



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΔΠΜΣ «Δομοστατικός Σχεδιασμός & Ανάλυση Κατασκευών»

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Πειραματική και Αναλυτική Διερεύνηση Καμπτικής
Συμπεριφοράς Δοκών από Οπλισμένο Σκυρόδεμα
Ενισχυμένες με Ινοπλισμένα Πολυμερή

Κουτσοπούλου Γ. Αγγελική - Ειρήνη
Παπαϊωάννου Θ. Αγγελική

Αθήνα, Οκτώβριος 2011



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΔΠΜΣ «Δομοστατικός Σχεδιασμός & Ανάλυση Κατασκευών»

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Πειραματική και Αναλυτική Διερεύνηση Καμπτικής
Συμπεριφοράς Δοκών από Οπλισμένο Σκυρόδεμα
Ενισχυμένες με Ινοπλισμένα Πολυμερή

Επιβλέπων: Σπυράκος Κωνσταντίνος

Κουτσοπούλου Γ. Αγγελική - Ειρήνη

Παπαϊωάννου Θ. Αγγελική

Αθήνα, Οκτώβριος 2011

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Για την ολοκλήρωση αυτής της διπλωματικής εργασίας, θέλουμε να ευχαριστήσουμε θερμά τον κ. Κ. Σπυράκο, Καθηγητή Ε.Μ.Π., διευθυντή του εργαστηρίου της Αντισεισμικής Τεχνολογίας για τις πολύτιμες καθοδηγήσεις του καθ' όλη τη διάρκεια της μεταπτυχιακής αυτής εργασίας. Ιδιαίτερα σημαντική και καθοριστική υπήρξε η συμβολή της Δρ. Λ. Καράπιττα οι γνώσεις της οποίας μας βοήθησαν να διεξάγουμε τη μεταπτυχιακή εργασία. Επιπλέον θέλουμε να ευχαριστήσουμε τη συνάδελφό μας και συμφοιτήτριά μας Θ.Κ. για τη συμβολή της.

Περίληψη

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι η πειραματική και αναλυτική διερεύνηση της αποτελεσματικότητας της εφαρμογής ινοπλισμένων πολυμερών στην αύξηση της καμπτικής αντοχής δοκών οπλισμένου σκυροδέματος. Εξετάζονται τα αποτελέσματα πέντε πειραματικών διαδικασιών (ως προς τον τύπο ιών, το σύστημα ενίσχυσης και τα αποτελέσματα), καθώς και το πειραματικό πρόγραμμα που εφαρμόστηκε στο εργαστήριο Αντισεισμικής Τεχνολογίας του Ε.Μ.Π. Στη συνέχεια ελέγχεται ο τρόπος αστοχίας των δοκών του πειράματος με βάση τις διατάξεις του ΚΑΝ.ΕΠΕ.

Η ανάπτυξη προσομοιωμάτων για ενίσχυση με ΙΟΠ είναι ακόμη σχετικά καινούριο αντικείμενο και δεν υπάρχει ευρέως αποδεκτό αναλυτικό προσομοίωμα πρόβλεψης της απόκρισης. Έτσι, λοιπόν, σκοπός μας σε αυτή την εργασία είναι η αποτίμηση της ακρίβειας του προτεινόμενου προσομοιώματος που υιοθετεί ο κανονισμός επεμβάσεων στην πρόβλεψη του τρόπου αστοχίας.

Για την αποτίμηση των πειραματικών αποτελεσμάτων που λήφθηκαν από την διεξαγωγή των πειραμάτων της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας εξετάζονται πειραματικές διαδικασίες από την διεθνή βιβλιογραφία.

Στην συνέχεια παρουσιάζονται τα πέντε (5) πειραματικά προγράμματα, που έγιναν με σκοπό την διερεύνηση του τρόπου αστοχίας δοκών ο/σ ενισχυμένων με ΙΟΠ. Οι ίνες των σύνθετων υλικών που χρησιμοποιήθηκαν για την ενίσχυση των δοκών που εξετάζονται ήταν αποκλειστικά από άνθρακα, ούτως ώστε να έχουμε ανάλογα αποτελέσματα με τα αναμενόμενα μετά τις δοκιμές στο εργαστήριο.

Επίσης αναζητήθηκαν και παρουσιάζονται εργασίες στις οποίες οι ερευνητές είχαν εξετάσει τρόπους αγκύρωσης των σύνθετων υλικών.

Οι πιο ευρέως διαδεδομένοι κανονισμοί που χρησιμοποιούνται διεθνώς για την ενίσχυση δοκών οπλισμένου σκυροδέματος με ινοπλισμένα πολυμερή είναι ο ΚΑΝ.ΕΠΕ., ο οποίος θα αποτελέσει το εθνικό προσάρτημα του Ευρωκώδικα 8 – Μέρος 3, το προσομοίωμα που προτείνει η διεθνής ομοσπονδία για κατασκευές από σκυρόδεμα (Fédération Internationale du Béton - FIB) και τέλος ο Ιταλικός Κανονισμός ενίσχυσης υπαρχόντων κατασκευών με σύστημα ΙΟΠ CNR-DT

200/2004 (Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Existing Structures).

Στο εργαστήριο πραγματοποιήθηκαν πειράματα φόρτισης τεσσάρων σημείων σε τέσσερις δοκούς. Οι δοκοί ενισχύθηκαν εξωτερικά με ύφασμα ινοπλισμένων πολυμερών (ΙΟΠ). Ο κύριος σκοπός των πειραμάτων ήταν η διερεύνηση της απόκρισης των ενισχυμένων αυτών δοκών, δηλαδή η αντοχή, η παραμόρφωση και ο τρόπος αστοχίας τους, υπό την φόρτιση τεσσάρων σημείων. Ως υλικό ενίσχυσης χρησιμοποιήθηκε ΙΟΠ της εταιρείας BETONTEX. Η εφαρμογή των σύνθετων υλικών έγινε υπό την επίβλεψη του διευθυντή της εταιρείας.

Στην συνέχεια συγκρίνονται οι τάσεις που αναπτύσσονται στο σύνθετο υλικό όπως αυτές υπολογίστηκαν από την εφαρμογή των σχέσεων του ΚΑΝ.ΕΠΕ. με τις τάσεις που προέκυψαν από την διεξαγωγή της πειραματικής διαδικασίας.

Επιπλέον γίνεται ο υπολογισμός της αύξησης της καμπτικής αντοχής πλάκας οπλισμένου σκυροδέματος μετά την ενίσχυση της με λωρίδες σύνθετου υλικού με ανάλογη διαδικασία με αυτή της ενίσχυσης δοκών.

Για να αποκτήσουμε την ακριβή τιμή της τάσης αποκόλλησης για τα πειράματα τα οποία έγιναν αποφασίστηκε να πραγματοποιηθούν στο εργαστήριο Αντισεισμικής Τεχνολογίας τα πειράματα εξόλκευσης. Για τη σωστή διεξαγωγή αυτών των πειραμάτων χρησιμοποιήθηκε κατάλληλο και εξειδικευμένο μηχάνημα και τηρήθηκαν πλήρως όλα όσα υπαγορεύει σχετικός κανονισμός Guide Test Methods for Fiber-Reinforced Polymers (FRPs) for Reinforcing or Strengthening Concrete Structures (ACI 440.3R-04).

Και τέλος προτείνεται ένα προσομοίωμα για την αγκύρωση των ινοπλισμένων πολυμερών αντίστοιχη με αυτήν που έγινε σε δοκό των πειραμάτων και κατά την αστοχία επετεύχθη θραύση των σύνθετων υλικών στην μεσαία διατομή της δοκού που αποτελεί και τον επιθυμητό τρόπο αστοχίας για τέτοιου είδους ενισχύσεις.

Summary

The present M.Sc. thesis deals with the experimental and analytical study of the effectiveness of Fiber-Reinforced Polymer (FRP) applications on Reinforced Concrete (RC) beams for the purpose of increasing their flexural strength. Results deriving from five testing procedures are examined (parameters such as fiber type, strengthening system etc.), as well as the testing program adopted by the Laboratory of Earthquake Engineering of National Technical University of Athens (NTUA). Moreover, the failure mode of each beam tested is checked according to the provisions of the Greek Assessment & Retrofitting Code.

The development of FRP strengthening models is still considered a new field of study, thus there is no widely accepted analytical model for response anticipation. Therefore, the present thesis aims at the evaluation of the suggested model for the anticipation of the failure mode by the Greek Assessment & Retrofitting Code.

Testing results of the present thesis are evaluated according to experimental procedures found at the international bibliography.

Then five testing programs are presented, whose objective was the study of FRP strengthened RC beams failure mode. The fibers of the composite materials used for beam strengthening are exclusively carbon. This enables us to have similar results with the ones anticipated from the laboratory testing.

Besides, studies on composite materials anchorage methods are presented.

The most widely used codes internationally for the FRP strengthening of RC beams are the Greek Assessment & Retrofitting Code (which will be the National Annex of Eurocode 8 - Part 3), the model suggested by the International Federation for Structural Concrete (FIB) and finally the Italian Code CNR-DT 200/2004 (Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Existing Structures).

Four point load tests on four beams were carried out at the laboratory. Beams were externally strengthened with FRP sheets. The major purpose of the tests was the study of the response of those strengthened beams, i.e. their resistance, their strain and their failure mode, under four point loading. The strengthening material used

was product of the company BETONTEX. The FRP application took place under supervision of the company director.

Then the stresses developed at the composite materials, as measured during the laboratory testing, are compared to the ones calculated according to the provisions Greek Assessment & Retrofitting Code.

In addition, the increase of flexural strength of RC slabs is calculated after strengthening with FRP strips (procedure similar to the one implemented to beams).

In order to obtain the exact value of the debonding stress for the tests already mentioned above, pull-out tests were also carried out at the Laboratory of Earthquake Engineering. Appropriate equipment was used and tests were conducted in full compliance with the provisions of the relevant Guide for Test Methods for Fiber Reinforced Polymers (FRP) for Reinforcing and Strengthening Concrete Structures (ACI 440.3R-04).

Finally, a model for FRP anchorage is suggested corresponding to the configuration used at the beams tested. According to it, the failure mode includes the composite material rupture at the middle section of the beam, which is actually the desired failure mode for this kind of strengthening.

π ε ρ ι ε χ ό μ ε ν α

Πίνακας Περιεχομένων

πρώτο κεφάλαιο

γενικά για τα ινοπλισμένα πολυμερή

	σελίδα
1.1. Αντικείμενο εργασίας	1
1.2. Περί ινοπλισμένων πολυμερών	2
1.3. Υλικά	4
1.3.1. Ίνες	4
1.3.1.α Ίνες γυαλιού	4
1.3.1.β Ίνες άνθρακα	5
1.3.1.γ Ίνες αραμιδίου	6
1.3.2. Μήτρες σύνθετων υλικών	8
1.3.3. Τρόποι παρασκευής του σύνθετου υλικού	8
1.3.4. Κόλλες για την εφαρμογή των σύνθετων υλικών	10
1.4. Τρόπος εφαρμογής ινοπλισμένων πολυμερών	11
1.5. Μηχανικές Ιδιότητες ινοπλισμένων πολυμερών	11
1.5.1. Γενικά για τις μηχανικές ιδιότητες των ΙΟΠ	11
1.5.2. Τρόπος προσδιορισμού μηχανικών ιδιοτήτων ΙΟΠ	12
1.6. Φυσικές Ιδιότητες ινοπλισμένων πολυμερών	13
1.7. Παράμετροι που επηρεάζουν την ανθεκτικότητα των σύνθετων υλικών	14
1.8. Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματα χρήσης ινοπλισμένων πολυμερών	16

δεύτερο κεφάλαιο

πειράματα διεθνούς βιβλιογραφίας σε δοκούς οπλισμένου σκυροδέματος ενισχυμένες με ΙΟΠ

	σελίδα
2.1. Γενικά	18
2.2. <i>P. Alagusundaramoorthy, I.E. Harik, M. ASCE, C.C Choo</i>	19
2.3. <i>Koji Takeda et al (1996)</i>	21
2.3.1. Σειρά 1	21
2.3.2. Σειρά 2	22
2.4. <i>Hee Sun Kim, Yeong Soo Shin (2010)</i>	24
2.5. <i>Tom Norris, Hamid Saadatmanesh & Mohammad R. Ehsani (Members ASCE) (1997)</i>	26
2.6. <i>C.B. Demakos & G. Dimitrakis</i>	28
2.7. Συμπεράσματα	29

τρίτο κεφάλαιο

διατάξεις από κανονισμούς για ενίσχυση σε κάμψη με σύνθετα υλικά

	σελίδα
3.1. <i>Κανονισμός Επεμβάσεων (ΚΑΝ.ΕΠΕ.)</i>	32
3.1.1. Γενικά	32
3.1.2. Προσθήκη ελασμάτων από χάλυβα ή ινοπλισμένα πολυμερή	33
3.2. <i>The International Federation for Structural Concrete (FIB 2001)</i>	40
3.2.1. Γενικά	40
3.2.2. Αρχική κατάσταση	40

3.2.3.	Οριακή κατάσταση αντοχής – μηχανισμοί αστοχίας	42
3.2.4.	Υπολογισμοί για την οριακή κατάσταση αντοχής	43
3.2.5.	Μηχανισμοί πλήρους συνεργασίας	43
3.2.5.1.	Διαρροή εφελκνόμενου χάλυβα, σύνθλιψη σκυροδέματος (Μηχανισμός 1)	43
3.2.5.2.	Διαρροή εφελκνόμενου χάλυβα, θραύση σύνθετων υλικών (Μηχανισμός 2)	44
3.2.5.3.	Σύνθλιψη σκυροδέματος (Μηχανισμός 3)	45
3.2.6.	Μηχανισμοί με απώλεια της πλήρους συνεργασίας	45
3.2.6.1.	Αποκόλληση στην ακραία ρωγμή (Μηχανισμός 4)	45
3.2.6.2.	Αποκόλληση στην ενδιάμεση καμπτική ρωγμή (Μηχανισμός 5)	46
3.2.6.3.	Αποκόλληση στην ενδιάμεση λοξή ρωγμή (Μηχανισμός 6)	47
3.2.6.4.	Διατμητική αστοχία στο άκρο–αποκόλληση επικάλυψης (Μηχανισμός 7)	47
3.3.	Ιταλικός Κανονισμός CNR-DT 200/2004 (Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Existing Structures)	49
3.3.1.	Μηχανισμοί Αποκόλλησης	49
3.3.1.1.	Μηχανισμοί αστοχίας εξαιτίας της απώλειας συνάφειας	49
3.3.1.2.	Ενεργεία που απορροφάται κατά την θραύση	50
3.3.1.3.	Σχεδίαση για την οριακή κατάσταση αποκόλλησης στην ακραία διατομή του ΙΟΠ (τρόπος αστοχίας 1)	52
3.3.1.4.	Αποκόλληση στην μεσαία διατομή λόγω καμπτικών ρωγμών (Τρόπος αστοχίας 2)	52
3.3.1.5.	Τάσεις που ασκούνται στην διεπιφάνεια για την οριακή κατάσταση λειτουργικότητας	53
3.3.2.	Ενίσχυση σε κάμψη	55
3.3.2.1.	Ανάλυση στην οριακή κατάσταση αστοχίας	55
3.3.2.2.	Παραμορφώσεις στην κατασκευή πριν την ενίσχυση με ΙΟΠ	57
3.3.2.3.	Καμπτική ενίσχυση μελών οπλισμένου σκυροδέματος με ΙΟΠ	57

3.3.2.4. Καμπτική ενίσχυση μελών οπλισμένου σκυροδέματος με ΙΟΠ με ύπαρξη ροπής και αξονικής δύναμης	59
3.3.2.5. Αστοχία συγκόλλησης ΙΟΠ στο δοκίμιο	60
3.3.2.6. Ανάλυση στην κατάσταση λειτουργικότητας	61

τέταρτο κεφάλαιο

πειραματική διαδικασία

	σελίδα
4.1. Γενικά	64
4.2. Πειραματική διαδικασία	67
4.3. Μορφές αστοχίας των πειραμάτων	74

πέμπτο κεφάλαιο

αναλυτικά αποτελέσματα των πειραμάτων

	σελίδα
5.1. Πείραμα 1 ^ο : Δοκός ενισχυμένη με 3 στρώσεις ΙΟΠ άνθρακα GV330U- HT πλάτος 20cm- ρητίνη IPN	79
5.1.1. Δοκιμές στη διαρροή	80
5.1.2. Δοκιμές στην οριακή κατάσταση αστοχίας	82
5.1.3. Τιμή σχεδιασμού της ενεργού τάσεως σ_{jd}	85
5.2. Πείραμα 2 ^ο : Δοκός ενισχυμένη με 3 στρώσεις ΙΟΠ άνθρακα	87

<i>GV330U- HT πλάτος 20cm- ρητίνη εποξειδική</i>	
5.2.1.	Δοκιμές στη διαρροή 88
5.2.2.	Δοκιμές στην οριακή κατάσταση αστοχίας 90
5.2.3.	Δοκιμές στην οριακή κατάσταση αστοχίας 91
5.2.4.	Τιμή σχεδιασμού της ενεργού τάσεως σ_{jd} 95
5.3.	Πείραμα 3 ^ο : Δοκός ενισχυμένη με 3 στρώσεις ΙΟΠ άνθρακα GV330U- αγκύρια ΙΟΠ μήκους 40cm- ρητίνη εποξειδική 97
5.3.1.	Δοκιμές στη διαρροή 98
5.3.2.	Δοκιμές στην οριακή κατάσταση αστοχίας 101
5.3.3.	Δοκιμές στην οριακή κατάσταση αστοχίας 102
5.3.4.	Τιμή σχεδιασμού της ενεργού τάσεως σ_{jd} 105
5.4.	Πείραμα 4 ^ο : Δοκός ενισχυμένη με 3 στρώσεις ΙΟΠ άνθρακα GV330U- HT – 1 στρώση GV330U- HT – πλάτος 20cm σε μορφή U στα άκρα της δοκού (4 λωρίδες/20cm) - ρητίνη εποξειδική 107
5.4.1.	Δοκιμές στη διαρροή 108
5.4.2.	Δοκιμές στην οριακή κατάσταση αστοχίας 111
5.4.3.	Δοκιμές στην οριακή κατάσταση αστοχίας 112
5.4.4.	Τιμή σχεδιασμού της ενεργού τάσεως σ_{jd} 115

