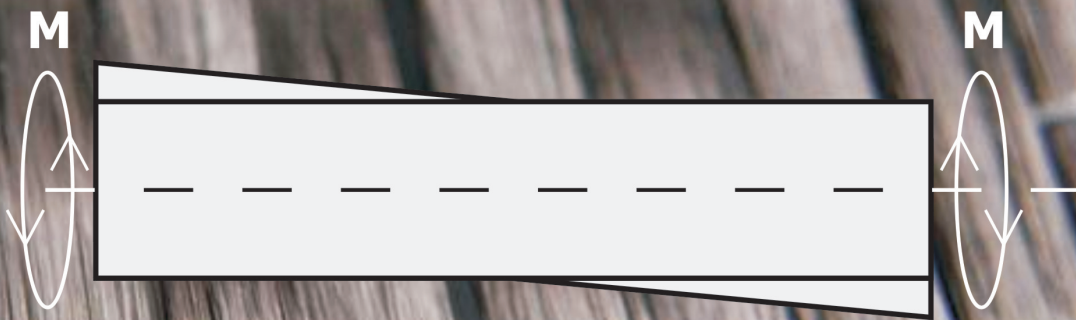


ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΠΕΙΡΑΙΑ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΔΟΜΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

Πειραματική διερεύνηση αντοχής ελαφρά οπλισμένων πλακοδοκών σκυροδέματος σε στρέψη με ή χωρίς ενίσχυση διαμήκων FRPs



Πτυχιακή Εργασία

Τζήμας Ευάγγελος

Σακελλάρη Αικατερίνη

Καζάκου - Παπαδονίκου Κρυσταλένια

Επιστημονική Επίβλεψη

Δημάκος Κωνσταντίνος

ΑΘΗΝΑ ΜΑΪΟΣ 2012

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Το πρόβλημα της συμπεριφοράς στοιχείων από σκυρόδεμα κάτω από συνθήκες σύνθετης καταπόνησης που περιλαμβάνουν και στρεπτική ροπή είναι αφ' ενός αρκετά συχνό στις διάφορες κατασκευές και αφ' ετέρου πολύ σύνθετο.

Η εργασία αυτή εντάσσεται σ' ένα ευρύτερο πρόγραμμα του Εργαστηρίου Σκυροδέματος, με σκοπό τη διερεύνηση της βελτίωσης του σκυροδέματος, όταν στην επιφάνεια του έχουν επικολληθεί υφάσματα από ινοπλισμένα πολυμερή με ίνες άνθρακα (CFRP), ως εξωτερικός διαμήκης οπλισμός. Η εργασία άρχισε τον Απρίλη του 2011 και τελείωσε τον Μάιο του 2012.

Από τη θέση αυτή θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε θερμά τον καθηγητή κ. Κωνσταντίνο Δημάκο, ο οποίος είναι ο εμπνευστής του θέματος και ο επιβλέπων των εργασιών καθ' όλη την πορεία της παρούσας πτυχιακής. Ευχαριστούμε ιδιαίτερα τους εργαστηριακούς συνεργάτες κ. Γεώργιο Μπαλακίτσα, κ. Δημήτριο Δρίβα, κ. Γεώργιο Δημητράκη και τον επίκουρο καθηγητή κ. Κωνσταντίνο Ρεπαλή που συνέβαλαν με την πολύτιμη βοήθεια τους, ο καθένας στον τομέα του, στην εκπόνηση αυτής της εργασίας. Επίσης θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε τον εργαστηριακό βοηθό Λάμπρο Πετρόπουλο για την αμέριστη βοήθεια του. Τέλος, θέλουμε να εκφράσουμε τις ευχαριστίες μας στις εταιρίες Lafarge και Sika για την ανιδιοτελή χορήγηση νωπού συμπακνωμένου σκυροδέματος και σύνθετων υλικών, αντίστοιχα.

Κρυσταλλένια Καζάκου - Παπαδονίκου

Αικατερίνη Σακελλάρη

Ευάγγελος Τζήμας

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Διατύπωση του προβλήματος	σελ. 1
Σκοπός της εργασίας	σελ. 1
Αντιμετώπιση του προβλήματος	σελ. 2

ΜΕΡΟΣ Ι: ΒΑΣΙΚΕΣ ΘΕΩΡΗΤΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Οπλισμένο σκυρόδεμα

1.1 Χρονολογική εξέλιξη του σκυροδέματος.....	σελ. 3
1.2 Ορισμός σκυροδέματος και οπλισμένου σκυροδέματος.....	σελ. 3
1.3 Συνεργασία σκυροδέματος - χάλυβα (Concrete-steel cooperation).....	σελ. 4
1.4 Πλεονεκτήματα - μειονεκτήματα.....	σελ. 5

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Σύνθετα υλικά

2.1 Γενικά.....	σελ. 6
2.2 Υλικά.....	σελ. 6
2.3 Τεχνικές εφαρμογής.....	σελ. 8
2.4 Ιδιότητες.....	σελ. 9
2.5 Ενίσχυση σε διάτμηση - στρέψη.....	σελ. 11

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Το φαινόμενο της στρέψης

3.1 Εισαγωγή.....	σελ. 13
3.2 Ορισμοί.....	σελ. 13
3.3 Στρέψη Saint Venant.....	σελ. 15
3.4 Ροπή αντοχής σχεδιασμού σε στρέψη λόγω οπλισμού στρέψης.....	σελ. 18
3.5 Στρέψη με παρεμποδιζόμενη στρέβλωση.....	σελ. 20
3.6 Ελαστική θεωρία.....	σελ. 21
3.7 Πλαστική θεωρία.....	σελ. 22
3.8 Θεωρία λοξής κάμψης (Skew bending theory).....	σελ. 23

ΜΕΡΟΣ 2: ΔΙΕΞΑΓΩΓΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Πειραματικό μέρος

- 4.1 Συναρμολόγηση καλουπιών, κατασκευή κλωβών, πειραματική διάταξη εφελκυσμού.....σελ. 24
- 4.2 Σκυροδέτηση δοκιμίων, συμπύκνωσή τους και έλεγχος ποιότητας σκυροδέματος.....σελ. 30
- 4.3 Επικόλληση υφασμάτων στις πλακοδοκούς.....σελ. 37
- 4.4 Πειραματική διάταξη.....σελ. 39
- 4.5 Περιγραφή επεξεργασίας πειραματικών μετρήσεωνσελ. 41

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Διαγράμματα και συμπεράσματα

- 5.1 Διαγράμματα.....σελ. 42
- 5.2 Πειραματικά αποτελέσματα.....σελ. 45
- 5.3 Μορφές αστοχίας.....σελ. 46
- 5.4 Συμπέρασμα.....σελ. 49
- Βιβλιογραφία.....σελ. 50

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

ΔΙΑΤΥΠΩΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

ΣΚΟΠΟΣ ΚΑΙ ΟΡΓΑΝΩΣΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Διατύπωση του προβλήματος

Σημαντικό πρόβλημα της συμπεριφοράς των στοιχείων από σκυρόδεμα υπό στρέψη είναι ότι παρουσιάζεται αρκετές φορές και σε συνηθισμένα έργα. Τα τελευταία χρόνια, η ενίσχυση δομικών στοιχείων από σκυρόδεμα με τη χρήση σύνθετων υλικών από ινοπλισμένα πολυμερή (FRPs) ως εξωτερικό οπλισμό βελτίωσε τη συμπεριφορά του σκυροδέματος στο φαινόμενο της στρέψης. Σε πλακοδοκούς όμως, που δεν είναι κατασκευαστικά εφικτή η εφαρμογή των σύνθετων υφασμάτων περιμετρικά της διατομής, η επικόλληση των υφασμάτων περιορίζεται στον κορμό της διατομής (σε μορφή U). Σε αυτές τις περιπτώσεις η αύξηση της στρεπτικής αντοχής λόγω ενίσχυσης είναι σαφώς μικρότερη και τα ινοπλισμένα πολυμερή δεν εξαντλούν τις υψηλές εφελκυστικές αντοχές τους.

Σκοπός της εργασίας

Στην παρούσα εργασία γίνεται μια προσπάθεια να εκτιμηθεί η αποτελεσματικότητα της ενίσχυσης πλακοδοκών οπλισμένου σκυροδέματος υπό στρέψη με τη χρήση ανθρακούχων υφασμάτων ως εξωτερικό διαμήκη οπλισμό. Η πειραματική στρεπτική συμπεριφορά μιας πλακοδοκού, εργοστασιακού (έτοιμο) σκυροδέματος, συγκρίνεται με μία ενισχυμένη ίδιας διατομής και σκυροδέματος. Ακόμη, συγκρίνεται μια πλακοδοκός εργαστηριακού σκυροδέματος, με μια ενισχυμένη ίδιας διατομής και σκυροδέματος.

Σκοπός της εργασίας είναι η διερεύνηση του ποσοστού αύξησης των αντοχών του έτοιμου και του εργαστηριακού σκυροδέματος, ενισχυμένου ή μη, όταν καταπονούνται από το φαινόμενο της στρέψης.

Οργάνωση της εργασίας

Η εργασία αποτελείται από 5 κεφάλαια:

- Στο πρώτο κεφάλαιο παρουσιάζεται μια σύντομη αναφορά στις θεωρίες περί σκυροδέματος.
- Στο δεύτερο κεφάλαιο δίνονται με πολύ συντομία οι ιδιότητες των σύνθετων υλικών και η συμπεριφορά τους όταν ενισχύουν, κατά τα φαινόμενο της στρέψης και της διάτμησης, τα δομικά στοιχεία.
- Στο τρίτο κεφάλαιο δίνονται συνοπτικά οι βασικές θεωρίες που υπάρχουν για το φαινόμενο της στρέψης.
- Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζεται το εργαστηριακό τμήμα αυτής της εργασίας. Δηλαδή η κατασκευή των πλακοδοκών και η πειραματική διάταξη.
- Στο πέμπτο κεφάλαιο δίνονται τα διαγράμματα των πλακοδοκών, ο πίνακας των πειραματικών δεδομένων τους, τα συμπεράσματα που προέκυψαν από το πείραμα της στρέψης και οι φωτογραφίες των δοκιμίων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΟΠΛΙΣΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ

1.1 ΧΡΟΝΟΛΟΓΙΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

Η ιστορία του σκυροδέματος είναι στενά συνδεδεμένη με την ιστορία του τσιμέντου, το οποίο αποτελεί ένα από τα βασικά συστατικά του. Πρόκειται για μια ιστορία που συνεχίζεται μέχρι σήμερα, καθώς το σκυρόδεμα εξελίσσεται διαρκώς, ώστε να παραμείνει ένα υλικό που προσφέρει χιλιάδες δυνατότητες και αποτελεί μια διαρκή πηγή έμπνευσης για τους αρχιτέκτονες.

Από το τσιμέντο στο σκυρόδεμα

Το τσιμέντο πρωτοχρησιμοποιήθηκε στην αρχαία Ρώμη, αλλά η ιδανική σύνθεσή του εξελίχθηκε μόλις το 19^ο αιώνα. Μόλις προσδιορίστηκε, εξαπλώθηκε γρήγορα η πρακτική έγχυσης του «σκυροδέματος από το τσιμέντο» σε καλούπια. Στο τσιμέντο προστέθηκαν άμμος και χαλίκια και άρχισε να καλουπώνεται, ώστε να μιμείται την φυσική πέτρα και το λαξευτό λίθο.

Σιδηρός οπλισμός, η ιδέα ενός κηπουρού

Το 1845, ο Joseph-Louis Lambot, ο «επίσημος» εφευρέτης του οπλισμένου σκυροδέματος, χρησιμοποίησε σύρμα και κονίαμα, για να δημιουργήσει δεξαμενές και φυτευτικά αυλάκια για πορτοκαλιές. Το 1867, ο Joseph Monier πρότεινε ένα σύστημα «κινητών κάδων ή λεκανών, κατασκευασμένων από σίδηρο και τσιμέντο, για να χρησιμοποιούνται στην κηπευτική», μια ιδέα, την οποία τελειοποίησε τα επόμενα χρόνια.

Οι τεχνικές οπλισμένου σκυροδέματος τελειοποιήθηκαν μερικά χρόνια αργότερα. Το 1892, ο Francois Hennebique κατέθεσε αίτηση για δίπλωμα ευρεσιτεχνίας και ανακηρύχθηκε ο εφευρέτης του οπλισμένου σκυροδέματος. Στην Παγκόσμια Έκθεση του 1900, τον αποκάλεσαν «τον σημαντικότερο ανάδοχο δημοσίων έργων από οπλισμένο σκυρόδεμα». Η αληθινή περιπέτεια των κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα ξεκίνησαν τον επόμενο αιώνα...

Η καθιέρωση του υλικού

Η χρήση του οπλισμένου σκυροδέματος, ως δομικό υλικό, εγκρίθηκε με μια εγκύκλιο του γαλλικού κράτους με ημερομηνία 20 Οκτωβρίου 1906.

Από το 1897, το οπλισμένο σκυρόδεμα και οι τεχνικές του αρχίζουν να διδάσκονται στην γαλλική σχολή Ecole des Ponts et Chaussees. Μεταξύ των επίδοξων πολιτικών μηχανικών ήταν ο Eugene Freyssinet, ο εφευρέτης του προεντεταμένου σκυροδέματος.

Μετά τον Δεύτερο Παγκόσμιο Πόλεμο, οι ανάγκες στέγασης, ώθησαν την ανάπτυξη των προκατασκευών. Από το 1950 έως το 1965, ο αριθμός των

κατοικιών που χτίζονταν κάθε χρόνο στην Γαλλία αυξήθηκε από 50.000 σε περισσότερες από 550.000 κατοικίες. Το σκυρόδεμα επιτέλους είχε καθιερωθεί.

1.2 ΟΡΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΤΟΥ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

Το μπετόν είναι ένα είδος τεχνητού λίθου που αποτελεί στην εποχή μας το πιο διαδεδομένο υλικό για κατασκευές. Αυτός ο τεχνητός λίθος προκύπτει από την ανάμειξη τσιμέντου, ύδατος, αδρανών υλικών (αμμοχάλικα) και ενδεχομένως και ορισμένων άλλων πρόσμικτων υλικών που επηρεάζουν άλλες ιδιότητες του σκυροδέματος (χρόνος πήξης, ρευστότητα κ.τ.λ.).

Το οπλισμένο σκυρόδεμα είναι ένα σκυρόδεμα στο οποίο έχουν τεθεί για ενίσχυσή του, χαλύβδινες ράβδοι και οπλισμός, επομένως είναι σύμμικτο υλικό. Το σκυρόδεμα μπορεί να παραλάβει μεγάλες θλιπτικές δυνάμεις, ενώ η εφελκυστική του αντοχή είναι πολύ μικρή, 5 - 10% της αντίστοιχης θλιπτικής, και δεν λαμβάνεται συνήθως υπόψη στον υπολογισμό. Ο χάλυβας απεναντίας, έχει μεγάλη εφελκυστική και θλιπτική αντοχή. Με την κατάλληλη εκλογή και διάταξη του χαλύβα (οπλισμού), σε μια οπλισμένη διατομή σκυροδέματος, είναι εφικτό το μεν σκυρόδεμα να παραλάβει τις θλιπτικές δυνάμεις και ο χάλυβας τις εφελκυστικές.

1.3 ΣΥΝΕΡΓΑΣΙΑ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ - ΧΑΛΥΒΑ (concrete-steel cooperation)

Η αποτελεσματική συνεργασία των δυο υλικών είναι αναγκαία προϋπόθεση για την ασφαλή παραλαβή των εντατικών μεγεθών και την αλληλοσυμπλήρωση των μηχανικών ιδιοτήτων τους. Η συνεργασία των δυο υλικών επιτυγχάνεται με :

1. Συνάφεια (adhesion)

Κατά μήκος των ράβδων οπλισμού, που βρίσκονται μέσα στη μάζα του σκληρυμένου σκυροδέματος αναπτύσσονται δυνάμεις συνάφειας, τριβής, έτσι ώστε να μην έχουμε σχετική μετατόπιση των δύο ράβδων. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα για μια τυχαία παραμόρφωση του χάλυβα, να προκαλείται η ίδια και στο γειτονικό σκυρόδεμα, γεγονός που αποτελεί προϋπόθεση για να λειτουργήσει ο μηχανισμός δυνάμεων μεταξύ των δυο υλικών.

