ. 5.2) που σηματοδοτεί και την αντοχή του στοιχείου.

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

$$f_{fde} = \eta_e f_{fd} \quad (5.2)$$



**Σχ. 5.2** Καμπύλες θλιπτικής τάσης – παραμόρφωσης για σκυρόδεμα περισφιγμένο με σύνθετα υλικά.

Βάσει πειραματικών αποτελεσμάτων μπορεί να διατυπώσει κανείς τις εξής παρατηρήσεις:

- Γενικά η καμπύλη τάσης – παραμόρφωσης είναι περίπου διγραμμική, με αλλαγή κλίσης στην παραμόρφωση ( $\varepsilon_{co} \approx 0.002$ ) που αντιστοιχεί στην αντοχή του απερίσφιγκτου σκυροδέματος ( $f_c$ ).
- Μανδύες εξαιρετικά μικρού πάχους αυξάνουν μόνο την οριακή παραμόρφωση  $\varepsilon_{ccu}$  (καμπύλη α στο Σχ. 5.2).
- Για μανδύες σχετικά μικρού πάχους η αντοχή του περισφιγμένου σκυροδέματος  $f_{cc}$  αντιστοιχεί σε παραμόρφωση  $\varepsilon_{cc}$  μικρότερη από την οριακή ( $\varepsilon_{ccu}$ ) (καμπύλη β στο Σχ. 5.2).
- Για δεδομένο τύπο συνθέτων υλικών, η αντοχή  $f_{cc}$  και η οριακή παραμόρφωση  $\varepsilon_{ccu}$  του περισφιγμένου σκυροδέματος αυξάνονται με το πάχος του μανδύα.
- Για μανδύες ίσου πάχους αλλά διαφορετικού τύπου ινών (π.χ. άνθρακας, γυαλί), η αντοχή  $f_{cc}$  αυξάνεται με την αντοχή του μανδύα  $f_{fde}$  (εδώ πλεονεκτούν οι ίνες άνθρακα), ενώ η οριακή παραμόρφωση του σκυροδέματος  $\varepsilon_{ccu}$  αυξάνεται με την αντοχή του μανδύα  $f_{fde}$  αλλά κυρίως με την οριακή παραμόρφωσή του,  $\varepsilon_{fue}$  (εδώ πλεονεκτούν οι ίνες γυαλιού).
- Για μανδύες ίσης δυστένειας (εκφράζεται από το γινόμενο  $E_f t_f$ ), η αντοχή  $f_{cc}$  αυξάνεται με την οριακή παραμόρφωση του μανδύα  $\varepsilon_{fue}$ .

## 5.2.2 Αναλυτικό προσομοίωμα σχεδιασμού

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

$$f_{ccd} = E_{sec,ud} \varepsilon_{ccu} \geq f_{cd} \quad (5.3)$$

$$\varepsilon_{ccu} = 0.002 [1 + 5(\alpha_{1d} \alpha_{2d} - 1)] \left[ \frac{E_{sec,Md}(E_c - E_{sec,ud})}{E_{sec,ud}(E_c - E_{sec,Md})} \right]^{1 - \frac{E_{sec,Md}}{E_c}} \quad (5.4)$$

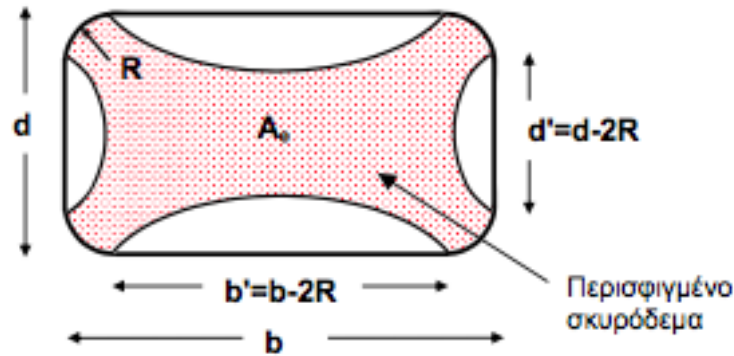
$$E_{sec,ud} = \frac{E_c}{1 + 2 \left( \frac{E_c}{f_{cd}} - \frac{1}{0.002} \right) \frac{f_{fde}}{E_f}} \quad (5.5)$$

$$E_{sec,Md} = \frac{\alpha_{1d} \alpha_{2d} f_{cd}}{0.002 [1 + 5(\alpha_{1d} \alpha_{2d} - 1)]} \quad (5.6)$$

$$\alpha_{1d} = 2.254 \sqrt{1 + 7.94 \frac{\sigma_{lud,b}}{f_{cd}}} - 2 \frac{\sigma_{lud,b}}{f_{cd}} - 1.254 \quad (5.7)$$

$$\alpha_{2d} = 1 - \left[ 0.6 \left( \frac{d}{b} \right)^2 - 1.4 \frac{d}{b} + 0.8 \right] \sqrt{\frac{\sigma_{lud,b}}{f_{cd}}} \quad (5.8)$$

$$\sigma_{lud,b} = \alpha_f \frac{2t_f}{d} f_{fde} \quad (5.9)$$



**Σχ. 5.3** Η περίσφιξη σκυροδέματος (με σύνθετα υλικά) σε ορθογωνικές διατομές επιτυγχάνεται μέσω καμπύλωσης των γωνιών.

Στις παραπάνω σχέσεις  $E_c$  = αρχικό μέτρο ελαστικότητας του σκυροδέματος  $\left[ E_c = 1.05 \times 9500 \times (f_{ck} + 8)^{1/3} \right]$  και  $\alpha_f$  = συντελεστής αποδοτικότητας του μανδύα, που εξαρτάται: (α) από τη γεωμετρία της διατομής (λόγος πλευρών, ακτίνα καμπυλότητας στις γωνίες, Σχ. 5.3), (β) από το βαθμό περιτυλίξης (κάλυψης) του σκυροδέματος (Σχ. 5.4α) και (γ) από τη διεύθυνση των ινών σε σχέση με τον άξονα του περισφιγμένου μέλους (Σχ. 5.4β). Συγκριμένα, είναι:

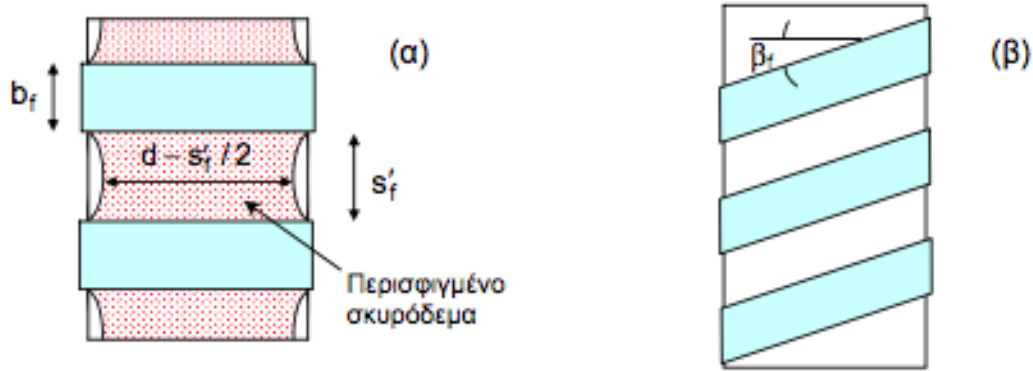
$$\alpha_f = \alpha_n \times \alpha_s \times \alpha_a \leq 1 \quad (5.10)$$

Συντελεστής διατομής: 
$$\alpha_n = \frac{A_e}{A_g} = 1 - \frac{b'^2 + d'^2}{3A_g \left( 1 - \frac{A_s}{A_g} \right)} \approx 1 - \frac{(b-2R)^2 + (d-2R)^2}{3bd} \quad (5.11)$$

Συντελεστής κάλυψης: 
$$\alpha_s = \frac{\left( 1 - \frac{s'_f}{2d} \right)^2}{1 - \frac{A_s}{A_g}} \approx \left( 1 - \frac{s'_f}{2d} \right)^2 \quad (5.12)$$

Συντελεστής διεύθυνσης: 
$$\alpha_a = \frac{1}{1 + (\tan \beta_f)^2} \quad (5.13)$$

όπου  $A_g$  = εμβαδόν διατομής,  $A_s$  = εμβαδόν διατομής διαμήκους οπλισμού,  $s'_f$  = καθαρή απόσταση λωρίδων σε περίπτωση μερικής περιτύλιξης (Σχ. 5.5α),  $d$  = μήκος μικρότερης πλευράς (ή διάμετρος, στην περίπτωση κυκλικής διατομής),  $\beta_f$  = γωνία ινών ως προς την κάθετο στον άξονα του μέλους (Σχ. 5.5β). Για κυκλικές διατομές  $\alpha_n = 1$ , για πλήρη κάλυψη του στοιχείου  $\alpha_s = 1$  και για οριζόντια διάταξη των ινών  $\alpha_a = 1$ .



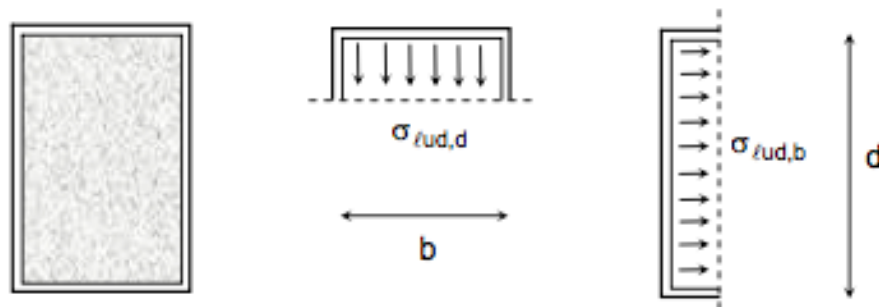
**Σχ. 5.4** Περίσφιγγη (α) με λωρίδες ανά αποστάσεις, (β) με τις ίνες από γωνία (σύνθετα υλικά σε ελικοειδή διάταξη).

Τα διαθέσιμα στην διεθνή βιβλιογραφία προσομοιώματα με απλούστερη μορφή είναι πάρα πολλά, συνήθως του τύπου:

$$\frac{f_{ccd}}{f_{cd}} = 1 + k_1 \left( \frac{\sigma_{lud}}{f_{cd}} \right)^m \quad (5.14)$$

$$\varepsilon_{ccu} = \varepsilon_{cu} + k_2 \left( \frac{\sigma_{lud}}{f_{cd}} \right)^n \quad (5.15)$$

Στις παραπάνω σχέσεις  $\sigma_{lud}$  είναι η μέση τάση περίσφιγγης (κατά τη θραύση του μανδύα), προσεγγιστικά ίση με (Σχ. 5.5):



**Σχ. 5.5** Προσεγγιστική κατανομή μέσω των τάσεων περίσφιγγης σε κάθε πλευρά ορθογωνικής διατομής.

$$\begin{aligned} \sigma_{lud} &= \frac{\sigma_{lud,b} + \sigma_{lud,d}}{2} = \frac{1}{2} \left( \alpha_f \frac{2t_f}{d} f_{fde} + \alpha_f \frac{2t_f}{b} f_{fde} \right) \\ &= \frac{1}{2} \alpha_f (\rho_{f,b} + \rho_{f,d}) f_{fde} = \alpha_f \frac{(b+d)}{bd} t_f f_{fde} \end{aligned} \quad (5.16)$$

όπου  $\sigma_{lud,b}$  και  $\sigma_{lud,d}$  οι μέσες τάσεις περίσφιξης παράλληλα στις πλευρές  $b$  και  $d$ , αντίστοιχα. Στην εξ. (5.15)  $\rho_{f,b}$  και  $\rho_{f,d}$  είναι τα γεωμετρικά ποσοστά συνθέτων υλικών αναδιεύθυνση:  $\rho_{f,b}=2t_f/d$  και  $\rho_{f,d}=2t_f/b$ .

Στις ευρέως αποδεκτές τιμές για τις εμπειρικές σταθερές των εξ. (5.13) – (5.14) περιλαμβάνονται οι εξής:  $k_1 = 2.15$ ,  $m = 1$ ,  $k_2 = 0.02$  ή  $0.04$  για υλικά ινών άνθρακα ή γυαλιού, αντίστοιχα, και  $n = 1$ . Εναλλακτικά,  $k_1 = 2.6$ ,  $m = 2/3$ ,

$k_2 = 0.015$  (ανεξαρτήτως του τύπου ινών) και  $n = 0.5$ . Σημειώνεται ότι η οριακή παραμόρφωση του απερίσφιγτου σκυροδεματος λαμβάνεται ίση με  $\epsilon_{cu} = 0.0035$ .

Αν οι υπολογισμοί απαιτούν, πλέον της αντοχής και οριακής παραμόρφωσης, τον πλήρη κατασταστικό νόμο για σκυροδεμα περισφιγμένο μέσω συνθέτων υλικών (π.χ. για την ανάλυση διατομής υποστυλωματος για συνδυασμό κάμψης και αξονικού φορτίου), τότε μπορεί να γίνει χρήση του παρακάτω απλού προσομοιωματος των Lam and Teng (2003), το οποίο περιγράφεται και στο Σχ. 5.6:

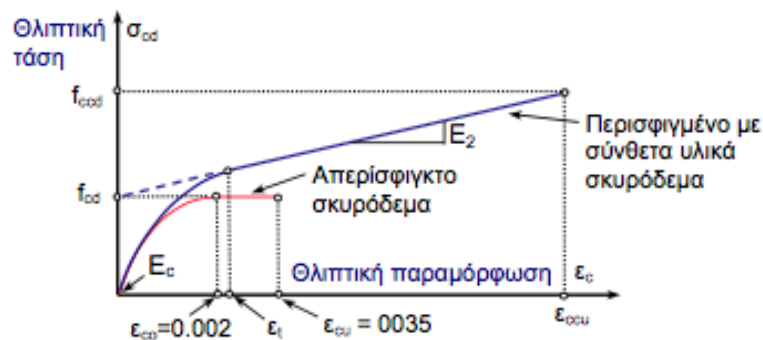
$$\sigma_{cd} = E_c \epsilon_c - \frac{(E_c - E_2)^2}{4f_{cd}} \epsilon_c^2 \quad \text{για } 0 \leq \epsilon_c \leq \epsilon_t \quad (5.17\alpha)$$

$$\sigma_{cd} = f_{cd} + E_2 \epsilon_c \quad \text{για } \epsilon_t \leq \epsilon_c \leq \epsilon_{ccu} \quad (5.17\beta)$$

όπου

$$\epsilon_t = \frac{2f_{cd}}{(E_c - E_2)} \quad (5.18)$$

$$E_2 = \frac{f_{ccd} - f_{cd}}{\epsilon_{ccu}} \quad (5.19)$$



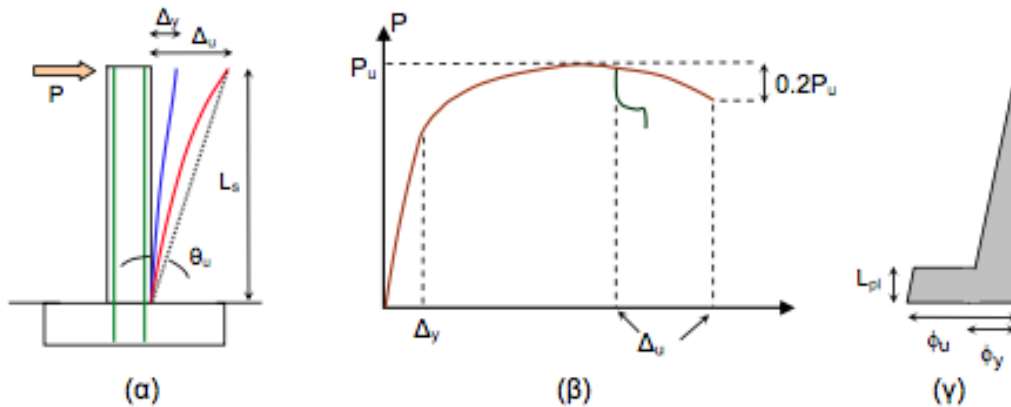
**Σχ. 5.6** Καμπύλες τάσης – παραμόρφωσης για απερίσφιγτο και περισφιγμένο μέσω συνθέτων υλικών σκυρόδεμα.