έκτο κεφάλαιο

αναλυτικός υπολογισμός πλάκας οπλισμένου σκυροδέματος με σύνθετα υλικά

	σελίδα
6.1.	Γενικά χαρακτηριστικά πλάκας και υλικού ενίσχυσης 117
6.2.	Υπολογισμοί 119
6.3.	Υπολογισμός της ροπής αντοχής της διατομής με βάση τους 120

πίνακες CEB, χωρίς το μανδύα σύνθετου υλικού

6.4.	Υπολογισμός της ροπής αντοχής της διατομής με βάση τον ΚΑΝ.ΕΠΕ.	121
6.4.1.	Αστοχία του ιδίου του υλικού ενίσχυσης	121
6.4.2.	Πρόωρη αποκόλληση του υλικού ενίσχυσης	121
6.4.3.	Τιμή σχεδιασμού της ενεργού τάσεως σ_{jd}	123

έβδομο κεφάλαιο

πειράματα εξόλκευσης

	σελίδα	
7.1.	Γενικά	125
7.2.	Guide Test Methods for Fiber-Reinforced Polymers (FRPs) for Reinforcing or Strengthening Concrete Structureso (ACI 440.3R-04)	126
7.3.	Αποτελέσματα Πειραμάτων	134
7.3.1.	Γενικά	134
7.3.2.	Αποτελέσματα πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν στα δοκάρια	134
7.3.3.	Αποτελέσματα πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν στα κυβικά δοκίμια	135
7.4.	Συγκριτικός Πίνακας Αποτελεσμάτων των Πειραμάτων Εξόλκευσης και του ΚΑΝ.ΕΠΕ.	139

όγδοο κεφάλαιο

συμπεράσματα - σύγκριση

	σελίδα
8.1. Γενικά	143
8.2. Συμπεράσματα από την διεξαγωγή των πειραμάτων	144
8.3. Συμπεράσματα όσον αφορά στις τάσεις αποκόλλησης	146
8.4. Μέθοδος αγκύρωσης των ΙΟΠ για αποφυγή αποκόλλησης	148

παράρτημα

	σελίδα
1. Λίστα Σχημάτων	153
2. Λίστα Πινάκων	156
3. Λίστα Εικόνων	158

summary	160
----------------	------------

βιβλιογραφία	177
---------------------	------------

πρώτο κεφάλαιο

γενικά για τα ινοπλισμένα πολυμερή

1.1. Αντικείμενο εργασίας

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι η πειραματική και αναλυτική διερεύνηση της εφαρμογής ινοπλισμένων πολυμερών στην αύξηση της καμπτικής αντοχής δοκών οπλισμένου σκυροδέματος. Εξετάζονται τα αποτελέσματα πέντε πειραματικών διαδικασιών (ως προς τον τύπο ινών, το σύστημα ενίσχυσης και τα αποτελέσματα) καθώς και το πειραματικό πρόγραμμα που εφαρμόστηκε στο εργαστήριο Αντισεισμικής Τεχνολογίας του Ε.Μ.Π. Στην συνέχεια ελέγχθηκε ο τρόπος αστοχίας των δοκών του πειράματος με βάση αυτά που υπαγορεύει ο ΚΑΝ.ΕΠΕ.

Η ανάπτυξη προσομοιώματων για ενίσχυση με ΙΟΠ είναι ακόμη σχετικά καινούριο αντικείμενο και δεν υπάρχει ευρέως αποδεκτό προσομοίωμα αναλυτικών προβλέψεων. Έτσι, λοιπόν, σκοπός μας σε αυτή την εργασία είναι ο

προσδιορισμός της ακρίβειας του προτεινόμενου προσομοιώματος που υιοθετεί ο κανονισμός επεμβάσεων στην πρόβλεψη του τρόπου αστοχίας.

1.2. *Περί ινοπλισμένων πολυμερών*

Η χρήση φύλλων ινοπλισμένων πολυμερών αποτελεί την πιο σύγχρονη τεχνική στην αποκατάσταση ή ενίσχυση της φέρουσας ικανότητας κατασκευών. Ουσιαστικά είναι η εξέλιξη της τεχνικής των χαλύβδινων επικολλητών ελασμάτων, υπερχαλύπτοντας τις αδυναμίες αυτής της τεχνικής καθώς απαιτούσε σημαντικό χρόνο και κόπο για να εφαρμοστεί.

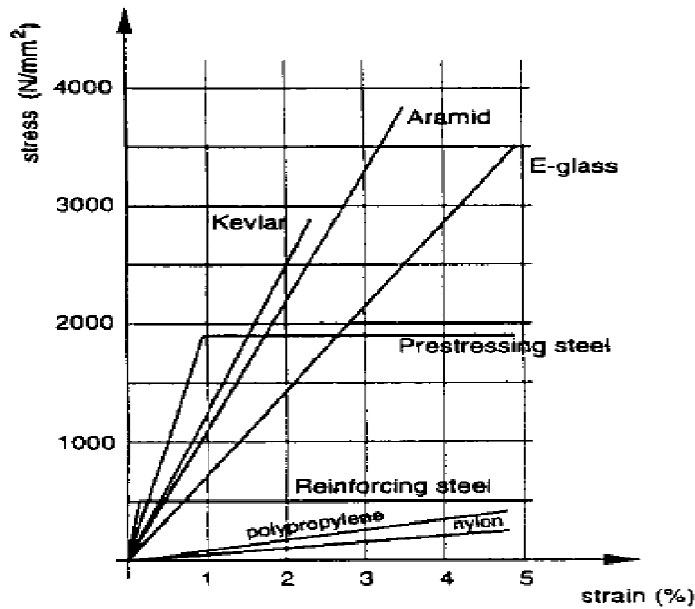
Τα ΙΟΠ κυρίως εφαρμόζονται σε δύο τύπους. Ο ένας είναι σε λεπτές στρώσεις φύλλων ΙΟΠ για επισκευές ή ενισχύσεις βλαμμένων υποστυλωμάτων, κυρίως, σκυροδέματος. Ο άλλος είναι υπό μορφή ελασμάτων που έχουν σχετικά μεγαλύτερο πάχος.

Τα σχετικά καινούρια παραπάνω υλικά, είναι σύνθετα υλικά τα οποία αποτελούνται από ινώδη οπλισμένα πολυμερή εμποτισμένα σε ειδικές εποξικές, συνήθως, ρητίνες (μήτρες) ώστε να σχηματίζουν αντίστοιχα δύσκαμπτα ελάσματα ή εύκαμπτα υφάσματα μίας ή δύο διευθύνσεων (Ινοπλισμένα Πολυμερή (ΙΟΠ) ή Fiber Reinforced Polymers (FRP)). Τα υφάσματα αυτά τοποθετούνται στις επιφάνειες των δομικών στοιχείων με προσανατολισμό ινών τέτοιο ώστε να παραλαμβάνουν εφελκυστικές δυνάμεις αποτελώντας εξωτερικό οπλισμό και μόνιμη ενίσχυση τους.

Οι βασικές αρχές για τον σχεδιασμό μανδύων ΙΟΠ είναι αντίστοιχες με αυτές των μεταλλικών μανδύων. Σε αντιπαράθεση όμως των παραπάνω συστημάτων ενίσχυσης, οι μανδύες από σύνθετα υλικά παρουσιάζουν εξαιρετικά υψηλή εφελκυστική αντοχή, ακόμη πιο σημαντικός είναι όμως ο υψηλός λόγος αντοχής προς βάρους και τέλος δεν πρέπει να παραλείψουμε την ευκολία τοποθέτησης που παρουσιάζουν αφού αυτό κυρίως είναι το γεγονός που τα καθιέρωσε στον τομέα των ενισχύσεων.

Παρά το γεγονός ότι παρουσιάζουν όλες τις παραπάνω βελτιωμένες ιδιότητες σε σχέση με τον χάλυβα (σχ. 1.2.1) η χρήση των ινοπλισμένων πολυμερών παρουσιάζεται επιφυλακτική κυρίως λόγω της έλλειψης κανονιστικού πλαισίου.

Εξίσου σημαντικό μειονέκτημα όμως είναι και η γραμμικά ελαστική συμπεριφορά τους έως την θραύση, γεγονός που καθιστά απαγορευτική την χρήση τους σε περίπτωση μη ύπαρξης συμβατικού χάλυβα που θα εξασφαλίσει την πλαστική συμπεριφορά του μέλους που πρόκειται να ενισχυθεί. Τέλος πρέπει να αναφερθεί το αυξημένο κόστος των σύνθετων υλικών σε σχέση με τον χάλυβα.



Σχήμα 1.1: Καμπύλη σ-ε για σύνθετα υλικά και χάλυβα (συμβατικό ή προεντεταμένο) [17]

1.3. Υλικά

1.3.1. Ίνες

Τα βασικά συστατικά των σύνθετων υλικών ως σύστημα ενίσχυσης είναι οι ίνες σε πολυμερική μήτρα και η κόλλα για την εφαρμογή τους στις επιφάνειες των μελών προς ενίσχυση. Οι συνηθέστερα χρησιμοποιούμενες ίνες είναι:

1.3.1.α Ίνες γυαλιού

Πάνω από το 90% των ινών που χρησιμοποιούνται στην ενίσχυση είναι ίνες γυαλιού, αφού είναι υλικό φθινό, εύκολο στην παραγωγή και έχει υψηλή αντοχή και δυσκαμψία. Η μικρή πυκνότητά του, η ανθεκτικότητά του σε χημικά και η άριστη θερμική και ηλεκτρική μονωτική του ικανότητα καθώς και το γεγονός ότι δεν παρουσιάζει σημαντικές ερπυστικές παραμορφώσεις είναι μερικά από τα κύρια χαρακτηριστικά του.

Υπάρχουν 3 τύποι υαλονημάτων:

- τύπου E με μειονέκτημα τη μείωση της αντοχής στο αλκαλικό περιβάλλον του σκυροδέματος,
- τύπου C με μεγάλη αντοχή σε αλκαλικό περιβάλλον, [16]
- τύπου S με υψηλή αντοχή και υψηλό μέτρο ελαστικότητας [6]



Εικόνα 1.1: Ίνες E-glass [16]

Είδος Υαλονήματος	Εφελκυστική αντοχή σε MPa	Μέτρο Ελαστικότητας σε GPa	Επιμήκυνση Θραύσης (%)	Πυκνότητα g/cm ³
Υαλος-E	2000 - 3000	70 - 75	3.0 - 4.5	2.54
Υαλος-S	3500 - 4800	85 - 90	4.5 - 5.5	2.48

Πίνακας 1.1: Ιδιότητες υάλου-E και υάλου-S. [14]

1.3.1.β Ίνες άνθρακα

Οι ίνες άνθρακα παρασκευάζονται συνήθως από πολυ-ακρυλο-νιτρίλιο (polyacrylonitrile, PAN) ή πίσσα και χαρακτηρίζονται από υψηλή αντοχή και μέτρο ελαστικότητας, χαμηλή πυκνότητα και έχουν διάμετρο 5-8 μm. Διακρίνονται σύμφωνα με τις χαρακτηριστικές τους ιδιότητες σε ίνες : υψηλής αντοχής (high strength HS), μέσου μέτρου ελαστικότητας (intermediate modulus IM), υψηλού μέτρου ελαστικότητας (high modulus HM) και πολύ υψηλού μέτρου ελαστικότητας. (ultra high modulus UHM).

Οι ίνες άνθρακα έχουν την υψηλότερη ειδική δυσκαμψία (**δυσκαμψία / πυκνότητα**) σε σχέση με τις άλλες ίνες και πολύ υψηλή αντοχή σε εφελκυσμό και θλίψη καθώς επίσης είναι ανθεκτικές σε διάβρωση, ερπυσμό, κόπωση και σε υψηλές θερμοκρασίες. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν χωριστά ή από κοινού με τις ίνες γυαλιού ως υβρίδιο για να αυξηθεί η ακαμψία ενός δομικού μέλους



Εικόνα 1.2: Ίνες άνθρακα [16]

1.3.1.γ Ίνες αραμιδίου

Οι ίνες αραμιδίου παρασκευάζονται από αρωματικά πολυαμίδια (μακριές πολυμερικές αλυσίδες με αρωματικούς δακτυλίους). Προσφέρουν καλές μηχανικές ιδιότητες σε χαμηλή πυκνότητα. Χαρακτηρίζονται από υψηλή εφελκυστική αντοχή, υψηλό μέτρο ελαστικότητας και χαμηλό βάρος. Η πυκνότητα των ινών αραμιδίου είναι μικρότερη από αυτή των ινών γυαλιού και άνθρακα. Έχουν υψηλή ανθεκτικότητα τόσο σε πυρκαγιά όσο και σε υψηλές θερμοκρασίες, καθώς επίσης είναι απρόσβλητες από οργανικούς διαλύτες.

Η πιο επιτυχής οργανική ίνα που παρασκευάστηκε βιομηχανικά είναι εκείνη με την επωνυμία Kevlar.

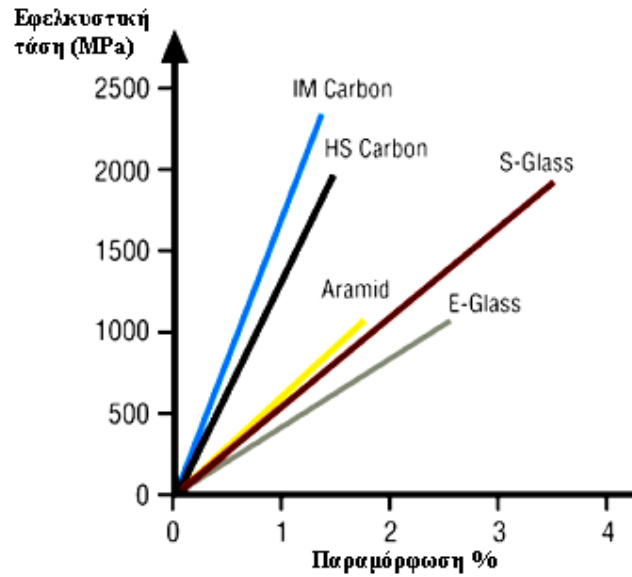
Τέλος υπάρχουν και άλλοι τύποι ινών που χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές πολιτικού μηχανικού και είναι οι ακόλουθες: [6]

- Ίνες γραφίτη: παράγονται όπως οι ίνες άνθρακα με πυρόλυση

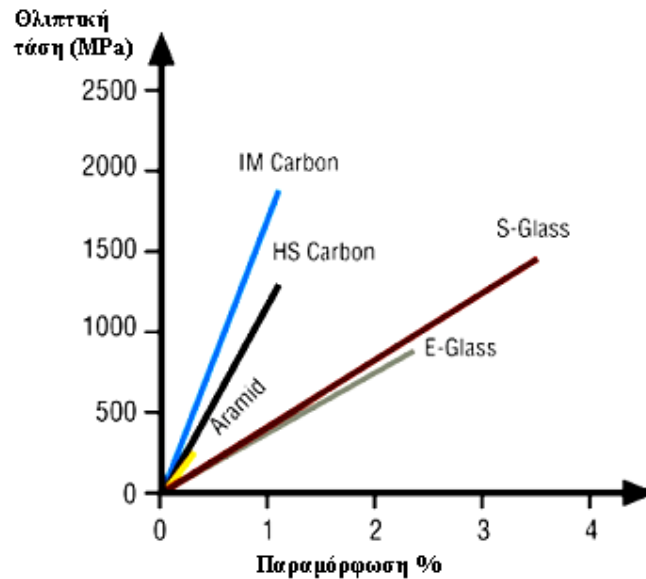


Εικόνα 1.3: Ίνες αραμιδίου [16]

- Ίνες βορίου: έχουν την μεγαλύτερη διάμετρο από όλες τις υπόλοιπες ίνες (0.05 - 0.2mm). Η αντοχή και η ακαμψία τους είναι μεγαλύτερες από αυτές των ινών γραφίτη.
- Ίνες από καρβίδιο του πυριτίου: Έχουν υψηλή αντοχή σε οξείδωση και ανθεκτικότητα στις υψηλές θερμοκρασίες.



Σχήμα 1.2: Συμπεριφορά σε εφελκυσμό διαφόρων τύπων ινών [16]



Σχήμα 1.3: Συμπεριφορά σε θλίψη διαφόρων τύπων ινών [16]

1.3.2. Μήτρες σύνθετων υλικών

Υπάρχουν δύο κύριοι τύποι πολυμερών που χρησιμοποιούνται ως μήτρες για την παραγωγή σύνθετων υλικών ινών: τα θερμοσκληρυνόμενα και τα θερμοπλαστικά. Τα θερμοσκληρυνόμενα χρησιμοποιούνται στον κλάδο των οικοδομικών και τεχνικών έργων και είναι οι εποξικές ρητίνες και σπανιότερα ο πολυεστέρας ή βινυλεστέρας.