2. Θερμική διαστολή (thermal expansion)

Τα δύο υλικά έχουν περίπου τον ίδιο συντελεστή θερμικής διαστολής με αποτέλεσμα να έχουν τις ίδιες θερμοκρασιακές μεταβολές.

3. Φυσική προστασία χάλυβα (steel's protection).

Ο οπλισμός που θα καλυφθεί με αρκετό τσιμεντοπολτό αποκτά μια διαχρονική φυσική προστασία έναντι οξείδωσης, διάβρωση του χάλυβα.

1.4 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ – ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ

Τα βασικά πλεονεκτήματά του είναι :

- Μεγάλη θλιπτική αντοχή

Το σκυρόδεμα έχει σχετική μεγάλη θλιπτική αντοχή και είναι πιο αδύναμο από το χάλυβα στη παραλαβή της εφελκυστικής δύναμης.

- Μορφοποίηση

Το σκυρόδεμα έχει την ικανότητα να παίρνει την μόρφη του ξυλότυπου μέσα στο οποίο διαστρώνεται. Επίσης, έχει την ιδιότητα να σκληρύνεται στον αέρα και μέσα στο νερό.

- Ανθεκτικότητα

Είναι ένα διαχρονικό υλικό το οποίο δεν προσβάλλεται από μικροοργανισμούς ή χημικές ουσίες όπως το ξύλο, με την προϋπόθεση ότι έχει παρασκευαστεί ένα καλής ποιότητας σκυροδέμα, σύμφωνα με τον ΕΚΟΣ.

Τα βασικά μειονεκτήματά του είναι:

- Ίδιο βάρος

Το σκυρόδεμα έχει σημαντικό ίδιο βάρος (25 kN/m^3) ώστε το μεγάλο νεκρό φορτίο του ίδιου βάρους να το κάνει αντιοικονομικό για γεφύρωση μεγάλων ανοιγμάτων. Αυτό αντιμετωπίζεται, με την δημιουργία φορέων που μεταβιβάζουν μέρος του φορτίου διαμέσου θλιπτικών τάσεων π.χ. κελύφη ή με προένταση ή με προκατασκευασμένα στοιχεία, που λόγω των υψηλών ελεγχόμενων αντοχών οι διατομές είναι μικρότερες.

- Θερμομόνωση - Ηχομόνωση

Το σκυρόδεμα δεν έχει θερμομονωτική ικανότητα και απαιτεί ειδική θερμομόνωση. Το σκυρόδεμα ως προς την ικανότητα ηχομόνωσης παρουσιάζει διαφορετική συμπεριφορά. Λόγω του μεγάλου βάρους του έχει αρκετή ηχομονωτική ικανότητα σε θορύβους.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ

2.1 ΓΕΝΙΚΑ

Τα τελευταία περίπου 15 χρόνια στη χώρα μας έχει αναπτυχθεί μια νέα τεχνική ενίσχυσης, η οποία βασίζεται στη χρήση προηγμένων υλικών που αποτελούνται από το συνδυασμό ινών (π.χ. άνθρακα, γυαλιού, αραμιδίου) σε μήτρα εποξειδικής ρητίνης. Τα υλικά αυτά, γνωστά ως ινοπλισμένα πολυμερή (Fibre Reinforced Polymers – FRP) χαρακτηρίζονται από εξαιρετικές ιδιότητες, που κάνουν την εφαρμογή τους στα τεχνικά έργα ιδιαίτερα ελκυστική. Η επιλογή του τύπου, της μορφής και της μεθόδου εφαρμογής των σύνθετων υλικών εξαρτώνται κάθε φορά από πολλούς παράγοντες όπως: η γεωμετρία και οι διαστάσεις των προς ενίσχυση στοιχείων, το είδος της εντατικής του καταπόνησης, οι περιβαλλοντικές συνθήκες (π.χ. σε θερμοκρασίες κάτω των 10 °C περίπου η σκλήρυνση των ρητινών είναι δύσκολη). Ένας παράγοντας που καθορίζει αν η επέμβαση θα είναι επιτυχής είναι η αντοχή και η ποιότητα του υποστρώματος (σκυρόδεμα) στο οποίο θα γίνει η επικόλληση. Πολύ χαμηλή εφελκυστική αντοχή ή επιφάνεια τροχία, γεμάτη με σκόνη, λάδια κ.τ.λ. δεν θα εξασφαλίσουν καλή ποιότητα σύνδεσης μεταξύ σκυροδέματος - σύνθετων υλικών, με αποτέλεσμα πρόωρη αστοχία του οπλισμού ενίσχυσης.

2.2 ΥΛΙΚΑ

Ίνες

Οι ίνες στα σύνθετα υλικά, διαμέτρου 5-25 μm, αποτελούν τον φορέα ανάληψης εφελκυστικών δυνάμεων, παράλληλα στη διεύθυνσή τους. Έχουν υψηλή εφελκυστική αντοχή και γραμμικά ελαστική συμπεριφορά μέχρι τη θραύση τους. Οι κυριότεροι τύποι ινών που χρησιμοποιούνται στο πεδίο των ενισχύσεων είναι:

α) Οι ίνες άνθρακα με πυκνότητα 1800-1900 kg/m³. Οι τύποι των ανθρακονημάτων διαφέρουν ανάλογα με το αν παρασκευάζονται από θερμική κατεργασία πολυακρυλονιτρικού (υψηλής εφελκυστικής αντοχής και μέτρου ελαστικότητας) είτε μέσω απόσταξης κάρβουνου.

β) Οι ίνες γυαλιού με πυκνότητα 2300-2500 kg/m³. Υπάρχουν τέσσερις τύποι υαλονημάτων: τύπου E με μειονεκτήματα τη μείωση αντοχής στο αλκαλικό περιβάλλον του σκυροδέματος, τύπου Z ή AR με μεγάλη αντοχή σε αλκαλικό περιβάλλον και τύπου S, με υψηλή αντοχή και υψηλό μέτρο ελαστικότητας.

γ) Οι ίνες αραμιδίου με πυκνότητα 1450 kg/m^3 διακρίνονται σε αυτές που προέρχονται από αρωματικό πολυαμίδιο (Κέβλαρ) και σε εκείνες οι οποίες προέρχονται από αρωματικό πολυαιθεραμίδιο. Κύριο πλεονέκτημα τους είναι η πολύ καλή συμπεριφορά σε κρουστικά φορτία (μανδύες στα υποστυλώματα γεφυρών).

ΠΙΝΑΚΑΣ 1 - Ενδεικτικές Ιδιότητες Ινών

Ίνες	Μέτρο Ελαστικότητας (GPa)	Εφελκυστική ή Αντοχή (MPa)	Παραμόρφωση Αστοχίας (%)
ΑΝΘΡΑΚΑ			
Υψηλής Αντοχής	215-235	3500-4800	1,40-2,00
Πολύ υψηλής Αντοχής	215-235	3500-6000	1,40-2,30
Υψηλού μέτρου Ελαστικότητας	250-300	2500-3100	0,50-0,90
Πολύ υψηλού μέτρου Ελαστικότητας	500-700	2100-2400	0,20-0,40
ΓΥΑΛΙΟΥ			
Τύπου E	70-75	1900-3000	3,00-4,50
Τύπου S	85-90	3500-4800	4,50-5,50
ΑΡΑΜΙΔΙΟΥ			
Χαμηλού μέτρου Ελαστικότητας	70-80	3500-4100	4,30-5,00
Υψηλού μέτρου Ελαστικότητας	115-130	3500-4000	2,50-3,50

Μήτρα

Υπάρχουν δύο κύριοι τύποι πολυμερών που χρησιμοποιούνται ως μήτρες: θερμοσκληρυνόμενα και θερμοπλαστικά. Τα θερμοσκληρυνόμενα χρησιμοποιούνται στον κλάδο των οικοδομικών και τεχνικών έργων και είναι οι εποξειδικές ρητίνες και σπανιότερα ο πολυεστέρας ή βινυλεστέρας. Οι εποξειδικές υπερέρχουν των άλλων τύπων μήτρας λόγω των εξαιρετικών μηχανικών χαρακτηριστικών και της μεγάλης ανθεκτικότητας σε δυσμενείς περιβαλλοντικές επιδράσεις.

Κόλλα

Η κόλλα κατά κανόνα εποξειδική ρητίνη δύο συστατικών εφαρμόζεται μεταξύ του σκυροδέματος και του σύνθετου υλικού, εξασφαλίζοντας έτσι τη συνεργασία τους και τη μεταφορά τάσεων από το πρώτο στο δεύτερο. Η χρήση εποξειδικών ρητινών στις κατασκευές προϋποθέτει την κατανόηση τριών βασικών εννοιών: του χρόνου εργασιμότητας, του χρόνου εφαρμογής και τη θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης T_g .

ΠΙΝΑΚΑΣ 2 – Ενδεικτικές ιδιότητες εποξειδικών ρητινών και σύγκριση με σκυρόδεμα και χάλυβα

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

2.3 ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ

3.1 Βασική Τεχνική

Η βασική τεχνική, η οποία είναι και πλέον συνηθισμένη και αποκλειστικά εφαρμόσιμη στη χώρα μας, περιλαμβάνει τη δια χειρός επικόλληση είτε υφασμάτων (προεμποτισμένων με ρητίνη ή μη προεμποτισμένων), είτε προκατασκευασμένων στοιχείων (π.χ. ελάσματα) σε στοιχεία οπλισμένου σκυροδέματος, μέσω εποξειδικών ρητινών.

3.2 Ειδικές Τεχνικές

- Αυτοματοποιημένη Περιτύλιξη
- Εφαρμογή με προένταση
- Επιταχυμένη σκλήρυνση με θέρμανση
- Προκατασκευασμένα στοιχεία
- Εφαρμογή ράβδων εγκοπής
- Μηχανική στερέωση ελασμάτων με αγκύρια
- Πλέγματα συνεχών ινών σε ανόργανη μήτρα

2.4 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ

Τα βασικά πλεονεκτήματα των σύνθετων υλικών είναι: η ανθεκτικότητα σε διάβρωση, το χαμηλό βάρος (περίπου 1/4 – 1/5 του χάλυβα), η εξαιρετικά υψηλή εφελκυστική αντοχή (πολλαπλάσια του κοινού χάλυβα), η διαθεσιμότητα των υλικών σε μεγάλα μήκη και η μεγάλη ευκαμψία τους, με αποτέλεσμα η αντίστοιχη τεχνική ενίσχυσης να χαρακτηρίζεται από εξαιρετική ευκολία και ταχύτητα εφαρμογής, ακόμα και σε δύσκολα προσβάσιμα τμήματα κατασκευών.

Τα βασικά μειονεκτήματα των σύνθετων υλικών είναι:

- η παντελής έλλειψη ολκιμότητας τους
- Η αμφισβητούμενη ανθεκτικότητα τους σε διάρκεια, λόγω ευαισθησίας τους σε ορισμένες περιβαλλοντικές επιδράσεις (υπεριώδεις ακτινοβολία, αυξομειώσεις θερμοκρασίας, δράση χημικών).
- η χαμηλή αντίστασή τους σε υψηλές θερμοκρασίες (πάνω από 60 °C μειώνεται σημαντικά το μέτρο ελαστικότητας της ρητίνης, ενώ στους 250 °C η ρητίνη καίγεται)
- η μείωση της εφελκυστικής τους αντοχής υπό μόνιμη τάση (εξαιρετικά πτωχή συμπεριφορά του γυαλιού)
- το υψηλό κόστος τους

ΠΙΝΑΚΑΣ 3 – Αξιολόγηση ιών με βάση την ανθεκτικότητά τους

Χαρακτηριστικό	Ίνες Άνθρακα	Ίνες Γυαλιού	Ίνες Αραμιδίου
Ανθεκτικότητα σε διάρκεια	Πολύ καλή	Οριακή	Καλή
Αντοχή σε κόπωση	Πολύ καλή	Οριακή	Καλή
Ανθεκτικότητα σε αλκαλικό περιβάλλον	Πολύ καλή	Ακατάλληλο υλικό	Καλή
Αντοχή σε κρούση	Μικρή	Καλή	Πολύ καλή
Αντοχή σε φθορά λόγω τριβής	Μέτρια	Καλή	Πολύ καλή
Γαλβανικό φαινόμενο	Ναι	Όχι	Όχι
Αντοχή σε υπεριώδεις ακτινοβολίες	Καλή	Καλή	Μικρή

Από τον παραπάνω πίνακα παρατηρούμε πως οι ίνες άνθρακα, γενικά, έχουν καλύτερη συμπεριφορά σε σύγκριση με τις ίνες γυαλιού και αραμιδίου. Τα χαρακτηριστικά των σύνθετων υλικών, εξαρτώνται από την κατ' όγκο περιεκτικότητα τους σε ίνες. Προσεγγιστικά, κατ' εφαρμογή των "κανόνων των μιγμάτων", οι σχετικές εκφράσεις για το μέτρο ελαστικότητας και την αντοχή των σύνθετων υλικών με συνεχείς ίνες μιας διεύθυνσης είναι οι εξής:

$$E_{FRP} = E_r V_r + E_f V_f, f_{FRP} = f_r V_r + f_f V_f$$

όπου E_{FRP} , E_r , E_f και f_{FRP} , f_r , f_f είναι τα μέτρα ελαστικότητας και οι εφελκυστικές αντοχές του σύνθετου υλικού, της ρητίνης και των ιών αντίστοιχα και V_r , V_f , είναι τα κ.ο. ποσοστά ρητίνης και ιών. Προφανώς ισχύει $V_r + V_f = 1$. Εξάλλου, επειδή

$$E_f \gg E_r \text{ μπορεί να θεωρηθεί προσεγγιστικά: } E_{FRP} = V_f E_f$$

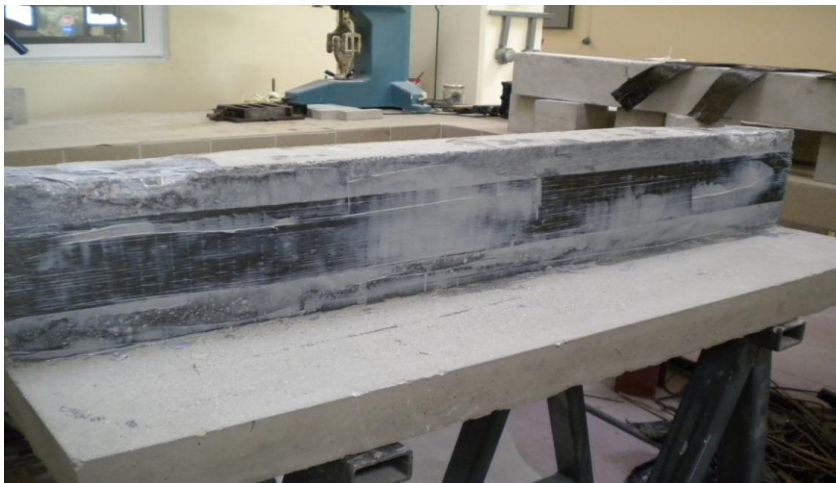
2.5 ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΣΕ ΔΙΑΤΜΗΣΗ-ΣΤΡΕΨΗ

Οι τεχνικές που εφαρμόζονται σήμερα για ενίσχυση σε στρέψη είναι παρόμοιες με αυτές που εφαρμόζονται για ενίσχυση σε διάτμηση. Οι δύο αυτές καταπονήσεις προκαλούν περίπου τα ίδια φαινόμενα στα γραμμικά μέλη με μία βασική διαφορά: ενώ κατά τη διατμητική αστοχία οι ρωγμές που εμφανίζονται στις δύο πλευρές μιας δοκού είναι παράλληλες, στη στρέψη έχουν αντίθετη κατεύθυνση (Σχήμα 1), λόγω του αντίθετου πρόσημου των διατμητικών τάσεων στις δύο εξωτερικές επιφάνειες της δοκού.