### 5.3 Γωνία στροφής χορδής και πλαστιμότητα

Συχνά ένας από τους βασικούς στόχους αντισεισμικών ενισχύσεων σε υφιστάμενα δομικά στοιχεία είναι η αύξηση της γωνίας στροφής χορδής στην αστοχία  $\theta_u$  (Σχ. 5.7α), κάτι που περίπου ισοδυναμεί με την αύξηση της πλαστιμότητας. Η τελευταία μπορεί να ποσοτικοποιηθεί μέσω του δείκτη πλαστιμότητας της γωνίας στροφής χορδής του μέλους,  $\mu_\theta = \theta_u / \theta_y$ , ή μέσω του δείκτη πλαστιμότητας καμπυλοτήτων,  $\mu_\phi = \phi_u / \phi_y$ , όπου:  $\theta_y$  = γωνία στροφής χορδής στην διαρροή,  $\phi_u$  = καμπυλότητα διατομής στην



αστοχία και  $\varphi_y =$  καμπυλότητα διατομής στην διαρροή. Αξίζει να επισημανθεί ότι ουσιαστικά ο δείκτης  $\mu_\Delta$  ισούται με τον δείκτη πλαστιμότητας σχετικής μετακίνησης των άκρων του μέλους,  $\mu_\Delta = \Delta_u / \Delta_y$ , όπου  $\Delta_u$  και  $\Delta_y$  η σχετική μετακίνηση των άκρων του μέλους στην αστοχία και στη διαρροή, αντίστοιχα (Σχ. 5.8). Σημειώνεται ότι η αστοχία ορίζεται στο σημείο της καμπύλης εντατικού μεγέθους (π.χ. δύναμη) – παραμόρφωσης (π.χ. μετακίνηση) όπου το εντατικό μέγεθος είτε εμφανίζει εμφανή πτώση είτε έχει μειωθεί κατά 20% έναντι της μέγιστης τιμής του (Σχ. 5.7β).



**Σχ. 5.7** (α) φόρτιση στοιχείου (β) Διάγραμμα δύναμης – μετατόπισης. (γ) Διάγραμμα καμπυλοτήτων

Για τον υπολογισμό της  $\theta_u$  μπορεί να χρησιμοποιηθεί η απλή σχέση:

$$\theta_u = \theta_y + (\varphi_u - \varphi_y)L_{pl} \left(1 - 0.5 \frac{L_{pl}}{L_s}\right) \quad (5.20)$$

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

Για υποστυλώματα ή δοκούς:

$$\theta_y = \varphi_y \frac{L_s + avz}{3} + 0.0013 \left(1 + 1.5 \frac{h}{L_s}\right) + 0.13 \varphi_y \frac{f_y}{\sqrt{f_c}} d_b \quad (5.21)$$

Για τοιχώματα:

$$\theta_y = \varphi_y \frac{L_s + avz}{3} + 0.002 \left(1 - 1.125 \frac{L_s}{h}\right) + 0.13 \varphi_y \frac{f_y}{\sqrt{f_c}} d_b \quad (5.22)$$

όπου  $d_b =$  μέση διάμετρος ράβδων των εφελκόμενων διαμήκων ράβδων,  $h =$  ύψος της διατομής,  $f_y =$  τάση διαρροής διαμήκους οπλισμού ( $N/mm^2$ ) και  $f_c =$  θλιπτική αντοχή σκυροδέματος ( $N/mm^2$ ). Οι παραπάνω τιμές για τα υλικά είναι οι μέσες τιμές, όπως αυτές προκύπτουν από επιτόπου αποτίμηση, διαιρεμένες (σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 8) με τον συντελεστή αξιοπιστίας (1.0, 1.2, 1.35). Ο όρος  $avz$  είναι το

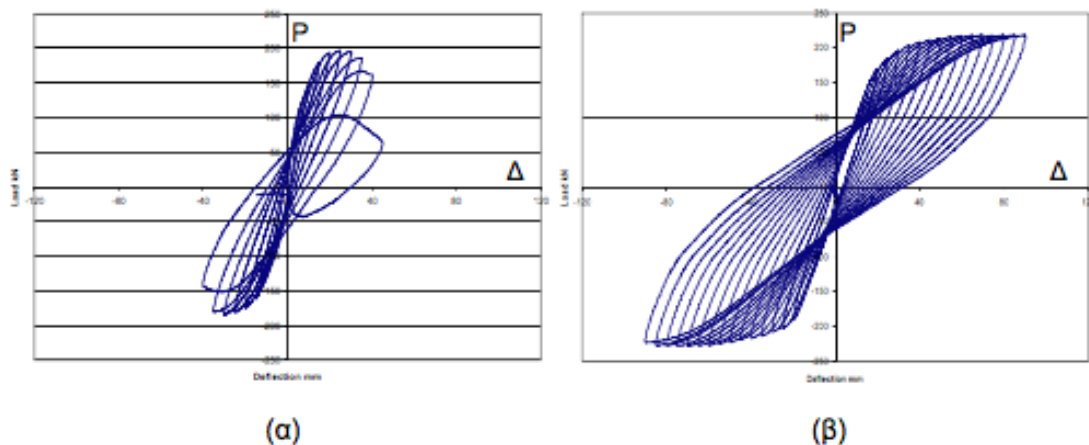
μήκος μετάθεσης  $a_i$  για διατμητική ρηγμάτωση κατά  $45^\circ$  και εκφράζει την επιρροή της επέκτασης των δυνάμεων του εφελκυσμένου πέλματος κατά  $a_i$  στις καμπτικές παραμορφώσεις του μέλους. Ο συντελεστής  $a_v$  που πολλαπλασιάζει τον μοχλοβραχίονα εσωτερικών δυνάμεων στην ακραία διατομή,  $z$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

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

$$L_{pl} = 0.1L_s + 0.17h + \frac{0.24f_y}{\sqrt{f_c}} d_b \quad (5.23)$$

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

Η γωνία στροφής χορδής  $\theta_u$  (ή η  $\phi_u$ ) μπορεί να αυξηθεί μέσω της κατασκευής μανδύα συνθέτων υλικών στις κρίσιμες περιοχές, εκεί δηλαδή όπου ενδέχεται να αναπτυχθούν σημαντικές παραμορφώσεις στον χάλυβα και στο σκυρόδεμα. Η περισφιγξη του σκυροδέματος στις περιοχές αυτές αυξάνει τη μέγιστη παραμόρφωσή του (πλέον του ότι ενδέχεται να παρεμποδίσει τον λυγισμό ραβδών και/ή την απώλεια συνάφειας σε περιοχές με ματίσεις) και άρα την πλαστιμότητα (Σχ. 5.10).



**Σχ. 5.8** Καμπύλες δύναμης – μετατόπισης για υποσύλωμα οπλισμένου σκυροδέματος (διατομής  $0.25 \times 0.50m$ ) σε ανακλυζόμενη φόρτιση. (α) Στοιχείο χωρίς ενίσχυση. (β) Στοιχείο με μανδύα συνθέτων υλικών (δύο στρώσεις με ίνες άνθρακα, πάχος στρώσης  $0.12mm$ ) στην κρίσιμη περιοχή (ύψος μανδύα  $0.6m$ ).

Ο σχεδιασμός μανδύα συνθέτων υλικών για την επίτευξη δεδομένης γωνίας στροφής χορδής στην αστοχία προϋποθέτει τη συσχέτιση του  $\theta_u$  με τα χαρακτηριστικά του μανδύα. Αυτό μπορεί να γίνει βάσει των παρακάτω βημάτων:

- Υπολογισμός του μήκους πλαστικής άρθρωσης  $L_{pl}$  από την εξ. (5.23).
- Υπολογισμός της καμπυλότητας στη διαρροή  $\phi_y$ , βάσει ανάλυσης διατομής.
- Υπολογισμός της γωνίας στροφής χορδής στη διαρροή από την εξ. (5.21) ή (5.22).
- Επίλυση της εξ. (5.20) για τα απαιτούμενα χαρακτηριστικά του μανδύα.

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

$$\theta_{um} = 0.016(0.3^v) \left[ \frac{\max(0.01, \omega')}{\max(0.01, \omega)} f_c \right]^{0.025} \left( \frac{L_s}{h} \right)^{0.35} 25^{\left( \alpha \rho_{sx} \frac{f_{yw}}{f_c} + \alpha_f \rho_{fx} \frac{f_{fe}}{f_c} \right)} (1.25^{100 \rho_d}) \quad (5.24)$$

όπου:

$\omega$  = μηχανικό ποσοστό εφελκόμενου οπλισμού (περιλαμβάνει και τυχόν διαμήκη οπλισμό κορμού μεταξύ εφελκόμενου και θλιβόμενου πέλματος)

$\omega'$  = μηχανικό ποσοστό θλιβόμενου οπλισμού

$v = N / bhfc$  = ανηγμένη στη διατομή αξονική δύναμη (  $b$  = πλάτος θλιβόμενης ζώνης,

$h$  = πλευρά διατομής παράλληλα στη διεύθυνση φόρτισης)

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

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

$s_h$  = απόσταση συνδετήρων

$f_{yw}$  = τάση διαρροής συνδετήρων

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

$\rho_d$  = γεωμετρικό ποσοστό τυχόν δισδιαγώνιου οπλισμού

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

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

$$\alpha = \left( 1 - \frac{s_h}{2b_o} \right) \left( 1 - \frac{s_h}{2h_o} \right) \left( 1 - \frac{\sum b_i^2}{6b_o h_o} \right) \quad (5.25)$$

Στην παραπάνω εξ. (5.25)  $b_o$  και  $h_o$  είναι οι διαστάσεις του περισφιγμένου πυρήνα και  $b_i$  είναι οι αποστάσεις μεταξύ διαμήκων ράβδων που συγκρατούνται από συνδετήρα στην περίμετρο της διατομής. Πάντως τονίζεται ότι αν οι συνδετήρες δεν κλείνουν με άγκιστρο προς το εσωτερικό του σκυροδέματος (  $\geq 135^\circ$  στις γωνίες,  $\geq 90^\circ$  στο ενδιάμεσο των πλευρών), συνιστάται να αμελείται η περίσφιγξη λόγω συνδετήρων ( $\alpha = 0$ ).

Η αντίστοιχη της εξ. (5.24) για την μέση τιμή του πλαστικού τμήματος της γωνίας στροφής χορδής στην αστοχία ( $\theta_u^{pl} = \theta_u - \theta_y$ ) είναι:

$$\theta_{um}^{pl} = 0.0145(0.25^v) \left[ \frac{\max(0.01, \omega')}{\max(0.01, \omega)} \right]^{0.3} (f_c)^{0.2} \left( \frac{L_s}{h} \right)^{0.35} 25^{\left( \alpha \rho_{sx} \frac{f_{yw}}{f_c} + \alpha_f \rho_{fx} \frac{f_{fe}}{f_c} \right)} (1.275^{100 \rho_d}) \quad (5.26)$$

Για τοιχώματα σύμφωνα με τις πριν το 1985 αντιλήψεις για αντισεισμικότητα, το δεξιά μέλος των εξ. (5.24) και (5.26) πρέπει να πολλαπλασιασθεί επί 0.625 και 0.6, αντίστοιχα (οι συντελεστές 0.016 και 0.0145 γίνονται 0.01 και 0.0087).

Παρατηρώντας τις εξ. (5.24) και (5.26) διαπιστώνουμε ότι η συμβολή των συνθέτων υλικών έγκειται στο δεξιά μέλος του εκθέτη του 25. Στον Ευρωκώδικα 8 προτείνεται ο

υπολογισμός της ενεργής αντοχής του μανδύα συνθέτων υλικών από την εξής εμπειρική σχέση:

$$f_{fe} = \min(f_f, \varepsilon_{fu} E_f) \left[ 1 - 0.7 \min(f_f, \varepsilon_{fu} E_f) \frac{\rho_{fx}}{f_c} \right] \quad (5.27)$$

όπου  $f_f$ ,  $\varepsilon_{fu}$  και  $E_f$  η εφελκυστική αντοχή, η οριακή παραμόρφωση και το μέτρο ελαστικότητας του συνθέτου υλικού, αντίστοιχα. Η συνιστωμενη τιμή του  $\varepsilon_{fu}$  είναι 0.015 για σύνθετα υλικά με ίνες άνθρακα ή αραμιδίου και 0.020 για ίνες γυαλιού.

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

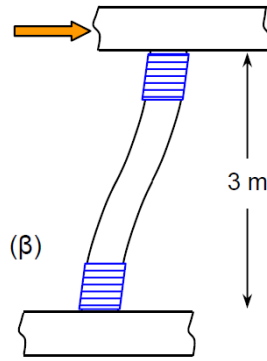
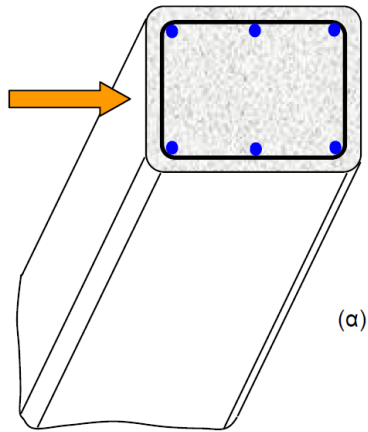
$$\mu_{\Delta} = \mu_{\theta} = 1.3 + 12.4 \left( \frac{\sigma_{lu}}{f_c} - 0.1 \right) \geq 1.3 \quad (5.28)$$

Στην εξ. (5.28)  $\sigma_{lu}$  είναι η τάση περίσφιγξης στο σκυρόδεμα κατά την οριακή κατάσταση αστοχίας, η οποία μπορεί να λαμβάνεται από την εξ. (5.9). Εδώ σημειώνεται ότι για τη χρήση της εξ. (5.9) σε ορθογωνικά υποστυλώματα ως  $d$  θα πρέπει να ληφθεί η πλευρά του υποστυλώματος που είναι κάθετη στη διεύθυνση εφαρμογής της οριζόντιας δύναμης. Η εφαρμογή της τελευταίας σχέσης γίνεται κατανοητή μέσω του παραδείγματος που ακολουθεί.

#### 5.4 Παράδειγμα

Θεωρούμε υποστύλωμα ορθογωνικής διατομής 0.30x0.50 m, για το οποίο η σεισμική φόρτιση (οριζόντια δύναμη - επιβαλλόμενη μετατόπιση) δρα παράλληλα στη μεγάλη πλευρά. Υποθέτουμε ότι οι γωνίες του υποστυλώματος έχουν στρογγυλευθεί ώστε να είναι  $R = 30$  mm. Το σκυρόδεμα έχει αντοχή  $f_c = 15$  N/mm<sup>2</sup>. Έστω ότι διαθέτουμε ύφασμα ινών άνθρακα με μέτρο ελαστικότητας 230 kN/mm<sup>2</sup>,  $f_{fd} =$  εφελκυστική αντοχή 3500 N/mm<sup>2</sup> και πάχος 0.12 mm, προκειμένου να το χρησιμοποιήσουμε για την κατασκευή μανδύα στις κρίσιμες περιοχές με στόχο την επίτευξη δείκτη πλαστιμότητας μετατοπίσεων (ή γωνιών στροφής χορδής)  $\mu_{\Delta} (= \mu_{\theta}) = 5$ . 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 (και συντηρητικός!) υπολογισμός του απαιτούμενου αριθμού στρώσεων βάσει της εξίσωσης:

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

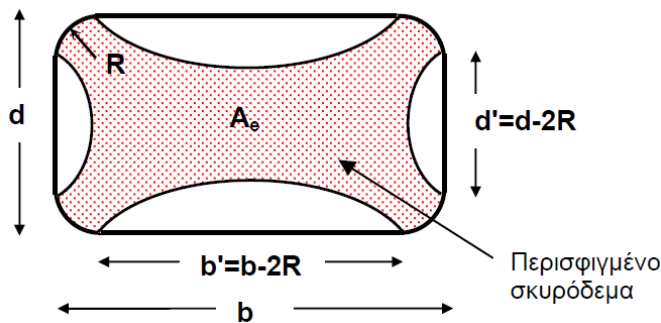


Διαμήκης οπλισμός:  
 $\Phi 18$ ,  $f_y$  (αντοχή διαμήκους  
 χάλυβα) = 420 N/mm<sup>2</sup>

Εφελκυστική αντοχή μανδύα  $f_{fde} = \eta_e * f_{fd} = 0.90 * 3500 = 3150 \text{ N/mm}^2$ .