Οι εποξικές ρητίνες υπερέχουν των άλλων τύπων μήτρας λόγω των εξαιρετικών μηχανικών χαρακτηριστικών και της μεγάλης ανθεκτικότητας σε δυσμενείς περιβαλλοντικές επιδράσεις. Προσφάτως έχουν γίνει προσπάθειες αντικατάστασης των πολυμερικών μητρών με υλικά βασισμένα στο τσιμεντό (τσιμεντο-κονιάματα τροποποιημένα με πολυμερή, TRM)

Είδος ρητίνης	Εφελκυστική αντοχή MPa	Μέτρο ελαστικότητας GPa	Επιμήκυνση Θράυσης (%)	Πυκνότητα g/cm ³
Εποξική	55 - 130	2.0 - 4.5	4.0 - 14.0	1.2 - 1.3
Πολυεστερική	35 - 104	2.1 - 4.1	< 5.0	1.1 - 1.46
Βινυλεστερική	73 - 81	3.0 - 3.6	3.5 - 5.5	1.12 - 1.32

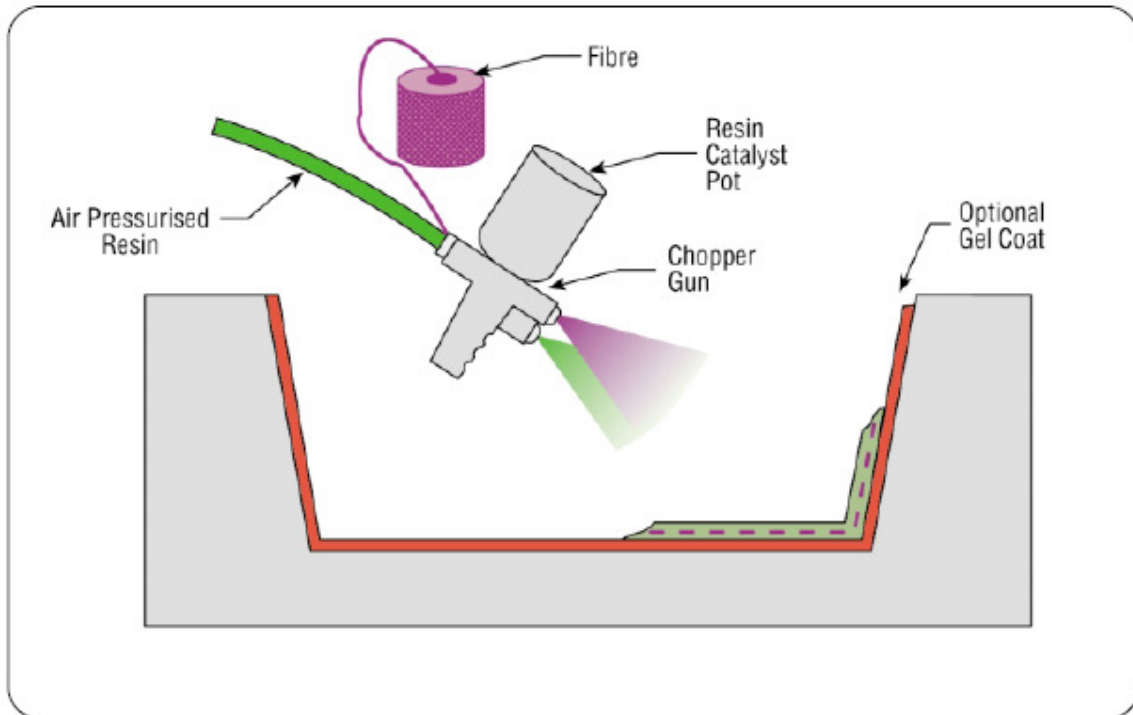
Πίνακας 1.2: Ιδιότητες ρητινών [14]

1.3.3. Τρόποι παρασκευής του σύνθετου υλικού

Τα σύνθετα υλικά έχουν διάφορες μορφές, ανάλογα με την μέθοδο κατασκευής τους. Οι πιο συνηθισμένες τεχνικές κατασκευής ινοπλισμένων πολυμερών είναι οι παρακάτω:

α) Εφαρμογή με ψεκασμό

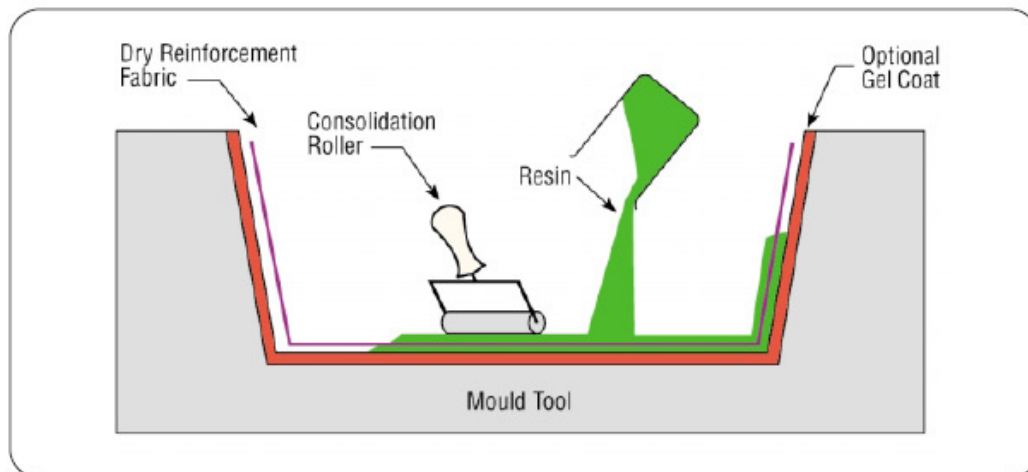
Οι ίνες κόβονται μέσα στο χειροκίνητο 'πιστόλι'(βλέπε Σχ. 1.3.3) και στην συνέχεια τροφοδοτούνται μέσω της, υπό μορφή σπρέι, ρητίνης κατευθείαν στο καλούπι. Το εναποτεθέν υλικό αφήνεται να ωριμάσει υπό κανονικές ατμοσφαιρικές συνθήκες.



Σχήμα 1.4: Εφαρμογή με ψεκασμό [16]

β) Εφαρμογή με το χέρι

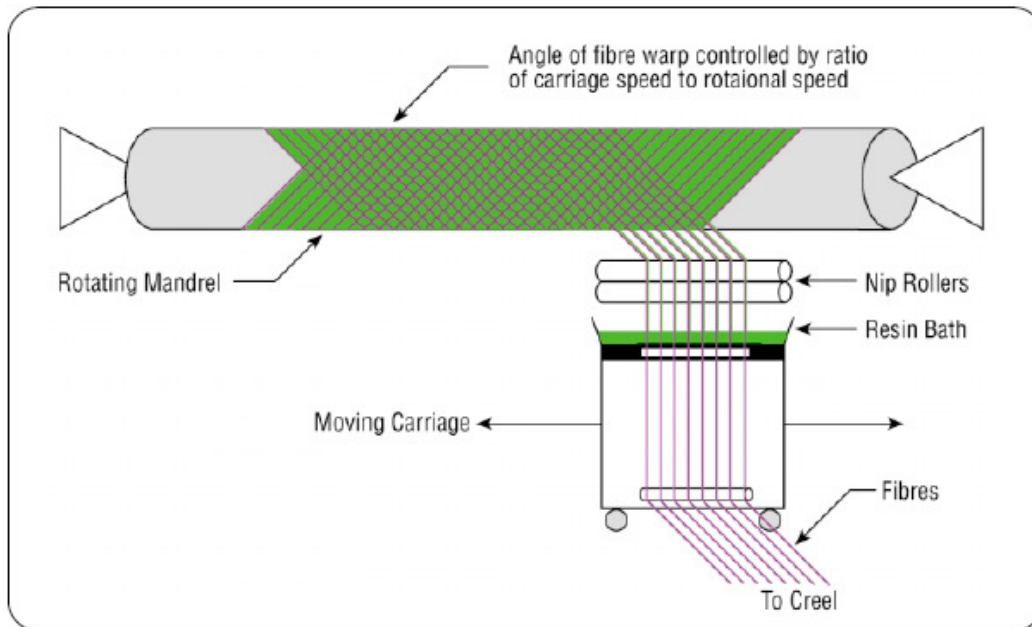
Η ρητίνη εμποτίζεται με το χέρι μεταξύ των ινών, οι οποίες βρίσκονται σε πλεκτή μορφή. Η τελική διαμόρφωση γίνεται με ρολά ή βούρτσες και το προϊόν αφήνεται όπως πριν να ωριμάσει σε κανονικές ατμοσφαιρικές συνθήκες



Σχήμα 1.5: Εφαρμογή με το χέρι [16]

γ) Περιέλιξη νήματος ηλεκτρονικής λυχνίας

Αυτή η διαδικασία αρχικά χρησιμοποιήθηκε για κοίλες, κυκλικές ή οβάλ διατομές όπως σωλήνες και δεξαμενές. Οι ίνες περνούν διαμέσου ενός 'λουτρού' ρητίνης προτού την περιέλιξη πάνω σε έναν άξονα σε διάφορες κατευθύνσεις, ελεγχόμενες από τον μηχανισμό τροφοδοσίας ινών και τον ρυθμό περιστροφής του άξονα.



Σχήμα 1.6: Περιέλιξη ινών σε άξονα [16]

1.3.4. Κόλλες για την εφαρμογή των σύνθετων υλικών

Κατά κανόνα χρησιμοποιείται ως κόλλα εποξική ρητίνη δυο συστατικών που εφαρμόζεται μεταξύ του υποστρώματος και του σύνθετου υλικού, εξασφαλίζοντας έτσι τη συνεργασία τους και τη μεταφορά τάσεων από το πρώτο στο δεύτερο. Η χρήση εποξικών ρητινών στις κατασκευές προϋποθέτει την κατανόηση τριών βασικών εννοιών: χρόνος εργασιμότητας (pot life), χρόνος εφαρμογής (open time), θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης T_g , δηλαδή το σημείο πέρα από το οποίο η συμπεριφορά του ινοπλισμένου πολυμερούς αλλοιώνεται δραματικά παρουσιάζοντας σημαντική μείωση των μηχανικών χαρακτηριστικών του.

1.4. Τρόπος εφαρμογής ινοπλισμένων πολυμερών

Η διαδικασία εφαρμογής των ΙΟΠ αρχικά περιλαμβάνει το στάδιο προετοιμασίας της επιφάνειας του σκυροδέματος. Η προετοιμασία αυτή έχει γενικά πολύ μεγάλη επίδραση στην μακρόχρονη αντοχή της σύνδεσης. Γίνεται αντιληπτό, λοιπόν, πως η προσεκτική προετοιμασία της επιφάνειας του δομικού στοιχείου συνδέεται άμεσα με την συμπεριφορά του ενισχυμένου δομικού στοιχείου με την πάροδο του χρόνου.

Αρχικά λοιπόν γίνεται απομάκρυνση του βλαμμένου σκυροδέματος ή του σκυροδέματος που δεν ικανοποιεί τις προδιαγραφές και αντικαθίστανται με υλικό καλής ποιότητας. Το υψηλής περιεκτικότητας σε τσιμέντο, σκυρόδεμα πρέπει να απομακρύνεται με αμμοβολή. Στην συνέχεια με την χρήση πεπιεσμένου αέρα απομακρύνονται τα θραύσματα και η σκόνη.

Το χρονικό περιθώριο μεταξύ προετοιμασίας της επιφάνειας και επικόλλησης των σύνθετων υλικών πρέπει να είναι εξαιρετικά μικρό για την αποφυγή πιθανής ενανθράκωσης του σκυροδέματος.

Η διαδικασία εφαρμογής των ΙΟΠ ξεκινά με την επάλειψη της επιφάνειας του δομικού στοιχείου με εποξική, κυρίως, ρητίνη. Στην συνέχεια τοποθετείται η πρώτη στρώση του σύνθετου υλικού και επαναλαμβάνεται η διαδικασία με την τοποθέτηση επιπλέον στρώσεων, σύμφωνα με την μελέτη επισκευής – ενίσχυσης.

1.5. Μηχανικές Ιδιότητες ινοπλισμένων πολυμερών

1.5.1. Γενικά για τις μηχανικές ιδιότητες των ΙΟΠ

Τα FRP χαρακτηρίζονται από μεγάλη εφελκυστική αντοχή της τάξης των 1500-3000 MPa που είναι 3-10 φορές μεγαλύτερη από αυτή του κοινού χάλυβα S500 (σχήμα 1.2.1). Οι τιμές αυτές των αντοχών ισχύουν κατά κύριο λόγο για βραχυχρόνια φόρτιση ενώ για μακροχρόνια οι τιμές μειώνονται σημαντικά ανάλογα με το είδος της ίνας. Συγκεκριμένα στις ίνες γυαλιού που το μέτρο ελαστικότητας έχει τη μικρότερη τιμή ≈ 50 GPa και η παραμόρφωση αστοχίας του έχει μεγαλύτερη τιμή ίση με 3%, η εφελκυστική τους αντοχή σε μακροχρόνια φόρτιση μειώνεται κατά περίπου 80% της αρχικής. Στις ίνες αραμιδίου οι οποίες έχουν μια ενδιάμεση τιμή μέτρου ελαστικότητας (65-120 GPa) και

παραμόρφωσης (2-3%) η εφελκυστική αντοχή με το χρόνο μειώνεται μέχρι το 50-65%. Τέλος για τις ίνες άνθρακα που έχουν το μεγαλύτερο μέτρο ελαστικότητας (35-190 GPa) και τη μικρότερη παραμόρφωση αστοχίας (1-1,5%) η εφελκυστική τους αντοχή μπορεί να μειωθεί μακροχρόνια μέχρι και 75-95%. Από το σχήμα 1.2.1 παρατηρείται ότι τα σύνθετα υλικά συμπεριφέρονται τελείως πλαστικά μέχρι την αστοχία τους [20].

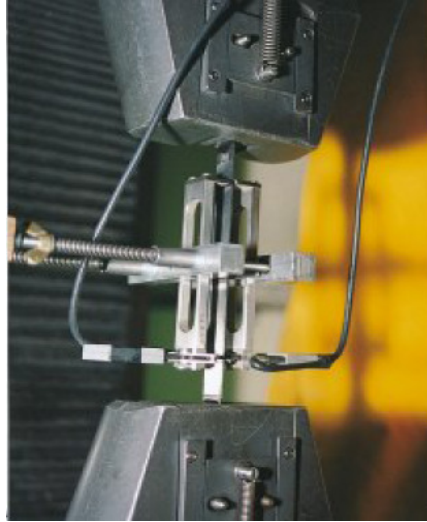
1.5.2. Τρόπος προσδιορισμού μηχανικών ιδιοτήτων ΙΟΠ

Οι ιδιότητες των ινοπλισμένων πολυμερών λαμβάνονται από δοκιμές εφελκυσμού και εξαρτώνται από την ρητίνη επικόλλησης που χρησιμοποιείται καθώς και από τις διαδικασίες που ακολουθούνται κατά την διάρκεια των δοκιμών

Συγκεκριμένα παρασκευάζονται δοκίμια υπό μορφής ελάσματος, χρησιμοποιώντας ίδιες ίνες και ρητίνη με εκείνες που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν καθώς και την ίδια διαδικασία συντήρησης. Στις άκρες τοποθετείται μια μπάρα αλουμινίου. Στην συνέχεια δοκιμάζεται σε μηχανή εφελκυσμού (βλέπε Σχ. 1.5.1, 1.5.2, 1.5.3)



Εικόνα 1.4: Δείγμα ΙΟΠ για τον προσδιορισμό της εφελκυστικής αντοχής του



Εικόνα 1.5: Πραγματοποίηση δοκιμής εφελκυσμού σε δείγματα ΙΟΠ



Εικόνα 1.6: Αστοχία δείγματος ΙΟΠ.

1.6. Φυσικές Ιδιότητες ινοπλισμένων πολυμερών

Μερικές από τις βασικές ιδιότητες των σύνθετων υλικών όλων των τύπων ινών παρατίθενται παρακάτω:

- ⇒ Δεν προσβάλλονται από τα χλωριόντα και έχουν αντοχή σε όξινα περιβάλλοντα
- ⇒ Βάρος περίπου ίσο με το 1/4 - 1/5 του βάρους των μεταλλικών οπλισμών και προφανώς εξαρτάται από το υλικό των ινών

- ⇒ Δεν επηρεάζονται από μαγνητικά πεδία και ραδιοσυχνότητες
- ⇒ Κακοί αγωγοί της θερμότητας και του ηλεκτρισμού

Επιπλέον κάποιες ιδιότητες που αφορούν συγκεκριμένους τύπους ινών είναι:

- ⇒ Μειωμένη αντοχή των ινών γυαλιού σε αλκαλικό περιβάλλον όπως αυτό του σκυροδέματος
- ⇒ Πολύ καλή συμπεριφορά των ινών αραμιδίου σε κρουστικά φορτία

1.7. Παράμετροι που επηρεάζουν την ανθεκτικότητα των σύνθετων υλικών

α) Ερπυσμός

Σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει τη μακροχρόνια συμπεριφορά των σύνθετων υλικών είναι ο ερπυσμός. Τα ανθρακονήματα και τα υαλονήματα φαίνεται να έχουν πρακτικά μηδενικές ερπυστικές παραμορφώσεις ενώ οι ίνες πολυαραμιδής και οι ρητινούχες μήτρες παρουσιάζουν ερπυσμό. Ο βαθμός του ερπυσμού είναι συνάρτηση του υλικού της ίνας και του προσανατολισμού της σε σχέση με την εφαρμοζόμενη ένταση.

β) Θερμοκρασία

Η αύξηση της θερμοκρασίας πέρα από κάποια τιμή μπορεί να προκαλέσει σημαντική υποβάθμιση των ευεργετικών ιδιοτήτων των σύνθετων υλικών. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι θερμοκρασίες της τάξης των 50-80 °C μειώνουν σημαντικά την ικανότητα ανάληψης δυνάμεων στις ρητίνες και άρα στους σύνθετους οπλισμούς. Είναι προφανές ότι υψηλότερες θερμοκρασίες όπως αυτές που αναπτύσσονται κατά τη διάρκεια μιας πυρκαγιάς, προκαλούν πλήρη αποσύνθεση των ρητινών και επομένως τα ΙΟΠ δεν μπορούν να φέρουν τάσεις. Ωστόσο κατάρρευση της κατασκευής αναμένεται σε πολύ υψηλότερες θερμοκρασίες.