Η ενίσχυση στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος σε διάτμηση-στρέψη με σύνθετα υλικά επιτυγχάνεται μέσω της επικόλλησης υφασμάτων, ή σπανιότερα ελασμάτων, τα οποία επικολλούνται στις εξωτερικές επιφάνειες με τις ίνες κατά το δυνατόν παράλληλες στις τροχιές των κύριων τάσεων, δηλαδή περίπου κάθετα σε πιθανές ρωγμές (Εικόνα 1). Τούτο βέβαια δεν είναι γενικά εφικτό, γι' αυτό, όπως και στη περίπτωση της χρήσης συνδετήρων για ανάληψη τέμνουσας, οι ισχυρές ίνες εφαρμόζονται στις πιο πολλές περιπτώσεις με διεύθυνση κάθετη στον άξονα των δομικών μελών. Μέσω της επικόλλησης του υφάσματος σε διεύθυνση κάθετη προς αυτή των δοκών, επιτυγχάνεται:

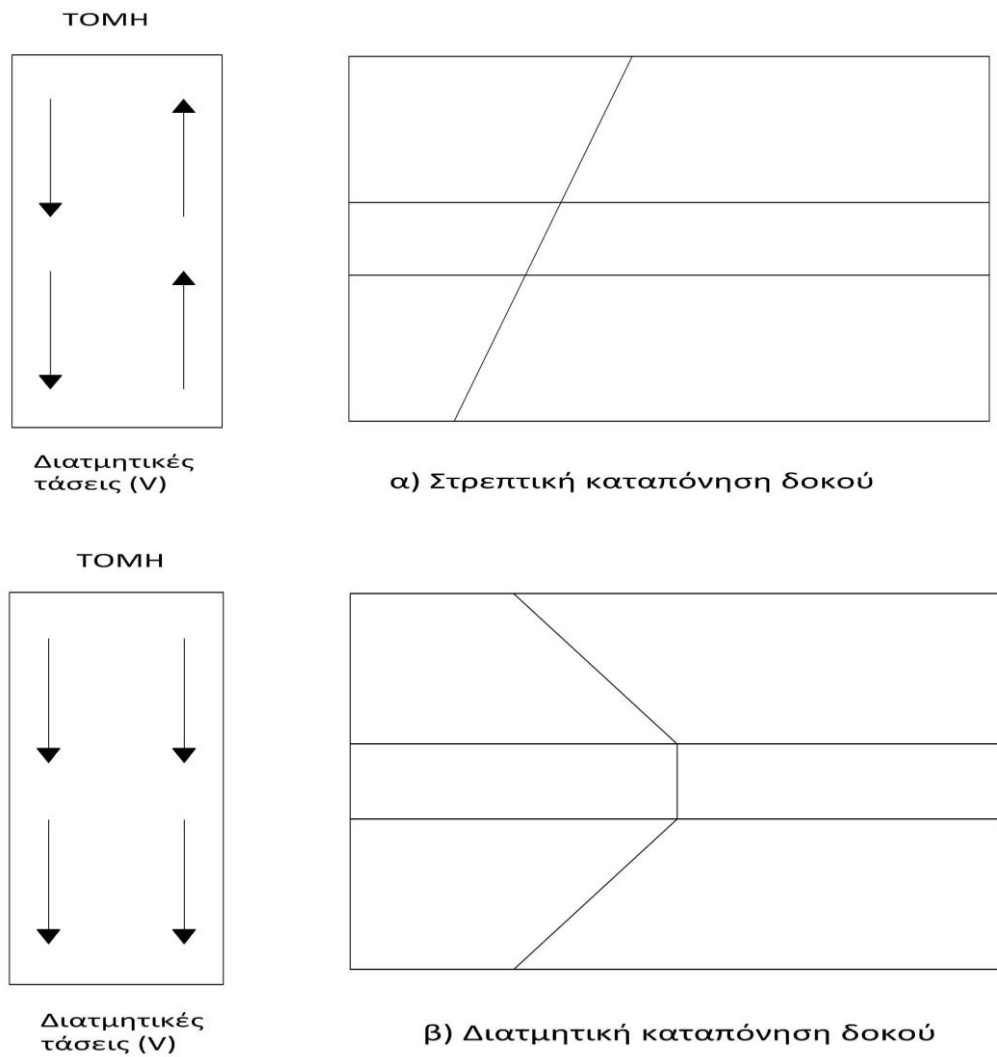
- Αύξηση της διατμητικής αντοχής
- Δραστική μείωση της πιθανότητας ψαθυρής αστοχίας
- Σημαντική βελτίωση της συμπεριφοράς των δοκών σε ανακυκλιζόμενες φορτίσεις (σεισμούς) και αύξηση της πλαστιμότητας

Σε περίπτωση πλακοδοκών, ο συνήθης τρόπος ενίσχυσης είναι με το σύνθετο υλικό σε σχήμα U στις πλευρές (κούτελα) και τη κάτω παρειά του στοιχείου. (Σχήμα 2)

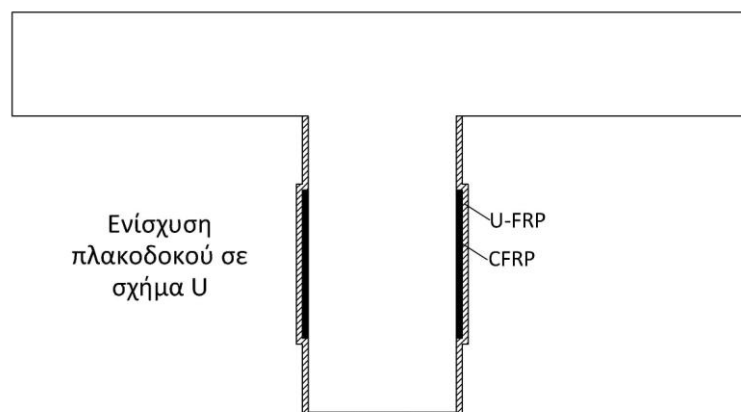


Εικόνα 1.
Ενίσχυση
πλακοδοκού
σε στρέψη,
λίγο πριν την
αγκύρωση των
άκρων της.

Σχήμα 1. Στρεπτική και διατμητική καταπόνηση δοκού



Σχήμα 2. Ενίσχυση πλακοδοκών σε τομή



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3
ΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΤΗΣ ΣΤΡΕΨΗΣ

«Ένας έμπειρος μηχανικός δεν επιτρέπει σε μία κατασκευή να καταπονείται με στρέψη.»

ΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΤΗΣ ΣΤΡΕΨΗΣ.

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το είδος της καταπόνησης που τείνει να περιστρέψει μια ράβδο περί τον άξονά της, καλείται στρέψη. Υπάρχουν προβλήματα απλής στρέψης, όπου μία μόνο στρεπτική ροπή επιδρά στη ράβδο, αλλά και περιπτώσεις σύνθετης στρέψης όπου, εκτός της στρεπτικής ροπής, είναι δυνατόν να επιβάλλονται συγχρόνως και άλλα είδη φορτίων όπως θλιπτικά, καμπτικά, διατμητικά κλπ. Παράδειγμα στην πράξη, οι έκκεντρα φορτιζόμενοι δοκοί, οι άξονες των μηχανών κλπ. Συνήθως εξετάζεται η πιο απλή περίπτωση, όπου μια ράβδος καταπονείται με ζεύγος δυνάμεων, οι φορείς των οποίων ορίζουν επίπεδο κάθετο στον άξονά της.

Η ανάπτυξη της θεωρίας της στρέψης ξεκίνησε από τον Coulomb, ο οποίος μελέτησε την απλούστερη περίπτωση της ράβδου με κυκλική διατομή. Τα αποτελέσματα του Coulomb επιχείρησε αργότερα να τα εφαρμόσει σε ράβδους τυχούσας διατομής ο Navier χωρίς όμως επιτυχία, γιατί δεν ήταν δυνατόν να επιτευχθεί ικανοποίηση των συνοριακών συνθηκών. Το πρόβλημα της στρέψης για τυχούσες διατομές λύθηκε τελικά από τον Saint Venant με την ημιαντίστροφη μέθοδο. Η μέθοδος αυτή βασίζεται σε κατάλληλη τροποποίηση της θεωρίας του Coulomb για μη κυκλικές διατομές.

3.2 ΟΡΙΣΜΟΙ

Η στρέψη μπορεί να διακριθεί σε :

- Άμεση στρέψη: η στρεπτική ροπή είναι απαραίτητη για την ικανοποίηση των συνθηκών ισορροπίας (στρέψη ισορροπίας).
- Έμμεση στρέψη: η στρεπτική ροπή οφείλεται αποκλειστικά στην παρεμπόδιση της στροφής που εισάγεται από παρακείμενα στοιχεία (στρέψη συμβιβαστού). Στην περίπτωση αυτή οι στρεπτικές ροπές δεν είναι απαραίτητες για την ισορροπία και μπορούν να αγνοηθούν στους υπολογισμούς οριακών καταστάσεων αστοχίας.

Επίσης η στρέψη μπορεί να διακριθεί σε :

- Στρέψη Saint Venant: η ισορροπία εξασφαλίζεται με μία κλειστή ροή διατμητικών τάσεων εκ στρέψεως.

- Στρέψη με στρέβλωση: λόγω της παρεμπόδισης της διαμήκου παραμορφώσεως, ο φορέας ανθίσταται στις επιβαλλόμενες στρεπτικές ροπές με την ανάπτυξη ορθών και πρόσθετων διατμητικών τάσεων.

Μεταξύ των δύο αυτών ειδών στρέψης δεν υπάρχει σαφής διάκριση.

- Το μεγαλύτερο τμήμα μιας κιβωτοειδούς διατομής ανθίσταται σε στρέψη μέσω μιας κλειστής ροής διατμητικών τάσεων (Saint Venant), κοντά όμως στα διαφράγματα αναπτύσσεται στρέψη με παρεμποδιζόμενη στρέβλωση.
- Μία ανοιχτή διατομή μορφής ανθίσταται σε στρέψη κυρίως με παρεμποδιζόμενη στρέβλωση, στα επιμέρους όμως ορθογωνικά τμήματα της διατομής αναπτύσσεται και στρέψη Saint Venant.

3.3 ΣΤΡΕΨΗ SAINT VENANT

ΓΕΝΙΚΑ

Ο υπολογισμός σε στρέψη γίνεται θεωρώντας μία κοίλη λεπτότοιχη κλειστή δύναμη. Για τις πλήρεις(συμπαγείς)διατομές θεωρείται μια <<ισοδύναμη κοίλη λεπτότοιχη κλειστή διατομή>>. Η διατομή αυτή ορίζεται ως εξής:

- Η εξωτερική περίμετρός της συμπίπτει με αυτήν της πραγματικής διατομής
- Έχει ένα ισοδύναμο πάχος τοιχωμάτων $t = \max(A/u, 2c)$ (στην περίπτωση κοίλων διατομών, το πάχος t δεν μπορεί να είναι μεγαλύτερο από το πραγματικό πάχος των τοιχωμάτων του).

Όπου:

u : είναι η περίμετρος της διατομής

A : η ολική επιφάνεια που περικλείεται από την εξωτερική περίμετρο(συμπεριλαμβανομένων και των εσωτερικών κενών στην περίπτωση κοίλων διατομών)

C : η επικάλυψη των διαμήκων ράβδων.

Ο οπλισμός στρέψεως αποτελείται από κλειστούς συνδετήρες κάθετους προς τον άξονα της δοκού και από διαμήκεις ράβδους κατανομημένες περίπου ομοιόμορφα κατά μήκος της περιμέτρου της διατομής. Διαμήκεις ράβδοι πρέπει να υπάρχουν σε όλες τις γωνίες της διατομής, ενώ παράλληλα πρέπει να προβλέπεται ένας ελάχιστος οπλισμός.

Η οριακή κατάσταση αστοχίας διέπεται:

- Είτε από την ροπή στρέψεως T_{Rd1} και την τέμνουσα V_{Rd2} που αντιστοιχούν στην αστοχία από λοξή θλίψη του σκυροδέματος των τοιχωμάτων της ισοδύναμης διατομής
- Είτε από την ροπή στρέψεως T_{Rd2} που αντιστοιχεί στην αστοχία των συνδετήρων
- Είτε από την ροπή στρέψεως T_{Rd3} που αντιστοιχεί στην αστοχία των διαμήκων οπλισμών.

Οι τιμές σχεδιασμού των στρεπτικών αντοχών T_{Rd1} , T_{Rd2} και T_{Rd3} καθορίζουν τις διαστάσεις των τοιχωμάτων της ισοδύναμης διατομής (άρα και της πραγματικής διατομής) καθώς επίσης και τους απαιτούμενους οπλισμούς (διαμήκεις και εγκάρσιους).

3.3.1 Ροπή αντοχής σχεδιασμού σε στρέψη λόγω θλίψης των τοιχωμάτων

Επειδή ο κινηματικός μηχανισμός βάσει της πλαστικής θεωρίας (η οποία αποτελεί το θεωρητικό υπόβαθρο της προτεινόμενης μεθόδου) απαιτεί την σύγχρονη αστοχία των δύο συνιστώντων οπλισμών, μία προσεγγιστική τιμή της γωνίας θ μπορεί να ληφθεί από την έκφραση:

$$(\tan \theta)^2 [(A_{sw}/s) * f_{ywd}] / [(A_{sl}/u_k) * f_{yld}]$$

Στις συνήθεις περιπτώσεις η γωνία θ εκλέγεται $\theta=45^\circ$ ($\cot\theta=1$) διότι έτσι αφενός μεν μεγιστοποιείται η T_{Rd1} , αφετέρου δεν ελαχιστοποιείται ο συνολικός οπλισμός. Ο μόνος λόγος για την εκλογή $\theta \neq 45^\circ$ είναι η περίπτωση όπου είναι επιθυμητή η μείωση των συνδετήρων με αντίστοιχη αύξηση των διαμήκων οπλισμών (ή και το αντίστροφο).

Η δρώσα ροπή στρέψεως T_{sd} και η αντίστοιχη δρώσα τέμνουσα δύναμη V_{sd} πρέπει να ικανοποιούν ταυτοχρόνως τις παρακάτω συνθήκες:

- Στις κοίλες διατομές:

$$(T_{sd}/T_{Rd1}) + (V_{sd}/V_{Rd2}) \leq 1$$

- Στις άλλες διατομές:

$$(T_{sd}/T_{Rd1})^2 + (V_{sd}/V_{Rd2})^2 \leq 1 \text{ Type equation here.}$$

$$T_{sd} \leq T_{Rd2}$$

$$T_{sd} \leq T_{Rd3}$$

Οι παραπάνω έλεγχοι πρέπει να γίνονται στην παρειά μιας άμεσης στήριξης.

Οι υπολογισμοί των αντοχών T_{Rd1} , T_{Rd2} και T_{Rd3} στηρίζονται στο πρότυπο ενός ιδεατού χωροδικτυώματος.

$$T_{Rd1} = 2 * v * f_{cd} * t * A_k / (\cot\theta + \tan\theta)$$

Όπου:

t: το πάχος της ισοδύναμης διατομής

A_k : η επιφάνεια που περικλείεται από την πολυγωνική γραμμή που διέρχεται από το μέσον των τοιχωμάτων (κατά την έννοια του πάχους) της ισοδύναμης

λεπτότοιχης διατομής (συμπεριλαμβανομένων και των εσωτερικών κενών στην περίπτωση κοίλης διατομής)

$v: 0,70(0,70-f_{ck}/200) \geq 0,35$ (f_{ck} σε MPa). Η τιμή αυτή ισχύει στην περίπτωση όπου οι συνδετήρες βρίσκονται μόνον στην εξωτερική περίμετρο της ισοδύναμης διατομής. Αν όμως προβλέπονται κλειστοί συνδετήρες και στις δυο παρειές κάθε τοιχώματος της ισοδύναμης κοίλης διατομής ή στα τοιχώματα μιας κιβωτοειδούς διατομής, τότε μπορεί να ληφθεί $v=0,70-f_{ck}/200 \geq 0,50$

θ : η γωνία των λοξών θλιπτήρων σκυροδέματος με τον διαμήκη άξονα του στοιχείου. Η γωνία θ πρέπει να εκλεγεί έτσι ώστε : $0,40 \leq \cot\theta \leq 2,50$.