Εύρεση συντελεστή αποδοτικότητας από την εξίσωση:

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



$$b' = b - 2R = 50 - (2 * 3) = 44 \text{ cm}$$

$$d' = d - 2R = 30 - (2 * 3) = 24 \text{ cm}$$

$$\alpha_n = 1 - \frac{44^2 + 24^2}{3 * 50 * 30} = 0.442$$

Από την εξίσωση :

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

Αντικαθιστούμε την  $\sigma_{lu}$  με την εξίσωση

$$\sigma_{lud,b} = \alpha_f \frac{2t_f}{d} f_{fde}$$

$$5 = 1,3 + 12,4 \left( \frac{0,442 * \left( \frac{2t_f}{300} \right) * 3150}{15} - 0,1 \right) \rightarrow t_f = 0,646$$

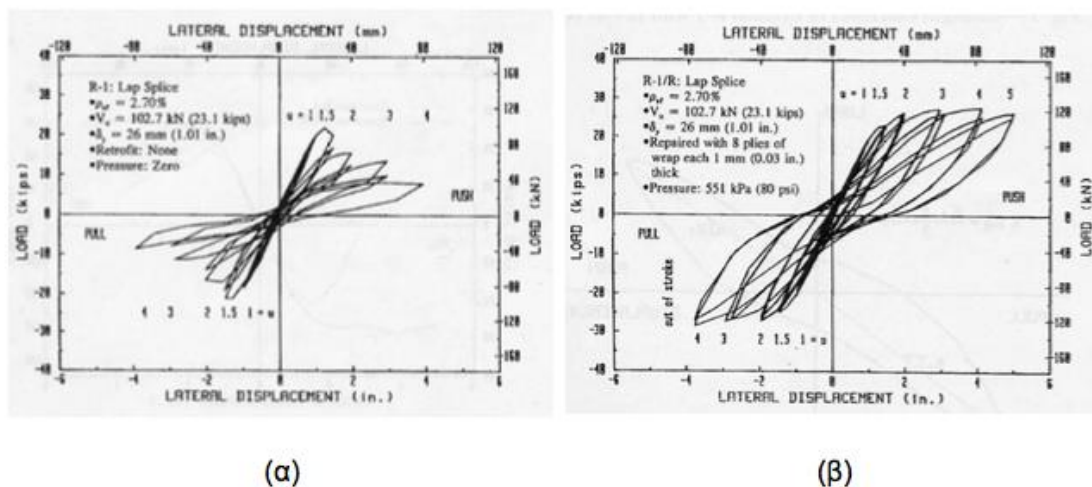
## 5.5 Ένωση ράβδων με παράθεση ράβδων (ματίσεις)

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

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

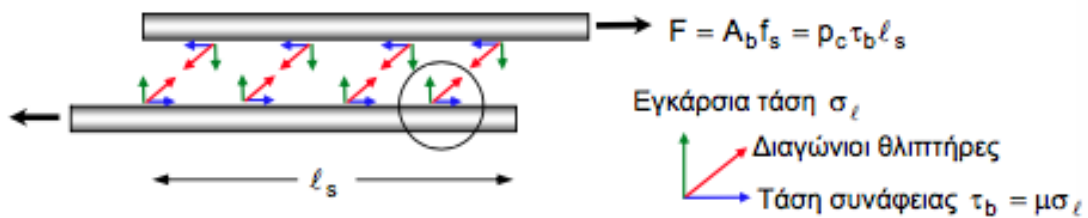
### 5.5.1 Συμπεριφορά και αναλυτικό προσομοίωμα

Η ευνοϊκή δράση της περίσφιγξης που παρέχουν οι μανδύες συνθέτων υλικών σε περιοχές ματίσεων έχει καταδειχθεί σε αρκετές ερευνητικές εργασίες. Ενδεικτικά πειραματικά αποτελέσματα δίνονται στο Σχ. 5.10.

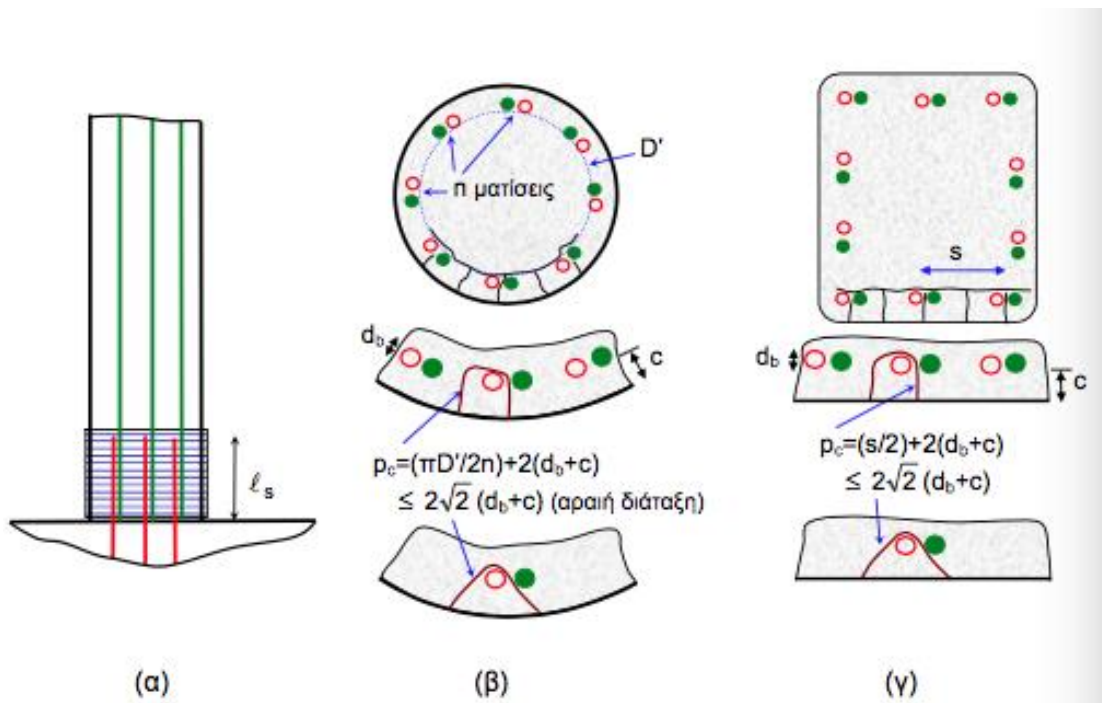


**Σχ. 5.9** Συμπεριφορά (α) μη ενισχυμένου και (β) ενισχυμένου στην περιοχή μάτισης υποστυλώματος ορθογωνικής διατομής υπό την οριζόντια ανακυκλιζόμενη φόρτιση

Η δύναμη  $F$  που μπορεί να αναπτυχθεί σε ράβδο σπλισμού εμβαδού  $A_b$  στην περιοχή μάτισης μήκους  $\ell_s$  εξισορροπείται από την διατμητική τάση συνάφειας  $\tau_b$  που αναπτύσσεται στην περιφέρεια της ράβδου. Η τάση αυτή λαμβάνεται από θεώρηση προσομοιώματος τριβής, είναι δηλαδή ανάλογη με την εγκάρσια τάση  $\sigma_\ell$  μέσω συντελεστή  $\mu$  (Σχ. 5.10), ο οποίος κυμαίνεται από 0.5 – 2 και βαίνει μειούμενος με την ανακύκλιση επιβαλλόμενων ολισθήσεων. Απουσία εγκάρσιου σπλισμού στο μήκος μάτισης, η εγκάρσια τάση αναλαμβάνεται μόνον από την εφελκυστική αντοχή της επικάλυψης (πάχους  $c$ ) του σπλισμού, αναπτύσσοντας ρωγμή διαδρομής  $\rho_c$  (Σχ. 5.11β,γ). Η δύναμη  $F$  που μπορεί να αναπτυχθεί σε αυτή την περίπτωση είναι ίση με  $\rho_c(\mu f c t m) \ell_s$ .



**Σχ. 5.10** Εντατική κατάσταση στην περιοχή μάτισης (μηχανισμός τριβής)



**Σχ. 5.11** (α) Περίσφιγξη υποστυλώματος σε περιοχή μάτισης. (β) Ανάπτυξη ρωγμών στην εφελκυσμένη περιοχή κυκλικού υποστυλώματος λόγω αστοχίας συνάφειας και ορισμός της κρίσιμης διαδρομής ρηγμάτωσης. (γ) Ομοίως για ορθογωνικά υποστυλώματα.

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

$$A_b f_y = \rho_c \mu_s l_s \quad (5.29)$$

όπου  $\sigma_l$  η τάση περίσφιγξης που παρέχει ο μανδύας των συνθέτων υλικών κατά την οριακή κατάσταση αστοχίας ( $\sigma_l = \sigma_{lu}$ ). Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, για υποστυλώματα ορθογωνικής διατομής, η τάση αυτή μπορεί, προσεγγιστικά, να ληφθεί ίση με τη μέση τιμή των τάσεων περίσφιγξης στις διευθύνσεις των δύο πλευρών, βλ. εξ. (5.16).

Συνδυάζοντας τις εξ. (5.29) και (5.16), θεωρώντας ότι η απαίτηση για μανδύα αυξάνεται γραμμικά όσο μειώνεται ο λόγος του διατιθέμενου μήκους μάτισης  $l_s$  προς το απαιτούμενο μήκος  $l_{s,min}$  για αποφυγή αστοχίας μάτισης απουσία μανδύα και εισάγοντας τον συντελεστή ασφάλειας για την αβεβαιότητα του προσομοιώματος, καταλήγουμε στην παρακάτω σχέση για το απαιτούμενο πάχος μανδύα ώστε να αποφευχθεί η απώλεια συνάφειας σε περιοχές ματίσεων:

$$t_f = \gamma_{Rd} \frac{bd \left(1 - \frac{l_s}{l_{s,min}}\right) A_b f_y}{\alpha_f (b+d) \rho_c \mu_{fe} l_s} \quad (5.30)$$

Στην παραπάνω σχέση  $A_b$  είναι το εμβαδόν διατομής μίας ματιζόμενης εφελκυσμένης ράβδου οπλισμού (με διάμετρο  $d_b$ ) και  $\rho_c$  είναι η διαδρομή ρηγματώσης που αντιστοιχεί στη ράβδο αυτή (Σχ. 6.15γ).

Οι Seible et al. (1997), βασισμένοι σε πειραματικά αποτελέσματα, διέτύπωσαν μία επί πλέον συνθήκη, σύμφωνα με την οποία για να εξασφαλισθεί η συνάφεια ράβδου – σκυροδέματος θα πρέπει η εγκάρσια παραμόρφωση (διόγκωση του σκυροδέματος) να μην ξεπερνά μία κρίσιμη τιμή, γύρω στο 0.001. Έτσι, στην εξ. (5.30) για το σχεδιασμό του πάχους μανδύα, η ενεργή τάση σχεδιασμού των συνθέτων υλικών  $f_{fe}$  θα πρέπει να περιορίζεται σε:

$$f_{fe} \leq 0.001 \times E_f \quad (5.31)$$

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

### 5.5.2 Επιρροή της ένωσης ράβδων με παράθεση στη γωνία στροφής χορδής

Για να ληφθεί υπόψη η επιρροή των ματίσεων θα πρέπει η γωνία στροφής χορδής στη διαρροή  $\theta_y$  και το πλαστικό τμήμα της γωνίας στροφής χορδής στην αστοχία  $\theta_u^{pl}$  να υπολογίζονται με ποσοστό θλιβόμενου οπλισμού  $\omega'$  διπλάσιο αυτού που ισχύει εκτός της περιοχής μάτισης. Το ίδιο ισχύει φυσικά για την καμπυλότητα διαρροής  $\phi_y$  και την ροπή διαρροής  $M_y$ . Επίσης αν η μάτιση γίνεται σε μήκος  $l_s < l_{s,min}$ , ο υπολογισμός των  $\theta_u^{pl}$ ,  $\theta_u$ ,  $M_y$  και  $\phi_y$  θα γίνεται πολλαπλασιάζοντας την τάση διαρροής του διαμήκους χάλυβα επί  $l_s/l_{s,min}$ . Ακόμα θα πρέπει να πολλαπλασιάζεται ο 2ος όρος των εξ. (5.21) – (5.22) επί το λόγο της τροποποιημένης λόγω μάτισης ροπής διαρροής προς την τιμή



της εκτός της μάτισης. Τέλος, από στοιχεία που προκύπτουν βάσει πειραματικών δεδομένων, το δεξιά μέλος της εξ. (5.26) θα πρέπει να πολλαπλασιάζεται επί  $l_s / l_{su,min}$ . Για ματίσεις χωρίς μανδύα συνθέτων υλικών είναι:

$$l_{s,min} = \frac{0.3f_y}{\sqrt{f_c}} d_b \quad (5.32)$$

$$l_{su,min} = \frac{f_y}{\left(1.05 + 14.5\alpha_l \rho_{sx} \frac{f_{yw}}{f_c}\right) \sqrt{f_c}} d_b \quad (5.33)$$

όπου

$$\alpha_l = \left(1 - \frac{s_h}{2b_o}\right) \left(1 - \frac{s_h}{2h_o}\right) \frac{n_{restr}}{n} \quad (5.34)$$

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

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

$$l_{s,min} = \frac{0.2f_y}{\sqrt{f_c}} d_b \quad (5.35)$$

$$l_{su,min} = \frac{f_y}{\left(1.05 + 14.5\alpha_{l,f} \rho_{fx} \frac{f_{fe}}{f_c}\right) \sqrt{f_c}} d_b \quad (5.36)$$

όπου  $\alpha_{l,f} = 4/n$ , δεδομένου ότι οι τάσεις περίσφιγξης δρουν μόνο στις 4 γωνιακές διαμήκεις ράβδους. Θα πρέπει να επισημάνουμε στο σημείο αυτό ότι για να αποφύγουμε την εισαγωγή της συμβολής των συνθέτων υλικών δύο φορές στην διόρθωση για την  $\theta_u^{pl}$  το  $\alpha_f$  στον εκθέτη του 25 στην εξ. (5.26) θα πρέπει να ληφθεί ίσο με μηδέν. Τέλος τα μεγέθη αντοχής στις παραπάνω εξισώσεις έχουν μονάδες N/mm<sup>2</sup>.