γ) Υγρασία

Γενικά τα σύνθετα υλικά έχουν καλή συμπεριφορά σε συνθήκες υγρασίας. Ωστόσο μετά από μακροχρόνια έκθεση κάποιοι συνδυασμοί ινών-ρητινών μπορεί να παρουσιάσουν προβλήματα. Μετά το πέρας μιας εξαιρετικής μακράς περιόδου, οι χημικές αλυσίδες των πολυμερών είναι πλήρως υδροδιαλυτές και όσον αφορά στις ίνες, ειδικά τα υαλονήματα γίνονται εξαιρετικά εύθραυστα. Η λύση για την προστασία ινοπλισμένων πολυμερών που εφαρμόζονται σε κατασκευές που είναι μέσα στο νερό, είναι η επιλογή κατάλληλης ρητίνης.

δ) Οξινο περιβάλλον

Η παρουσία διαφόρων τύπων αλάτων σε συνδυασμό με θερμοκρασιακούς παράγοντες μπορούν να προκαλέσουν υποβάθμιση των μηχανικών χαρακτηριστικών των ράβδων.

ε) Αλκαλικό περιβάλλον

Έκθεση ινοπλισμένων πολυμερών από αραμίδιο σε αλκαλικά διαλύματα οδηγεί σε 10%-50% μείωση της αντοχής τους και 0-20% μειωμένο μέτρο ελαστικότητας. Μεγαλύτερες τιμές (έως 75%) διαπιστώθηκαν στις αντίστοιχες ίνες GFRP ενώ τα ΙΟΠ άνθρακα θεωρούνται πρακτικά απρόσβλητα καθώς δεν παρατηρείται πτώση της αντοχής πάνω από 20%.

στ) Υπεριώδης ακτινοβολία

Η υπεριώδης ακτινοβολία επηρεάζει την εξωτερική στρώση ρητίνης επιφέροντας ενδεχομένως μείωση της αντοχής των σύνθετων υλικών μέχρι και 40%. Μικρορηγματώσεις και χρωματικές αλλοιώσεις είναι τα χαρακτηριστικά που εμφανίζονται σε επιφάνειες εκτεθειμένες σε υπεριώδη ακτινοβολία. Για την προστασία προτείνεται η εφαρμογή επιχρισμάτων ή ειδικών βαφών

1.8. Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματα χρήσης ινοπλισμένων πολυμερών

Τα κυριότερα πλεονεκτήματα της χρήσης σύνθετων υλικών για την επισκευή και ενίσχυση κατασκευών σε σχέση με τις παραδοσιακές μεθόδους επισκευής και ενίσχυσης με χρήση συμβατικών υλικών είναι τα εξής:

- Μεγάλη εφελκυστική αντοχή ιδιαίτερα στην διεύθυνση των ινών (μέχρι 3000 MPa) και μέτρο ελαστικότητας.
- Αύξηση καμπτικής και διατμητικής αντοχής των υποστυλωμάτων .
- Έχουν χαμηλό βάρος (1/4 του χάλυβα).
- Πρόκειται για σύστημα ενίσχυσης που μπορεί να εφαρμοστεί σε πάσης φύσεως διατομές.
- Παρέχουν την δυνατότητα στον μελετητή να χρησιμοποιήσει τα ΙΟΠ σε όποια κατεύθυνση κρίνει ότι χρειάζεται, λόγω των πολλών και διαφορετικών τρόπων διάταξης των ινών μέσα στο υλικό.
- Παρέχουν μεγαλύτερη παθητική περίσφιγξη σκυροδέματος από το χάλυβα και έμμεση βελτίωση του δεσμού σκυροδέματος και οπλισμού.
- Ευκολία τοποθέτησης λόγω του ότι διατίθενται σε μεγάλα μήκη (αντίθετα με τα χαλύβδινα ελάσματα και τις χαλύβδινες βέργες οπλισμού).
- Δεν αυξάνουν τη μορφή και τις διαστάσεις των ενισχυμένων στοιχείων λόγω του ότι το πάχος τους είναι της τάξης του χιλιοστού.
- Η εγκατάστασή τους δεν προκαλεί κίνδυνο φθοράς ή αποδυνάμωση της υφιστάμενης κατασκευής καθώς δεν αυξάνεται το βάρος της.
- Η μορφή αστοχίας από ψαθυρή (ξαφνική) γίνεται ψευδο-πλάστιμη (πιο σταδιακή).
- Είναι αποτελεσματικά στην προστασία από διάβρωση.
- Προσφέρουν εσπευσμένη αντισεισμική ενίσχυση στοιχείων παλαιότερων κατασκευών με ανεπαρκή οπλισμό.

Παρόλες τις υψηλές προσδοκίες που έχουν καλλιεργηθεί, η χρήση των ΙΟΠ πρέπει να γίνεται με προσοχή καθώς παρουσιάζουν αρκετά μειονεκτήματα μερικά από τα οποία είναι τα παρακάτω:

- Απότομη πτώση της εφελκυστικής αντοχής, ακαμψίας και ικανότητας απορρόφησης ενέργειας μετά από μακροχρόνια φόρτιση λόγω αστοχίας των ακυρώσεων των λωρίδων ενίσχυσης με FRP.
- Έχουν ιδιαίτερα υψηλό κόστος (ειδικά το CFRP) περίπου 9 φορές μεγαλύτερο από το κόστος του Fe 360.
- Πρόκειται για νέο υλικό οπότε πρέπει να είμαστε επιφυλακτικοί ως προς τα αποτελέσματα ενίσχυσης.
- Συμπεριφέρονται πλήρως ελαστικά (έλλειψη πλαστιμότητας) μέχρι την αστοχία τους που σημαίνει αδυναμία απορρόφησης ενέργειας.
- Χαμηλό μέτρο ελαστικότητας (ως προς τον χάλυβα) εκτός του CFRP.
- Το GFRP δεν έχει καλά χαρακτηριστικά κόπωσης.
- Η έκθεση σε περιβαλλοντικές συνθήκες όπως η υγρασία, η δράση χημικών, οι αυξομειώσεις της θερμοκρασίας και η υπεριώδης ακτινοβολία επιδρά αρνητικά στην απόδοση των φύλλων ΙΟΠ εξαιτίας της εξασθένησης της ένωση των φύλλων με το σκυρόδεμα (μείωση συνάφειας).
- Τα σύνθετα υλικά μπορούν να αναλάβουν φορτία μόνο κατά τη διεύθυνση των ινών τους.

ΔΕΥΤΕΡΟ ΚΕΦΑΛΑΙΟ

πειράματα διεθνούς βιβλιογραφίας σε δοκούς οπλισμένου σκυροδέματος ενισχυμένες με ΙΟΠ

2.1. Γενικά

Για την αποτίμηση των πειραματικών αποτελεσμάτων που λήφθηκαν από την διεξαγωγή των πειραμάτων της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας εξετάστηκαν πειραματικές διαδικασίες από την διεθνή βιβλιογραφία.

Στην συνέχεια παρουσιάζονται τα πέντε (5) πειραματικά προγράμματα, που έγιναν με σκοπό την διερεύνηση του τρόπου αστοχίας δοκών ο/σ ενισχυμένων με ΙΟΠ. Οι ίνες των σύνθετων υλικών που χρησιμοποιήθηκαν για την ενίσχυση των δοκών που εξετάζονται ήταν αποκλειστικά από άνθρακα για να έχουμε ανάλογα αποτελέσματα με τα αναμενόμενα μετά τις δοκιμές στο εργαστήριο. Επίσης αναζητήθηκαν και εργασίες στις οποίες οι ερευνητές είχαν εξετάσει τρόπους αγκύρωσης των σύνθετων υλικών.

2.2. P.Alagusundaramoorthy, I.E. Harik, M.ASCE, C.C Choo

Flexural Behavior of R/C Beams Strengthened with Carbon Fiber Reinforced Polymer Sheets or Fabric [1]

Τα πειράματα των Alagusundaramoorthy et al [1] βασίστηκαν στην δοκιμή ενισχυμένων δοκών σε φόρτιση τεσσάρων σημείων. Αναλυτικότερα δοκιμάστηκαν μέχρι την αστοχία 2 δοκοί ελέγχου και δώδεκα (12) δοκοί οι οποίες ενισχύθηκαν με φύλλα ινοπλισμένου πολυμερούς από άνθρακα δύο ειδών: το πρώτο είχε διαστάσεις (πλάτος * πάχος) 76mm*1.40mm και το δεύτερο 102mm*4.78mm.

Οι διαστάσεις των δοκών ήταν ($l*b*d$) 4880*230*380mm. Οι δοκοί ήταν ελαφρώς οπλισμένες με 2Φ25 εφελκόμενο οπλισμό, 2Φ9 θλιβόμενο οπλισμό και συνδετήρες Φ9/150mm. Οι επικαλύψεις του εφελκόμενου και του θλιβόμενου οπλισμού ήταν αντίστοιχα 38mm και 25mm. Τέλος χρησιμοποιήθηκαν:

- δύο ή τρεις στρώσεις CFRP τύπου 1
- μία στρώση τύπου 2
- μια ή δύο στρώσεις τύπου 2 στις δοκούς στις οποίες το φύλλο ΙΟΠ αγκυρώθηκε στα άκρα
- μία ή δύο στρώσεις υφάσματος ΙΟΠ

Η αντοχή του σκυροδέματος ήταν 31MPa (αντοχή κυλίνδρου) και το όριο διαρροής του χάλυβα 414MPa. Οι αντοχές των σύνθετων υλικών προσδιορίστηκαν από coupon tests και δίνονται στον πίνακα 1.1

Υλικό ενίσχυσης	Πλάτος (mm)	Πάχος (mm)	Οριακή Τάση Αστοχίας f_{fu}	Μέτρο Ελαστικότητας E_{fu} (GPa)	Παραμόρφωση Αστοχίας ϵ_{fu} (%)
CFRP (φύλλα)	76	1.40	2068 MPa	138	1.50
CFRP (φύλλα)	102	4.78	552 MPa	48	1.1
CFRP (ύφασμα)	203	0.18	490 MPa	228	1.20

Πίνακας 2.1: Μηχανικά χαρακτηριστικά CFRP sheets & CFRP fabric

Η αγκύρωση των ΙΟΠ στις δοκούς πραγματοποιήθηκε αφού προηγουμένως είχαν διανοιχθεί οπές και είχαν καθαριστεί με ηλεκτρική σκούπα για να αφαιρεθούν υπολείμματα σκόνης. Οπές είχαν διανοιχθεί επίσης και στο σύνθετο υλικό. Όταν έγινε η επικόλληση των φύλλων ΙΟΠ, οι οπές είχαν γεμίσει με εποξικής ρητίνη με την βοήθεια ενός πιστολιού έγχυσης ρητίνης. Τα αγκύρια εισήχθησαν στην δοκό σφυρί και οι άκρες τους τεντώθηκαν.

Οι δοκοί διατηρήθηκαν για επτά ημέρες σε θερμοκρασία δωματίου πριν διεξαχθεί η πειραματική δοκιμασία.

Ο τρόπος φόρτισης περιλάμβανε πέντε κύκλους φόρτισης-αποφόρτισης και ο στον έκτο κύκλο οι δοκοί φορτίστηκαν μέχρι την αστοχία με ρυθμό 10kN/min.

Είδος δοκού	Δοκός*	Φορτίο αστοχίας P_u (kN)	Τρόπος Αστοχίας
Δοκοί Ελέγχου	CB1	196	Διαρροή χάλυβα (καμπτική αστοχία)
	CB2	190	Διαρροή χάλυβα (καμπτική αστοχία)
Δοκοί ενισχυμένες με πάχος ΙΟΠ 1.40mm	CB-2S	263	Σύνθλιψη σκυροδέματος
	CB-2S	260	Σύνθλιψη σκυροδέματος
	CB-3S	287	Σύνθλιψη σκυροδέματος
	CB-3S	275	Σύνθλιψη σκυροδέματος
Δοκοί ενισχυμένες με πάχος ΙΟΠ 4.78mm	CB- 1S	256	Σύνθλιψη σκυροδέματος (στην μεσαία διατομή)
	CB-1SB	273	Σύνθλιψη σκυροδέματος
	CB-1SB	249	Σύνθλιψη σκυροδέματος
	CB-2SB	306	Σύνθλιψη σκυροδέματος
Δοκοί ενισχυμένες με πάχος ΙΟΠ 0.18mm	CB-1F	219	Σκίσιμο ΙΟΠ στην μεσαία διατομή
	CB-1F	223	Σκίσιμο ΙΟΠ στην μεσαία διατομή
	CB-2F	263	Σκίσιμο ΙΟΠ στην μεσαία διατομή
	CB-2F	270	Σκίσιμο ΙΟΠ

*#S: αριθμός φύλλων ΙΟΠ, #SB:αριθμός φύλλων ΙΟΠ με αγκύρωση στις στριξίες

Πίνακας 2.2: Οριακό φορτίο αστοχία και τρόπος αστοχία δοκών

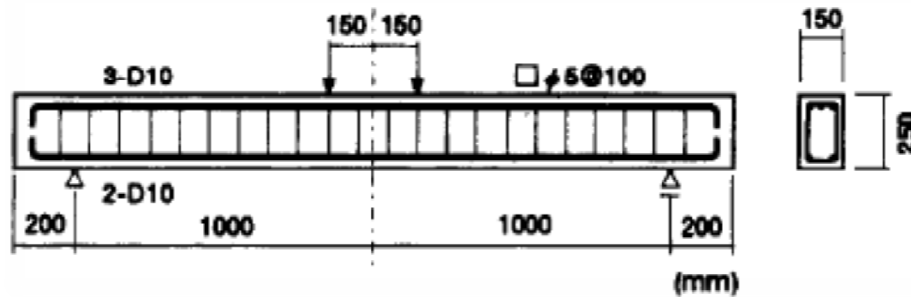
2.3. Koji Takeda et al (1996)

Flexural Behavior of reinforced concrete Beams Strengthened with Carbon Fiber Sheets [2]

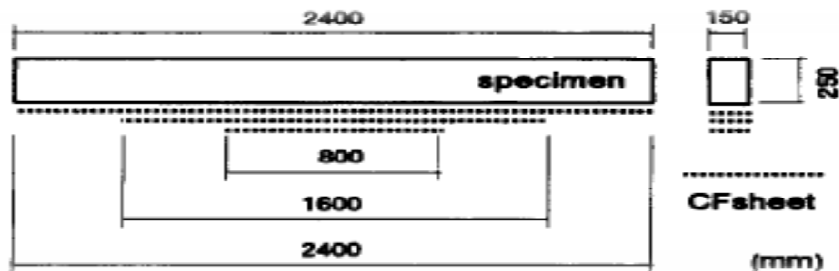
Οι Takeda et al για τα πειράματα χρησιμοποίησαν δοκούς τις οποίες είχαν προφορτίσει ώστε να δημιουργηθούν ρωγμές στην συνέχεια τις επισκεύασαν με έγχυση εποξικής ρητίνης στις ρωγμές και τέλος τις ενίσχυσαν με φύλλα CFRP. Χρησιμοποιήθηκαν δύο σειρές δοκιμίων (δοκών) διαφορετικών διαστάσεων :

2.3.1. Σειρά 1

Οι δοκοί είχαν διαστάσεις ($I*b*h$) 2400*150*250mm και περιελάμβαναν διαμήκη σπλισμό 2Φ10 στην εφελκυσόμενη παρειά και 3Φ10 στην θλιβόμενη και συνδετήρες Φ5/100mm.



Σχήμα 2.1: Διαστάσεις και σπλισμοί δοκών (σειρά 1)



Σχήμα 2.2: Τρόπος επικόλλησης ΙΟΠ (σειρά 1)

Την σειρά 1 αποτελούσαν 6 δοκοί από τις οποίες η μια χρησιμοποιήθηκε ως δοκός ελέγχου οι υπόλοιπες τέσσερις ενισχύθηκαν με μια, δύο και τρεις στρώσεις φύλλων ΙΟΠ άνθρακα ενώ η έκτη δοκός αρχικά προ-φορτίστηκε με την εφαρμογή φορτίου που αντιστοιχούσε στα 2/3 του ορίου αντοχής της δοκού. Στη συνέχεια ενισχύθηκε με CFRP και παρέμεινε σε θερμοκρασία δωματίου για περισσότερο από μια εβδομάδα.

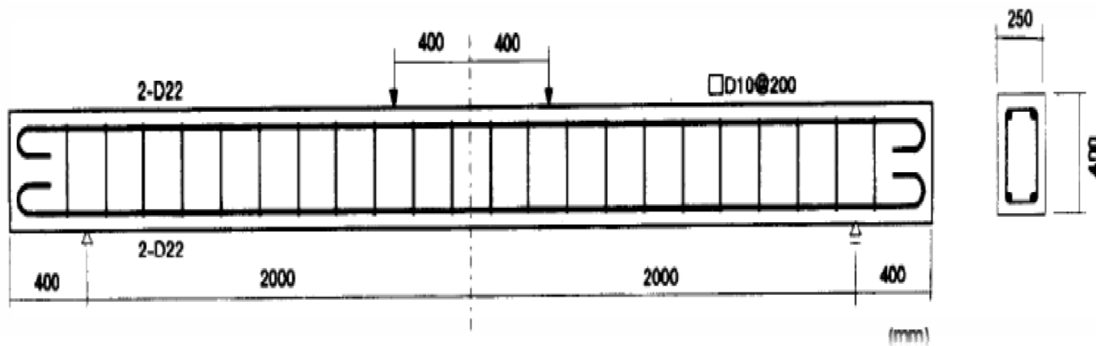
Αριθμός δοκιμίου	Αριθμός φύλλων CFRP	Μέθοδος φόρτισης
1	-	FPB**
2	1	FPB
3	2	FPB
4*	2	FPB
5	3	FPB
6	1	TPB***

* ρηγματωμένη δοκός, προ - φορτισμένη δοκός στα 2/3 του οριακού φορτίου αστοχίας

** FPB: four point bending *** TPB: three point bending

Πίνακας 2.3: Αριθμός φύλλων ΙΟΠ & μέθοδος δοκιμής

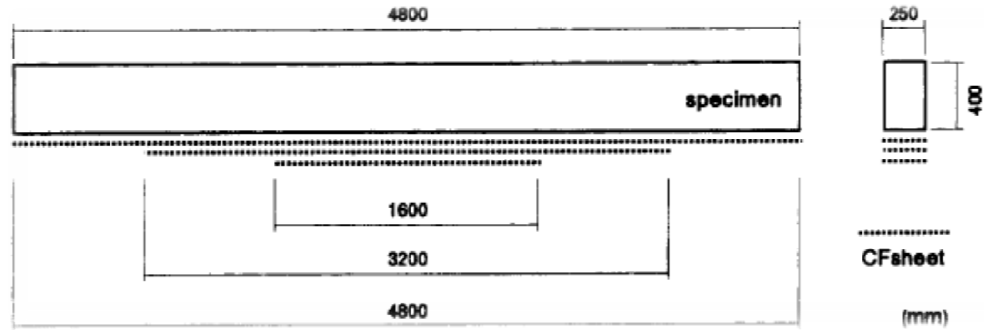
2.3.2. Σειρά 2



Σχήμα 2.3: Διαστάσεις και οπλισμοί δοκών (σειρά 2)

Η σειρά 2 των πειραμάτων που διεξήγαγαν οι K. Takeda et al αποτελούνταν από μια μεγαλύτερη δοκό με διαστάσεις ($l \cdot b \cdot h$) 4800*250*400mm, ο διαμήκης εφελκόμενος και θλιβόμενος οπλισμός ήταν 2Φ22 και οι συνδετήρες Φ10/220mm. Στην δοκό εφαρμόστηκε φόρτιση τεσσάρων σημείων μέχρις ότου η δοκός να έχει κεντρική μετατόπιση 40mm - η οποία αντιστοιχεί στο 1% του ανοίγματος μεταξύ των δύο στηρίξεων (4000mm)- και αποφορτίστηκε. Ο εφελκόμενος οπλισμός έφτασε στην διαρροή και δημιουργήθηκαν πολλές καμπτικές ρωγμές. Η δοκός επισκευάστηκε με έγχυση στις ρωγμές εποξικής

ρητίνης, διατηρήθηκε μια μέρα σε θερμοκρασία δωματίου και τέλος ενισχύθηκε με φύλλα ΙΟΠ ινών άνθρακα όπως φαίνεται στο σχήμα.