3.3.2 Διαμήκεις σπλισμοί

Η συνισταμένη των εφελκυστικών δυνάμεων $f_{yld} * A_{sl}$ διέρχεται από το κέντρο βάρους της ισοδύναμης κοίλης διατομής. Έτσι, ένα ποσοστό του διαμήκους σπλισμού (π.χ. ορισμένοι τένοντες προέντασης) μπορεί να τοποθετηθεί στον άξονα του στοιχείου.

3.3.3 Σύνθετη καταπόνηση από στρέψη με κάμψη και/ή αξονικές δυνάμεις

Όταν συνδυάζονται στρέψη και υψηλή καμπτική ροπή μπορούν να αναπτυχθούν κρίσιμες κύριες τάσεις στη θλιβόμενη ζώνη, ειδικά σε κιβωτοειδής διατομές. Στις περιπτώσεις αυτές η κύρια θλιπτική τάση μπορεί να υπολογιστεί από τη μέση διαμήκη θλιπτική τάση λόγω κάμψης και από την διατμητική τάση λόγω στρέψης που μπορεί να ληφθεί ίση με $T_{sd}/(2 * A_k)$. Η κύρια θλιπτική τάση δεν πρέπει να υπερβαίνει την τιμή $0,85f_{cd}$.

3.4 ΡΟΠΗ ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΣΕ ΣΤΡΕΨΗ ΛΟΓΩ ΟΠΛΙΣΜΟΥ ΣΤΡΕΨΗΣ

ΓΕΝΙΚΑ

Οι οριακές τιμές των χαρακτηριστικών αντοχών για το χάλυβα ισχύουν και για τους οπλισμούς στρέψης.

3.4.1 Κλειστοί συνδετήρες

Οι υπολογισμοί των συνδετήρων μπορούν να γίνουν, με την ίδια γωνία θ , χωριστά για στρέψη και για τέμνουσα.

Οι αντίστοιχες διατομές συνδετήρων προστίθενται.

Η ροπή αντοχής σε στρέψη λόγω συνδετήρων δίνεται από τη σχέση:

$$T_{Rd2} = 2 * A_k * (f_{ywd} * A_{sw} / s) \cot \theta$$

Όπου:

A_{sw} : το εμβαδόν της διατομής των ράβδων που χρησιμοποιούνται ως συνδετήρες στρέψεως (το εμβαδόν του ενός σκέλους)

s : η απόσταση των συνδετήρων

3.4.2 Διαμήκεις οπλισμοί

$$T_{Rd3} = 2 * A_k * (f_{yld} * A_{sl} / u_k) \tan \theta$$

Όπου:

A_{sl} : το άθροισμα των διατομών των διαμήκων ράβδων για την ανάληψη της στρέψεως. Οι διαμήκεις ράβδοι πρέπει να έχουν κατά το δυνατόν ίσες διατομές και να είναι ομοιόμορφα κατανεμημένες κατά μήκος της περιμέτρου u .

θ : η γωνία που έχει ληφθεί υπόψη για τον υπολογισμό των συνδετήρων.

3.4.3 Σύνθετη καταπόνηση από στρέψη με κάμψη και/ή αξονικές δυνάμεις.

Ο διαμήκης σπλισμός θα προσδιοριστεί χωριστά για στρέψη και χωριστά για ορθή ένταση.

- Στην λόγω κάμψης εφελκυσόμενη ζώνη, οι σπλισμοί στρέψης προστίθενται στους σπλισμούς έναντι κάμψης και/ή αξονικής δύναμης.
- Στην λόγω κάμψης θλιβόμενη ζώνη οι σπλισμοί μπορούν να ελαττωθούν. Η μείωση αυτή εξαρτάται από το μέγεθος των θλιπτικών τάσεων λόγω κάμψης.

3.5 ΣΤΡΕΨΗ ΜΕ ΠΑΡΕΜΠΟΔΙΖΟΜΕΝΗ ΣΤΡΕΒΛΩΣΗ

Σε ανοιχτές ή κλειστές λεπτότοιχες διατομές πυρήνων, λόγω παρεμπόδισης της στρέβλωσης αναπτύσσονται πρόσθετες ορθές τάσεις των οποίων η συνισταμένη ισούται με τη διρροπή. Η συνολική ροπή στρέψης T αναλύεται σε δύο συνιστώσες. Στην ροπή Saint Venant T_1 και στην ροπή στρέβλωσης T_2 , η οποία οφείλεται στην μεταβολή της διρροπής κατά μήκος του άξονα της ράβδου, οπότε:

$$T=T_1+T_2$$

Μετά τον υπολογισμό των ορθών και διατμητικών τάσεων στις κορυφές της διατομής σύμφωνα με την ελαστική θεωρία, λαμβάνοντας υπόψη ακαμψίες 2^{ου} σταδίου, η διαστασιολόγηση γίνεται ανεξάρτητα για κάθε πλευρά της διατομής ως εξής:

- Η διαστασιολόγηση κάθε πλευράς έναντι ορθών τάσεων γίνεται για την συνισταμένη αξονική δύναμη και ροπή κάμψης που υπολογίζονται από τις ορθές τάσεις των ακραίων ινών.
- Η διαστασιολόγηση έναντι τέμνουσας γίνεται με την συνισταμένη των διατμητικών τάσεων που οφείλονται στη συνολική τέμνουσα της διατομής και στη ροπή από στρέβλωση T_2 .
- Η διαστασιολόγηση σε στρέψη γίνεται για την συνισταμένη ροπή των διατμητικών τάσεων που οφείλονται στη ροπή Saint Venant.

Οι τάσεις που προκαλούνται από την παρεμποδιζόμενη στρέβλωση ενδέχεται να είναι σημαντικές και να πρέπει να ληφθούν υπόψη. Γενικά όμως οι τάσεις από παρεμποδιζόμενη στρέβλωση μπορούν να αγνοηθούν στην οριακή κατάσταση.

3.6 ΕΛΑΣΤΙΚΗ ΘΕΩΡΙΑ

Στοιχεία από σκυρόδεμα υπό στρέψη

Η συμπεριφορά στοιχείων από ομοιογενές υλικό υπό στρέψη περιγράφεται με επιτυχία από την κλασική θεωρία του Saint Venant. Η επέκταση της θεωρίας για την πρόβλεψη της συμπεριφοράς και μη ομοιογενών στοιχείων, όπως το σκυρόδεμα, έδειξε ότι η αρχική θεωρία μπορεί με μεγάλη επιτυχία να περιγράψει το φαινόμενο όσο το υλικό παραμένει στην ελαστική περιοχή, ακόμα και όταν υπό υψηλή στρεπτική ροπή δημιουργούνται μικρορηγματώσεις στην μάζα του.

Με βάση την επιτυχία αυτή της θεωρίας του Saint Venant έγινε προσπάθεια να επεκταθεί η εφαρμογή της ακόμα περισσότερο και να χρησιμοποιηθεί για την πρόβλεψη της μέγιστης στρεπτικής ροπής αντοχής των στοιχείων από σκυρόδεμα. Προς το σκοπό αυτό τίθεται το επόμενο κριτήριο θραύσεως: Η θραύση λόγω στρέψης σε άοπλο σκυρόδεμα συμβαίνει όταν οι μέγιστες κύριες εφελκυστικές τάσεις σ_{\max} γίνουν ίσες με την εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος f_t . Όταν η $\sigma_{\max} = \tau_{\max}$ από διάτμηση λόγω καθαρής κάμψης, η στρεπτική ροπή θραύσης (M_e) σύμφωνα με την ελαστική θεωρία μπορεί να περιγραφεί από την εξίσωση:

$$M_e = \alpha x^2 \gamma f_t' \quad (1)$$

Όπου: α = συντελεστές κατά Saint Venant ,εξαρτώμενος από το σχήμα της διατομής.

Για ορθογωνικές διατομές ισχύουν οι παρακάτω τιμές:

y/x	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0	2,5	3,0	4,0	5,0	10	100	8
α	0,208	0,219	0,227	0,234	0,240	0,246	0,250	0,267	0,282	0,291	0,312	0,331	0,333

Και f_t' : η καμπτική αντοχή του σκυροδέματος που λαμβάνεται από πειράματα μονοαξονικού εφελκυσμού.

Μια λογική τιμή που προτείνεται είναι:

$$f_{ct} \approx 5.5 \sqrt{f_c} \quad (2)$$

όπου f_c : η αντοχή σε θλίψη κυλινδρικού δοκιμίου(σε psi)

Πάντως τα πειράματα έχουν δείξει πως αυτή η θεωρία υποεκτιμά με συνέπεια την αντοχή θραύσης για δοκάρη από άοπλο σκυρόδεμα. Η πραγματική αντοχή σε στρέψη είναι περίπου 50% μεγαλύτερη από αυτή που προβλέπει η συγκεκριμένη θεωρία.

3.7 ΠΛΑΣΤΙΚΗ ΘΕΩΡΙΑ

Λόγω της αδυναμίας της ελαστικής θεωρίας να εκτιμήσει σωστά την αντοχή σε στρέψη του σκυροδέματος αναπτύχθηκε η πλαστική θεωρία. Σύμφωνα με αυτή το σκυρόδεμα συνεχίζει να παραλαμβάνει ροπές έχοντας μπει στην πλαστική περιοχή αυξάνοντας έτσι την τελική του αντοχή. Όπως περίπου προβλέπει και η ελαστική θεωρία η θραύση λαμβάνει χώρα όταν οι μέγιστες κύριες εφελκυστικές τάσεις φτάνουν την εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος ($\tau=f_t'$).

Η θραύση υπό στρέψη στην πλαστική θεωρία (τ_p) εκφράζεται από την εξίσωση:

$$\tau_p = \alpha_p x^2 y f_t \quad (3)$$

όπου $\alpha_p = (0,5 - x/6y)$ και x, y οι διαστάσεις της διατομής.

Ο συντελεστής α_p της πλαστικής θεωρίας κυμαίνεται από 1/3 έως 1/2 και είναι περίπου 50% μεγαλύτερος από τον συντελεστή α που χρησιμοποιείται στην ελαστική θεωρία.

Παρ' όλα, αυτά η πλαστική θεωρία παρουσιάζει τρεις αδυναμίες :

1. Θεωρητικά είναι ανεπιτυχής γιατί ο εφελκυσμός είναι ο λόγος της θραύσης δοκαριού λόγω στρέψης αλλά δεν υπάρχουν σημεία πλαστικής συμπεριφοράς τα οποία να έχουν παρατηρηθεί σε στρέψη σκυροδέματος, όπως άλλωστε βλέπουμε και από τις πειραματικές καμπύλες τάσεων παραμορφώσεων.
2. Η θραύση λόγω στρέψης στο άοπλο σκυρόδεμα είναι εντελώς ψαθυρή. Δεν υπάρχει κανένα σημάδι πλαστικής στροφής.
3. Η θεωρία αυτή δεν μπορεί να αποδώσει την επιρροή μεγέθους (size-effect).

3.8 ΘΕΩΡΙΑ ΤΗΣ ΛΟΞΗΣ ΚΑΜΨΗΣ (SKEW BENDING THEORY)

Όπως ήδη έχει αναφερθεί η ελαστική θεωρία ενώ περιγράφει με επιτυχία την συμπεριφορά των στοιχείων από σκυρόδεμα στην ελαστική περιοχή, αποτυγχάνει να προσεγγίσει την τελική τους αντοχή σε στρέψη. Ομοίως αποτυγχάνει και η πλαστική θεωρία η οποία επιπλέον εισάγει και κάποιες παραδοχές που δεν έχουν αποδειχθεί. Υποπτεύεται έτσι κανείς ότι οι θεωρίες αυτές δεν χρησιμοποιούν το σωστό κριτήριο αστοχίας για το σκυρόδεμα.

Αν μελετήσει κανείς τον τρόπο με τον οποίο αστοχεί ένα δοκάρι από σκυρόδεμα παρατηρεί ότι δημιουργείται μια ρωγμή στη μία πλάγια πλευρά η οποία έχει κλίση 45° περίπου και η οποία διασχίζει όλη την πλευρά. Αυτή κατόπιν επεκτείνεται στην επάνω όψη την οποία διασχίζει καθέτως προς τις ακμές. Μετά επεκτείνεται στην τρίτη πλευρά υπό γωνία 45° και φορά παράλληλη και αντίθετη από αυτή που είχε στην πρώτη πλευρά και τέλος παρουσιάζεται στην τελευταία, κάτω, πλευρά με διεύθυνση κάθετα προς τις ακμές.

Ο τρόπος και η μορφή με την οποία εμφανίζεται και διαδίδεται η ρωγμή οδηγεί στην παρατήρηση ότι η αστοχία τελικώς επέρχεται από κάποιες μορφές, λανθάνουσας κάμψης που δημιουργείται από τον τρόπο παραμόρφωσης της δοκού κατά την φόρτισή της.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4
ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Για τον πειραματικό έλεγχο κατασκευάστηκαν τέσσερα δοκίμια πλακοδοκών από οπλισμένο σκυρόδεμα. Το μήκος των δοκιμών είναι 1100 mm με διαστάσεις $b/h/b_f/h_f = 100/270/500/70$ σε mm. Σε όλες τις πλακοδοκούς χρησιμοποιήθηκε διαμήκης οπλισμός 8Φ6 και σε κάθε άκρο τους εγκάρσιος οπλισμός χαλύβδινων συνδετήρων 5Φ8/6. Τα δοκίμια BT-CFRP-4 και BT-CFRP-5 ενισχύθηκαν με μια στρώση ανθρακοϋφάσματος με τη μορφή συνεχόμενων φύλλων στα πλαϊνά του κορμού της διατομής T σε όλο το μήκος της δοκού, ενώ τα δοκίμια, μάρτυρες, BT-V6 και BT-V7 δεν ενισχύθηκαν. Τα στάδια κατασκευής των δοκιμών είναι τα ακόλουθα:

4.1 ΣΥΝΑΡΜΟΛΟΓΗΣΗ ΚΑΛΟΥΠΙΩΝ, ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΚΛΩΒΩΝ, ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΥ

Συναρμολόγηση καλουπιών :

Αφού επιλέχθηκε ο χώρος στο εργαστήριο και καθαρίστηκε, έτσι ώστε να έχουμε όσο το δυνατόν μία επίπεδη και λεία επιφάνεια, συναρμολογήθηκαν τα καλούπια, λαδώθηκαν και τοποθετήθηκαν πάνω σε πολυμερική μεμβράνη (Nylon), η οποία προσφέρει μία πιο υδατοστεγανή επιφάνεια και δεν θα επηρεάζει τα τελικά αποτελέσματα των μετρήσεων.