## 5.6 Λυγισμός ράβδων

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

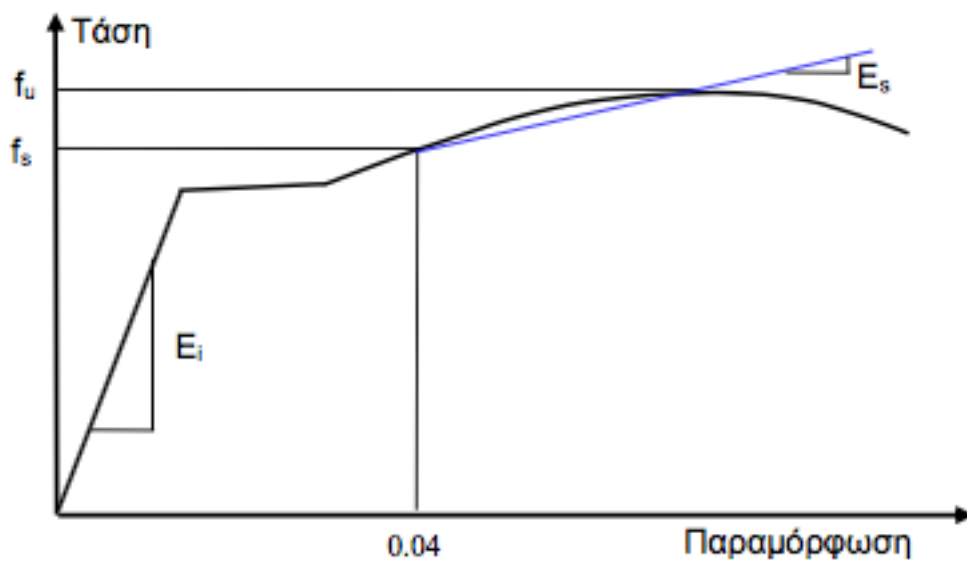
$$t_f = \frac{0.4nf_s^2 d}{4E_{ds} E_f \alpha_f} \quad (5.37)$$

όπου  $n$  = συνολικός αριθμός διαμήκων ράβδων στη διατομή,  $f_s$  = τάση στον διαμήκη σπλισμό για παραμόρφωση ίση με 0.04 και  $E_{ds}$  = "διπλό" μέτρο ελαστικότητας του διαμήκους σπλισμού, το οποίο ορίζεται ως εξής (Σχ. 5.12):

$$E_{ds} = \frac{4E_s E_i}{(\sqrt{E_s} + \sqrt{E_i})^2} \quad (5.38)$$

Στην εξ. (5.38)  $E_s$  = τέμνον μέτρο ελαστικότητας του διαμήκους χάλυβα από την τάση  $f_s$  στην τάση  $f_u$  (αντοχή του χάλυβα) και  $E_i$  = αρχικό μέτρο ελαστικότητας του διαμήκους χάλυβα. Στην εξ. (6.37) η ποσότητα  $0.45 f_s^2 / E_{ds}$  μπορεί να ληφθεί προσεγγιστικά (και συντηρητικά) ίση με  $40 \text{ N/mm}^2$ , οπότε, λαμβανοντας υπόψη και τον συντελεστή ασφάλειας, έχουμε:

$$t_f = \gamma_{Rd} \frac{10nd}{E_f \alpha_f} \quad (E_f \text{ σε N/mm}^2) \quad (5.39)$$



Σχ. 5.12 Ορισμός μέτρων ελαστικότητας χάλυβα

## 6. ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ

### 6.1 Γενικά

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

- Υψηλές θερμοκρασίες
- Υγρασία
- Υπεριώδης ακτινοβολία
- Αλκαλικό και όξινο περιβάλλον
- Γαλβανική διάβρωση

- Ερπυσμός, θραύση υπό τάση, διάβρωση υπό τάση
- Κόπωση
- Κρούση

## 6.2 Θερμοκρασιακές επιδράσεις

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

## 6.3 Υγρασία

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

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

## 6.4 Υπεριώδης ακτινοβολία

Η υπεριώδης ακτινοβολία του ηλίου (UV) επιφέρει αλλοίωση της ισχύος των δεσμών και γενικά μείωση της αντοχής στα πολυμερή (μήτρα συνθέτων υλικών) που εκτίθενται σε αυτή. Φαινομενικά, το αποτέλεσμα της επίδρασης της υπεριώδους ακτινοβολίας

είναι η χρωματική αλλοίωση και μικρορηγγάτωση των εκτιθέμενων επιφανειών. Για την περίπτωση των συνθέτων υλικών η υπεριώδης ακτινοβολία επηρεάζει κάπως την επιφανειακή στρώση ρητίνης, επιφέροντας χρωματική αλλοίωση και ενδεχομένως μικρή μείωση της αντοχής της, όχι όμως και τις ίνες (εξαιρέση αποτελούν οι ίνες αραμιδίου, οι οποίες είναι ελαφρώς ευπαθείς, Ahmad and Plecnik 1989). Ως μέθοδος προστασίας στην περίπτωση απευθείας έκθεσης στον ήλιο επί μακρόν προτείνεται η εφαρμογή επιχρισμάτων ή ειδικών αντι-UV (ακρυλικής ή πολυουρεθανικής σύστασης) βαφών ανοικτού χρώματος (π.χ. γκρί ανοικτό).

## **6.5 Αλκαλικό και όξινο περιβάλλον**

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

## **6.6 Γαλβανική διάβρωση**

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

## **6.7 Ερπυσμός**

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

## **6.8 Θραύση υπό τάση και διάβρωση υπό τάση**

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

Το φαινόμενο της διάβρωσης υπό τάση (stress corrosion) αφορά στην μείωση της αντοχής των συνθέτων υλικών λόγω της συνδυασμένης δράσης εφελκυστικών τάσεων και διαβρωτικού (π.χ. όξινου ή αλκαλικού) περιβάλλοντος (το οποίο όμως,

απουσία τάσεων, δεν θα είχε ως αποτέλεσμα την μείωση της αντοχής). Γενικά τα σύνθετα υλικά με ίνες άνθρακα δεν έχουν πρόβλημα διάβρωσης υπό τάση ακόμα και αν η τάση φθάνει στο 80% της εφελκυστικής αντοχής. Οι ίνες γυαλιού όμως είναι εξαιρετικά ευπαθείς (ειδικά όταν συνδυάζονται με ρητίνες όχι τόσο καλές όσο οι εποξειδικές) ενώ οι ίνες αραμιδίου δείχνουν ενδιάμεση συμπεριφορά. Συμπερασματικά, όταν τα σύνθετα υλικά φέρουν μόνιμα φορτία, η βέλτιστη επιλογή υλικού ινών είναι ο άνθρακας (σε συνδυασμό με εποξειδική ρητίνη).

## 6.9 Κόπωση

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

## 6.10 Κρούση

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

## 6.11 Αξιολόγηση τύπου ινών

Ένα ερώτημα το οποίο τίθεται συχνά στην πράξη από τους μηχανικούς – μελετητές ενισχύσεων με σύνθετα υλικά αφορά στην επιλογή του πλέον κατάλληλου για κάθε περίπτωση τύπου ινών. Όπως φάνηκε σε προηγούμενα κεφάλαια, η παράμετρος που καθορίζει τον σχεδιασμό μίας επέμβασης σε πολλές περιπτώσεις (π.χ. ενίσχυση σε κάμψη, ενίσχυση σε τέμνουσα, περίσφιγξη με στόχο αύξηση της θλιπτικής αντοχής, περίσφιγξη στις κρίσιμες περιοχές υποστυλωμάτων με στόχο την αποτροπή λυγισμού των διαμήκων ράβδων) είναι η “δυστένεια” του υλικού, δηλαδή το γινόμενο  $E_{ft}$  (μέτρο ελαστικότητας επί συνολικό πάχος). Έτσι, ένα πρώτο κριτήριο επιλογής υλικού ινών θα μπορούσε να αποτελέσει το κόστος για δεδομένη δυστένεια. Για παράδειγμα, ένα ύφασμα ινών άνθρακα με μέτρο ελαστικότητας  $230 \text{ kN/mm}^2$  και πάχος  $t_{fib} = 0.12 \text{ mm}$  είναι ουσιαστικά “ισοδύναμο” ενός υφάσματος ινών γυαλιού με μέτρο ελαστικότητας  $69 \text{ kN/mm}^2$  και πάχος  $t_{fib} = 0.40 \text{ mm}$ . Το σύνθετο υλικό που θα προκύψει και από τα δύο θα έχει “δυστένεια” κάτι λιγότερο από  $nE_{ft_{fib}}$  δύο στρώσεις υφάσματος ινών άνθρακα με μέτρο ελαστικότητας  $230 \text{ kN/mm}^2$  και πάχος  $0.12 \text{ mm}$  είναι ουσιαστικά “ισοδύναμες” 5 στρώσεων υφάσματος γυαλιού με μέτρο ελαστικότητας  $69 \text{ kN/mm}^2$  και πάχος  $0.16 \text{ mm}$ . Έτσι, αν το κόστος (π.χ. ανά  $\text{m}^2$ ) κάθε υφάσματος γυαλιού, στο τελευταίο παράδειγμα, είναι πάνω από 2.5 φορές χαμηλότερο του αντίστοιχου για το ύφασμα άνθρακα, η επιλογή του γυαλιού αποτελεί τη βέλτιστη λύση. Στην περίπτωση

που στόχος της ενίσχυσης είναι η αύξηση της παραμορφωσιμότητας του σκυροδέματος μέσω περίσφιγξης (π.χ. σε περιοχές πλαστικών αρθρώσεων με στόχο την αύξηση του δείκτη πλαστιμότητας) η παράμετρος που καθορίζει τον σχεδιασμό μιας επέμβασης είναι το γινόμενο ffdtf (εφελκυστική αντοχή επί συνολικό πάχος), οπότε ως κριτήριο επιλογής του τύπου ινών θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί το κόστος για δεδομένη τιμή του παραπάνω γινομένου.

**Πίνακας 6.1** Αξιολόγηση ινών με βάση την ανθεκτικότητα.

<b>Κριτήριο</b>	<b>Ίνες άνθρακα</b>	<b>Ίνες Γυαλιού</b>	<b>Ίνες Αραμιδίου</b>
Υψηλές θερμοκρασίες	+	-	-
Υγρασία	+	-	-
Υπεριώδης ακτινοβολία	++	+	-
Αλκαλικό και όξινο περιβάλλον	++	--	+
Γαλβανική διάβρωση	--	+	+
Ερπυσμός	++	--	-
Θραύση υπό τάση, διάβρωση υπό τάση	++	--	+
Κόπωση	++	-	+
Κρούση	-	+	++

Στους παραπάνω συλλογισμούς όμως θα πρέπει να ληφθούν σοβαρά υπόψη και άλλες παράμετροι, όπως είναι το κόστος εργατικών (αυξάνεται με τον αριθμό στρώσεων), η αποδοτικότητα των πολλαπλών στρώσεων (δεν είναι ανάλογη του αριθμού των στρώσεων), η δυσκολία εμποτισμού στρώσεων μεγάλου πάχους και, φυσικά, η ανθεκτικότητα του συστήματος σε διάρκεια. Σε ότι αφορά στον τελευταίο παράγοντα, τα σύνθετα υλικά με ίνες άνθρακα είναι αυτά που έχουν την καλύτερη συμπεριφορά, όπως φαίνεται και στον Πίν. 6.1.

## **7. ΣΥΓΧΡΟΝΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ**

Οι βλάβες που προκαλούνται από σεισμούς σε κατασκευές οπλισμένου σκυροδέματος, η προσεισμική ενίσχυση, η γήρανση και φθορά των κατασκευών ( π.χ. λόγω διάβρωσης των οπλισμών) και η αλλαγή χρήσης οδηγούν ολοένα και περισσότερο προς την αναζήτηση νέων υλικών και τεχνικών επεμβάσεων οι οποίες να εξασφαλίζουν αποτελεσματικότητα, ταχύτητα και ευκολία στην εφαρμογή, διατήρηση της γεωμετρίας των δομικών στοιχείων καθώς και μείωση του κόστους. Προς την κατεύθυνση αυτή αναπτύχθηκε τα τελευταία 20 έτη περίπου η τεχνική επεμβάσεων με ινοπλισμένα πολυμερή (ΙΟΠ), η οποία αξιοποιεί ιδιότητες των υλικών αυτών όπως είναι η εξαιρετικά υψηλή εφελκυστική αντοχή, η ανθεκτικότητα στο χρόνο, το χαμηλό βάρος και η ικανοποιητική παραμορφωσιμότητα. Έτσι, τόσο διεθνώς όσο και στη χώρα μας, ο αριθμός επεμβάσεων σε υφιστάμενα δομήματα όπου γίνεται

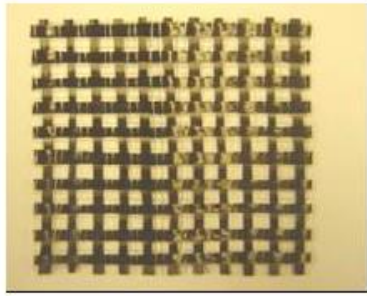
χρήση ΙΟΠ αυξάνεται με ταχείς ρυθμούς. Προς την κατεύθυνση αυτή έχει βοηθήσει σημαντικά και η πλούσια διεθνής βιβλιογραφία, η οποία έχει φωτίσει πάρα πολλές πτυχές του πεδίου των επεμβάσεων με ΙΟΠ. Παρόλα τα πλεονεκτήματά της, η τεχνική των ινοπλισμένων πολυμερών έχει ορισμένες εγγενείς αδυναμίες, οι οποίες ουσιαστικά οφείλονται στην χρήση ρητινών (κατά κανόνα εποξειδικών).

Εν περιλήψει οι αδυναμίες αυτές αφορούν:

- στην πτωχή συμπεριφορά (απώλεια αντοχής) των ρητινών σε θερμοκρασίες πάνω από την θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης (της τάξης των 70-80ο C),
- στο σχετικά υψηλό κόστος των ρητινών,
- στην αδυναμία εφαρμογής σε υγρές επιφάνειες (εκτός αν γίνει χρήση ρητινών ειδικού τύπου),
- στον περιορισμό της ικανότητας “αναπνοής” των δομικών στοιχείων που καλύπτονται από μανδύες ΙΟΠ,
- στην ασυμβατότητα ρητινών με υλικά ιστορικών κατασκευών και
- στην δυσκολία διεξαγωγής μη καταστροφικής αποτίμησης πιθανών βλαβών “πίσω” από μανδύες ΙΟΠ μετά από σεισμούς.

Μια εκ πρώτης όψεως λογικοφανής λύση στα παραπάνω προβλήματα θα μπορούσε να είναι η αντικατάσταση της ρητίνης, η οποία αποτελεί το συνδετικό υλικό μεταξύ των συνεχών ινών, δηλαδή την “μήτρα”, με πολύ λεπτόκοκκο υλικό ανόργανης σύστασης, π.χ. τύπου κονιάματος με βάση το τσιμέντο. Τέτοιες λύσεις έχουν δοκιμασθεί τα τελευταία χρόνια χωρίς ιδιαίτερη επιτυχία, διότι η κοκκομετρία των κονιαμάτων, ακόμα και των εξαιρετικά λεπτόκοκκων, δεν επιτρέπει τον πλήρη εμποτισμό των ινών, με αποτέλεσμα την εμφάνιση πτωχών χαρακτηριστικών συνάφειας μεταξύ των ινών και του μητρικού υλικού (κονίαμα). Μια ενδιαφέρουσα εναλλακτική πρόταση, είναι αυτή της αντικατάστασης των “συμβατικών” υφασμάτων συνεχών ινών (συνήθως) μίας διεύθυνσης με υφάσματα ινών σε μορφή πλέγματος (textile) με βροχίδες. Τα πλέγματα αυτά μπορούν να κατασκευάζονται από δέσμες ινών ανά αποστάσεις σε δύο ή περισσότερες διευθύνσεις (π.χ. Σχήμα 1α,β), έτσι ώστε να εξασφαλίζεται η καλή συνεργασία ινών – μητρικού υλικού (δηλαδή κονιάματος) κυρίως μέσω μηχανικής εμπλοκής του κονιάματος στα κενά μεταξύ των δεσμών (Σχήμα 1γ). Ο όρος που έχει προταθεί από τους συγγραφείς στην διεθνή βιβλιογραφία για τα “νέα” αυτά σύνθετα υλικά μανδύων ενίσχυσης είναι Textile-Reinforced Mortars (TRM), που στην Ελληνική γλώσσα θα μπορούσε να αποδοθεί ως Ινοπλέγματα σε Ανόργανη Μήτρα (IAM). Τα πλέγματα αυτά παρασκευάζονται από συνήθεις ίνες άνθρακα, υάλου κλπ. Σημειώνεται πάντως ότι στην περίπτωση πλεγμάτων από ίνες υάλου θα πρέπει να γίνεται είτε χρήση υάλου τύπου AR (alkali-resistant) είτε προεμποτισμός των δεσμών με κάποιο πολυμερές χαμηλού κόστους, ώστε να αποφεύγεται η πρώιμη φθορά των ινών λόγω της υψηλής αλκαλικότητας των κονιαμάτων.

**Σχήμα 7.1.** Πλέγματα ινών (α) δύο διευθύνσεων και (β) τεσσάρων διευθύνσεων. (γ) Εφαρμογή ινοπλεγμάτων σε κονίαμα στη βάση υποστρώματος.