Σχήμα 2.4: Τρόπος επικόλλησης ΙΟΠ (σειρά 2)

Τέλος δίνεται ο πίνακας με τις μηχανικές ιδιότητες του σκυροδέματος και του χάλυβα ενώ για το σύνθετο υλικό δίνονται: $t=0.28\text{mm}$ και $f=2058\text{MPa}$

For concrete:	f_c (N mm^{-2})	$E(\times 10^4)$ (N mm^{-2})	ν	f_t (N mm^{-2})	f_b (N mm^{-2})
	23.5	2.15	0.21	1.99	3.68
For main reinforcement:	Name	Mark	σ_Y (N mm^{-2})	σ_B (N mm^{-2})	δ (%)
	D10	SD345	372	537	15.4
	D22	SD295	324	482	31.1

^a f_c = compressive strength, E = modulus of elasticity (secant modulus), ν = Poisson's ratio, f_t = splitting tensile strength, f_b = flexural strength, σ_Y = yield strength, σ_B = tensile strength, δ = elongation

Πίνακας 2.4: Μηχανικές ιδιότητες σκυροδέματος και χάλυβα

Αριθμός δοκού	Ροπή στην ρηγμάτωση(kNm)	Ροπή στην διαρροή(kNm)	Ροπή στην αστοχία(kNm)	Τρόπος αστοχίας
1	4.165	9.996	11.96	Καμπτική αστοχία με σύνθλιψη σκυροδέματος

2	4.998	13.75	26.40	Σχίσσιμο ΙΟΠ μετά τον διαχωρισμό
3	6.252	16.25	27.87	Σχίσσιμο ΙΟΠ μετά τον διαχωρισμό
4	-	17.91	26.86	Διαχωρισμό ΙΟΠ
5	5.419	19.16	28.76	Διαχωρισμός ΙΟΠ
6	6.370	13.72	22.28	Σχίσσιμο ΙΟΠ μετά τον διαχωρισμό

Πίνακας 2.5: Αναπτυσσόμενες ροπές και τρόπος αστοχίας

2.4. Hee Sun Kim, Yeong Soo Shin (2010)

Flexural Behavior of reinforced concrete (RC) beams retrofitted with hybrid fiber reinforced polymers (FRPs) under sustaining loads [3]

Η συγκεκριμένη μελέτη προσπαθεί να παρουσιάσει την επίδραση ενός νέου υβριδικού συστήματος ΙΟΠ στην συμπεριφορά δοκών οπλισμένου σκυροδέματος. Αυτό το νέο υβριδικό σύστημα κατασκευάστηκε βασισμένο στην ιδέα ότι από τον συνδυασμό στρώσεων από CFRP και GFRP θα προκύψει μικρότερο μέτρο ελαστικότητας της ενισχυμένης δοκού σε σύγκριση με αυτό που θα προέκυπτε αν υπήρχαν μόνο στρώσεις CFRP και υψηλότερη αντοχή από την περίπτωση στρώσεων GFRP.

Αναλυτικότερα σε φόρτιση τεσσάρων σημείων δοκιμάστηκαν δεκατέσσερις δοκοί διαστάσεων (μήκος*πλάτος*ύψος) 2400*150*250mm. Οι δοκοί περιείχαν διαμήκη εφελκυσμένο και θλιβόμενο οπλισμό 2Φ13 και 2Φ10 αντίστοιχα καθώς και συνδετήρες Φ10/100mm.

Υλικό	Μέτρο Ελαστικότητας(GPa)	Αντοχή (MPa)
Σκυρόδεμα	23.7	31.93
Χάλυβας	Φ10: 204.0	443.3
	Φ13: 226.2	531.16

Πίνακας 2.6: Μηχανικές ιδιότητες σκυροδέματος/χάλυβα

Οι δοκοί οι οποίες προ-φορτίστηκαν με το 50% ή 70% του οριακού φορτίου αστοχίας, στην συνέχεια δεν αποφορτίστηκαν αλλά το φορτίο αυτό συντηρήθηκε με την βοήθεια ενός υδραυλικού εμβόλου και ακολούθησε η διαδικασία επισκευής τους. Οι ρωγμές που αναπτύχθηκαν λόγω της προ-φόρτισης και ήταν πάνω από 0.3mm επισκευάστηκαν πριν την ενίσχυση με έγχυση εποξικής ρητίνης.

Όλες οι δοκοί διατηρήθηκαν σε θερμοκρασία δωματίου τουλάχιστον επτά ημέρες πριν την διεξαγωγή των πειραμάτων.

Δύο τρόποι αστοχίας κυρίως παρατηρήθηκαν. Οι ρωγμές άρχισαν να διαδίδονται νωρίτερα στα δοκίμια CC, GG (2.3 kN) απ' ότι στο δοκάρι με φύλλα ΙΟΠ GC (2.7 kN) εξαιτίας πιθανότατα της καλύτερης συνάφειας των υβριδικών ΙΟΠ. Στο δοκίμιο ελέγχου αξίζει να σημειωθεί ότι η έναρξη της εμφάνισης των ρωγμών έγινε στα 1.3 kN γύρω από τις περιοχές όπου εφαρμόστηκαν τα φορτία. Καθώς το εφαρμοζόμενο φορτίο αυξανόταν οι ρωγμές διαδίδονταν από τη μέση της δοκού και από τα σημεία που εφαρμόζονταν οι δυνάμεις.

Όταν το εφαρμοζόμενο φορτίο έφτασε τα 59.39kN οι ράβδοι οπλισμού άρχισαν να διαρρέουν και καμπτικές ρωγμές παρατηρήθηκαν στη δοκό.

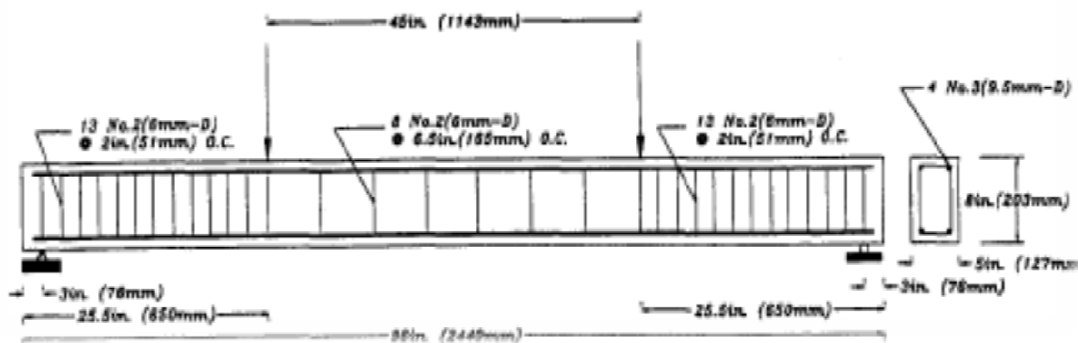
Δοκοί	Ράβδοι οπλισμού			Αριθμός στρώσεων ΙΟΠ	Προφορτισμένα/μη προφορτισμένα
	Εφελακνόμενο πέλαμα	Θλιβόμενο πέλαμα	Συνδετήρες		
CONTR	2Φ13	2Φ10	Φ10/100	0	Δοκίμιο ελέγχου
CC	2Φ13	2Φ10	Φ10/100	2	Μη προφορτισμένη
GG	2Φ13	2Φ10	Φ10/100	2	Μη προφορτισμένη
CG	2Φ13	2Φ10	Φ10/100	2	Μη προφορτισμένη
GC	2Φ13	2Φ10	Φ10/100	2	Μη προφορτισμένη
CCG	2Φ13	2Φ10	Φ10/100	3	Μη προφορτισμένη
GCG	2Φ13	2Φ10	Φ10/100	3	Μη προφορτισμένη
GCC	2Φ13	2Φ10	Φ10/100	3	Μη προφορτισμένη
CG-50	2Φ13	2Φ10	Φ10/100	2	Προφορτισμένη
CG-70	2Φ13	2Φ10	Φ10/100	2	Προφορτισμένη
GC-50	2Φ13	2Φ10	Φ10/100	2	Προφορτισμένη
GC-70	2Φ13	2Φ10	Φ10/100	2	Προφορτισμένη
GCC-50	2Φ13	2Φ10	Φ10/100	3	Προφορτισμένη
GCC-70	2Φ13	2Φ10	Φ10/100	3	Προφορτισμένη

Πίνακας 2.7: Προφορτισμένοι ή μη προφορτισμένοι ράβδοι

2.5. *Tom Norris, Hamid Saadatmanesh & Mohammad R. Ehsani (Members ASCE) (1997)*

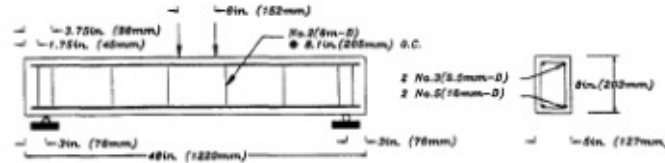
Shear and Flexural Strengthening of R/C Beams with Carbon Fiber Sheets [4]

Η πειραματική μελέτη των Norris et al [4] βασίστηκε στην προετοιμασία 19 δοκών οπλισμένου σκυροδέματος, οι περισσότερες από τις οποίες προρηγματώθηκαν. Στη συνέχεια εφαρμόστηκαν τα φύλλα ΙΟΠ άνθρακα και ακολούθως φορτίστηκαν μέχρι την οριακή κατάσταση αστοχίας.



Σχήμα 2.5: Παρουσίαση της δοκού με τον υπάρχων οπλισμό της

Κάθε μια από τις δεκαεννέα δοκούς είχε διατομή (B*H) 127mm*203mm. Οι δεκατρείς δοκοί είχαν μήκος (L) 2.44m και είχαν θλιβόμενο και εφελκόμενο οπλισμό 2 no.3 (Φ9.5mm) ανά παρειά. Οι συνδετήρες που χρησιμοποιήθηκαν ήταν Φ6mm/165mm στη μέση της δοκού όπου δεν υπάρχει διάτμηση και Φ6mm/51mm στο τμήμα μεταξύ των στηρίξεων και του σημείου επιβολής των φορτίων. Οι υπόλοιπες έξι δοκοί είχαν το μισό μήκος (L) 1.22m. Σε αυτές τις δοκούς ο εφελκόμενος οπλισμός αποτελούνταν από 2 ράβδους των 16mm ενώ ο θλιβόμενος από 2 ράβδους των 9.5mm. Τέλος οι συνδετήρες ήταν Φ6mm/205mm δηλαδή μεγαλύτερο από το στατικό ύψος της διατομής, ώστε να μπορούν να αναπτυχθούν διατμητικές ρωγμές. Στις έξι κοντύτερες δοκούς τα δύο επιβαλλόμενα φορτία ήταν πολύ κοντά στο κέντρο και έτσι οι ροπές που αναπτύχθηκαν ήταν μικρότερες σε αντίθεση με τις τέμνουσες δυνάμεις. Ο χάλυβας και το σκυρόδεμα που χρησιμοποιήθηκε υποβλήθηκε σε δοκιμές και το όριο διαρροής προσδιορίστηκε ίσο με 420MPa, ενώ το σκυρόδεμα είχε θλιπτική αντοχή 36.5MPa.



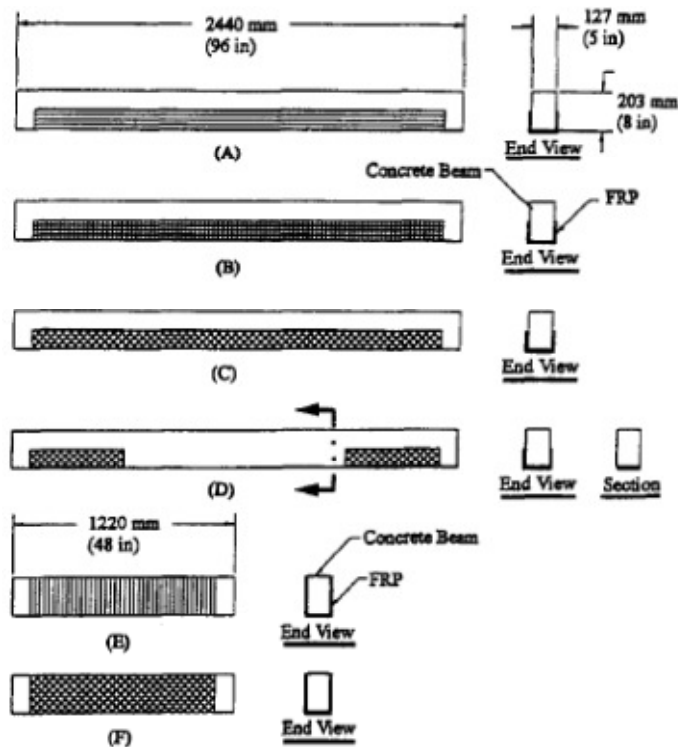
Σχήμα 2.6: Παρουσίαση της δοκού του πειράματος

Ο πίνακας [2.8] περιέχει συγκεντρωμένα τα χαρακτηριστικά των δοκών. Οι δοκοί ελέγχου – χωρίς επισκευή συμβολίζονται με το γράμμα C, ενώ το νούμερο 96 και 48 είναι τα δύο διαφορετικά μήκη των δοκών που κατασκευάστηκαν σε ίντσες και αντιστοιχούν σε 2440mm και 1220mm.

Τα λατινικά γράμματα I, II, III αναφέρονται στο σύστημα ΙΟΠ που χρησιμοποιήθηκε. Τα λατινικά γράμματα A-F πίνακας [2.8] αναφέρονται στις διεύθυνση των ινών και τέλος με το γράμμα u είναι οι δοκοί οι οποίες δεν ηγματοώθηκαν πριν την εφαρμογή των ΙΟΠ.

Beam designation (1)	Flexural or shear specimen (2)	FRP system (3)	FRP orientation (see Fig. 4) (4)
C96	Flexural	(none)	(none)
C48	Shear	(none)	(none)
IA	Flexural	1	A
IB	Flexural	1	B
IBu	Flexural	1	B
IBi	Flexural	1	B
IC	Flexural	1	C
ID	Flexural	1	D
IE	Shear	1	E
IF	Shear	1	F
IIA	Flexural	2	A
IIB	Flexural	2	B
IIBu	Flexural	2	B
IIBi	Flexural	2	B
IIIC	Flexural	3	C
IIID	Flexural	3	D
IIIE	Shear	2	E
IIIF	Shear	3	F
IIFu	Shear	3	F

Πίνακας 2.8: Σύστημα ΙΟΠ που χρησιμοποιήθηκε



Σχήμα 2.7: Απεικόνιση των στρώσεων ΙΟΠ που χρησιμοποιήθηκαν

Το σύστημα ΙΟΠ 1 περιλάμβανε εποξική ρητίνη Α και δύο στρώσεις ΙΟΠ με τελικό πάχος περίπου 1mm. Το σύστημα ΙΟΠ 2 περιελάμβανε εποξική ρητίνη Β και δύο στρώσεις σύνθετου υλικού με τελικό πάχος πάλι 1mm.

Τα περισσότερα από τα δοκίμια είχαν προ-φορτιστεί πριν εφαρμοστούν τα ΙΟΠ. Το φορτίο που εφαρμόστηκε ήταν αρκετό για να ρηγματωθεί το σκυρόδεμα ενώ οι αφόρτιστες δοκοί έπαιξαν τον ρόλο των δοκών έλεγχου.

2.6. C.B.Demakos & G.Dimitrakis

On the Effect of FRP Sheet Composite Anchorage to Flexural Behavior of Reinforced Concrete Beams [5]

Τα πειράματα των Δημάκου και Δημητράκη περιλάμβαναν δοκούς διαστάσεων (L*B*H) 150*10*20cm. Είχαν κατασκευαστεί από σκυρόδεμα C16/20 και περιείχαν ως οπλισμό S500 δύο ράβδους Φ8 στην εφελκόμενη και δύο στην θλιβόμενη παρειά. Οι δοκοί είχαν και συνδετήρες Φ8/110cm στις ακραίες διατομές των δοκών και Φ8/350 στη μεσαία διατομή.