Εικόνα 2. Καλούπι μετά τη συναρμολόγηση



Κατασκευή κλωβών :

- Δημιουργία διαμήκους χαλύβδινου σπλισμού από κατηγορίες χάλυβα S220 (λείος χάλυβας Φ6).
- Δημιουργία εγκάρσιου σπλισμού(συνδετήρες) από κατηγορία χάλυβα S500 (Φ8).
- Σύνδεση των χαλύβων για την δημιουργία κλωβού (σιδέρωμα)

Εικόνα 3. Πάγκος για την διαμόρφωση σίδερων (Μπρατσόλι)



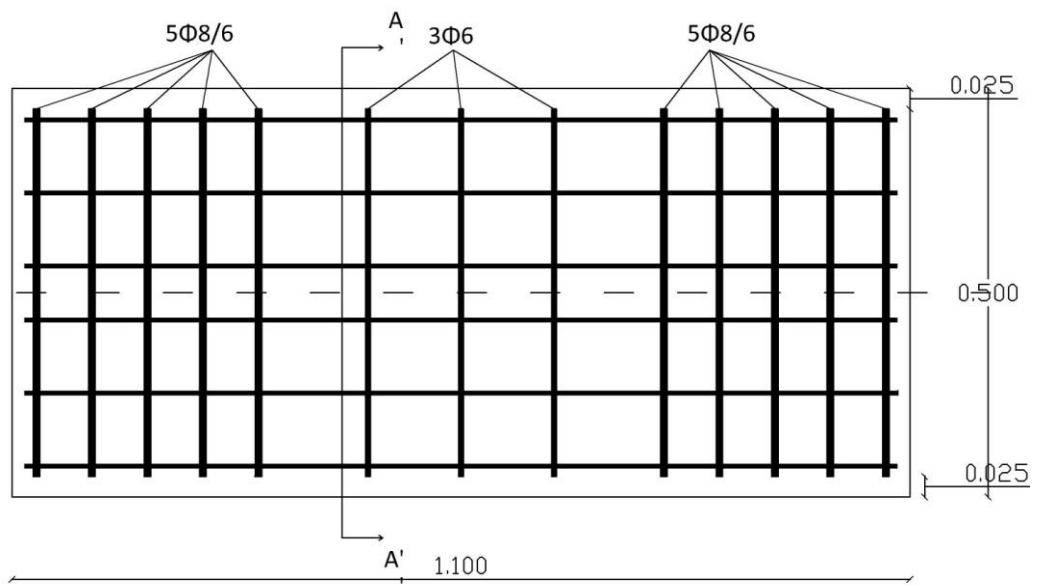
Εικόνα 4. Κλωβός έτοιμος να τοποθετηθεί μέσα στο καλούπι



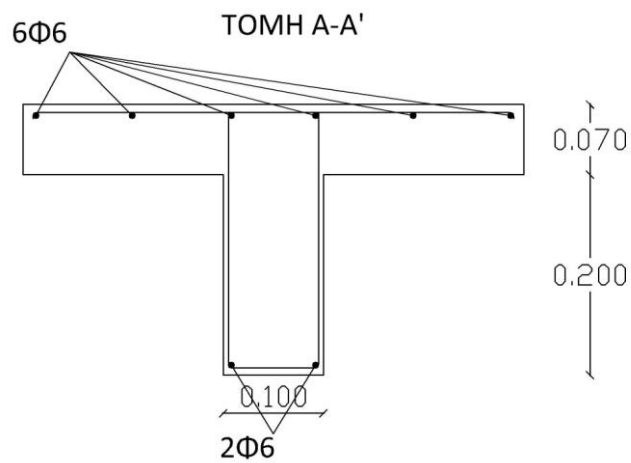
Εικόνα 5. Σιδέρωμα καλουπιών



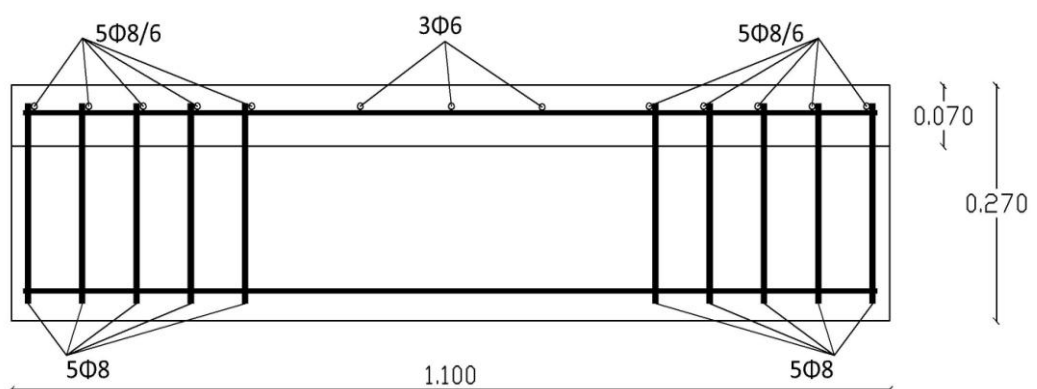
Σχήμα 3. Κάτοψη πλακοδοκού με σπλισμό



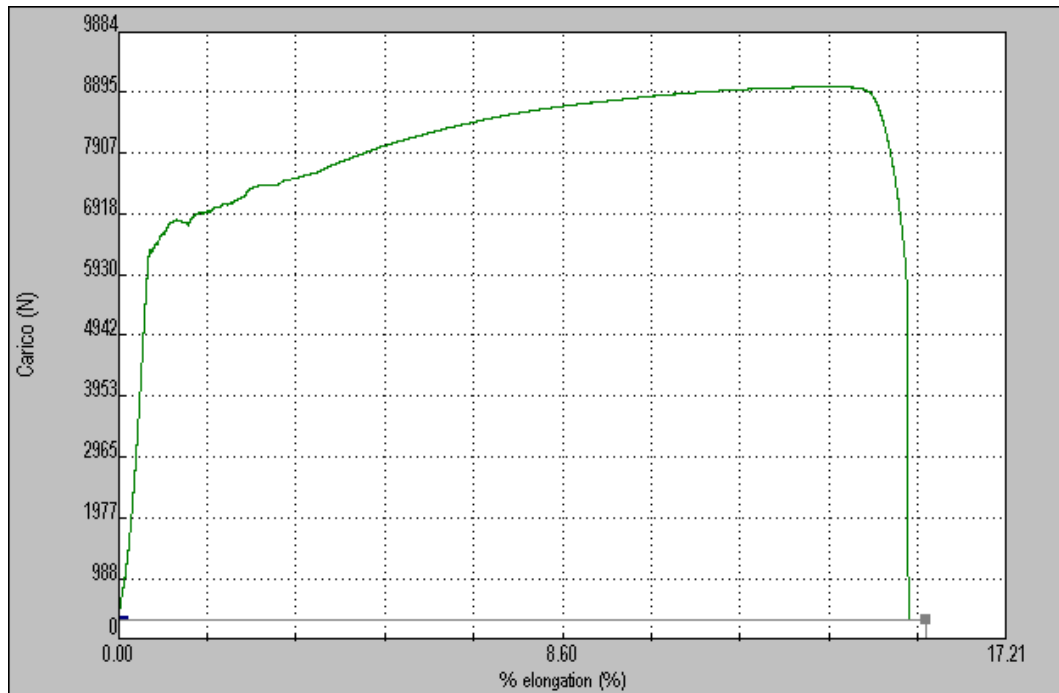
Σχήμα 4. Τομή με σπλισμό



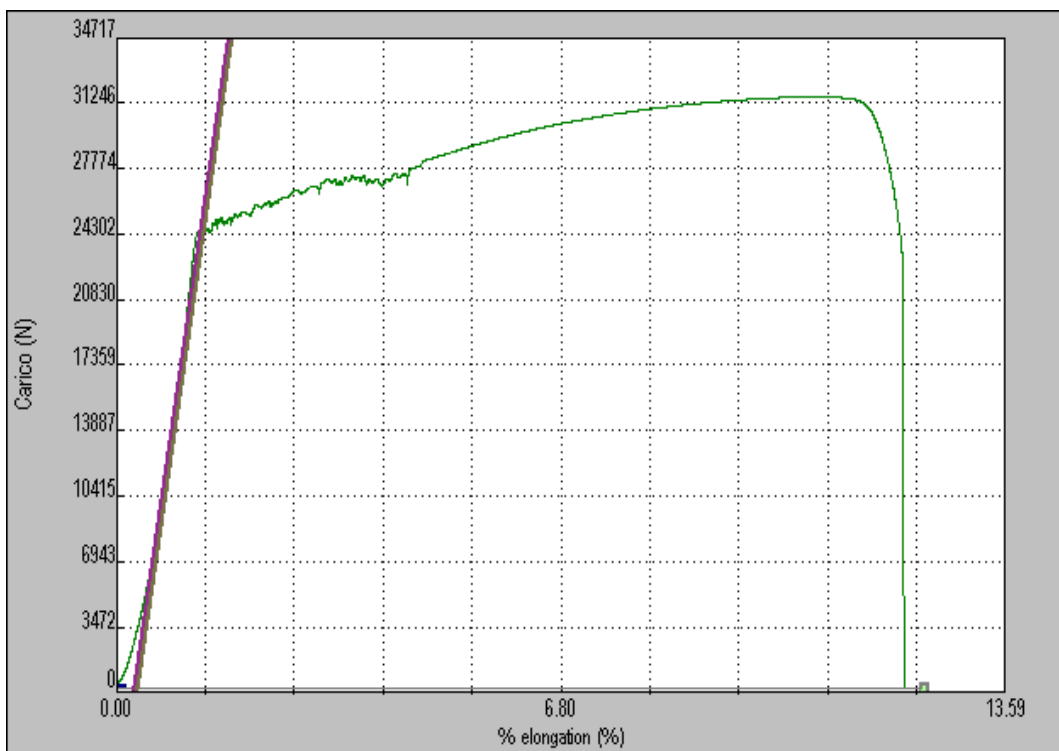
Σχήμα 5. Πλάγια όψη πλακοδοκού με σπλισμό



Από την πειραματική μηχανή εφελκυσμού Galdabini του εργαστηρίου προέκυψε ότι, για ράβδο χάλυβα Φ6 (S220) το διάγραμμα P(N)- $\Delta l/l_0$ είναι:



Για ράβδο χάλυβα Φ8 (S500) το διάγραμμα P(N)- $\Delta l/l_0$ είναι:



Επομένως η τάση θραύσης ράβδου του χρησιμοποιηθέντος λείου χάλυβα Φ6 είναι:

$$\sigma_{\max} = 8895 \text{ N} / ((\pi \times 6^2 \text{ mm}^2) / 4) = 314.75 \text{ N/mm}^2$$

Η τάση θραύσης ράβδου του χρησιμοποιηθέντος χάλυβα Φ8 είναι:

$$\sigma_{\max} = 31246 \text{ N} / ((\pi \times 8^2 \text{ mm}^2) / 4) = 621.9 \text{ N/mm}^2$$

4.2 ΣΚΥΡΟΔΕΤΗΣΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ, ΣΥΜΠΥΚΝΩΣΗ ΤΟΥΣ ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

Μετά το πέρας των εργασιών, την προετοιμασία του χώρου και την κατασκευή των καλουπιών ήμασταν έτοιμοι για τη σκυροδέτηση. Για τις πλακοδοκούς ΒΤ - V6 και ΒΤ - CFRP4, χρησιμοποιήσαμε εργοστασιακό (έτοιμο) σκυρόδεμα της εταιρίας Lafarge, κατηγορίας C20/25. Το σκυρόδεμα που χρησιμοποιήθηκε στις πλακοδοκούς ΒΤ - V7 και ΒΤ - CFRP5 φτιάχτηκε στο εργαστήριο και ήταν ίδιας κατηγορίας με το εργοστασιακό. Σε πρώτη φάση, έγινε η σκυροδέτηση των δοκιμών με το σκυρόδεμα της Lafarge. Αφού παραγγείλαμε την ποσότητα και την κατηγορία του σκυροδέματος που χρειαζόμασταν, έγινε προσεκτική σκυροδέτηση των καλουπιών έτσι ώστε να μη γίνει οποιαδήποτε ζημιά (Σχήμα 6). Για την καλύτερη συμπύκνωση του σκυροδέματος χρησιμοποιήθηκε δονητής, ώστε να αποβληθεί ο αέρας που έχει εγκλωβιστεί μέσα του. Έτσι εξασφαλίστηκε η συνεργασία με τα σίδερα και αποτράπηκε η δημιουργία ευπαθών κοιλοτήτων. Στη συνέχεια, αφήσαμε τα δοκίμια να «ωριμάσουν». Σε δεύτερη φάση, κάποιες ημέρες μετά την σκυροδέτηση, ξεκίνησε η διαδικασία δημιουργίας σκυροδέματος στο εργαστήριο. Η σύνθεση του σκυροδέματος περιελάμβανε τις εξής αναλογίες:

Σύνθεση

Χαλίκι: 93,76 kg

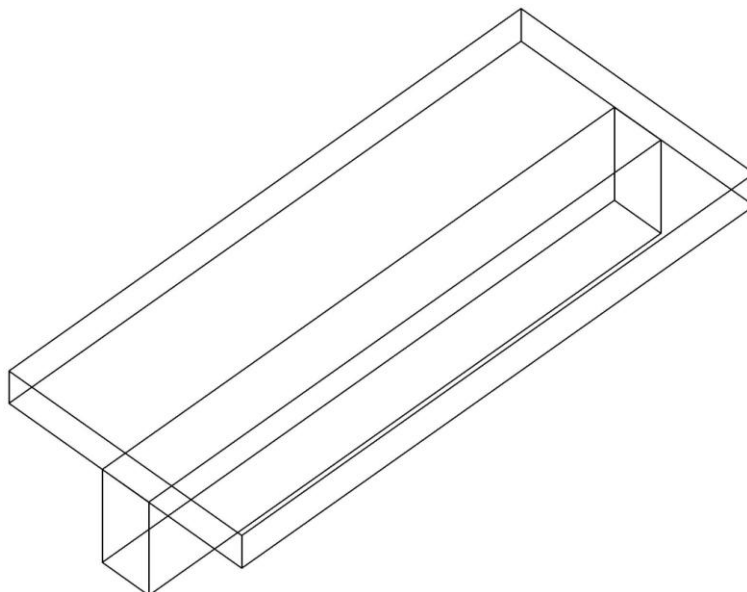
Γαρμπίλι: 24,83 kg

Νερό: 26,53 kg

Άμμος: 141,3kg

Τσιμέντο: 41,37 kg

Σχήμα 6. Μοντέλο Δοκιμίου



Μετά τη κοκκομέτρηση των αδρανών υλικών, του τσιμέντου και του νερού, τα υλικά τοποθετήθηκαν στον αναμικτήρα. Η σειρά τοποθέτησής τους έγινε με βάση το μέγεθος του μεγαλύτερου κόκκου, δηλαδή πρώτα τοποθετήθηκε στον αναμικτήρα το υλικό με το μεγαλύτερο κόκκο. Αφού έγινε η ανάμιξη των υλικών και το μίγμα «έδεσε», σκυροδετήθηκαν τα δοκίμια με τη χρήση δονητή για την καλύτερη συμπύκνωση τους, όπως αναφέρθηκε και πιο πάνω. Μετά τη σκυροδέτηση των πλακοδοκών αφήσαμε τα δοκίμια να «ωριμάσουν».

Σύμφωνα με το άρθρο 10 του Κανονισμού Τεχνολογίας Σκυροδέματος, το σκυρόδεμα για να «ωριμάσει» σωστά πρέπει να βρίσκεται σε υγρό περιβάλλον. Τα δοκίμια οφείλουν να είναι υγρά τουλάχιστον τις πρώτες επτά ημέρες. Έτσι είτε σκεπάζονται με βρεγμένες λινάτσες (χοντρά πανιά), είτε καταβρέχονται συχνά. Με αυτή τη διαδικασία αποφεύγονται:

- ανεπιθύμητες ρηγματώσεις λόγω πρόωρης πήξης του σκυροδέματος
- χαμηλές αντοχές κοντά στην επιφάνεια
- χαμηλή ανθεκτικότητα σε καιρικές επιδράσεις (μειωμένες αντοχές)
- υψηλή διαπερατότητα σε νερό

Σε 7 ημέρες γίνεται η διαδικασία του ξεκαλουπώματος, αφού το σκυρόδεμα έχει πάρει περισσότερο από το 70% της χαρακτηριστικής του αντοχής, ενώ σε 28 ημέρες θα έχει πάρει πρακτικά το σύνολο της αντοχής του.