(α)



(β)



(γ)

Οι πρώτες εργασίες όπου ινοπλέγματα συνδυάστηκαν με κονιάματα για την ενίσχυση δομικών στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος ήταν αυτές των Curbach & Brueckner (2003) και Curbach & Ortlerp (2003). Στις εργασίες αυτές γίνονται μελέτες συνάφειας ινοπλεγμάτων ανόργανης μήτρας – σκυροδέματος και παρουσιάζονται αποτελέσματα δοκιμών κάμψης επί δοκών ενισχυμένων με υαλοπλέγματα σε τσιμεντοκονίαμα. Η χρήση των ινοπλεγμάτων σε ανόργανη μήτρα για την κατασκευή μανδύων με στόχο την περίσφιξη σκυροδέματος και την ενίσχυση έναντι τέμνουσας παρουσιάστηκε για πρώτη φορά στις εργασίες των Triantafyllou & Paranicolaou (2005), Triantafyllou et al. (2006) και Triantafyllou & Paranicolaou (2006). Παρακάτω γίνεται μια συνοπτική παρουσίαση πειραματικών αποτελεσμάτων από ορισμένες δοκιμές όπου έγινε χρήση μανδύων ινοπλεγμάτων σε ανόργανη μήτρα, αλλά και σύγκριση αυτών με ισοδύναμους μανδύες οπλισμένων πολυμερών, με στόχο:

- ❖ Την περίσφιξη άοπλου και οπλισμένου σκυροδέματος υπό αξονική θλίψη.
- ❖ Την αύξηση της πλαστιμότητας υποστυλωμάτων μέσω περίσφιξης στα άκρα.
- ❖ Την ενίσχυση δομικών στοιχείων έναντι τέμνουσας.
- ❖ Την ενίσχυση στοιχείων τύπου δοκού έναντι κάμψης.

Εκ των αποτελεσμάτων συνάγεται ότι η προτεινόμενη τεχνική είναι εξαιρετικής αποτελεσματικότητας, η οποία είναι συγκρίσιμη αυτής των οπλισμένων πολυμερών.

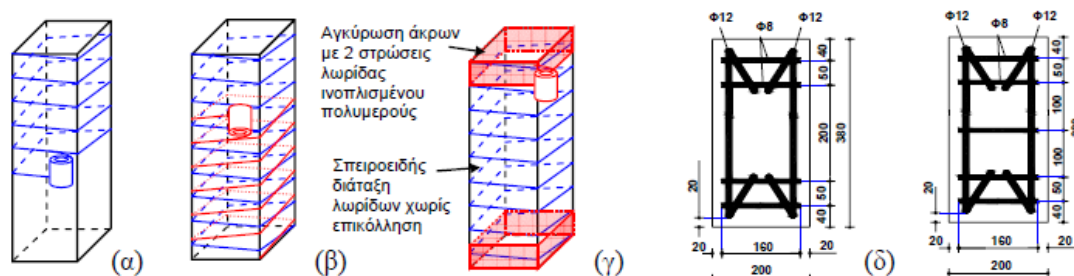
### 7.1. Περίσφιξη άοπλων και οπλισμένων δοκιμίων

Για την μελέτη της περίσφιξης σκυροδέματος με μανδύες ινοπλεγμάτων σε ανόργανη μήτρα (TRM) διεξήχθη πειραματικό πρόγραμμα το οποίο περιελάμβανε δοκιμές κεντρικής θλίψης σε τέσσερις ομάδες δοκιμίων. Κύριοι στόχοι του πειραματικού προγράμματος ήταν να μελετηθούν:

1. Ο ρόλος της αντοχής του κονιάματος στα χαρακτηριστικά περίσφιξης του άοπλου σκυροδέματος (Ομάδα Α).
2. Η αποτελεσματικότητα των μανδύων TRM συγκριτικά με αυτήν των μανδύων ΙΟΠ ως προς την περίσφιξη άοπλου σκυροδέματος (Ομάδες Β και C).
3. Ο ρόλος του αριθμού των στρώσεων μανδύων TRM στην περίσφιξη άοπλου σκυροδέματος (Ομάδες Α, Β και C).



4. Η αποτελεσματικότητα μιας νέας τεχνικής, βάσει της οποίας η περίσφιγξη επιβάλλεται μέσω λωρίδων σε σπειροειδή διάταξη χωρίς επικόλληση (Σχ. 2α-γ), με εξαίρεση στα άκρα (Ομάδα C).
5. Η αποτελεσματικότητα των μανδυών TRM συγκριτικά με αυτήν των μανδυών ΙΟΠ ως προς την περίσφιγξη οπλισμένου σκυροδέματος για διαφορετικές αποστάσεις συνδετήρων (Ομάδα D).



**Σχήμα 7.2.** Γεωμετρικές λεπτομέρειες δοκιμίων. (α)-(γ) Εφαρμογή λωρίδων σε σπειροειδή διάταξη χωρίς επικόλληση (Ομάδα C). (δ) Πρισματικά δοκίμια Ομάδας D.

Για την πειραματική μελέτη χρησιμοποιήθηκαν:

- ❖ Άοπλα κυλινδρικά δοκίμια διαμέτρου 150 mm και ύψους 300 mm (Ομάδες A και B).
- ❖ Άοπλα πρισματικά δοκίμια τετραγωνικής διατομής 250×250 mm και ύψους 700 mm (Ομάδα C).
- ❖ Οπλισμένα πρισματικά δοκίμια τετραγωνικής διατομής 200×200 mm και ύψους 700 mm (Ομάδα D).

Τα δοκίμια κάθε ομάδας παρασκευάστηκαν από εργοστασιακό σκυρόδεμα, το οποίο ήταν το ίδιο για κάθε ομάδα αλλά ελαφρώς διαφορετικό μεταξύ ομάδων, λόγω σκυροδετήσεων σε διαφορετικές ημέρες. Τα δοκίμια της Ομάδας D ήταν οπλισμένα με κλωβούς οπλισμών που αποτελούνταν από τέσσερις διαμήκεις ράβδους Φ12 και από συνδετήρες Φ8 σε αραιή (ανά 200 mm) ή πυκνή (ανά 100 mm) διάταξη κατηγορίας S500 με τάση διαρροής 560 N/mm<sup>2</sup>. Όλες οι γεωμετρικές λεπτομέρειες των δοκιμίων της Ομάδας D απεικονίζονται στο Σχήμα 2 δ. Σημειώνεται ότι κατά την

σκυροδέτηση των πρισματικών δοκιμίων χρησιμοποιήθηκαν τεταρτοκύκλια πλαστικού σωλήνα στους μεταλοτύπους για καμπύλωση των γωνιών της διατομής με ακτίνα καμπυλότητας 15 mm και 25 mm για τα δοκίμια των Ομάδων C και D, αντιστοίχως, ώστε να αποφευχθεί πρώιμη αστοχία του μανδύα συνθέτων υλικών λόγω συγκέντρωσης τάσεων. Η σήμανση των δοκιμίων (Πίνακας 1) δίνεται ως Y\_XNZ, όπου:

- ❖ Y δηλώνει τον κωδικό της ομάδας (A, B, C, D).
- ❖ X δηλώνει τον τύπο μανδύα [C για δοκίμια αναφοράς, δηλ. χωρίς μανδύα, M για δοκίμια με μανδύα κονιάματος, MI και MII για δοκίμια με μανδύα κονιάματος Τύπου I και II, αντιστοίχως (το κονίαμα I είχε μικρότερη αντοχή σε σχέση με το II), R για δοκίμια με μανδύα όπου η μήτρα των συνθέτων υλικών είναι ρητίνη και A για δοκίμια όπου ο μανδύας κατασκευάζεται μέσω λωρίδων σε σπειροειδή διάταξη χωρίς επικόλληση, με εξαίρεση στα άκρα].
- ❖ N δηλώνει τον αριθμό των στρώσεων.
- ❖ Ο υποδείκτης Z (στα δοκίμια της Ομάδας D μόνον) δηλώνει την ύπαρξη ή όχι συνδετήρων καθώς και την απόσταση αυτών (U για άοπτα δοκίμια, S20 για δοκίμια με απόσταση συνδετήρων 200 mm και S10 για δοκίμια με απόσταση συνδετήρων 100 mm).

Με εξαίρεση εκείνα τα δοκίμια της Ομάδας D στα οποία εφαρμόστηκαν μανδύες ινοπλισμένων πολυμερών, η ενίσχυση των δοκιμίων έγινε με πλέγματα συνεχών ινών (textiles) δύο διευθύνσεων. Τα πλέγματα αποτελούνταν από δέσμες ινών άνθρακα σε απόσταση 10 mm (από άξονα σε άξονα) και είχαν μάζα 168 g/m<sup>2</sup> και ονομαστικό πάχος 0.047 mm (υπολογισμένο βάσει ισοδύναμης κατανομής των ινών σε ομοιόμορφη διάταξη ανά διεύθυνση – smeared distribution, δηλαδή χωρίς τα κενά των βροχίδων) για τα δοκίμια των Ομάδων A, B και C (Tex1), ενώ οι αντίστοιχες τιμές για το πλέγμα της Ομάδας D (Tex2) ήταν διπλάσιες. Σημειώνεται ότι στο πλέγμα των Ομάδων A, B και C οι ίνες ήταν σε “ξηρή” κατάσταση, δηλαδή μη εμποτισμένες, ενώ στο πλέγμα της ομάδας D οι ίνες ήταν εμποτισμένες με πολυμερές χαμηλής αντοχής. Η εγγυημένη εφελκυστική αντοχή των ινών σε κάθε μία από τις δύο κύριες διευθύνσεις ήταν 3350 N/mm<sup>2</sup> για το Tex1 και 3545 N/mm<sup>2</sup> για το Tex2. Στα δοκίμια της Ομάδας D (D\_RNz) που κατασκευάστηκαν μανδύες ινοπλισμένων πολυμερών χρησιμοποιήθηκαν υφάσματα ινών άνθρακα μιας διεύθυνσης με μάζα 300 g/m<sup>2</sup>, ονομαστικό πάχος 0.17 mm και εφελκυστική αντοχή 3790 N/mm<sup>2</sup>. Το μέτρο ελαστικότητας των ινών στα πλέγματα και στο ύφασμα ήταν περίπου 225-230 kN/mm<sup>2</sup>. Τα κονιάματα MI και MII είχαν ως βάση το τσιμέντο και περιείχαν πολυμερή σε ποσοστό έως 10% κ.β. επί του συνολικού βάρους της κονιάς σε ξηρή μορφή. Το κονίαμα MI είχε μέση αντοχή 28 ημερών 8.6 N/mm<sup>2</sup> σε θλίψη και 3.3 N/mm<sup>2</sup> σε

εφελκυσμό από κάμψη. Οι αντίστοιχες τιμές για το κονίαμα MII ήταν 30.6 N/mm<sup>2</sup> και 4.3 N/mm<sup>2</sup>.

Τέλος, το κονίαμα που χρησιμοποιήθηκε στους μανδύες της Ομάδας D (δοκίμια D\_M4Z και D\_M6Z) είχε μέση αντοχή 28 ημερών 22.1 N/mm<sup>2</sup> σε θλίψη και 6.8 N/mm<sup>2</sup> σε εφελκυσμό από κάμψη. Όλα τα δοκίμια υπεβλήθησαν σε μονοτονική θλιπτική καταπόνηση επιβαλλόμενης μετατόπισης με ταχύτητα 0.01 mm/s και 0.05 mm/s για τις Ομάδες A-C και D, αντιστοίχως, μέσω μηχανής θλίψης δυναμικότητας 4000 kN. Τα φορτία μετρούνταν μέσω της δυναμοκυψέλης και οι αξονικές παραμορφώσεις μέσω ηλεκτρομηκυσιομέτρων στις απέναντι πλευρές κάθε δοκιμίου.

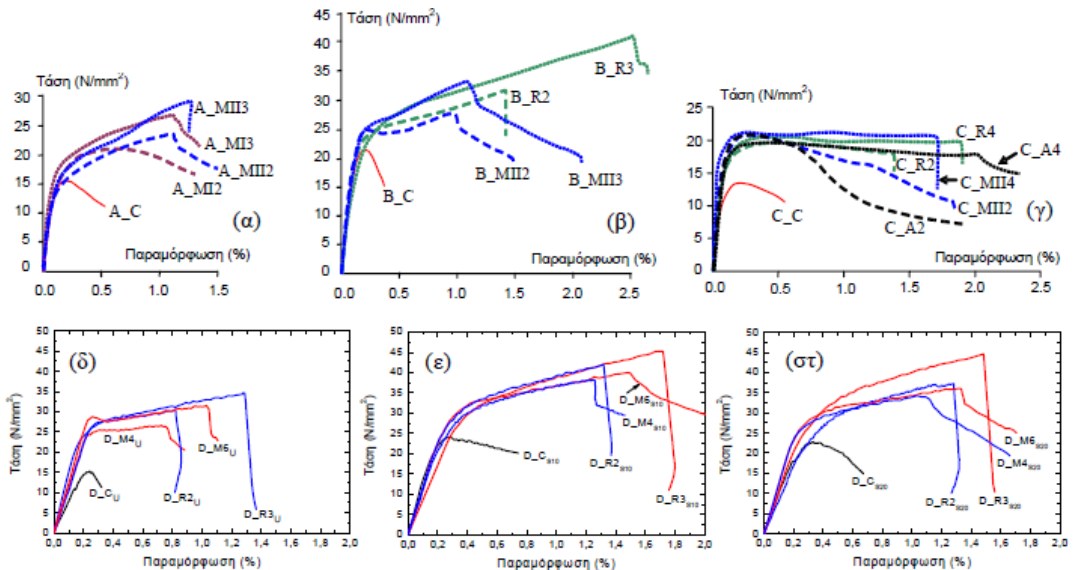
Ενδεικτικά αποτελέσματα σε μορφή καμπυλών τάσης – παραμόρφωσης δίνονται στο Σχήμα 3 και οι μέσες τιμές των αποτελεσμάτων για την αντοχή ( $f_{cc}$ ), την οριακή παραμόρφωση ( $\epsilon_{ccu}$ ) και τους λόγους αντοχής και οριακής παραμόρφωσης περισφιγμένου σκυροδέματος προς τις αντίστοιχες τιμές για το απερίσφιγκτο δίνονται στον Πίνακα 7.1. Τονίζεται ότι ανά ζεύγη (TRM και ΙΟΠ) τα δοκίμια ήταν ενισχυμένα με μανδύες ίσης δυστένειας, ώστε να είναι εύκολη η άμεση σύγκριση της αποτελεσματικότητας των μανδύων TRM (ανόργανης μήτρας) ως προς αυτήν των αντιστοιχών ΙΟΠ (πολυμερικής μήτρας). Για τις Ομάδες A-C τούτο επετεύχθη χρησιμοποιώντας το ίδιο πλέγμα ινών στους μανδύες TRM και ΙΟΠ, ενώ για την Ομάδα D οι μανδύες TRM αποτελούνταν από περισσότερες στρώσεις των αντιστοιχών ΙΟΠ, ώστε να διατηρείται σταθερό το γινόμενο του αριθμού των στρώσεων επί το πάχος κάθε στρώσης (οι ίνες ήταν ίδιες). Έτσι, τα εξής ζεύγη δοκιμίων είναι ισοδύναμα ως προς την δυστένεια των μανδύων: B\_R2 με B\_MII2, B\_R3 με B\_MII3, C\_R2 με C\_MII2, C\_R4 με C\_MII4, D\_R2Z με D\_M4Z, D\_R3Z με D\_M6Z.