Τα σύνθετα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν ήταν από ίνες άνθρακα με μέτρο ελαστικότητας 82 GPa ενώ η ρητίνη που εφαρμόστηκε για την τοποθέτηση των CFRPs στις δοκούς ήταν εποξικής ρητίνη με μέτρο ελαστικότητας 5GPa.

Για την διεξαγωγή των πειραμάτων κατασκευάστηκαν πέντε ομάδες δοκών. Στην πρώτη ομάδα (BV) οι δοκοί ήταν χωρίς εξωτερική ενίσχυση (δοκοί ελέγχου). Στην δεύτερη ομάδα (B-CFRP) στην κάτω παρειά των δοκών τοποθετήθηκε μια στρώση ΙΟΠ άνθρακα πλάτους 11.5 cm και πάχους 1m. Στην τρίτη ομάδα δοκών (B-CFRP-1AN-B) η μια στρώση CFRP αγκυρώθηκε με την βοήθεια μιας δέσμης CFRP η οποία εμποτίστηκε στην εποξική ρητίνη και ενσωματώθηκε σε βάθος 11cm μέσα στην δοκό διαπερνώντας το ύφασμα που είχε εφαρμοστεί στην εφελκυστική παρειά. Οι ίνες απλώθηκαν στην συνέχεια κυκλικά πάνω από το ύφασμα ΙΟΠ σε διάμετρο 8cm, ενώ πάνω από τις ίνες εφαρμόστηκε ένα κομμάτι υφάσματος σύνθετων υλικών πλάτους 11.5cm και μήκους 15 cm με διεύθυνση ινών παράλληλα στον άξονα της δοκού. Η τέταρτη ομάδα (B-CFRP-2AN-B) δοκών ήταν όμοια με την τρίτη με την διαφορά ότι σε κάθε άκρο είχε δύο αγκύρια σύνθετων ινών με απόσταση μεταξύ τους 8cm. Τέλος στην πέμπτη ομάδα (B-CFRP-2UG) ως σύστημα αγκύρωσης χρησιμοποιήθηκε διπλό ύφασμα ΙΟΠ άνθρακα σχήματος U στα άκρα των δοκών. Πρέπει να σημειωθεί ότι κάθε ομάδα από τις προαναφερθείσες περιελάμβανε τρεις δοκούς για να γίνει εκτίμηση των αποτελεσμάτων.

Όλες οι δοκοί διατηρήθηκαν σε νερό για 28 ημέρες. Στην συνέχεια οι γωνίες στο κάτω τμήμα των δοκών στρογγυλεύθηκαν ενώ ακολούθως καθαρίστηκαν από την σκόνη για την επίτευξη καλύτερης συνεργασίας μεταξύ σκυροδέματος και υφάσματος.

2.7. Συμπεράσματα

Στα πειράματα των Takeda et al [2] οι δοκοί ελέγχου ανέπτυξαν καμπτικές ρωγμές και τελικά αστόχησαν λόγω σύνθλιψης του σκυροδέματος. Οι ενισχυμένες δοκοί ανέπτυξαν και αυτές καμπτικές ρωγμές και αστόχησαν εξαιτίας του σκισίματος των φύλλων ΙΟΠ άνθρακα.

Από το διάγραμμα τάσεων - παραμορφώσεων οι Takeda et al [2] συμπέραναν ότι η καμπτική ακαμψία και η αντοχή των δοκών αυξανόταν, ενώ η ικανότητα παραμόρφωσης μειωνόταν με την αύξηση του αριθμού των στρώσεων ΙΟΠ.

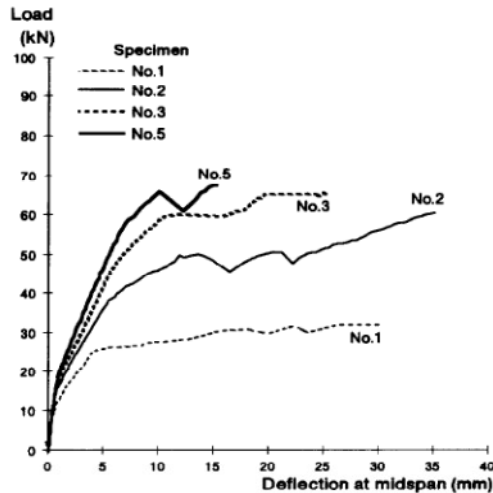


Figure 6 Load-deflection curves (series 1, specimens 1, 2, 3 and 5). Number of sheets is 1, 2 and 3 for specimens 2, 3 and 5, respectively. Specimen No. 1 is the virgin beam

Σχήμα 2.8: Διάγραμμα τάσεων - παραμορφώσεων

Όσον αφορά τη δοκό στην οποία είχε επιβληθεί φορτίο πριν την ενίσχυση τα συμπεράσματα βγήκαν συγκρίνοντας την με μια πανομοιότυπη δοκό με τις ίδιες στρώσεις ΙΟΠ άνθρακα. Παρατηρήθηκε ίδια συμπεριφορά και για τις δύο δοκούς. Ως εκ τούτου μπορεί να θεωρηθεί ότι η βλάβη που προκαλείται στην παρούσα δοκιμή επηρεάζει ελάχιστα την καμπτική συμπεριφορά των ενισχυμένων δοκών.

Οι δοκοί ελέγχου στα πειράματα των Alagusundaramoorthy et al [1] αστόχησαν αφού ο εφελκόμενος σπλισμός έφτασε στο όριο διαρροής του πριν η θλιπτική παραμόρφωση του σκυροδέματος φτάσει το 0.003. Και στις 14 δοκούς(ενισχυμένες ή ελέγχου) παρατηρήθηκαν καμπτικές ρωγμές μεταξύ των δύο συγκεντρωμένων φορτίων που επιβλήθηκαν. Οι περισσότερες δοκοί οι οποίες ενισχύθηκαν με φύλλα CFRP(και των δύο διαστάσεων) αστόχησαν λόγω της σύνθλιψης του σκυροδέματος σε ένα από τα δυο σημεία επιβολής του φορτίου. Παρατηρήθηκε επίσης διαχωρισμός των φύλλων ΙΟΠ με την έναρξη της σύνθλιψης του σκυροδέματος.

Οι C.B.Demakos & G.Dimitrakis [5] όσον αφορά στον τρόπο αγκύρωσης των σύνθετων υλικών επιβολής εξωτερικής ενίσχυσης διαπίστωσαν πως ο τρόπος αγκύρωσης με τις δύο στρώσεις υφάσματος ΙΟΠ μορφής U προσέφερε υψηλότερη ακαμψία στις δοκούς που εφαρμόστηκε σε σχέση με τις δοκούς στις οποίες εφαρμόστηκαν αγκύρια ινών άνθρακα. Επιπλέον οι δοκοί με το ένα αγκύριο σε κάθε άκρο ήταν πιο εύκαμπτες με εκείνες με δύο αγκύρια σε κάθε άκρο. Πάντως οι δοκοί με δύο αγκύρια αστόχησαν σε μεγαλύτερο φορτίο.

Αναλυτικότερα, γενικά όλες οι δοκοί αστόχησαν καμπτική και εμφάνισαν ασήμαντες ρωγμές λόγω θλίψης στην άνω παρειά.

Στην ομάδα των δοκών στις οποίες για την αγκύρωση του υφάσματος ΙΟΠ χρησιμοποιήθηκε ύφασμα μορφής U στις μεν δύο δοκούς το ύφασμα αποκολλήθηκε στην μεσαία διατομή στην μεν τρίτη στο αριστερό άκρο της. Σχεδόν όμοια ήταν και η απόκριση των δοκών με ένα αγκύριο ανά άκρο με την διαφορά ότι σε μία δοκό οι ρωγμές που αναπτύχθηκαν ήταν καμπτοδιατμητικές. Στις δοκούς με τα δύο αγκύρια σε κάθε άκρο το ύφασμα ΙΟΠ σκίστηκε στο αριστερό άκρο ή στην μεσαία διατομή των δοκών, και παρουσιάστηκε μεγάλη αύξηση της ακαμψίας που οφείλετε στο γεγονός ότι η απόσταση των εσωτερικών αγκυρίων ήταν μικρότερη σε σχέση με την απόσταση που είχαν τα αγκύρια στις δοκούς B-CFRP-1AN-B.

Από τα πειράματα οι Hee Sun Kim, Yeong Soo Shin (2010) [3] συμπέραναν πως τα υβριδικά συστήματα σύνθετων υλικών για την ενίσχυση δοκών βελτιώνουν εμφανώς την οριακή αντοχή των δοκών καθώς και την ακαμψία τους. Επίσης η σειρά με την οποία εφαρμόζονται τα υφάσματα διαφορετικού τύπου ινών επηρεάζει σημαντικά τόσο την αντοχή όσο και την ακαμψία. Έτσι λοιπόν διαπιστώθηκε ότι οι δοκοί στις οποίες επικολλήθηκε πρώτα το ΙΟΠ με ίνες γυαλιού επέδειξαν βελτιωμένη αντοχή και ακαμψία.

Η επίδραση της προ-φόρτισης στις είναι ξεκάθαρη και η επίδραση της υβριδικής ενίσχυσης είναι μικρότερη στις προ-φορτισμένες δοκούς εν αντιθέσει με τις μη προ-φορτισμένες. Παρόλα αυτά τα αποτελέσματα της προ-φόρτισης στις δοκούν μπορούν να ξεπεραστούν με την επισκευή των ρωγμών (γέμισμα με ρητίνη) πριν την εφαρμογή των σύνθετων υλικών. Οι ενισχυμένες δοκοί αστοχούν πριν το υβριδικό σύστημα ενίσχυσης ΙΟΠ φτάσει στο όριο αντοχής του.

Οι Tom Norris et(1997) [4] τόνισαν ότι το ποσοστό αύξησης της αντοχής και της ακαμψίας καθώς και ο τρόπος αστοχίας σχετίζονται με την διεύθυνση των ινών. Όταν οι ίνες του ΙΟΠ άνθρακα είναι κάθετες στις ρωγμές τότε η αύξηση της αντοχής και της ακαμψίας είναι μεγαλύτερη και η αστοχία που συμβαίνει οφείλεται στην αστοχία του σκυροδέματος λόγω της συγκέντρωσης τάσεων κοντά στην άκρη του σύνθετου υλικού. Όταν οι ίνες τοποθετούνται με γωνία 45° ως προς τις ρωγμές παρατηρείται μικρότερη αύξηση της αντοχής και της ακαμψίας ενώ ο τρόπος αστοχίας είναι όμοιος με τον παραπάνω.

τρίτο κεφάλαιο

διατάξεις από κανονισμούς για ενίσχυση σε κάμψη με σύνθετα υλικά

3.1. Κανονισμός Επεμβάσεων (ΚΑΝ.ΕΠΕ.)

3.1.1. Γενικά

Η τεχνική εφαρμόζεται κυρίως σε πλάκες και δοκούς, σπανίως δε σε υποστυλώματα ή τοιχώματα. Τα ελάσματα ή τα υφάσματα επικολλώνται στο εφελκυσμένο πέλμα με χρήση κατάλληλου συγκολλητικού υλικού (π.χ. εποξειδική κόλλα). Στην περίπτωση των χαλύβδινων ελασμάτων μπορούν να χρησιμοποιηθούν και βλήτρα σύνδεσης. Στην περίπτωση που χρησιμοποιούνται ινοπλισμένα πολυμερή επιτρέπεται η χρήση ειδικών αγκυρίων-βλήτρων, υπό τον όρο ότι η αποτελεσματικότητα των είναι επαρκώς τεκμηριωμένη στη βιβλιογραφία και βεβαιώνεται με αξιόπιστες πειραματικές δοκιμές.

Η εναλλακτική μορφή εφαρμογής της τεχνικής με χρήση νέων ράβδων

οπλισμού, από χάλυβα ή ινοπλισμένα πολυμερή, πακτωμένων με κατάλληλο συγκολλητικό υλικό (π.χ. εποξειδική κόλλα) σε "αυλάκια" στο εφελκυτόμοιο πέλαμα, μπορεί να εφαρμοστεί εφόσον διατίθενται κατάλληλες αξιόπιστες μέθοδοι σχεδιασμού. Οι παρούσες διατάξεις δεν καλύπτουν αυτήν την περίπτωση.

Η εφαρμογή της τεχνικής των πρόσθετων εφελκυτόμοιων οπλισμών, συνιστάται όταν η επιδιωκόμενη αύξηση της καμπτικής αντίστασης του στοιχείου δεν είναι μεγαλύτερη από την αρχική.

Πρέπει να λαμβάνεται υπόψη ότι μέσω αυτής της τεχνικής, εκτός από την αύξηση της καμπτικής αντίστασης του στοιχείου, επιφέρεται σημαντική αύξηση της δυσκαμψίας και περιορισμός των παραμορφώσεων και της ρηγμάτωσης, καθώς και μείωση της πλαστιμότητας.

Για να εξασφαλίζεται η ακεραιότητα του ενισχυμένου στοιχείου ακόμα και μετά την ενδεχόμενη αστοχία της ενίσχυσης λόγω μιας τυχηματικής δράσης (π.χ. πυρκαγιά), το στοιχείο αυτό πρέπει να είναι σε θέση να φέρει, αρχικώς, τα μόνιμα φορτία του τουλάχιστον.

Μέσω αυτής της συστάσεως επιδιώκεται να εξασφαλισθεί ο επιθυμητός τρόπος αστοχίας του στοιχείου, κατά τον οποίον το υλικό ενισχύσεως φθάνει την συμβατική παραμόρφωση αστοχίας του, ενώ το σκυρόδεμα στην θλιβόμενη ζώνη έχει παραμόρφωση $\leq 0,0035$. Έτσι, αποφεύγεται η τοποθέτηση υπερβολικά μεγάλης ποσότητας υλικού ενίσχυσης, η οποία θα οδηγούσε σε πρόωρη ψαθυρή αστοχία της θλιβόμενης ζώνης.

3.1.2. Προσθήκη ελασμάτων από χάλυβα ή ινοπλισμένα πολυμερή

- i. Η ανεπάρκεια του εφελκυτόμοιου οπλισμού σε ένα υφιστάμενο δομικό στοιχείο Ο.Σ. μπορεί να αντιμετωπιστεί με επικόλληση ελασμάτων από χάλυβα ή ινοπλισμένα πολυμερή (σε μορφή ελάσματος ή σπανίως επιτόπου εμποτισμένου ειδικού υφάσματος). Η τεχνική δεν εφαρμόζεται σε περιοχές οι οποίες ενδέχεται να βρεθούν υπό θλιπτική καταπόνηση λόγω ανακυκλιζόμενης ροπής ή τυχηματικής δράσης.
- ii. Η εφαρμογή της τεχνικής επιτρέπεται υπό τον όρο ότι το

υφιστάμενο δομικό στοιχείο είναι σε θέση να αναλάβει, χωρίς την ενίσχυση, την ένταση από τα μόνιμα φορτία του τελικού σχεδιασμού.

- iii. Η ποσότητα του προστιθέμενου υλικού ενισχύσεως συνιστάται να επιλέγεται έτσι ώστε στην οριακή κατάσταση αστοχίας, ο υφιστάμενος εφελκόμενος οπλισμός να αναπτύσσει παραμόρφωση τουλάχιστον ίση με την παραμόρφωση διαρροής του, χωρίς αστοχία της θλιβόμενης ζώνης του σκυροδέματος.
- iv. Υπό το σύνολον, των προϋποθέσεων που ακολουθούν, το ενισχυμένο στοιχείο θεωρείται μονολιθικό, η δε εκτίμηση της καμπτικής του αντίστασης και των άλλων χαρακτηριστικών του μπορεί να γίνει θεωρώντας το υλικό ενίσχυσης ως νέον εξωτερικό οπλισμό.
- v. Η τιμή σχεδιασμού της ενεργού τάσεως σ_{jd} του νέου οπλισμού, εκτιμάται με βάση μία κρίσιμη τιμή της τάσης $\sigma_{j,crit}$, οφείλει δε να είναι μικρότερη από την τιμή σ_{jd} που αντιστοιχεί στην δυσμενέστερη από τις ακόλουθες δύο μορφές αστοχίας:

1. Αστοχία του ίδιου του υλικού ενίσχυσης, οπότε,

$$\sigma_{j,crit} = f_{jk} \text{ και}$$

$$\sigma_{jd} = \frac{1}{\gamma_m} \cdot f_{jk}$$

όπου

f_{jk} είναι η χαρακτηριστική τιμή αντοχής του υλικού ενίσχυσης και

γ_m είναι ο επί μέρους συντελεστής ασφαλείας για το υλικό ενίσχυσης

2. Πρόωρη αποκόλληση του υλικού ενίσχυσης λόγω ανεπάρκειας της σύνδεσης κατά μήκος του στοιχείου ή της αγκύρωσης των άκρων του, οπότε,

$$\sigma_{jd} = \sigma_{j,crit} \cdot \gamma_{Rd}$$

όπου,

γ_{Rd} είναι κατάλληλος συντελεστής ασφαλείας, ο οποίος καλύπτει τις αβεβαιότητες του προσομοιώματος

$\sigma_{j,crit}$ είναι η τάση του υλικού η οποία οδηγεί σε αποκόλληση

- vi. Απαιτείται ειδικός έλεγχος για την περίπτωση πρόωρης διατμητικής αστοχίας του αρχικού στοιχείου στην περιοχή απόληξης του ελάσματος

(ή υφάσματος) ενίσχυσης.

vii. Συνιστάται:

- Να επιδιώκεται η χρήση ελασμάτων (ή υφασμάτων) με μικρό πάχος.
- Να αποφεύγονται οι ματίσεις του υλικού ενίσχυσης.
- Να ακολουθούνται κατάλληλοι κανόνες γεωμετρικής διάταξης των νέων οπλισμών, ώστε να επιτυγχάνεται η καλύτερη δυνατή συνεργασία μεταξύ τους και με το υφιστάμενο στοιχείο.
- Η αγκύρωση του οπλισμού ενίσχυσης πρέπει να γίνεται πέραν του σημείου μηδενισμού των ροπών (στην περιοχή υπό θλίψη).
- Αν η υπό ενίσχυση εφελκόμενη περιοχή του δομικού στοιχείου ενδέχεται, υπό συνθήκες ανακυκλιζόμενης έντασης, να βρεθεί υπό θλιπτική καταπόνηση, απαιτούνται πρόσθετα κατάλληλα μέτρα (π.χ. περίσφιγξη της περιοχής) για να παρεμποδιστεί ο "τοπικός λυγισμός" του υλικού. Διαφορετικά, δεν επιτρέπεται η εφαρμογή της τεχνικής.
- Στην περίπτωση χαλύβδινων ελασμάτων, πρέπει να εξασφαλίζεται η πλήρης μεταφορά της δύναμης διαρροής του οπλισμού ενίσχυσης στο σκυρόδεμα μέσω βλήτρων.
- Στην περίπτωση χρήσης σύνθετων υλικών να επιδιώκεται η βελτίωση της αγκύρωσης στα άκρα των ελασμάτων/υφασμάτων με χρήση εγκάρσιων λωρίδων ή γωνιακών ή άλλων αγκυρίων ειδικού τύπου με τεκμηριωμένη αποτελεσματικότητα.

viii. Σε κάθε περίπτωση λαμβάνονται κατάλληλα μέτρα πυροπροστασίας των υλικών ενίσχυσης (υφασμάτων ή ελασμάτων).