Για τον έλεγχο της ποιότητας του σκυροδέματος έγινε δειγματοληψία τριών κυβικών δοκιμίων για το έτοιμο σκυρόδεμα και τεσσάρων κυβικών δοκιμίων για το εργαστηριακό σκυρόδεμα. Σύμφωνα με τις ισχύουσες διατάξεις του άρθρου 13 του Κανονισμού Τεχνολογίας Σκυροδέματος (ΦΕΚ 315/17-4-97), για ημερήσια διαστρωμένη ποσότητα σκυροδέματος μέχρι 20m³, γίνεται λήψη τριών κυβικών δοκιμίων. Οι μήτρες που χρησιμοποιήθηκαν για τη λήψη των κύβων είχαν διαστάσεις 150X150mm και πριν τη σκυροδέτηση τους καθαρίστηκαν και λαδώθηκαν.

Εικόνα 6. Βαρέλα της εταιρίας Lafarge έξω από το εργαστήριο σκυροδέματος



Εικόνα 7. Σκυροδέτηση δοκιμίων με χρήση δονητή



Εικόνα 8. Δοκίμια μετά τη σκυροδέτηση έτοιμα να σκεπαστούν με λινάτσες για επτά ημέρες.



Εικόνα 9. Κύβιοι ελέγχου ποιότητας σκυροδέματος



ΠΙΝΑΚΑΣ 4. Αποτελέσματα θραύσης κυβικών δοκιμών εργοστασιακού σκυροδέματος της εταιρίας Lafarge

Δοκίμιο	Διαστάσεις (mm)	Ένδειξη Φορτίου (kN)	Τάση θραύσεως (kN/m ²)
No. 1 Δοκίμιο	150x151	812 kN	35.85 MPa
No. 2 Δοκίμιο	150x150	775 kN	34.40 MPa
No. 3 Δοκίμιο	150x152	788 kN	34,56 MPa

Προσδιορισμός Κατηγορίας Σκυροδέματος

Για τη λήψη τριών κύβων έχουμε:

ΚΡΙΤΗΡΙΟ Ε

$x_{\mu} > f_{ck} + 3.7 \text{ MPa}$, όπου $x = \text{average} = 34.94 \text{ MPa}$

$x_i > f_{ck}$

Για σκυρόδεμα C20/25 έχουμε:

$34,94 \text{ MPa} > 25 + 3.7 \text{ MPa}$

$34.94 \text{ MPa} > 28.70 \text{ MPa}$ Ισχύει

και για $x_i > f_{ck}$ έχουμε :

$35.85 \text{ MPa} > 25 \text{ MPa}$

$34.40 \text{ MPa} > 25 \text{ MPa}$

$34.56 \text{ MPa} > 25 \text{ MPa}$ Ισχύει

Άρα το σκυρόδεμα μας είναι κατηγορίας **C20/25**.

ΠΙΝΑΚΑΣ 5. Αντοχή Σκυροδέματος

Δοκίμια Σκυροδέματος	Μέση θλιπτική Αντοχή	Κατηγορία
Πλακοδοκοί	34.94 MPa	C20/25

ΠΙΝΑΚΑΣ 6. Αποτελέσματα θραύσης κυβικών δοκιμών εργαστηριακού σκυροδέματος

Δοκίμιο	Διαστάσεις (mm)	Ένδειξη Φορτίου (kN)	Τάση θραύσεως (kN/m ²)
No. 1 Δοκίμιο	150x150	340 kN	15.10 MPa
No. 2 Δοκίμιο	151x150	516 kN	22.80 MPa
No. 3 Δοκίμιο	151x150	363 kN	16.10 MPa
No. 4 Δοκίμιο	150x150	486 kN	21.60 MPa

Προσδιορισμός Κατηγορίας Σκυροδέματος

Για την ικανοποίηση του κριτηρίου E θα πρέπει να επιλεχτούν τρεις από τους τέσσερις κύβους που ελήφθησαν. Οι κύβοι αυτοί θα είναι: No. 1 Δοκίμιο, No. 2 Δοκίμιο, No. 4 Δοκίμιο.

ΚΡΙΤΗΡΙΟ E

$\chi_{\mu} > f_{ck} + 3.7 \text{ MPa}$, όπου $\chi_{\mu} = \text{average} = 19.83 \text{ MPa}$

$\chi_i > f_{ck}$

Για σκυρόδεμα C20/25 έχουμε:

$19.83 \text{ MPa} > 25 + 3.7 \text{ MPa}$

$19.83 \text{ MPa} < 28.70 \text{ MPa}$ Δεν Ισχύει

και για $\chi_i > f_{ck}$ έχουμε :

$15.10 \text{ MPa} < 25 \text{ MPa}$

$22.80 \text{ MPa} < 25 \text{ MPa}$

$21.60 \text{ MPa} > 25 \text{ MPa}$ Δεν Ισχύει

Άρα το σκυρόδεμα δεν είναι κατηγορίας **C20/25**.

Μετά από ελέγχους βρέθηκε ότι το σκυρόδεμα είναι κατηγορίας C12/15 αφού ικανοποιείται η σχέση:

$$x_{\mu} > f_{ck} + 3.7 \text{ MPa}$$

$$19.83 \text{ MPa} > 15 + 3.7 \text{ MPa}$$

$$19.83 \text{ MPa} > 18.70 \text{ MPa} \text{ Ισχύει}$$

και για $x_i > f_{ck}$ έχουμε :

$$15.10 \text{ MPa} > 15 \text{ MPa}$$

$$22.80 \text{ MPa} > 15 \text{ MPa}$$

$$21.60 \text{ MPa} > 15 \text{ MPa} \text{ Ισχύει}$$

Άρα το σκυρόδεμα είναι κατηγορίας **C12/15**.

ΠΙΝΑΚΑΣ 7. Αντοχή Εργαστηριακού Σκυροδέματος

Δοκίμια Σκυροδέματος	Μέση θλιπτική Αντοχή	Κατηγορία
Πλακοδοκοί	19.83 MPa	C12/15

Τα αποτελέσματα του ποιοτικού ελέγχου έδειξαν πως οι αντοχές του εργαστηριακού σκυροδέματος ήταν αρκετά μειωμένες (C12/15), σε σύγκριση με αυτές που είχαν υπολογιστεί αρχικά (C20/25). Οι μειωμένες αντοχές οφείλονταν, κατά κύριο λόγο στο τσιμέντο και στα αδρανή υλικά. Λόγω έλλειψης εργαστηριακού εξοπλισμού, εξαιτίας έλλειψης χρημάτων, τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για τη δημιουργία του σκυροδέματος ήταν πολύ καιρό αποθηκευμένα στον εργαστηριακό χώρο, με αποτέλεσμα η ποιότητα τους να είναι αρκετά χαμηλή.

4.3 ΕΠΙΚΟΛΛΗΣΗ ΥΦΑΣΜΑΤΩΝ ΣΤΙΣ ΠΛΑΚΟΔΟΚΟΥΣ

Χαρακτηριστικά Ανθρακοϋφάσματος

Το ύφασμα από ινοπλισμένο πολυμερές που χρησιμοποιήθηκε ως εξωτερικός διαμήκης σπλισμός είχε ίνες άνθρακα κατά τη μία διεύθυνση με πάχος ίσο με $t_f=0,131\text{mm}$ ανά φύλλο (βασισμένο σε συνολικό περιεχόμενο άνθρακα). Επικολλήθηκε στα δοκίμια ως διαμήκης σπλισμός, έτσι ώστε η διεύθυνση των ισχυρών ινών του να είναι κάθετη στον εγκάρσιο άξονα της δοκού. Σύμφωνα με τις προδιαγραφές του προμηθευτή Sika, το μέτρο ελαστικότητας, η μέγιστη εφελκυστική αντοχή και η μέγιστη παραμόρφωση θραύσης των ινών είναι: $E_f=234\text{GPa}$, $f_{fu}=4300\text{MPa}$, $\varepsilon_{fu}=1,8\%$, αντίστοιχα.

Χαρακτηριστικά Εποξειδικής Κόλλας

Για την επικόλληση των φύλλων του σύνθετου υλικού χρησιμοποιήθηκε ειδική εποξειδική κόλλα (Sikadur-330) με πυκνότητα $1.300\text{kg/m}^3 (+, - 100\text{kg/m}^3)$, μέτρο ελαστικότητας 3.800MPa (καμπτικό) και 4.500MPa (εφελκυστικό) και εφελκυστική αντοχή 30MPa . Η κόλλα αποτελείται από δύο συστατικά, συστατικό A: ρητίνη χρώματος λευκό και συστατικό B: σκληρυντής χρώματος γκρι. Η αναλογία της ανάμιξης του συστατικού A προς το συστατικό B είναι 4:1 κατά βάρος και το χρώμα της θα είναι ανοιχτό γκρι.

Διαδικασία Τοποθέτησης Υφασμάτων

Εικόνα 10. Τοποθέτηση υφασμάτων με τη χρήση ρολού στο Εργαστήριο Σκυροδέματος του Τ.Ε.Ι.



Το υπόστρωμα καθαρίζεται επιμελώς από χαλαρά, τμήματα, σοβάδες, χρώματα, κλπ και στη συνέχεια τρίβεται καλά με τροχό. Τυχόν εναπομένουσες ανωμαλίες συμπληρώνονται με επισκευαστικό υλικό. Αναμιγνύεται η ρητίνη με το σκληρυντή με τη βοήθεια αναδευτήρα προσαρτημένο σε ηλεκτρικό αναμικτήρα χαμηλής

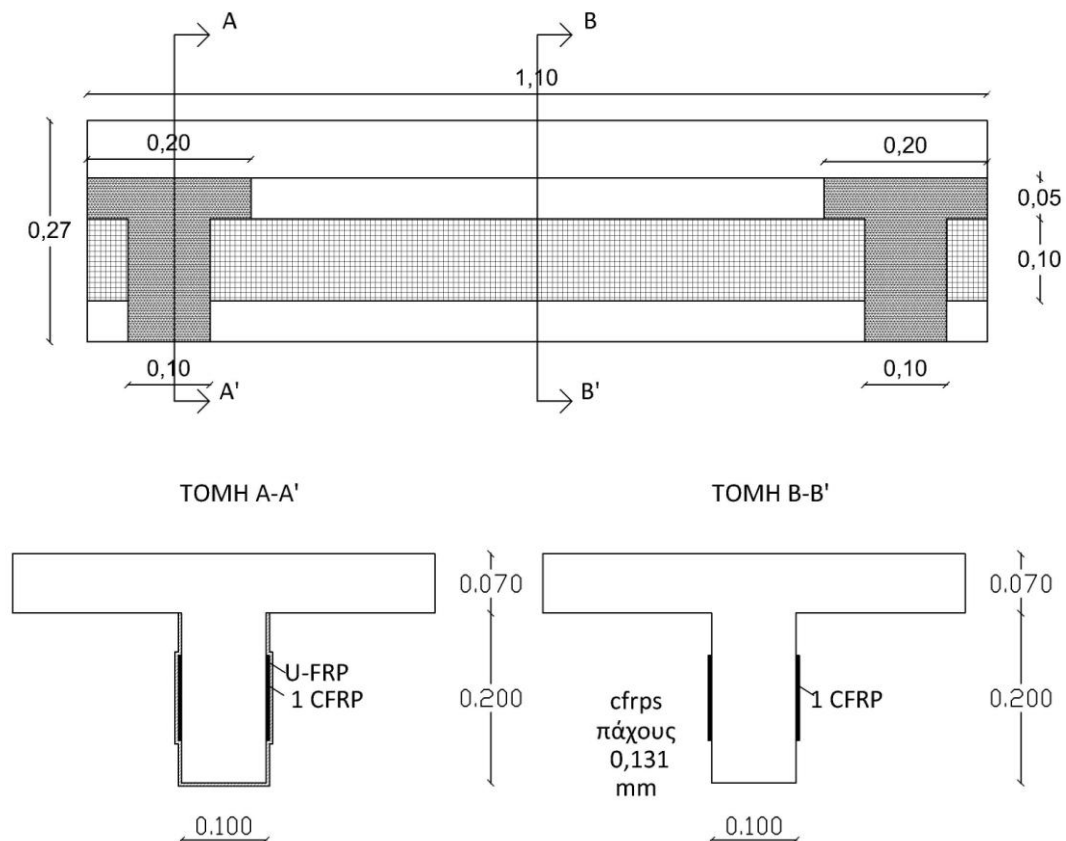
ταχύτητας για τουλάχιστον 3 λεπτά μέχρις ότου το υλικό να αποκτήσει λεία υφή και ομοιόμορφο γκρι χρώμα. Στη συνέχεια αδειάζεται όλο το μίγμα σε ένα καθαρό δοχείο και ανακατεύεται περίπου για ένα λεπτό σε χαμηλές ταχύτητες ώστε να ελαχιστοποιηθεί ο εγκλωβισμός αέρα. Εφαρμόζεται η ρητίνη Sikadur-330 στο προετοιμασμένο υπόστρωμα με τη βοήθεια πλαστικού ρολού εμποτισμού Sika. Στη συνέχεια το ύφασμα κόβεται με ειδικό ψαλίδι στις απαιτούμενες διαστάσεις, τοποθετείται προσεκτικά, καλά τεντωμένο στη νωπή

επίστρωση και πατιέται σχολαστικά με το ρολό παράλληλα με τη διεύθυνση των ινών, μέχρι να συμπιεστεί η ρητίνη ανάμεσα στη πλέξη των ινών και κατανεμηθεί ομοιόμορφα σε όλη την επιφάνεια υφάσματος. Κατά τη διάρκεια της διάστρωσης για να αποφευχθούν τσακίσματα και πτυχώσεις του υφάσματος SikaWrap πρέπει να μην ασκείται υπερβολική δύναμη. Ο χρόνος πλήρης ωρίμανσης των ενισχυμένων πλακοδοκών διήρκησε 7 ημέρες, λόγω της θερμοκρασίας περιβάλλοντος που ήταν 10°C.