**Πίνακας 7.1.** Αντοχή και οριακή παραμόρφωση δοκιμών θλίψης

Σήμανση δοκιμίων	Αντοχή $f_{cc}$ (N/mm <sup>2</sup> )	Οριακή παραμ/ση $\epsilon_{ccu}$ (%)	$\frac{f_{cc}}{f_{co}}$	$\frac{\epsilon_{ccu}}{\epsilon_{co}}$	Σήμανση δοκιμίων	Αντοχή $f_{cc}$ (N/mm <sup>2</sup> )	Οριακή παραμ/ση $\epsilon_{ccu}$ (%)	$\frac{f_{cc}}{f_{co}}$	$\frac{\epsilon_{ccu}}{\epsilon_{co}}$
<i>Ομάδα A</i>					<i>Ομάδα D</i>				
A_C	15.24	0.20	1.00	1.00	D_C <sub>U</sub>	15.28	0.24	1.00	1.00
A_MI2	20.77	0.96	1.36	4.80	D_R2 <sub>U</sub>	30.59	0.82	2.00	3.42
A_MI2	23.88	1.08	1.57	5.40	D_R3 <sub>U</sub>	34.71	1.28	2.27	5.33
A_MI3	26.50	1.13	1.74	5.65	D_M4 <sub>U</sub>	26.60	0.76	1.74	3.17
A_MI3	27.00	1.22	1.77	6.10	D_M6 <sub>U</sub>	31.55	1.06	2.07	4.42
<i>Ομάδα B</i>					<i>Ομάδα D</i>				
B_C	21.81	0.20	1.00	1.00	D_C <sub>S10</sub>	24.11	0.29	1.00	1.00
B_R2	33.47	1.67	1.53	8.35	D_R2 <sub>S10</sub>	41.97	1.32	1.74	4.55
B_MI2	27.36	0.98	1.25	4.90	D_R3 <sub>S10</sub>	45.23	1.72	1.88	5.93
B_R3	41.94	2.55	1.92	12.75	D_M4 <sub>S10</sub>	38.28	1.26	1.59	4.34
B_MI3	32.44	1.08	1.49	5.40	D_M6 <sub>S10</sub>	39.91	1.50	1.66	5.17
<i>Ομάδα C</i>					<i>Ομάδα D</i>				
C_C	14.25	0.20	1.00	1.00	D_C <sub>S20</sub>	22.89	0.33	1.00	1.00
C_R2	18.41	1.24	1.29	6.20	D_R2 <sub>S20</sub>	37.27	1.28	1.63	3.88
C_MI2	20.00	1.18	1.40	5.90	D_R3 <sub>S20</sub>	44.65	1.48	1.95	4.48
C_A2	19.86	0.79	1.39	3.95	D_M4 <sub>S20</sub>	34.24	1.12	1.50	3.39
C_R4	20.97	2.03	1.47	10.15	D_M6 <sub>S20</sub>	36.03	1.33	1.57	4.03
C_MI4	21.56	1.76	1.51	8.80					
C_A4	20.64	1.76	1.45	8.80					

\* Οι τιμές του Πίνακα είναι μέσες τιμές των αποτελεσμάτων τριών δοκιμών για τις Ομάδες A-B και δύο δοκιμών για την Ομάδα C. Τα δοκίμια της Ομάδας D ήταν ένα ανά κατηγορία.  $f_{co}$  και  $\epsilon_{co}$  είναι η αντοχή και η αντίστοιχη παραμόρφωση των δοκιμών αναφοράς. Η  $\epsilon_{co}$  για τα δοκίμια των Ομάδων A-C ελήφθη ίση με 0.2% (τιμή πολύ κοντά στην μετρηθείσα) ενώ για τα δοκίμια της Ομάδας D ελήφθη όπως ακριβώς μετρήθηκε. Η  $\epsilon_{ccu}$  ορίζεται στο σημείο της καμπύλης όπου είτε καταγράφεται σαφής πτώση του φορτίου (λόγω θραύσης τμήματος του μανδύα) είτε το φορτίο έχει μειωθεί κατά 20% σε σχέση με την μέγιστη τιμή του. Εξαιρέση αποτελούν τα δοκίμια αναφοράς, για τα οποία ελήφθη  $\epsilon_{ccu} = \epsilon_{co}$ .

**Σχήμα 7.3.** Τυπικές καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης για δοκίμια (α) Ομάδας A (κύλινδροι), (β) Ομάδας B (κύλινδροι), (γ) Ομάδας C (άοπλα πρίσματα) και (δ)-(στ) Ομάδας D (οπλισμένα πρίσματα).



Από τα παραπάνω πειραματικά αποτελέσματα συνάγονται τα εξής συμπεράσματα:

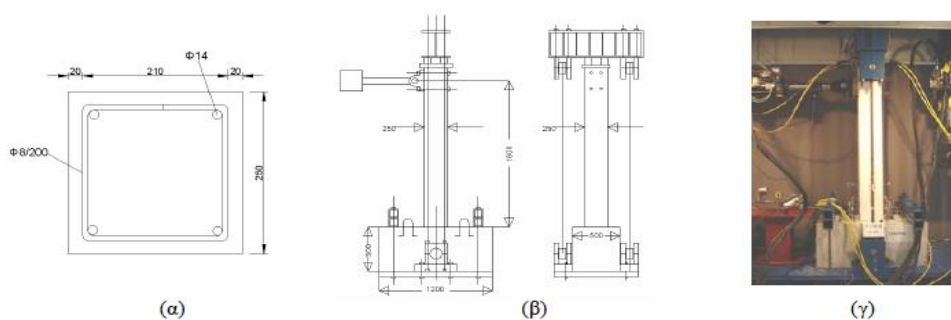
- ❖ Η αποτελεσματικότητα των μανδυών από ινοπλέγματα σε ανόργανη μήτρα (TRM) ως προς την αύξηση της αντοχής και της παραμορφωσιμότητας στοιχείων άοπλου ή οπλισμένου σκυροδέματος είναι γενικώς υψηλή και μόνον ελαφρώς μειωμένη ως προς την αντίστοιχη των μανδυών από ινοπλισμένα πολυμερή (ΙΟΠ). Η μείωση αυτή είναι εντονότερη στην περίπτωση περίσφιγξης άοπλων κυλινδρικών στοιχείων, αλλά εξαιρετικά περιορισμένη, της τάξης του 10%, στην περίπτωση οπλισμένων στοιχείων, όπου κύριος στόχος της περίσφιγξης είναι η καθυστέρηση του λυγισμού των διαμήκων ράβδων.
- ❖ Όπως και στην περίπτωση μανδυών ΙΟΠ, η αποτελεσματικότητα των μανδυών TRM αυξάνεται (μη αναλογικά) με τον αριθμό των στρώσεων.
- ❖ Η μορφή των καμπυλών τάσης-παραμόρφωσης σκυροδέματος περισφιγμένου με μανδύες TRM έχει την (γνώριμη) περίπτωση διγραμμική μορφή που παρατηρείται και στο σκυρόδεμα με μανδύες ΙΟΠ. Υπό την προϋπόθεση κατάλληλης επιλογής κονιάματος, οι μανδύες TRM εξαντλούν την εφελκυστική αντοχή τους, γεγονός που καταδεικνύει την πλήρη αξιοποίηση της υψηλής αντοχής των ινών.
- ❖ Η αστοχία των μανδυών TRM λόγω εγκάρσιας διόγκωσης του περισφιγμένου σκυροδέματος είναι γενικώς βαθμιαία και όχι τόσο ξαφνική (και ψαθυρή) όπως στην περίπτωση των μανδυών ΙΟΠ, γεγονός που οφείλεται στην σταδιακή θραύση δεσμών ινών. Η θραύση αυτή επεκτείνεται σχετικά αργά σε γειτονικές δέσμες, ως αποτέλεσμα της μειωμένης ανακατανομής της έντασης που παρέχει η ανόργανη μήτρα (κονίαμα) σε σχέση με την πολυμερική (εποξειδική ρητίνη). Έτσι, η συμπεριφορά σκυροδέματος περισφιγμένου με TRM είναι περισσότερο πλάσιμη σε σχέση με το αντίστοιχο περισφιγμένο με ΙΟΠ.
- ❖ Η αναλυτική προσομοίωση για την περίσφιγξη σκυροδέματος με TRM μπορεί να γίνει αξιοποιώντας υφιστάμενα προσομοιώματα περίσφιγξης με ΙΟΠ, στα οποία λαμβάνεται υπόψη η μειωμένη αποτελεσματικότητα των μανδυών TRM μέσω κατάλληλων μειωτικών συντελεστών (π.χ. Triantafillou et al. 2006).
- ❖ Η περίσφιγξη μέσω λωρίδων σε ελικοειδή διάταξη και αγκύρωση μόνο στα άκρα των δομικών στοιχείων αποτελεί ενδιαφέρουσα τεχνική ικανοποιητικής αποτελεσματικότητας.

## 7.2. Αύξηση πλαστιμότητας σε υποστυλώματα

Στη συνέχεια μελετάται η δυνατότητα χρήσης μανδύων TRM ως μέσου περίσφιξης στις κρίσιμες περιοχές (πόδας και κορυφή) υποστυλωμάτων μη σεισμικά σχεδιασμένων παλαιών κατασκευών και γίνεται σύγκριση με μανδύες ίσης δυστένειας από ινοπλισμένα πολυμερή (ΙΟΠ).

Παρουσιάζονται προκαταρκτικά πειραματικά αποτελέσματα δοκιμών ανακυκλιζόμενης φόρτισης επί τριών στοιχείων τύπου προβόλου (Σχήμα 4 β), αναπαριστώντας σε πλήρη κλίμακα υποστυλώματα με ύψος ίσο με το μισό του ύψους τυπικού ορόφου (1.60 m). Τα δοκίμια είχαν τετραγωνική διατομή 250×250 mm με διαμήκη οπλισμό από τέσσερις γωνιακές λείες ράβδους Φ14 και εγκάρσιο οπλισμό συνδετήρων Φ8 σε αποστάσεις 200 mm, με τα άγκιστρα κεκαμμένα κατά 90ο (Σχήμα 4α). Για την παρασκευή των δοκιμών χρησιμοποιήθηκε έτοιμο σκυρόδεμα C16/20 με θλιπτική αντοχή 28 ημερών ίση με 25 N/mm<sup>2</sup>. Ο διαμήκης οπλισμός των δοκιμών είχε τάση διαρροής 372 N/mm<sup>2</sup>, εφελκυστική αντοχή 433 N/mm<sup>2</sup> και παραμόρφωση θραύσης 17%, ενώ οι αντίστοιχες τιμές για τον εγκάρσιο οπλισμό ήταν 351 N/mm<sup>2</sup>, 444 N/mm<sup>2</sup> και 19.5%. Από τα τρία δοκίμια που περιγράφονται στην παρούσα εργασία ένα δοκιμάστηκε χωρίς ενίσχυση (δοκίμιο αναφοράς), ένα ενισχύθηκε στον πόδα με δύο στρώσεις μανδύα ινοπλισμένων πολυμερών (δοκίμιο R2) και ένα ενισχύθηκε στον πόδα με τέσσερις στρώσεις μανδύα ινοπλεγμάτων σε ανόργανη μήτρα (δοκίμιο M4). Ο μανδύας κάλυπτε τον πόδα των υποστυλωμάτων σε ύψος 430 mm. Τα υλικά των μανδύων ήταν ίδια με αυτά που χρησιμοποιήθηκαν στα δοκίμια της Ομάδας D που περιγράφεται στην προηγούμενη ενότητα. Σημειώνεται ότι οι δύο μανδύες (TRM και ΙΟΠ) αποτελούνταν από ίνες άνθρακα ίδιου τύπου και είχαν ίση δυστένεια.

**Σχήμα 7.4.** (α) Διατομή δοκιμίων, (β) διάταξη δοκιμών και (γ) φωτογραφία της πειραματικής διάταξης.



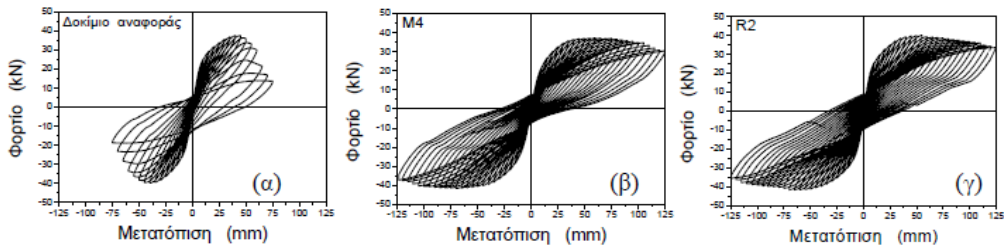
Τα δοκίμια φορτίστηκαν με οριζόντια δύναμη σε ύψος 1.60 m από τη βάση, μέσω σερβοϋδραυλικού εμβόλου MTS αγκυρωμένου στην κεφαλή του στοιχείου (Σχ. 4γ). Η ιστορία φόρτισης αποτελούνταν από επαναλαμβανόμενους κύκλους μετατοπίσεων

αυξανομένου εύρους (κατά 5 mm) μέχρι είτε την αστοχία του δοκιμίου (δοκίμιο αναφοράς) είτε την επιβολή μεγάλης μετατόπισης (125 mm σε κάθε διεύθυνση) έως εξαντλήσεως της δυναμικότητας του εμβόλου (δοκίμια με μανδύες). Η ταχύτητα φόρτισης μεταβάλλονταν από 0.2 mm/s στους πρώτους κύκλους έως 1.1 mm/s στους τελευταίους. Τα δοκίμια φορτίζονταν ταυτόχρονα κατά τη διεύθυνση του άξονά τους με σταθερό αξονικό φορτίο 460 kN, το οποίο αντιστοιχεί στο 30% περίπου της θλιπτικής αντοχής των υποστυλωμάτων υπό κεντρική θλίψη.

Το φορτίο ασκούνταν στην κεφαλή κάθε δοκιμίου μέσω τεσσάρων (συμμετρικά τοποθετημένων ως προς τον άξονα του δοκιμίου) εμβόλων, σύμφωνα με την διάταξη του Σχήματος 7.4β, η οποία εξασφαλίζει την συνεχή εφαρμογή του αξονικού φορτίου κατά την αξονική διεύθυνση του στοιχείου. Κατά την διάρκεια των δοκιμών καταγράφονταν η δύναμη και η μετατόπιση του εμβόλου, η πραγματική τιμή του αξονικού φορτίου (μέσω μηκυνσιομέτρων στις δύο προεντεταμμένες ράβδους επιβολής του αξονικού φορτίου) καθώς και η στροφή και η κατακόρυφη (αξονική) μετατόπιση τριών διατομών, 130 mm, 260 mm και 450 mm πάνω από τη βάση των στοιχείων. Τα αποτελέσματα των δοκιμών δίνονται στο Σχήμα 7.5. Κύριο χαρακτηριστικό της απόκρισης του δοκιμίου αναφοράς (Σχ. 7.5α) ήταν η διαρροή σε κάμψη, η οποία όμως ακολουθήθηκε από λυγισμό των διαμήκων ράβδων, λόγω του μεγάλου αστήρικτου μήκους από τους αραιά τοποθετημένους συνδετήρες, και αποδιοργάνωση του σκυροδέματος πάνω από την βάση. Το δοκίμιο αυτό εμφάνισε σημαντική πτώση της αντοχής σε μετακίνηση περίπου ίση με 50 mm. Η απόκριση των ενισχυμένων υποστυλωμάτων (Σχ. 7.5β,γ) βελτιώθηκε σημαντικά λόγω της περισφιγξης από τους μανδύες. Η αντοχή καθορίστηκε και πάλι από καμπτική διαρροή στη διατομή της βάσης στο ίδιο περίπου φορτίο, ωστόσο ο επακόλουθος λυγισμός των διαμήκων ράβδων ήταν σχετικά ελεγχόμενος, λόγω της περισφιγξης μέσω των μανδύων. Έτσι κατέστη δυνατή η ανάπτυξη μεγάλης οριζόντιας μετατόπισης, η οποία συνοδεύτηκε από μικρή (μανδύας ΙΟΠ) έως οριακή (μανδύας TRM) πτώση του φορτίου.

Σημειώνεται πάντως ότι σημαντικό ποσοστό της οριζόντιας μετατόπισης οφείλονταν στην ολίσθηση των διαμήκων ράβδων, λόγω των πτωχών συνθηκών συνάφειας με το περιβάλλον σκυρόδεμα. Συμπερασματικά, η αποτελεσματικότητα του μανδύα ινοπλεγμάτων σε ανόργανη μήτρα ως προς την καθυστέρηση των δυσμενών συνεπειών του λυγισμού των ράβδων ήταν τουλάχιστον ίση, αν όχι μεγαλύτερη, από αυτήν του μανδύα ινοπλισμένων πολυμερών ίσης δυστένειας.