Ο νέος οπλισμός υπολογίζεται έτσι ώστε σε συνεργασία με τον υφιστάμενο παλιό οπλισμό να αναλαμβάνονται οι εφελκυστικές δυνάμεις που αντιστοιχούν στη συνολική καμπτική ένταση στην περιοχή ενίσχυσης. Προσεγγιστικά, για τον υπολογισμό της απαιτούμενης διατομής του οπλισμού ενίσχυσης (A_j), σε βαθμό προμελέτης, μπορεί να χρησιμοποιηθεί η σχέση:

$$A_j = \frac{\Delta M_{do}}{z \cdot \sigma_{jd}}$$

$$A_j = \frac{\Delta M_{do}}{z \cdot \sigma_{jd}} \Rightarrow \sigma_{jd} = \frac{\Delta M_{do}}{z \cdot A_j}$$

Όπου

ΔM_{do} είναι η πρόσθετη διατομή που καλείται να αναλάβει η ενισχυμένη διατομή (επιπλέον της M_{do} την οποία μπορεί να αναλάβει η αρχική)

z , ο μοχλοβραχίονας των εσωτερικών δυνάμεων (ο οποίος μπορεί να ληφθεί ίσος με $0,9d_j$) και

d_j το στατικό ύψος της διατομής, μετρούμενα από τη στάθμη του εξωτερικού οπλισμού.

Οι τιμές των $\sigma_{j,επι}$ και σ_{jd} μπορεί να εκτιμώνται για κάθε μορφή αστοχίας, με χρήση αξιόπιστων πηγών της διεθνούς βιβλιογραφίας.

Αν το υλικό ενίσχυσης είναι χάλυβας, ως αστοχία θεωρείται η διαρροή του, ενώ αν είναι ινοπλισμένο πολυμερές θεωρείται η θραύση του. Στην πρώτη περίπτωση λαμβάνεται $f_{jk} = f_{sy}$ και η τιμή του συντελεστή ασφαλείας του υλικού $\gamma_m = \gamma_s$ προσδιορίζεται με βάση τα προβλεπόμενα. Στη δεύτερη περίπτωση λαμβάνεται $\gamma_m = \gamma_{IOP} = 1,2$. Εξ άλλου, αν χρησιμοποιούνται περισσότερες, από μία στρώσεις ΙΟΠ, η τιμή της αντοχής του υλικού θεωρείται $f'_{jk} = \psi \cdot f_{jk}$ όπου ψ ο μειωτικός συντελεστής πολλών στρώσεων.

Η τιμή του συντελεστή μεγάλου πλήθους στρώσεων, ψ , εκτιμάται με βάση αξιόπιστα βιβλιογραφικά στοιχεία. Ελλείψει επαρκών σχετικών στοιχείων, μπορεί να λαμβάνεται

$$\psi = k^{-1/4}$$

Όπου k το πλήθος των στρώσεων του ΙΟΠ, όταν $k \geq 4$. Αλλιώς λαμβάνεται $\psi = 1,0$.

Ο συντελεστής αβεβαιότητας προσομοιώματος γ_{RD} μπορεί να ληφθεί ίσος με 1,2.

Γι' αυτήν τη μορφή αστοχίας, μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι παρακάτω προσεγγιστικές σχέσεις:

$$\sigma_{j, crit} \cong \beta \frac{\tau_b^{αποκ.}}{t_j} L_e$$

Όπου

$\beta = \beta_w \cdot \beta_L$, διορθωτικός συντελεστής

$$\tau_b^{αποκ.} \cong f_{ctm}$$

L_e το ενεργό μήκος αγκύρωσης (δηλ. το μήκος πέραν του οποίου η αναλαμβανόμενη απ' το υλικό ενίσχυσης δύναμη, δεν αυξάνεται άλλο), που υπολογίζεται από τη σχέση θεωρώντας ότι το άνοιγμα της κρίσιμης ρωγμής ισούται με 0,5mm, και λαμβάνεται ίσο με:

$$L_e = \sqrt{\frac{E_j \cdot t_j}{2 \cdot f_{ctm}}} (MPa, mm)$$

t_j, E_j είναι το πάχος και το μέτρο ελαστικότητας του υλικού ενίσχυσης αντίστοιχα. Στην περίπτωση που χρησιμοποιούνται k επάλληλες στρώσεις υλικού ενίσχυσης πάχους t_{j1} λαμβάνεται $t_j = \psi \cdot k \cdot t_{j1}$, όπου ψ ο μειωτικός συντελεστής πολλών στρώσεων.

$$\beta_w = \sqrt{\frac{2 - b_j / b_w}{1 + b_j / b_w}}, \text{ συντελεστής επιρροής πλάτος οπλισμού ενίσχυσης}$$

b_j το πλάτος του υλικού ενίσχυσης

b_w το πλάτος του εφελκυσμένου πέλματος του δομικού στοιχείου επί του οποίου επικολλάται το υλικό ενίσχυσης

$$\beta_L = \sin\left(\frac{\pi\lambda}{2}\right) \cong \lambda \cdot (2 - \lambda) \text{ συντελεστής επιρροής του διατιθέμενου μήκους}$$

αγκύρωσης, όπου $\lambda = \frac{L_{av}}{L_e} < 1,0$ και L_{av} το διατιθέμενο μήκος αγκύρωσης του οπλισμού ενίσχυσης

$$\beta_L = 1,0 \text{ όταν } \lambda > 1,0.$$

Αυτή η μορφή αστοχίας συμβαίνει συνήθως με τη μορφή απόσχισης της επικάλυψης του διαμήκους οπλισμού του στοιχείου στην περιοχή όπου απολήγει ο οπλισμός ενίσχυσης.

Η διαδικασία ελέγχου τεκμηριώνεται με χρήση αξιόπιστων τιμών της βιβλιογραφίας. Προσεγγιστικά, πάντως, μπορεί να εφαρμόζεται το ακόλουθο

κριτήριο:

$$V_{Sd}^{απολ.} \leq V_{Rd,c}^{απολ.} \quad \text{και} \quad M_{Sd}^{απολ.} \leq (2/3)M_{Rd}^{απολ.}$$

όπου

$V_{Sd}^{απολ.} \leq V_{Rd,c}^{απολ.}$ είναι οι τιμές της τέμνουσας σχεδιασμού και της τέμνουσας που αναλαμβάνει το σκυρόδεμα (βλ. §6.2.2 του ΕΚ 2) στην θέση όπου απολήγει ο οπλισμός ενίσχυσης

$M_{Sd}^{απολ.}$ είναι η τιμή της καμπτικής ροπής σχεδιασμού (που προκαλεί εφελκυσμό στο πέλμα όπου επικολλάται το υλικό ενίσχυσης) στη θέση που απολήγει ο οπλισμός ενίσχυσης

$M_{Rd}^{απολ.}$ είναι η αντίστοιχη ροπή αντοχής στην ίδια θέση.

Αν το παραπάνω κριτήριο δεν ικανοποιείται, απαιτείται πρόσθετος εξωτερικός οπλισμός διάτμησης ο οποίος θα αναλάβει τέμνουσα

$$V_{Sdj} = \frac{A_j \cdot \sigma_{jd}}{A_{so} \cdot f_{ydo} + A_j \cdot \sigma_{jd}} \cdot V_{Sd}^{απολ.}$$

όπου

A_{so}, f_{ydo} είναι το εμβαδόν της διατομής και το όριο διαρροής του εφελκυσμένου οπλισμού που υπάρχει στο αρχικό στοιχείο.

A_j είναι το εμβαδόν της διατομής του απαιτούμενου εξωτερικού οπλισμού καμπτικής ενίσχυσης.

Πάντως το πλήθος των στρώσεων δεν είναι σκόπιμο να ξεπερνά το 3 για ελάσματα και το 5 για εύκαμπτα υφάσματα, εκτός αν διατίθεται σχετική τεκμηρίωση που επιτρέπει τη χρήση περισσότερων στρώσεων. Επίσης, το πάχος των ελασμάτων δεν είναι σκόπιμο να ξεπερνά τα 4 mm ή 2% του πλάτους του ελάσματος.

Η απόσταση του υλικού ενίσχυσης από τις ακμές της διατομής σκυροδέματος συνιστάται να μην υπερβαίνει το πάχος της επικάλυψης της πλησιέστερης προς την ακμή παράλληλης ράβδου του υφιστάμενου οπλισμού.

Στις περιπτώσεις χρήσης περισσότερων παραλλήλων λωρίδων (συνήθως στην περίπτωση πλακών), η μεταξύ τους απόσταση δεν πρέπει να υπερβαίνει το 3πλάσιο του πάχους του στοιχείου και του $0,10 l_0$, όπου l_0 είναι η απόσταση των σημείων μηδενισμού της ροπής κάμψης κατά μήκος του στοιχείου.

Στις περιπτώσεις ενίσχυσης στο μέσο ανοίγματος, το υλικό ενίσχυσης πρέπει να επεκτείνεται και να αγκυρώνεται κοντά στις στηρίξεις. Στην περίπτωση ενίσχυσης στην περιοχή της στήριξης δοκών ή πλακών, το υλικό ενίσχυσης

επεκτείνεται και αγκυρώνεται στις θλιβόμενες περιοχές σε μήκος περίπου του 1 m, εντός αυτών.

Να αποφεύγεται η διάτρηση των σύνθετων υλικών. Στις περιπτώσεις που η διάτρηση είναι αναπόφευκτη, απαιτείται ειδική ενίσχυση της γειτονικής περιοχής με ειδικό σύστημα του οποίου η αποτελεσματικότητα θα τεκμηριώνεται από αξιόπιστες πειραματικές δοκιμές.

Να αποφεύγεται η επαφή κοινού χάλυβα με ίνες άνθρακα, για την αποφυγή γαλβανικής διάβρωσης.

3.2. *The International Federation for Structural Concrete (FIB 2001)*

3.2.1. *Γενικά*

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

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 σύνθετων υλικών (π.χ. γραμμική ελαστικότητα μέχρι τη θραύση) και (β) το ενδεχόμενο πρόωρης αποκόλλησής τους από το σκυρόδεμα.

3.2.2. *Αρχική κατάσταση*

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

Κατά την φάση της ενίσχυσης η κρίσιμη διατομή μιας δοκού καταπονείται σε ροπή M_0 , μεγαλύτερη της ροπή ρηγμάτωσης M_r (αν είναι μικρότερη, η επίδραση της M_0 είναι αμελητέα). Από ισορροπία δυνάμεων στη διατομή προκύπτει το ύψος της θλιβόμενης ζώνης x_0 :

$$1/2bx_o^2 + (a_s - 1)A_{s2}(x_o - d_2) = a_s A_{s1}(d - x_o)$$

όπου:

A_{s1} και A_{s2} : εμβαδόν εφελκόμενου και θλιβόμενου χάλυβα αντίστοιχα.

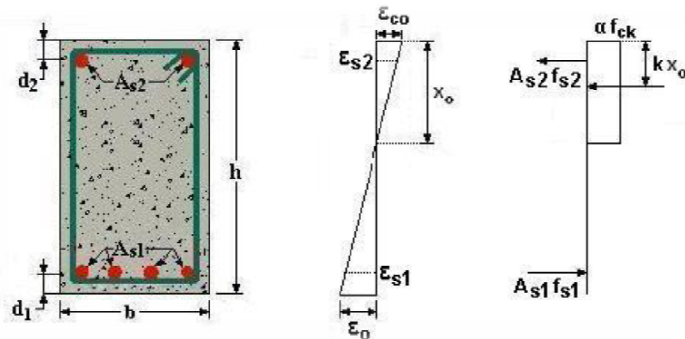
d_1 και d_2 : απόσταση κέντρου βάρους διατομής εφελκόμενου και θλιβόμενου χάλυβα από την ακραία εφελκόμενη ίνα αντίστοιχα.

d : στατικό ύψος.

h : ύψος διατομής.

b : πλάτος διατομής.

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



Σχήμα 3.1: Παραμορφώσεις σε ορθογωνική διατομή δοκού υπό ροπή M_o κατά την φάση ενίσχυσης

Η παραμόρφωση στην ακραία θλιβόμενη ίνα σκυροδέματος είναι :

$$\varepsilon_{co} = \frac{M_o x_o}{E_c I_{o2}}$$

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

$$I_{o2} = bx_o^3/3 + (a_s - 1)A_{s2}(x_o - d_2)^2 + a_s A_{s1}(d - x_o)^2$$

Η παραμόρφωση ε_o στην ακραία εφελκόμενη ίνα υπολογίζεται βάσει του συμβιβαστού των παραμορφώσεων:

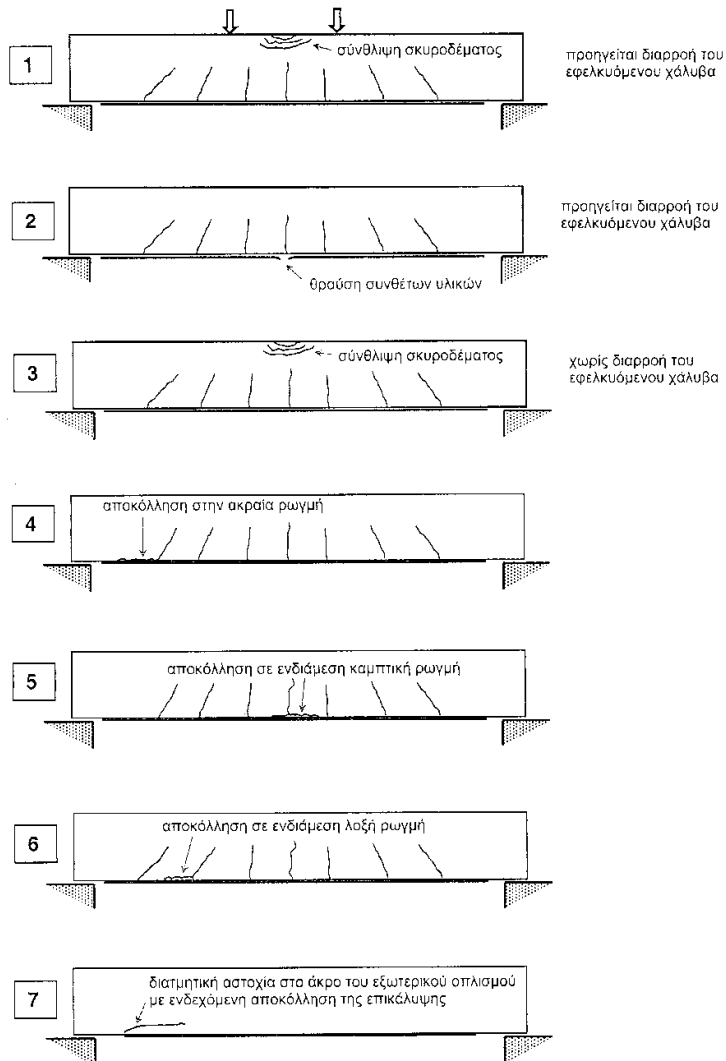
$$\varepsilon_o = \varepsilon_{co} \frac{h - x_o}{x_o}$$

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

3.2.3. Οριακή κατάσταση αντοχής – μηχανισμοί αστοχίας

Οι πιο πιθανοί μηχανισμοί αστοχίας στοιχείων από οπλισμένο σκυρόδεμα ενισχυμένων σε κάμψη με σύνθετα υλικά είναι οι εξής :

- 1) Διαρροή εφελκόμενου χάλυβα, σύνθλιψη σκυροδέματος
- 2) Διαρροή εφελκόμενου χάλυβα, θραύση σύνθετων υλικών
- 3) Σύνθλιψη σκυροδέματος
- 4) Αποκόλληση στην ακραία ρωγμή
- 5) Αποκόλληση σε ενδιάμεση καμπτική ρωγμή
- 6) Αποκόλληση σε ενδιάμεση λοξή ρωγμή
- 7) Διατμητική αστοχία στο άκρο – Αποκόλληση της επικάλυψης



Σχήμα 3.2: Μορφές αστοχίας δοκού ενισχυμένης σε κάμψη με σύνθετα υλικά

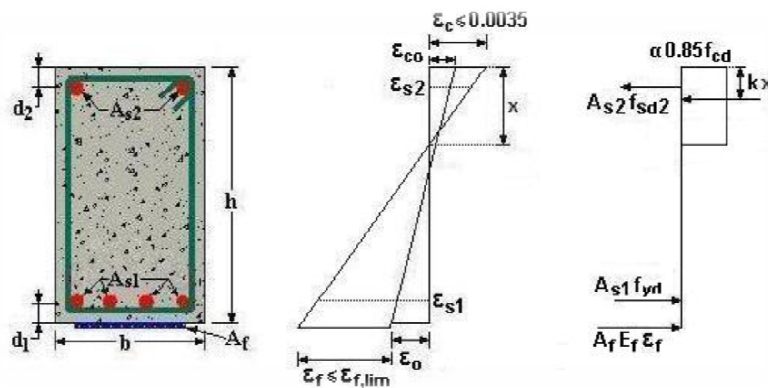
3.2.4. Υπολογισμοί για την οριακή κατάσταση αντοχής

Οι τρεις πρώτοι μηχανισμοί ονομάζονται μηχανισμοί πλήρους συνεργασίας (δεν σχετίζονται με πρόωρες αστοχίες π.χ. αποκολλήσεις σύνθετων υλικών). Έτσι, το ενισχυμένο στοιχείο μπορεί να ενισχυθεί ως σύμμικτο, στο οποίο υπάρχει πλήρης συνεργασία μεταξύ του σκυροδέματος και των εξωτερικών οπλισμών. Όλοι οι υπόλοιποι μηχανισμοί αντιστοιχούν σε απώλεια της πλήρους συνεργασίας.