Εικόνα 11. Σωστή τοποθέτηση, αγκύρωση U τενωμένου υφάσματος



Σχήμα 7. Πλάγια όψη - Ενίσχυση πλακοδοκού και τοποθέτηση αγκυρώσεως CFRP σε σχήμα U



4.4 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ

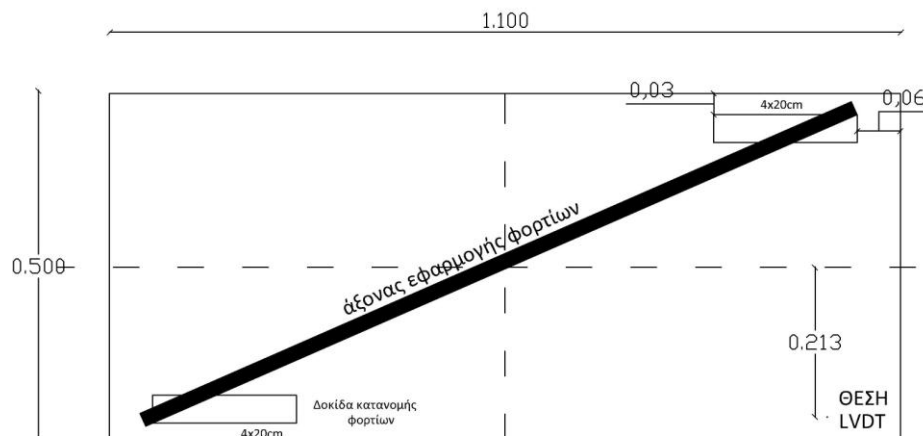
Η καταπόνηση των πλακοδοκών πραγματοποιήθηκε στη μηχανή κάμψης Toni Technik του εργαστηρίου (Εικόνα 12). Οι πλακοδοκοί τοποθετήθηκαν αμφιέριστα και στηρίχθηκαν με διαμήκη κύλιστρα, κοντά στα άκρα τους κατά την διεύθυνση του αξονά τους. Η φόρτιση κατέστη δυνατή, με τοποθέτηση του «μαχαιριου» λόξα ως προς τον άξονα της δοκού. Τα άκρα των πλακοδοκών είχαν συνδετήρες 5Φ8/6, ώστε να μην υπάρχει αστοχία σε διάτμηση, ενώ το μεσαίο τμήμα της πλακοδοκού που ήταν υπό εξέταση, δεν είχε εγκάρσιο οπλισμό. Για την μέτρηση του επιβαλλόμενου φορτίου, χρησιμοποιήθηκε ηλεκτρικό δυναμόμετρο (load cell) μέγιστου φορτίου 150 kN και ακρίβειας 0.05 kN. Η μέτρηση των βυθίσεων των δοκιμών, έγινε με την χρήση ενός ηλεκτρικού γραμμικού βελόμετρου (LVDT) μέγιστης διαδρομής 100 mm και ακρίβειας 0.01 mm, που τοποθετήθηκε ως εξής:

Εικόνα 12. Μηχανή κάμψης Toni - Technik



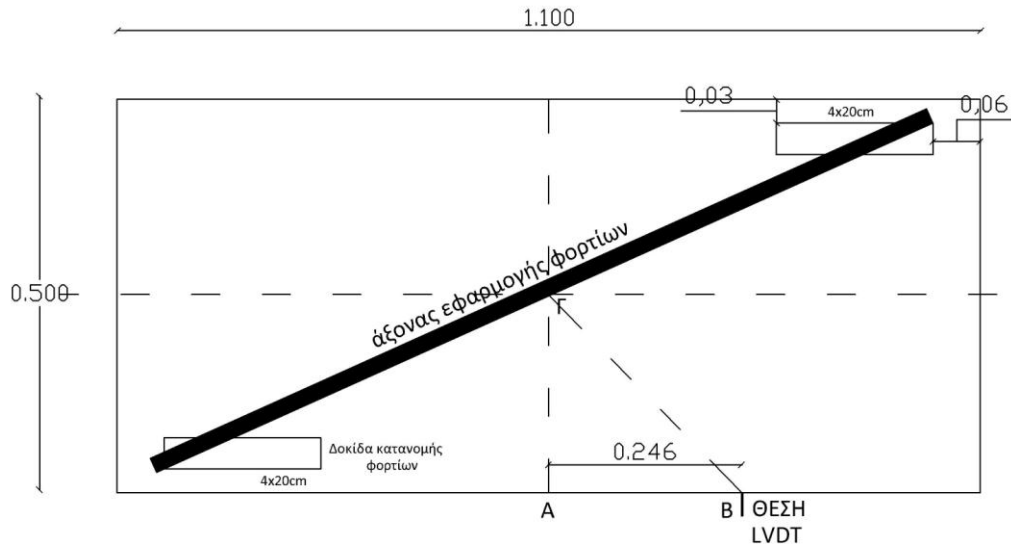
(α) Για τις πλακοδοκούς BT – V6 και BT – CFRP4, το βελόμετρο τοποθετήθηκε απέναντι από το σημείο φόρτισης, (Σχήμα 8), σε απόσταση 0.213 m από τον άξονα της πλακοδοκού και κάθετα στο άνω πέλμα της.

Σχήμα 8. Κάτοψη πλακοδοκού

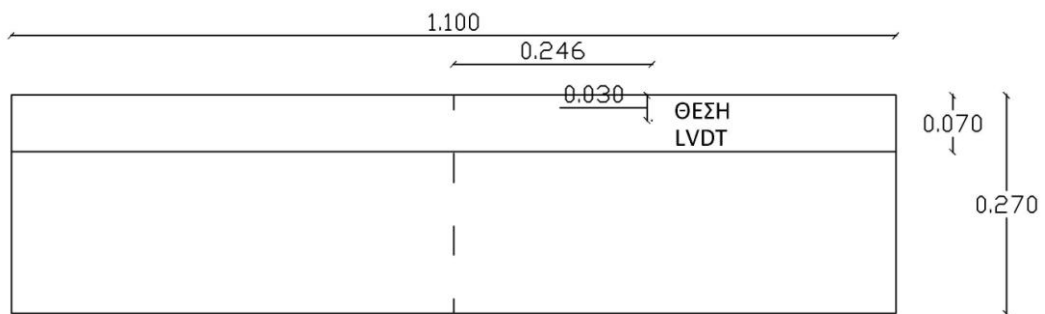


(β) Για τις πλακοδοκούς ΒΤ – V7 και ΒΤ – CFRP5, το βελόμετρο τοποθετήθηκε στα πλάγια των πλακοδοκών, απέναντι από το σημείο φόρτισης, παράλληλα στο άνω πέλιμα της πλακοδοκού και σε απόσταση 0.246 m από το κέντρο της (Σχήμα 9, Σχήμα 10).

Σχήμα 9. Κάτοψη πλακοδοκού



Σχήμα 10. Πλάγια όψη πλακοδοκού



Η φόρτιση πραγματοποιήθηκε με σταθερή αύξηση του φορτίου μέχρι τη στιγμή θραύσης. Ακολούθως, συνεχίσαμε μετρώντας σταθερά με το ηλεκτρικό βελόμετρο παραμορφώσεις, οι οποίες αυξανόντουσαν, μέχρι να φτάσουμε σε σημαντική πτώση του φορτίου.

4. 5 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΤΩΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

Η γώνια στροφής (ϕ) των πλακοδοκών υπολογίστηκε με βάση τις κατακόρυφες μετατοπίσεις (w), που κατεγράφησαν κατά τις πειραματικές δοκιμές με την βοήθεια του LVDT και η ροπή στρέψης (T) υπολογίστηκε, με βάση τα επιμέρους κατακόρυφα φορτία που κατεγράφησαν.

(α) Για τις πλακοδοκούς BT – V6 και BT – CFRP4, χρησιμοποιήθηκαν οι εξής τύποι:

$$\tan \phi = w / e', \quad e' = 0.213 \text{ m}$$

$$T = P/ 2 * e \text{ kNm, όπου } e = (0.5 / 2 - 0.05) \text{ m.}$$

(β) Για τις πλακοδοκούς BT – V7 και BT – CFRP5, χρησιμοποιήθηκαν οι εξής τύποι:

$$\tan \theta = (A\Gamma + w) / (AB)$$

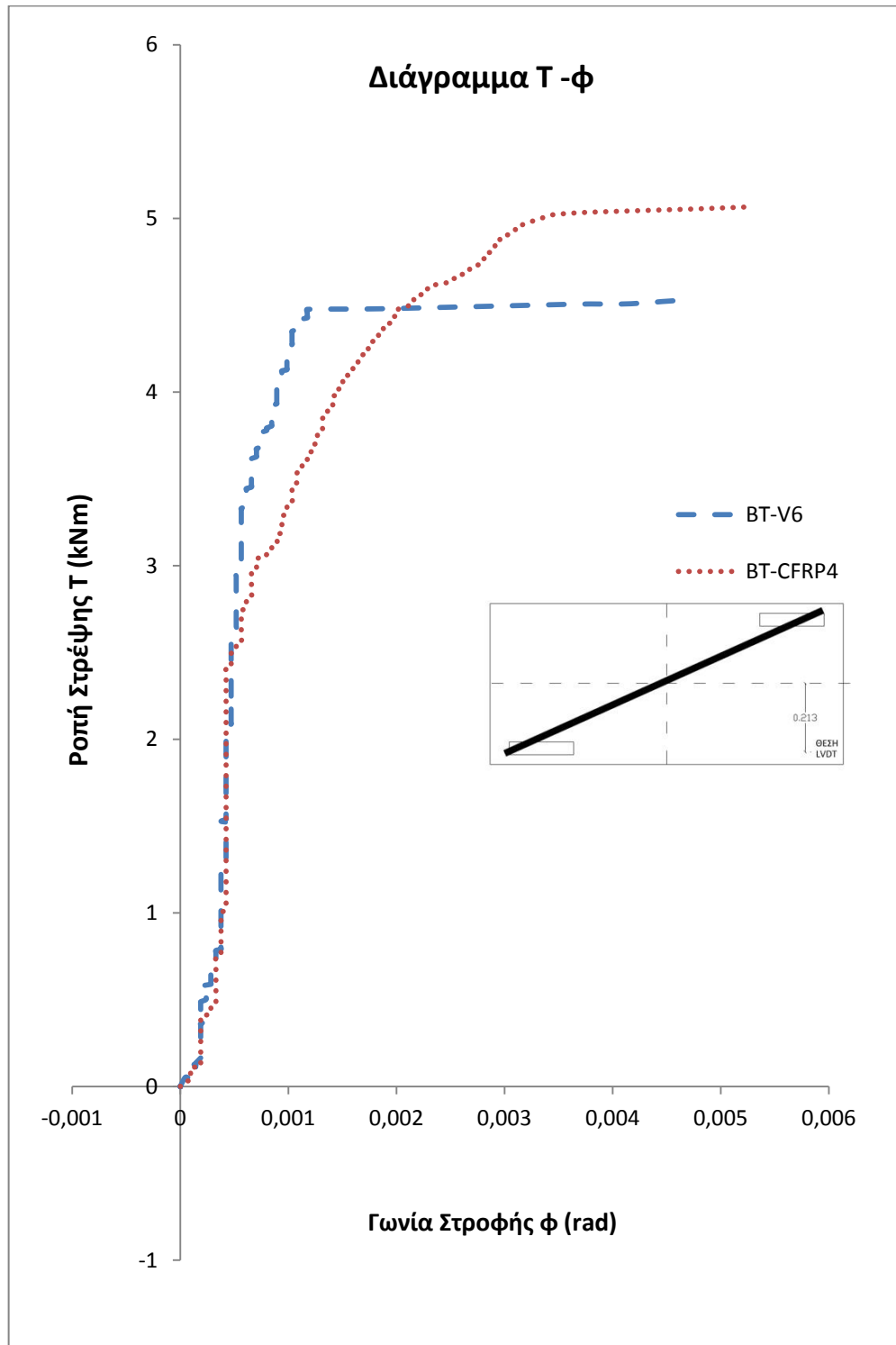
$$T = P/2 * (A\Gamma - 0.05) \text{ kNm}$$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

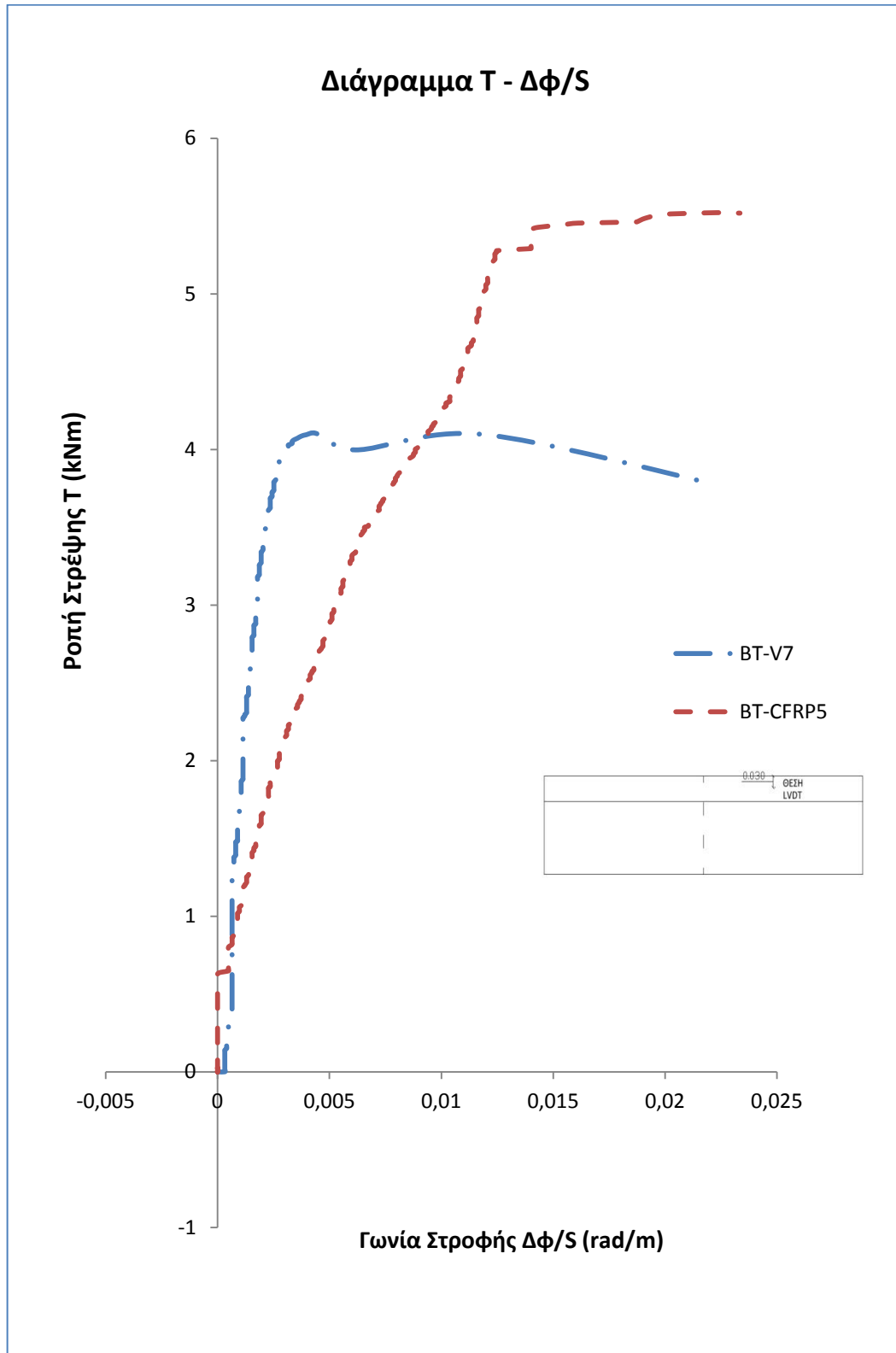
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

5.1 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ

Διάγραμμα 1. Μεταβολή ροπής στρέψης T συνάρτηση της γωνίας θ για τα δοκίμια BT – V6 και BT – CFRP4 σκυροδετημένα με εργοστασιακό σκυρόδεμα C20/25 (τοποθέτηση LVDT κατακόρυφα στην πλακοδοκό)



Διάγραμμα 2. Μεταβολή ροπής στρέψης T συνάρτηση της γωνίας θ για τα δοκίμια BT – V7 και BT – CFRP5 σκυροδετημένα με εργαστηριακό σκυρόδεμα C12/15 (τοποθέτηση LVDT οριζόντια στην πλακοδοκό)



Από τα διαγράμματα T - φ των πλακοδοκών φαίνεται πως οι ενισχυμένες πλακοδοκοί BT – CFRP4 και BT – CFRP5, ενώ είχαν το ίδιο ποσοστό εγκάρσιου και διαμήκους οπλισμού με τις αντίστοιχες συμβατές οπλισμένες πλακοδοκούς, έδειξαν σαφώς καλύτερη στρεπτική συμπεριφορά καθώς και υψηλότερη αντοχή σε στρέψη. Παρατηρούμε από το πρώτο διάγραμμα, ότι η BT – CFRP4 σημείωσε μικρή αύξηση της στρεπτικής αντοχής σε σχέση με την συμβατή της. Σε αντίθεση, η στρεπτική και η μετελαστική συμπεριφορά (πλαστιμότητα) της ενισχυμένης BT – CFRP5 ήταν ιδιαίτερα βελτιωμένη σε σχέση με την πλακοδοκό ελέγχου BT – V7. Ακόμη παρατηρούμε ότι στο δεύτερο διάγραμμα το LVDT που ήταν οριζόντια τοποθετημένο, έδωσε καλύτερες τιμές και ήταν αρκετά πιο σταθερό, σε σύγκριση με του πρώτου διαγράμματος.