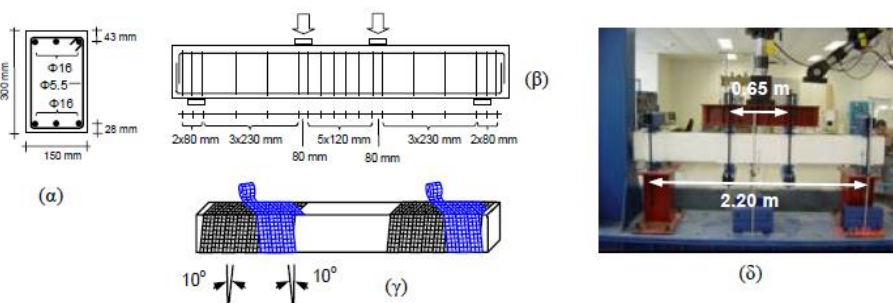
**Σχήμα 7.5.** Διαγράμματα δύναμης – μετατόπισης: (α) δοκίμιο αναφοράς, (β) δοκίμιο με μανδύα TRM, (γ) δοκίμιο με μανδύα ΙΟΠ (ίσης δυστένειας).



### 7.3. Ενίσχυση έναντι τέμνουσας

Σε αυτό το υποκεφάλαιο μελετάται η χρήση μανδυών TRM ως μέσου ενίσχυσης κρίσιμων έναντι τέμνουσας περιοχών σε στοιχεία οπλισμένου σκυροδέματος. Η διερεύνηση έγινε μέσω δοκιμών μονοτονικής και ανακυκλιζόμενης κάμψης τεσσάρων σημείων επί έξι αμφιερείστων στοιχείων ορθογωνικής διατομής 150×300 mm και συνολικού μήκους 2.60 m. Το θεωρητικό άνοιγμα μεταξύ των στηρίξεων ήταν 2.20 m και η απόσταση μεταξύ των δύο συγκεντρωμένων φορτίων ήταν 0.65 m, δημιουργώντας έτσι μήκη διάτμησης 0.775 m. Τα δοκίμια ήταν σκοπίμως υπερδιαστασιοποιημένα έναντι κάμψης και υποδιαστασιοποιημένα (στα μήκη διάτμησης) έναντι τέμνουσας, ώστε η αστοχία πριν την ενίσχυση να οφείλεται σε διάτμηση. Είχαν διαμήκη οπλισμό από έξι ράβδους S500 διαμέτρου Φ14 (τρεις ανά πέλμα) και εγκάρσιο οπλισμό συνδετήρων S220 διαμέτρου Φ5.5 σε αποστάσεις 230 mm εντός του μήκους διάτμησης (Σχ. 7.6α,β). Για την κατασκευή των δοκιμών χρησιμοποιήθηκε σκυρόδεμα με θλιπτική αντοχή 28 ημερών ίση με 30.5 N/mm<sup>2</sup>. Η τάση διαρροής του διαμήκους οπλισμού ήταν 575 N/mm<sup>2</sup> και του εγκάρσιου 275 N/mm<sup>2</sup>.

**Σχήμα 7.6.** (α)-(β) Γεωμετρία δοκιμών, (γ) ελικοειδής διάταξη λωρίδων μανδύα ενίσχυσης στο μήκος διάτμησης, (δ) φωτογραφία της πειραματικής διάταξης.





Κύριοι στόχοι του πειραματικού προγράμματος ήταν να μελετηθούν: (α) Η αποτελεσματικότητα μανδύα TRM συγκριτικά με αυτήν του μανδύα ΙΟΠ ως προς την ενίσχυση οπλισμένου σκυροδέματος έναντι τέμνουσας. (β) Ο ρόλος του αριθμού των στρώσεων μανδύων TRM στην ενίσχυση έναντι τέμνουσας. (γ) Η αποτελεσματικότητα μανδύα ο οποίος κατασκευάζεται με λωρίδες σε ελικοειδή διάταξη (Σχ. 7.6γ) συγκριτικά με τον “συμβατικό” μανδύα του μονού υφάσματος.

Ως “συμβατικός” μανδύας μονού υφάσματος ορίζεται αυτός ο οποίος κατασκευάζεται με ύφασμα ινών πλάτους ίσου με το μήκος διάτμησης και εφαρμόζεται μέσω περιτύλιξης του υφάσματος τόσες φορές ώστε να επιτευχθεί ο επιθυμητός αριθμός στρώσεων. Αντιθέτως, στον μανδύα με ελικοειδώς τοποθετημένες λωρίδες, κάθε στρώση ενίσχυσης κατασκευάζεται με μία λωρίδα υφάσματος σχετικά μικρού πλάτους (150 mm στην παρούσα εργασία), η οποία ξεκινά από το ένα άκρο του μήκους διάτμησης και τερματίζει στο άλλο άκρο, ενώ κάθε επόμενη λωρίδα έχει αντίθετη φορά περιτύλιξης από την προηγούμενη.

Η περιτύλιξη στην περίπτωση αυτή προϋποθέτει την εφαρμογή κάθε λωρίδας υπό γωνία ως προς την κάθετο στον άξονα του στοιχείου, που στην παρούσα εργασία ήταν ίση με 10ο. Από τα έξι δοκίμια που παρουσιάζονται στην παρούσα εργασία τα τέσσερα δοκιμάστηκαν σε μονοτονική φόρτιση και τα υπόλοιπα δύο σε ανακυκλιζόμενη. Εκ των τεσσάρων πρώτων, ένα ήταν δοκίμιο αναφοράς (C), δηλαδή χωρίς ενίσχυση, ένα ενισχύθηκε με δύο στρώσεις ινοπλέγματος σε ανόργανη μήτρα (TRM) με τρόπο συμβατικό (Δοκίμιο M2), ένα ενισχύθηκε με δύο στρώσεις του ίδιου ινοπλέγματος σε πολυμερική (εποξειδική) μήτρα (Δοκίμιο R2) και ένα ενισχύθηκε με δύο στρώσεις TRM οι οποίες κατασκευάστηκαν με δύο λωρίδες σε ελικοειδή διάταξη (Δοκίμιο M2-s, Σχ. 7.6γ).

Επειδή, όπως περιγράφεται παρακάτω, όλοι οι προαναφερθέντες τύποι μανδύα μετέτρεψαν τον μηχανισμό αστοχίας από ψαθυρό - διατμητικού τύπου σε πλάστιμο – καμπτικού τύπου, τα επόμενα δύο δοκίμια ενισχύθηκαν με μία μόνο στρώση μανδύα, ώστε να καταστεί εφικτή η αστοχία των ενισχυμένων δοκιμίων και πάλι λόγω διάτμησης και με τον τρόπο αυτό να ποσοτικοποιηθεί η συμβολή του μανδύα στην ανάληψη τέμνουσας.

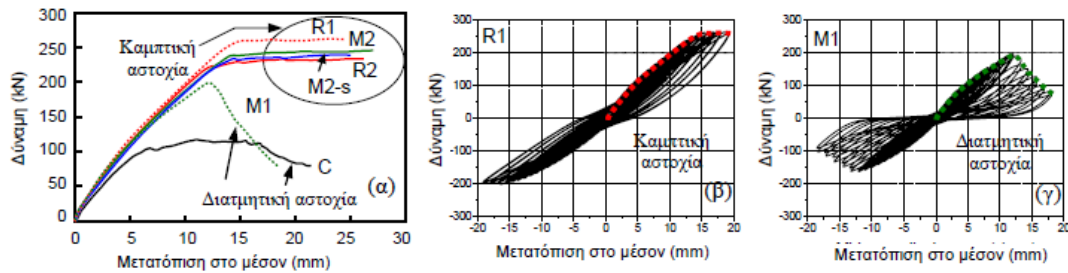
Στο ένα εκ των δύο αυτών δοκιμίων ο μανδύας ήταν τύπου ινοπλέγματος σε ανόργανη μήτρα (Δοκίμιο M1) και στο άλλο (ιδίου ινοπλέγματος) σε εποξειδική μήτρα (Δοκίμιο R1). Τα υλικά των μανδύων ήταν ίδια με αυτά που χρησιμοποιήθηκαν στις Ομάδες Β και C του πειραματικού προγράμματος περίσφιγξης (Tex1, δηλαδή ανθρακοπλέγματα ονομαστικού πάχους 0.047 mm, κόνιαμα MII για τους μανδύες των M2, M2-s, M1, εποξειδική ρητίνη για τους μανδύες των R2 και R1).

Επίσης σημειώνεται ότι στα δοκίμια TRM ή ΙΟΠ με τον ίδιο αριθμό στρώσεων (M2 και R2, M1 και R1) οι μανδύες είχαν ίση δυστένεια. Η φόρτιση των Δοκιμίων C, M2, M2-s και R2 επεβλήθη μέσω μονοτονικής επιβαλλόμενης μετατόπισης σερβοϋδραυλικού εμβόλου MTS στις θέσεις εφαρμογής των συγκεντρωμένων φορτίων με ταχύτητα 0.01 mm/s. Η ιστορία φόρτισης για τα δοκίμια M1 και R1 αποτελούνταν από επαναλαμβανόμενους κύκλους μετατοπίσεων αυξανόμενου εύρους (κατά 1 mm) με ταχύτητα 0.2 mm/s μέχρι είτε την αστοχία του δοκιμίου (για το δοκίμιο M1, το οποίο αστόχησε διατμητικά) είτε την σαφή ένδειξη διαρροής (για το δοκίμιο R1, το οποίο αστόχησε καμπηκικά). Κατά την διάρκεια των δοκιμών καταγράφονταν η δύναμη και η μετατόπιση του εμβόλου καθώς και η μετατόπιση στον μέσον του ανοίγματος (μέσω ηλεκτρικών μηχανομετρών).

Το δοκίμιο αναφοράς (C) αστόχησε διατμητικά μέσω της ανάπτυξης διαγώνιας ρωγμής σημαντικού εύρους στο μήκος διάτμησης σε τιμή του (συνολικού) φορτίου ίση με 116.5 kN. Η απόκριση των υπολοίπων τριών δοκιμίων (M2, M2-s, R2) που δοκιμάστηκαν μονοτονικά ήταν χαρακτηριστική καμπηκικής αστοχίας λόγω διαρροής του διαμήκους οπλισμού, καταδεικνύοντας έτσι ότι και οι τρεις διατάξεις μανδύα δύο στρώσεων, ανεξαρτήτως τύπου μητρικού υλικού (ανόργανο κονίαμα ή ρητίνη) και τρόπου εφαρμογής (“συμβατικός” μανδύας δύο στρώσεων ή μανδύας με δύο λωρίδες σε ελικοειδή διάταξη) ήταν επαρκείς ώστε να αλλάξουν τον μηχανισμό αστοχίας από ψαθυρό – διατμητικού τύπου σε πλάστιμο – καμπηκικού τύπου, μέσω της ανάληψης δύναμης από τις ίνες, κατ’ αναλογία προς τους εσωτερικούς συνδετήρες.

Η μέγιστες τιμές φορτίου για τα δοκίμια M2, M2-s και R2 ήταν 243.8 kN, 237.7 kN και 233.4 kN, αντιστοίχως. Έτσι συμπεραίνεται ότι κάθε μανδύας, ονομαστικού πάχους πλέγματος μόλις 0.09 mm παρέλαβε τέμνουσα δύναμη με μέγεθος που έχει ως κάτω όριο περίπου ίσο με 60 kN ( $233.4/2 - 116.5/2$ ). Τα αποτελέσματα των μονοτονικών δοκιμών σε μορφή καμπυλών συνολικής δύναμης – μετατόπισης στο μέσον του ανοίγματος δίνονται στο Σχήμα 7α (συνεχείς καμπύλες).

**Σχήμα 7.7.** Διαγράμματα δύναμης – μετατόπισης: (α) Καμπύλες μονοτονικών δοκιμών (συνεχείς γραμμές) και περιβάλλουσες ανακυκλιζόμενων δοκιμών (διακεκομμένες). (β) Απόκριση δοκιμίου με μανδύα ΙΟΠ (μια στρώση). (γ) Απόκριση δοκιμίου με μανδύα TRM (μια στρώση).

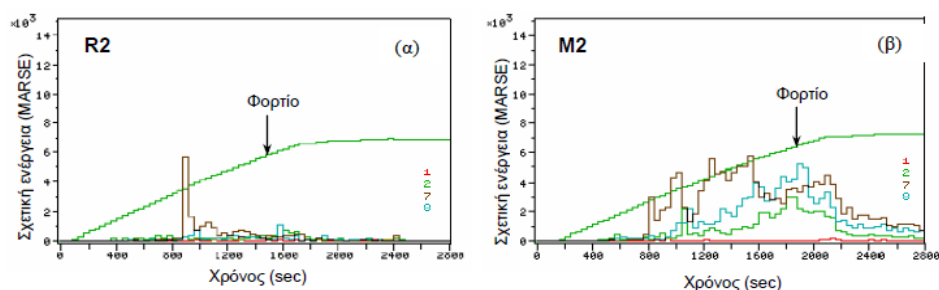


Εκ των δύο δοκιμών που καταπονήθηκαν σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση το R1 (ενισχυμένο με μία στρώση μανδύα ΙΟΠ) υπέστη καμπτικού τύπου αστοχία η οποία εκδηλώθηκε με έντονες κατακόρυφες ρωγμές στην περιοχή μέγιστης ροπής. Το φορτίο στις δύο διευθύνσεις σταθεροποιήθηκε στις τιμές 261.9 kN (ώθηση) και 201.4 kN (έλξη), όπως δίνεται στο Σχήμα 7.7β. Εκτιμάται ότι η ασυμμετρία των βρόχων υστέρησης και η διαφορετική τιμή του φορτίου διαρροής ανά διεύθυνση οφείλονταν στις διαφορετικές τιμές του στατικού ύψους για τις ράβδους άνω και κάτω πέλματος, λόγω των διαφορετικών (εκ λάθους) επικαλύψεων (Σχ. 7.7α). Το δεύτερο δοκίμιο (M1, ενισχυμένο με μία στρώση μανδύα TRM) αστόχησε διατμητικά και ανέπτυξε έντονες λοξές (χιαστί) ρωγμές στο μήκος διάτμησης, οι οποίες μάλιστα ήταν εμφανείς στις εξωτερικές επιφάνειες του μανδύα. Το μέγιστο φορτίο στις δύο διευθύνσεις ήταν 200.1 kN (έλξη) και 162 kN (ώθηση). Χαρακτηριστικό της απόκρισης του δοκιμίου M1, σε αντίθεση με το R1, ήταν η έντονη πτώση του φορτίου μετά την μέγιστη τιμή (Σχ. 7.7.γ). Επίσης, η θραύση του μανδύα (λόγω λοξής ρηγμάτωσης) έγινε σταδιακά: αρχικά ξεκίνησε από μια μικρή ομάδα δεσμών ινών και βαθμιαία επεκτάθηκε προς τις γειτονικές ίνες με τρόπο σχετικά ελεγχόμενο, γεγονός που δεν χαρακτηρίζει μανδύες ΙΟΠ, η θραύση των οποίων (όταν συμβαίνει) είναι συνήθως εκρηκτική. Συγκρίνοντας την απόκριση του δοκιμίου M1 με αυτήν του δοκιμίου αναφοράς εκτιμάται ότι η μία στρώση μανδύα πάχους μόλις 0.047 mm παρέλαβε τέμνουσα δύναμη περίπου ίση με 42 kN  $(200.1/2 - 116.5/2)$ . Με βάση την τιμή αυτή και από απλά προσομοιώματα για την συμβολή των συνθέτων υλικών στην ανάληψη τέμνουσας (π.χ. Τριανταφύλλου 2004) κατάλληλα τροποποιημένα ώστε να ληφθεί υπόψη η ύπαρξη ινών σε διαφορετικές διευθύνσεις (Paranicolaou & Triantafillou 2006) υπολογίζεται ότι η ενεργός παραμόρφωση του μανδύα κατά την διατμητική αστοχία του δοκιμίου M1 ήταν περίπου ίση με 0.8%, τιμή η οποία είναι αρκετά υψηλή. Βεβαίως αν συγκριθεί η απόκριση του δοκιμίου M1 με αυτήν του R1 συνάγεται ότι η αποτελεσματικότητα του μανδύα TRM ήταν μειωμένη σε σχέση με αυτήν του μανδύα ΙΟΠ: ο τελευταίος ανέπτυξε μεγαλύτερη ενεργό παραμόρφωση, κατ' ελάχιστον ίση με  $0.008 * [(261.9/2 - 116.5/2)/(200.1/2 - 116.5/2)] = 1.4\%$  και με άνω όριο την οριακή παραμόρφωση των

ινών, περίπου ίση με 1.6-1.7%. Στο σημείο αυτό αξίζει να αναφερθεί ότι σε ορισμένες εκ των δοκιμών (αυτές της μονοτονικής φόρτισης) έγινε εκτεταμένη χρήση αισθητήρων ακουστικής εκπομπής (14 αισθητήρες ανά δοκίμιο, έξι σε κάθε όψη και από ένας σε κάθε άκρο) με σκοπό την παρακολούθηση της εξέλιξης της βλάβης κατά την διάρκεια της φόρτισης.