5.2 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Στον Πίνακα 8, δίνονται οι μέγιστες πειραματικές τιμές στρεπτικής ροπής, (T_{max}) και γωνίας στροφής (ϕ_{max}) σύμφωνα με τα παραπάνω διαγράμματα. Ακόμα δίνεται η τιμή της στρεπτικής ροπής T_f , η οποία αντιπροσωπεύει την αύξηση της στρεπτικής αντοχής των ενισχυμένων πλακοδοκών και είναι η διαφορά T_{max} των BT – CFRP4 με BT – V6 και BT – CFRP5 με BT – V7. Τέλος, δίνεται το ποσοστό αύξησης της στρεπτικής αντοχής λόγω των ανθρακοϋφασμάτων και είναι για BT – CFRP4 = 11.70% και για BT – CFRP5 = 34.76%.

ΠΙΝΑΚΑΣ 8. Πειραματικά Αποτελέσματα

Δοκός	T_{max} (kNm)	ϕ_{max} (rad)	T_f (kNm)	Αύξηση της T_{max} λόγω των CFRP	Τοποθέτηση LVDT	Σκυρό- δεμα
BT – V6	4.537	0.005	-----	-----	κατακόρυφα	Lafarge
BT – CFRP4	5.068	0.005	0.531	11.70%	κατακόρυφα	Lafarge
BT – V7	4.097	0.012	-----	-----	οριζόντια	Εργαστ.
BT – CFRP5	5.521	0.022	1.424	34.76%	οριζόντια	Εργαστ.

Στον παραπάνω πίνακα, παρατηρούμε μεγάλο ποσοστό προσαύξησης T_{max} = 34.76% της ενισχυμένης BT – CFRP5 σε σύγκριση με την «virgin» της, BT – V7. Αυτό συνέβη γιατί, το εργαστηριακό σκυρόδεμα που χρησιμοποιήθηκε για την σκυροδέτηση των δυο αυτών πλακοδοκών είχε πολύ χαμηλές αντοχές C12/15, με αποτέλεσμα το ανθρακοϋφάσμα κατά το πείραμα της στρέψης, να παραλάβει μεγάλο μέρος των εφελκυστικών αντοχών και των παραμορφώσεων του σκυροδέματος, επομένως να δείξει και καλύτερη στρεπτική συμπεριφορά. Ακόμη παρατηρούμε, ότι οι πλακοδοκοί BT – V6 και BT – CFRP4 είχαν μικρό ποσοστό αύξησης μέγιστης στρεπτικής ροπής, T_{max} = 11.70%. Αυτό συνέβη γιατί το σκυρόδεμα των δύο αυτών πλακοδοκών ήταν κατηγορίας C20/25, άρα και μεγαλύτερης στρεπτικής αντοχής. Παρατηρούμε πως η συνολική απόκριση της BT – CFRP4 ήταν ελαφρώς βελτιωμένη σε σχέση με την πλακοδοκού ελέγχου BT – V6.

5.3 ΜΟΡΦΕΣ ΑΣΤΟΧΙΑΣ

α) ΒΤ – V6

Κατά τη διαδικασία της στρέψης, οι πρώτες διαγώνιες στρεπτικές ρηγματώσεις εμφανίστηκαν στο μεσαίο τμήμα της πλακοδοκού που ήταν υπό εξέταση και δεν υπήρχε εγκάρσιος σπλισμός. Έχουμε εμφάνιση ρηγματώσεων στα φτερά της ΒΤ – V6, στο μεσαίο τμήμα της και στη συνέχεια στα άκρα των φτερών όπου ασκήθηκαν τα φορτία. Στις Εικόνες 13 και 14 οι εμφανείς ρηγματώσεις τονίστηκαν με πράσινο χρώμα.

Εικόνα 13. Μορφή Αστοχίας ΒΤ - V6 (Πλάγια Όψη Πλακοδοκού)

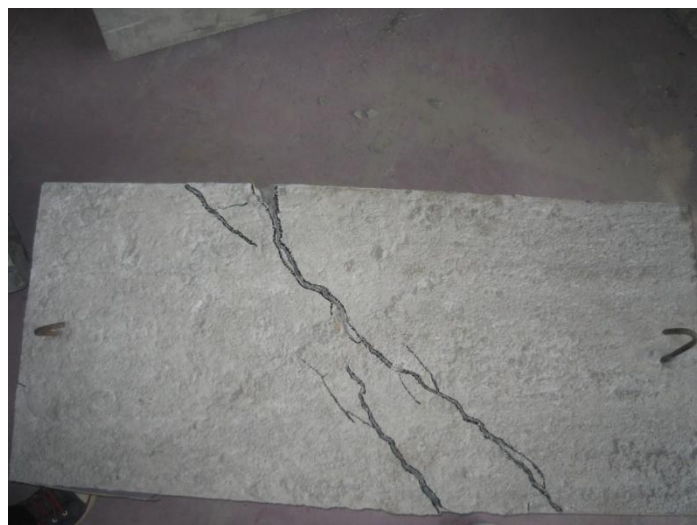


Εικόνα 14. Μορφή Αστοχίας ΒΤ - V6 (Κάτοψη Πλακοδοκού)



β) ΒΤ – CFRP4

Σε αυτή τη πλακοδοκό κατά τη διαδικασία της στρέψης, υπήρξε πρόωρη αποκόλληση (αστοχία) του υφάσματος από τη διεπιφάνεια σκυροδέματος - εποξειδικής κόλλας - ανθρακοϋφάσματος στο μεσαίο τμήμα της πλακοδοκού καθώς και πρόωρη ρηγματώση του (Εικόνα 15). Πιο συγκεκριμένα, οι πρώτες ορατές στρεπτικές ρηγματώσεις εμφανίστηκαν στα φτερά της ΒΤ – CFRP4 και στη συνέχεια, εμφανίστηκαν στρεπτικές ρηγματώσεις στο μεσαίο τμήμα της ΒΤ – CFRP4. Η αποκόλληση του υφάσματος αποδίδεται στην μη καλή εφαρμογή του. Στις Εικόνες 15 και 16 οι εμφανείς ρηγματώσεις τονίστηκαν με μαύρο χρώμα.

Εικόνα 15. Μορφή Αστοχίας (Πλάγια Όψη Πλακοδοκού)**Εικόνα 16.** Μορφή Αστοχίας (Κάτοψη Πλακοδοκού)

γ) ΒΤ – V7

Κατά το πείραμα της στρέψης, το δοκίμιο αστόχησε πλάστιμα εμφανίζοντας τυπικές διαγώνιες στρεπτικές ρηγματώσεις αρχικά στο μεσαίο τμήμα του, όπου δεν ήταν ενισχυμένο με εγκάρσιο σπλισμό και στη συνέχεια εμφάνισε μικρότερες στρεπτικές ρηγματώσεις στα άκρα των φτερών του.

Εικόνα 17. Μορφή Αστοχίας (Πλάγια Όψη Πλακοδοκού)

**δ) ΒΤ – CFRP5**

Στο μεσαίο τμήμα της δοκού, το οποίο βρίσκεται υπό εξέταση, παρατηρήθηκε εμφάνιση τυπικών διαγώνιων στρεπτικών ρηγματώσεων. Κατά τη διάρκεια της υποβολής της πλακοδοκού στη διαδικασία της στρέψης, οι ρηγματώσεις εμφανίστηκαν, αρχικά στα φτερά, στο μεσαίο τμήμα της πλακοδοκού, και τέλος στο μεσαίο τμήμα της δοκού (Εικόνα 18). Σε γενικές γραμμές η ΒΤ – CFRP5 έδειξε ικανοποιητική μετελαστική συμπεριφορά σε σχέση με την ΒΤ – V7.

Εικόνα 18. Μορφή Αστοχίας (Πλάγια Όψη Πλακοδοκού)

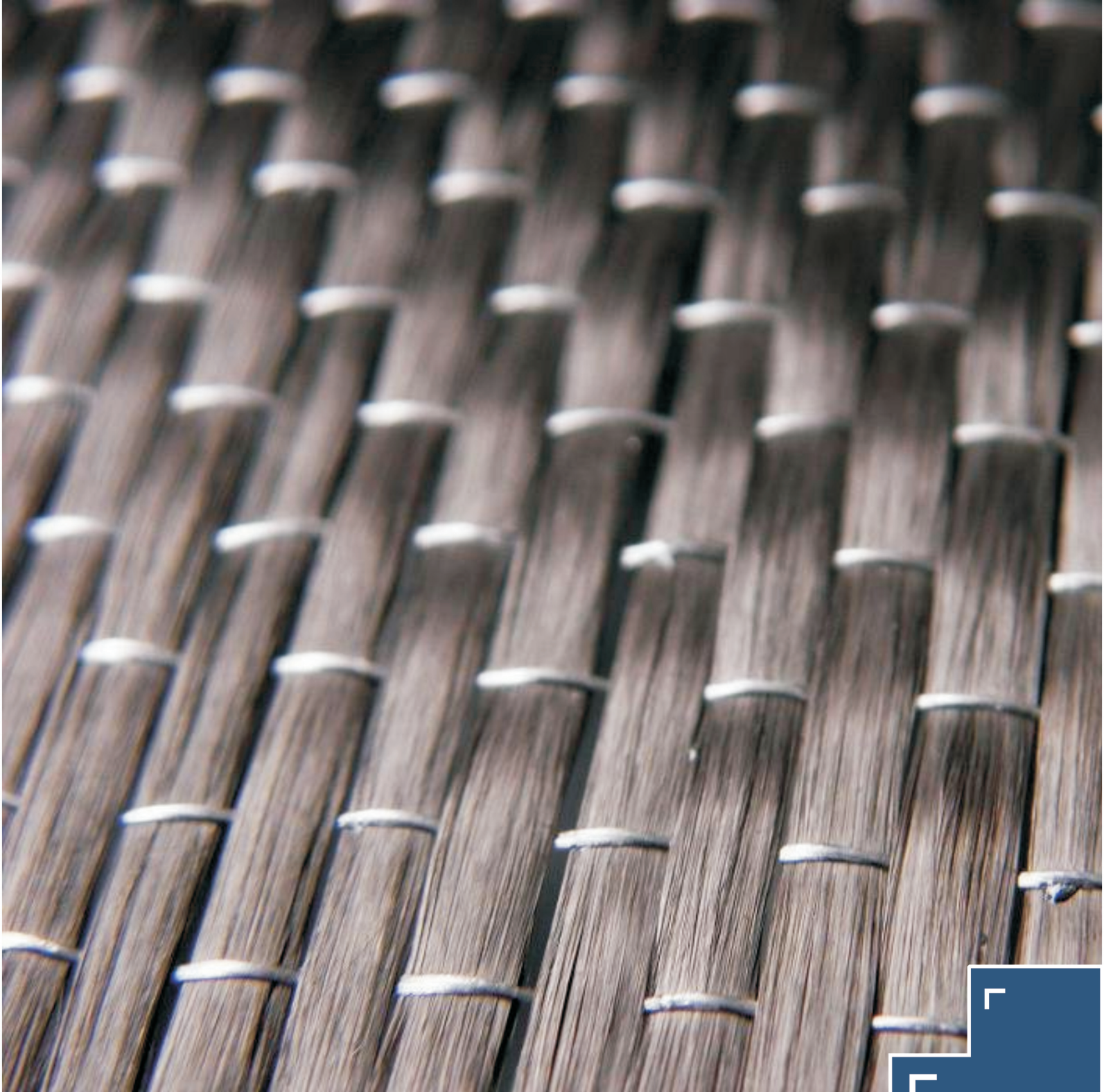


5.4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑ

Τα πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν, πως το ποσοστό αύξησης της στρεπτικής συμπεριφοράς της ενισχυμένης πλακοδοκού ΒΤ – CFRP4 ,κατασκευασμένη από εργοστασιακό σκυρόδεμα, ήταν μειωμένο, 11.70%, λόγω πρόωρης αστοχίας από την αποκόλληση του υφάσματος από την διεπιφάνεια του σκυροδέματος. Σε αντίθεση, η ενισχυμένη ΒΤ – CFRP5, κατασκευασμένη από εργαστηριακό σκυρόδεμα, έδειξε αρκετά αυξημένη στρεπτική συμπεριφορά, 34.76% και αρκετά καλή μετελαστική συμπεριφορά, σε σύγκριση με τη συμβατή της. Επειδή η πλακοδοκός ελέγχου ΒΤ – V7 είχε αρκετά μειωμένη στρεπτική συμπεριφορά, λόγω χαμηλής ποιότητας σκυροδέματος C12/15, στην αντίστοιχη ενισχυμένη ΒΤ – CFRP5 το ανθρακούφασμα παρέλαβε μεγάλο μέρος των εφελκυστικών αντοχών και των παραμορφώσεων του σκυροδέματος. Ακόμη, τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η εφαρμογή και η αγκύρωση των υφασμάτων στην περιοχή του κόμβου είχε ιδιαίτερη σημασία για την επιτυχία της μεθόδου ενίσχυσης.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. **Αθανάσιος Χ. Τριανταφύλλου**, «Ενισχύσεις κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος με σύνθετα υλικά (Ινοπλισμένα Πολυμερή) », Πάτρα 2004, 2^η Έκδοση
2. **Κ.Ε. Χαλιωτής & Ε.Γ. Καλαμαράς** «Στρέψη δοκών και πλακοδοκών από οπλισμένο σκυρόδεμα ενισχυμένων με ανθρακοϋφάσματα», 15^ο Συνέδριο Σκυροδέματος ΤΕΕ, ΕΤΕΚ, Αλεξανδρούπολη, 25 – 27 Οκτωβρίου, 2006
3. **Σ.Η. Δρίτσος**, «Τα σύνθετα υλικά στις κατασκευές», 15^ο Συνέδριο Σκυροδέματος ΤΕΕ, ΕΤΕΚ, Αλεξανδρούπολη, 25 – 27 Οκτωβρίου, 2006
4. **Ι.Γ. Χουλιάρης**, «Κατασκευές οπλισμένου σκυροδέματος», Αθήνα 2003
5. **ΕΚΩΣ 2000** (Ελληνικός Κανονισμός Οπλισμένου Σκυροδέματος), Αθήνα, Απρίλιος 2001
6. **Χ.Γ. Καραγιάννης**, «Επισκευές – ενισχύσεις από οπλισμένο σκυρόδεμα, Έμφαση σε ακραίους κόμβους δοκού – υποστυλωμάτων», 15^ο Συνέδριο Σκυροδέματος ΤΕΕ, ΕΤΕΚ, Αλεξανδρούπολη, 25 – 27 Οκτωβρίου 2006
7. **ΕΑΚ 2000** (Ελληνικός Αντισεισμικός Κανονισμός), Αθήνα, Απρίλιος 2001
8. **Χ.Γ. Καραγιάννης & Γ.Μ. Σιρκελής**, «Πειραματική διερεύνηση συμπεριφοράς σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση καμπτικών στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος ενισχυμένων με CFRP», Πρακτικά 2^{ου} Πανελληνίου Συνεδρίου Αντισεισμικής Μηχανικής και Τεχνικής Σεισμολογίας, Θεσσαλονίκη, 2001
9. **Σ.Η. Δρίτσος**, «Επισκευές και ενισχύσεις κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα», Πάτρα, 2001
10. **Α. Καραμπίνης & Σ. Πανταζοπούλου**, «Η χρήση των σύνθετων υλικών στο σχεδιασμό και την ενίσχυση στοιχείων από οπλισμένο σκυρόδεμα», Τεχνικά Χρονικά, Επιστημονική Έκδοση ΤΕΕ, τεύχος 3, 2000
11. **Αθανάσιος Χ. Τριανταφύλλου**, «Δομικά Υλικά», Πάτρα 2004 , 6^η Έκδοση



ΑΘΗΝΑ ΜΑΪΟΣ 2012