Οι λεπτομέρειες για την λήψη, καταγραφή και επεξεργασία των σημάτων ξεφεύγουν από τα πλαίσια της παρούσας εργασίας, αλλά εν περιλήψει μπορεί να αναφερθεί ότι η ενέργεια που “απελευθερώνεται” λόγω ρηγμάτωσης (ποσοτικοποιείται αθροίζοντας εντάσεις ακουστικών σημάτων στους αισθητήρες) στα δοκίμια με μανδύες TRM είναι σημαντικά μεγαλύτερη από αυτήν στα αντίστοιχα με μανδύες ΙΟΠ (Σχ. 7.8 για M2 σε σύγκριση με R2). Πιθανό συμπέρασμα της παραπάνω παρατήρησης είναι ότι ο έλεγχος ρηγμάτωσης με μανδύες TRM είναι λιγότερο αποτελεσματικός σε σύγκριση με μανδύες ΙΟΠ, γεγονός που αποδίδεται στην μειωμένη ικανότητα των κονιαμάτων, σε σύγκριση με τις ρητίνες, για ανακατανομή της έντασης μεταξύ των ινών, αλλά και στο γεγονός ότι τα κονιάματα υφίστανται και αυτά ρηγματώσεις κατά τη διάρκεια της φόρτισης.

**Σχήμα 7.8.** Διαγράμματα ενέργειας – χρόνου, όπως αυτά καταγράφονται για τέσσερις αισθητήρες ακουστικής εκπομπής που καλύπτουν την μια όψη ενός εκ των δύο μηκών διάτμησης για (α) το Δοκίμιο R2, (β) το Δοκίμιο M2.



Κύριο συμπέρασμα είναι ότι, με βάση τα σχετικά περιορισμένα πειραματικά αποτελέσματα που παρουσιάζονται στην παρούσα εργασία, οι μανδύες ινοπλεγμάτων σε ανόργανη μήτρα αποτελούν εξαιρετικά ενδιαφέροντα πρόταση διατμητικής ενίσχυσης στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος, με αποτελεσματικότητα ενδεχομένως μικρότερη σε σχέση με τους μανδύες ινοπλισμένων πολυμερών, κάτι όμως που μπορεί να αντισταθμιστεί εύκολα μέσω της κατάλληλης επιλογής του αριθμού των στρώσεων.

#### 7.4. Ενίσχυση έναντι κάμψης

Παρακάτω μελετάται η χρήση μανδουλών TRM ως μέσου ενίσχυσης στοιχείων τύπου δοκού έναντι κάμψης. Η διερεύνηση έγινε μέσω δοκιμών μονοτονικής κάμψης τεσσάρων σημείων επί τριών αμφιερείστων δοκών ορθογωνικής διατομής 150×250 mm και συνολικού μήκους 2.30 m. Το θεωρητικό άνοιγμα μεταξύ των στηρίξεων ήταν 2.0 m και η απόσταση μεταξύ των δύο συγκεντρωμένων φορτίων ήταν 0.50 m. Τα δοκίμια ήταν σκοπίμως υπερδιαστασιολογημένα έναντι τέμνουσας και υποδιαστασιολογημένα έναντι κάμψης, ώστε η αστοχία πριν την ενίσχυση να είναι καμπτικού τύπου.

Είχαν διαμήκη οπλισμό από τέσσερις ράβδους S500 διαμέτρου Φ12 (δύο ανά πέλμα) και εγκάρσιο οπλισμό πυκνών συνδετήρων S500 διαμέτρου Φ8 σε αποστάσεις 100 mm. Για την κατασκευή των δοκιμών χρησιμοποιήθηκε αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα, το οποίο παρασκευάστηκε στα πλαίσια ενός παράλληλου ερευνητικού προγράμματος, με θλιπτική αντοχή 28 ημερών ίση με 34.5 N/mm<sup>2</sup>. Η τάση διαρροής του οπλισμού ήταν 530 N/mm<sup>2</sup>. Από τα τρία δοκίμια που περιγράφονται στην παρούσα εργασία ένα δοκιμάστηκε χωρίς ενίσχυση (δοκίμιο αναφοράς C\_fl), ένα ενισχύθηκε στο εφελκούμενο πέλμα με τέσσερις στρώσεις ινοπλεγμάτων σε ανόργανη μήτρα (δοκίμιο M4\_fl) και ένα ενισχύθηκε με τον ίδιο τρόπο, κάνοντας όμως χρήση εποξειδικής ρητίνης αντί κονιάματος (δοκίμιο R4\_fl). Ο οπλισμός ενίσχυσης είχε πλάτος 190 mm και επικολλήθηκε σε μήκος 1.90 m, δηλαδή σε όλο σχεδόν το μήκος του εφελκούμενου πέλματος. Τα υλικά ενίσχυσης ήταν ίδια με αυτά που χρησιμοποιήθηκαν στις Ομάδες Β και C του πειραματικού προγράμματος περίσφιγξης (Tex1, δηλαδή ανθρακοπλέγματα ονομαστικού πάχους 0.047 mm, κονίαμα MII για το Δοκίμιο M4\_fl, εποξειδική ρητίνη για το Δοκίμιο R4\_fl).

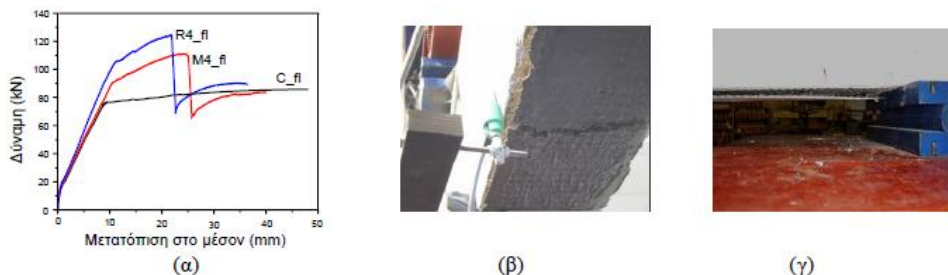
Επίσης σημειώνεται ότι και στα δύο ενισχυμένα δοκίμια οι οπλισμοί ενίσχυσης είχαν (περίπου) ίση δυστένεια. Η φόρτιση των δοκών επεβλήθη μέσω μονοτονικής επιβαλλόμενης μετατόπισης σερβουδραυλικού εμβόλου MTS στις θέσεις εφαρμογής των συγκεντρωμένων φορτίων με ταχύτητα 0.01 mm/s. Κατά την διάρκεια των δοκιμών καταγράφονταν η δύναμη και η μετατόπιση του εμβόλου καθώς και η μετατόπιση στον μέσον του ανοίγματος (μέσω ηλεκτρικών μηχανομετρών).

Τα αποτελέσματα των δοκιμών σε μορφή καμπυλών συνολικής δύναμης – μετατόπισης στο μέσον του ανοίγματος δίνονται στο Σχήμα 7.9α. Όπως φαίνεται στο σχήμα αυτό, η απόκριση του δοκιμίου αναφοράς (C\_fl) ήταν η χαρακτηριστική διγραμμική με σχεδόν οριζόντιο δεύτερο κλάδο, χαρακτηριστική υπο-οπλισμένης δοκού. Περίπου διγραμμική ήταν και η απόκριση των ενισχυμένων δοκιμίων, με αλλαγή κλίσης στο φορτίο που αντιστοιχεί στην διαρροή των εσωτερικών οπλισμών και μέγιστο φορτίο που καθορίστηκε από την αστοχία του εξωτερικού οπλισμού

ενίσχυσης. Πιό συγκεκριμένα, για το Δοκίμιο R4\_fl η αστοχία επήλθε μέσω εφελκυστικής θραύσης των ινών περίπου στο μέσον του ανοίγματος (Σχ. 7.9β), ενώ το Δοκίμιο M4\_fl αστόχησε λόγω αποκόλλησης του οπλισμού ενίσχυσης στο ένα άκρο (Σχ. 7.9γ). Ενδιαφέρον παρουσιάζει ότι η αποκόλληση αυτή έγινε δια μέσου του κονιάματος στην διεπιφάνεια μεταξύ δύο στρώσεων ινοπλεγμάτων (“διαστρωματική απόσχιση” – interlaminar shearing) και όχι ως συνήθως (στην περίπτωση οπλισμών ενίσχυσης ΙΟΠ), δηλαδή δια μέσου του σκυροδέματος κοντά στην διεπιφάνεια σκυροδέματος – οπλισμών ενίσχυσης.

Το γεγονός αυτό οφείλεται στην σχετικά χαμηλή διατμητική αντοχή του κονιάματος (μεταξύ των ινοπλεγμάτων), η οποία ήταν συγκρίσιμη με αυτήν του σκυροδέματος των δοκών. Ενδεχομένως, αν το κονίαμα του οπλισμού ενίσχυσης TRM ήταν υψηλότερης αντοχής (αλλά και δυσθραυστότητας – fracture toughness), ο τύπος αστοχίας του οπλισμού ενίσχυσης TRM να ήταν ίδιος με αυτόν του οπλισμού ΙΟΠ. Άλλα χαρακτηριστικά της απόκρισης του Δοκιμίου M4\_fl συγκριτικά με το Δοκίμιο R4\_fl είναι η μικρότερη τιμή φορτίου διαρροής, η μικρότερη δυσκαμψία μετά την διαρροή (κλίση του δεύτερου κλάδου της απόκρισης) αλλά και η μεγαλύτερη παραμορφωσιμότητα κατά την αστοχία.

Τα χαρακτηριστικά αυτά αποδίδονται στην μειωμένη δυσμησία (shear stiffness) του οπλισμού TRM σχετικά με τον οπλισμό ΙΟΠ, με αποτέλεσμα την ελαφρά μειωμένη διατμητική συνεργασία μεταξύ εξωτερικών οπλισμών και σκυροδέματος.



**Σχήμα 7.9.** (α) Διαγράμματα δύναμης – μετατόπισης. (β) Αστοχία οπλισμού ενίσχυσης στο Δοκίμιο R4\_fl λόγω εφελκυστικής θραύσης των ινών. (γ) Αστοχία λόγω αποκόλλησης του οπλισμού ενίσχυσης στο Δοκίμιο M4.

Παρόλη την ικανοποιητική συμπεριφορά των οπλισμών ενίσχυσης ινοπλεγμάτων σε ανόργανη μήτρα συγκριτικά με τους οπλισμούς σε πολυμερική μήτρα, άποψη των συγγραφέων είναι ότι η τεχνική αυτή θα πρέπει να διερευνηθεί περαιτέρω για την καμπτική ενίσχυση στοιχείων τύπου πλάκας (και όχι δοκού), ώστε να γίνεται πλήρης αξιοποίηση των ινών και στις δύο διευθύνσεις των πλεγμάτων.

## Συμπεράσματα

Παραπάνω, αναπτύσσεται μια νέα τεχνική ενίσχυσης δομικών στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος. Η τεχνική βασίζεται στη χρήση συνθέτων υλικών τα οποία αποτελούνται από ινοπλέγματα ινών σε ανόργανη μήτρα (π.χ. κονίαμα με βάση το τσιμέντο), αποσκοπώντας στην επίλυση προβλημάτων που χαρακτηρίζουν τα ινοπλισμένα πολυμερή (ΙΟΠ) σχετικά με την χρήση εποξειδικών ρητινών. Τα ινοπλέγματα ινών σε ανόργανη μήτρα (textile-reinforced mortars – TRM) δοκιμάζονται στη μορφή μανδύα για την ενίσχυση οπλισμένου σκυροδέματος με στόχο την περισφιγξη, την αύξηση της πλαστιμότητας υποστυλωμάτων, την ενίσχυση έναντι τέμνουσας και την ενίσχυση δοκών έναντι κάμψης. Βάσει πειραματικών αποτελεσμάτων καταδεικνύεται ότι η αποτελεσματικότητα των μανδύων TRM είναι υψηλή και γενικώς παρόμοια με αυτήν των μανδύων ΙΟΠ (σε κάποιες περιπτώσεις είναι ελάχιστα μειωμένη ως προς την αντίστοιχη των ΙΟΠ). Αναμένεται ότι, όπως η τεχνική των ΙΟΠ, έτσι και η τεχνική των TRM, στο εγγύς μέλλον θα αποτελεί μια ενδιαφέρουσα πρόταση για την αναβάθμιση των κατασκευών.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- 1) **ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ ΣΠΥΡΑΚΟΣ**, “Ενίσχυση κατασκευών για σεισμικά φορτία”, Β’ έκδοση τεχνικό επιμελητήριο Ελλάδας, Αθήνα 2004.
- 2) **Δρος ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΥ ΒΥΡ. ΔΗΜΑΚΟΥ**, “Σημειώσεις για το μάθημα τεχνολογίας σκυροδέματος”, Αθήνα 1993
- 3) **Ε. ΦΡΑΓΚΟΠΟΥΛΟΣ**, μεταπτυχιακή εργασία “Ολοκληρωμένες και υπό κατασκευή σήραγγες στην Ελλάδα” / Ε.Ε.Σ.Υ.Ε. (Ελληνική Επιτροπή Σηράγγων και Υπογείων Έργων), 2001
- 4) **Υπουργείο Περιβάλλοντος Χωροταξίας και Δημοσίων Έργων**, Οργανισμός Αντισεισμικού Σχεδιασμού και Προστασίας (Ο.Α.Σ.Π.), “Συστάσεις για προσεισμικές και μετασεισμικές επεμβάσεις σε κτίρια”, Αθήνα 2001.
- 5) **ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ Χ. ΤΡΙΑΝΤΑΦΥΛΛΟΥ**, “Ενισχύσεις κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος με σύνθετα υλικά”, Α’ έκδοση, Πάτρα 2003.
- 6) **Οργανισμός Αντισεισμικού Σχεδιασμού και Προστασίας**, “Κανονισμός Επεμβάσεων”, Αθήνα 2004.
- 7) **Newman, A.** “Structural Renovation of Buildings : Methods, Details, and Design Examples”, McGraw-Hill, New York 2001
- 8) **Οργανισμός Αντισεισμικού Σχεδιασμού και Προστασίας**, “Ελληνικός Αντισεισμικός Κανονισμός”, Αθήνα 2000
- 9) **Federal Emergency Management Agency**, “Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings”, Whashington D.C., 2000
- 10) **Penelis G. & Kappos A.** “Earthquake Resistant Concrete Structures”, 1997
- 11) **American Technology Council**, “Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings”, November 1996
- 12) **Αντωνόπουλος Κ.** “Ενίσχυση Κόμβων Οπλισμένου Σκυροδέματος με Σύνθετα Υλικά”, Διδακτορική Διατριβή, Πάτρα 2001
- 13) **Antonopoulos C.P. and Triantafillou T.C.** “Analysis of FRP-Strengthened RC Beam – Column joints”, 2002
- 14) **Triantafillou T.C. and Plevris N.** “Strengthening of RC Beams with epoxy-bonded fibre – composite materials”, 1992