3.2.5. Μηχανισμοί πλήρους συνεργασίας

3.2.5.1. Διαρροή εφελκόμενου χάλυβα, σύνθλιψη σκυροδέματος (Μηχανισμός 1)

Σύμφωνα με τον μηχανισμό αυτό, πρώτα πρέπει να διαρρέει ο διαμήκης οπλισμός σε εφελκυσμό και στη συνέχεια το σκυρόδεμα υφίσταται σύνθλιψη στη θλιβόμενη ζώνη χωρίς να υπάρχει αστοχία ή κάποιου είδους αποκόλληση στα σύνθετα υλικά. Αυτός είναι ο πλέον επιθυμητός μηχανισμός αστοχίας. Με βάση την ισορροπία των εσωτερικών δυνάμεων και του συμβιβαστού των παραμορφώσεων γίνεται ο υπολογισμός της ροπής αντοχής στην κρίσιμη διατομή του μέλους :



Σχήμα 3.3: Ανάλυση διατομής στην οριακή κατάσταση αντοχής

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

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

όπου:

$$\psi = 0.8$$

f_{cd} : θλιπτική αντοχή σκυροδέματος

x : ύψος θλιβόμενης ζώνης

f_{yd} : τάση διαρροής χάλυβα

A_f : εμβαδόν διατομής σύνθετων υλικών

ε_{s1} και ε_{s2} : παραμορφώσεις θλιβόμενου και εφελκόμενου χάλυβα αντίστοιχα

$$\varepsilon_{s2} = \varepsilon_c \frac{x - d_2}{x}$$

$$\varepsilon_f = \varepsilon_c \frac{h - x}{x} - \varepsilon_o$$

Ισχύει ότι $\varepsilon_c = \varepsilon_{cu}$ (οριακή παραμόρφωση σκυροδέματος = 0.0035) και ε_o η αρχική παραμόρφωση στην ακραία εφελκόμενη ίνα.

Ροπή αντοχής

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

όπου $\delta_G = 0.4$.

Για να εφαρμοστούν οι παραπάνω σχέσεις πρέπει ο χάλυβας να έχει πράγματι διαρρεύσει και η παραμόρφωση στα σύνθετα υλικά να είναι μικρότερη της οριακής, $\varepsilon_{f,lim}$, η αντιστοιχεί στη θραύση ή αποκόλλησή τους :

$$\varepsilon_{s2} = \varepsilon_c \frac{d - x}{x} \geq \frac{f_{yd}}{E_s}$$

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

3.2.5.2. Διαρροή εφελκόμενου χάλυβα, θραύση σύνθετων υλικών (Μηχανισμός 2)

Ο μηχανισμός αυτός κατά τον οποίο μετά τη διαρροή του εφελκόμενου χάλυβα ακολουθεί θραύση των σύνθετων υλικών είναι γενικά σπάνιος. Ενδέχεται να εμφανιστεί όταν το εμβαδόν διατομής των σύνθετων υλικών είναι πάρα πολύ

μικρό. Σε αυτή την περίπτωση ισχύουν οι σχέσεις (5.5)-(5.10) με τις εξής τροποποιήσεις: α) Η μέγιστη θλιπτική παραμόρφωση στο σκυρόδεμα δεν είναι πάντα ίση με την οριακή. β) Η παραμόρφωση στα σύνθετα υλικά ισούται με την οριακή $\varepsilon_f = \varepsilon_{fud}$. γ) Οι συντελεστές ψ και δ_G δίνονται από τις σχέσεις

$$\text{Για } \varepsilon_c \leq 0.002 : \quad \psi = 1000\varepsilon_c \left(0.5 - \frac{1000}{12} \varepsilon_c\right)$$

$$\text{Για } 0.002 \leq \varepsilon_c \leq 0.0035 \quad \psi = 1 - \frac{2}{3000\varepsilon_c}$$

$$\text{Για } \varepsilon_c \leq 0.002 \quad \delta_G = \frac{8 - 1000\varepsilon_c}{4(6 - 1000\varepsilon_c)}$$

$$\text{Για } 0.002 \leq \varepsilon_c \leq 0.0035 \quad \delta_G = \frac{1000\varepsilon_c(300\varepsilon_c - 4) + 2}{2000\varepsilon_c(3000\varepsilon_c - 2)}$$

3.2.5.3. Σύνθλιψη σκυροδέματος (Μηχανισμός 3)

Αυτός ο μηχανισμός όπου η θραύση του σκυροδέματος στην θλιβόμενη ζώνη προηγείται οποιασδήποτε άλλης αστοχίας αντιστοιχεί σε ψαθυρή συμπεριφορά και δεν είναι αποδεκτός. Η μη ενεργοποίηση αυτού του μηχανισμού επιτυγχάνεται περιορίζοντας το εμβαδόν των σύνθετων υλικών κάτω από μία κρίσιμη τιμή ώστε να εξασφαλιστεί η διαρροή του χάλυβα.

3.2.6. Μηχανισμοί με απώλεια της πλήρους συνεργασίας

3.2.6.1. Αποκόλληση στην ακραία ρωγή (Μηχανισμός 4)

Με βάση το αναλυτικό προσομοίωμα που έχει παρουσιασθεί στο κεφάλαιο 3.3 γίνεται υπολογισμός του απαιτούμενου μήκους αγκύρωσης στα άκρα των σύνθετων υλικών ώστε να μην επέλθει αποκόλληση στην περιοχή της αγκύρωσης. Θεωρώντας δοκό με διάγραμμα ροπών το οποίο έχει μετατεθεί κατά αι βάσει του μηχανισμού ισοδύναμου δικτυώματος για το μηχανισμό ανάληψης τέμνουσας υπολογίζονται οι δυνάμεις που ασκούνται τόσο στον εφελκυσμένο χάλυβα N_{sd} , όσο και στα σύνθετα υλικά N_{fd} σε κάθε διατομή, ως αποτέλεσμα της δράσας ροπής σχεδιασμού. Προσεγγιστικά, η συνολική εφελκυστική δύναμη σε ράβδους οπλισμού και σύνθετα υλικά $N_{sd} + N_{fd}$ ισούται με M_{sd}/z , όπου z ο μοχλοβραχίονας της δύναμης αυτής, περίπου ίσος με $0.95d$.

Η θέση πέρα από την οποία υπολογίζεται το μήκος αγκύρωσης των σύνθετων υλικών προσδιορίζεται εκεί όπου η καμπύλη της συνολικής εφελκυστικής δύναμης M_{sd}/z τέμνει τη μέγιστη δύναμη που μπορεί να παραληφθεί από το χάλυβα μόνο, $N_{Rsd}=A_{s1}f_{yd}$. Στη θέση αυτή η εφελκυστική δύναμη στα σύνθετα υλικά είναι N_{fad} , ενώ

το αντίστοιχο μήκος αγκύρωσης είναι l_b . Η προς αγκύρωση δύναμη N_{fad} μπορεί να προσεγγιστεί βάσει ισορροπίας εσωτερικών εντατικών μεγεθών ως εξής :

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

όπου $\varepsilon_{s1}/\varepsilon_f = 1$

Πρέπει η $N_{fad} \leq N_{fad,max}$ με συντελεστή ασφαλείας γ_b και πρέπει επίσης να υπάρχει επαρκής διαθέσιμος χώρος για το μήκος αγκύρωσης l_b . Διαφορετικά, η θέση πέρα από την οποία υπολογίζεται το μήκος αγκύρωσης πρέπει να ορισθεί παραπέρα προς την κατεύθυνση που μειώνεται η ροπή κάμψης δηλαδή κοντά στην στήριξη έτσι ώστε ή να μειωθεί η N_{fad} μέχρι την τιμή της $N_{fad,max}$ ή να απαιτείται μικρότερο l_b .

3.2.6.2. Αποκόλληση στην ενδιάμεση καμπτική ρωγμή (Μηχανισμός 5)

Γίνεται εφαρμογή του αναλυτικού προσομοιώματος στο οποίο πρέπει να γίνει μία μικρή διόρθωση. Με βάσει διαθέσιμα αποτελέσματα από τη διεθνή βιβλιογραφία (π.χ. Teng et al. 2001), προτείνεται μία ελαφρά τροποποίηση του προσομοιώματος η οποία συνίσταται στην προσαύξηση της δύναμης που προκαλεί αποκόλληση κατά 30%.

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

$$\text{Για } l_b \geq l_{b,max} : \varepsilon_{fbd,fl} = \alpha_{fl} \frac{0.5k_c k_b}{\gamma_b} \sqrt{\frac{f_{ctm}}{E_f t_f}}$$

$$\text{Για } l_b < l_{b,max} : \varepsilon_{fbd,fl} = \alpha_{fl} \frac{0.5k_c k_b}{\gamma_b} \sqrt{\frac{f_{ctm}}{E_f t_f}} \frac{l_b}{l_{b,max}} \left(2 - \frac{l_b}{l_{b,max}}\right)$$

όπου $\alpha_{fl} = 1.30$.

3.2.6.3. Αποκόλληση στην ενδιάμεση λοξή ρωγμή (Μηχανισμός 6)

Σε αυτή την περίπτωση η προσαύξηση της δύναμης αποκόλλησης είναι μικρότερη, της τάξης του 25%. Η μέγιστη επιτρεπόμενη παραμόρφωση στα σύνθετα υλικά είναι :

$$\text{Για } l_b \geq l_{b,max} : \varepsilon_{fbd,fl-sh} = a_{fl-sh} \frac{0.5k_c k_b}{\gamma_b} \sqrt{\frac{f_{ctm}}{E_f t_f}}$$

$$\text{Για } l_b < l_{b,max} : \varepsilon_{fbd,fl-sh} = a_{fl-sh} \frac{0.5k_c k_b}{\gamma_b} \sqrt{\frac{f_{ctm}}{E_f t_f}} \frac{l_b}{l_{b,max}} \left(2 - \frac{l_b}{l_{b,max}}\right)$$

όπου $\alpha_{fl-sh} = 1.25$.

3.2.6.4. Διατμητική αστοχία στο άκρο-αποκόλληση επικάλυψης (Μηχανισμός 7)

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

$$V_{sd,end} \leq 1.4V_{cd}$$

$$M_{sd,end} \leq 2/3M_{Rd}$$

όπου:

$V_{sd,end}$ και $M_{sd,end}$: η δρώσα τέμνουσα και ροπή (τιμές σχεδιασμού) αντίστοιχα, στη διατομή που τερματίζουν τα σύνθετα υλικά

M_{Rd} : η ροπή αντοχής του μέλους δηλαδή η ελάχιστη εξ αυτών που αντιστοιχούν στους μηχανισμούς 1, 2, 5 και 6

$V_{cd} = V_{Rd1} = \tau_{Rd1}(1.2+40\rho_l)+0.15\sigma_{cp})b_w d$ με βάση την σχέση του ΕΚΩΣ 11.2 είναι η διατμητική αντοχή του μέλους αγνοώντας την συνεισφορά οπλισμών διάτμησης (συνδετήρες)

όπου:

τ_{Rd} : τιμή σχεδιασμού διατμητικής αντοχής

$$k = 1.6 - d \geq 1$$

$\rho_l = A_{sl}/b_w d$ με A_{sl} την διατομή διαμήκους εφελκόμενου οπλισμού, ο οποίος εκτείνεται πέραν της διατομής στην οποία υπολογίζεται η V_{Rd1} κατά $d + 1.5d$

$$\sigma_{cp} = N_{sd} / A_c$$

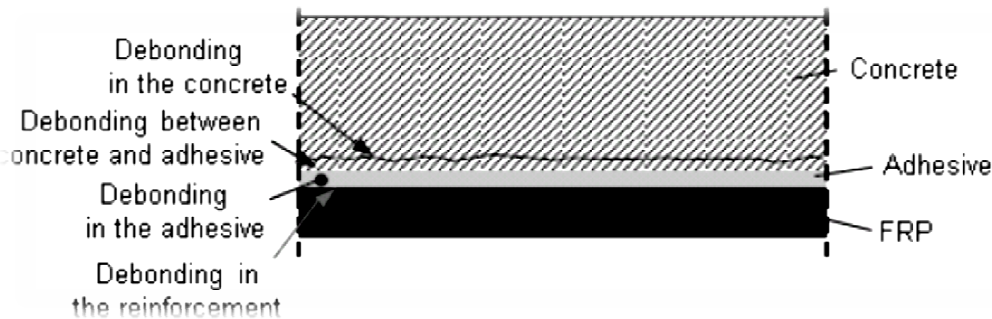
Η ικανοποίηση της συνθήκης $M_{sd,end} \leq 2/3 M_{Rd}$ γίνεται εύκολα, π.χ. ρυθμίζοντας τη θέση τερματισμού των σύνθετων υλικών. Αν όμως δεν ικανοποιείται η συνθήκη $V_{sd,end} \leq 1.4 V_{cd}$, τότε απαιτείται ενίσχυση του μέλους στην περιοχή κοντά στα άκρα των σύνθετων υλικών έναντι τέμνουσας

3.3. *Ιταλικός Κανονισμός CNR-DT 200/2004 (Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Existing Structures)*

3.3.1. *Μηχανισμοί Αποκόλλησης*

3.3.1.1. *Μηχανισμοί αστοχίας εξαιτίας της απώλειας συνάφειας*

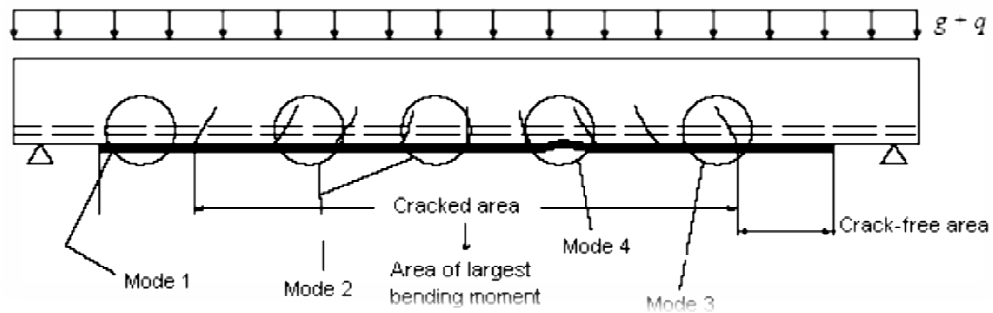
1. Όταν μέλη ο/σ ενισχύονται με ΙΟΠ, ο ρόλος της συνάφειας μεταξύ σκυροδέματος και σύνθετου υλικού είναι πρωταρχικής σημασίας εξαιτίας της ευαισθησίας αστοχίας του συγκεκριμένου μηχανισμού. Σύμφωνα με τα κριτήρια σχεδιασμού ο συγκεκριμένος μηχανισμός αστοχίας δεν πρέπει να προηγείται της καμπτικής ή ακόμη και της διατρητικής αστοχίας του ενισχυόμενου μέλους.
2. Η απώλεια της συνάφειας μεταξύ σύνθετου υλικού και σκυροδέματος αφορά τόσο στην ενίσχυση με ελάσματα σύνθετων υλικών όσο και στην ενίσχυση με φύλλα ΙΟΠ, ανεξάρτητα του είδους της ενίσχυσης για την οποία εφαρμόστηκαν (καμπτική ή διατρητική).



Σχήμα 3.4: Απώλεια συνάφειας μεταξύ ΙΟΠ και σκυροδέματος

Όπως φαίνεται στο σχήμα η απώλεια συνάφειας μπορεί να γίνει εντός της ρητίνης, μεταξύ σκυροδέματος και ρητίνης, στο σκυροδέμα ή στο υλικό ενίσχυσης (π.χ. στην διεπιφάνεια μεταξύ δύο στρώσεων ΙΟΠ). Στις περιπτώσεις που η επικόλληση των σύνθετων υλικών έχει γίνει σωστά και προσεχτικά τότε η αστοχία της συνάφειας θα πραγματοποιηθεί στο σκυροδέμα και θα αποκολληθεί μια στρώση σκυροδέματος, το πάχος της οποίας κυμαίνεται από μερικά χιλιοστά έως ολόκληρη την επικάλυψη. Αυτό συμβαίνει λόγω του ότι η αντοχή της ρητίνης είναι μεγαλύτερη από την εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος.

3. Τρόποι απώλειας συνάφειας για ελάσματα ή φύλλα ΙΟΠ σε καμπτική ενίσχυση δοκών ταξινομούνται στις ακόλουθες τέσσερις κατηγορίες και σχηματικά παρουσιάζονται και στο ακόλουθο σχήμα
- Τρόπος αστοχίας 1: αποκόλληση στο τέλος στην άκρη του ελάσματος/φύλλου ΙΟΠ
 - Τρόπος αστοχίας 2: αποκόλληση στην μεσαία διατομή λόγω καμπτικών ρωγμών
 - Τρόπος αστοχίας 3: αποκόλληση λόγω διαγώνιας διατμητικής ρωγμής
 - Τρόπος αστοχίας 4: αποκόλληση λόγω ανωμαλιών στην επιφάνεια του σκυροδέματος



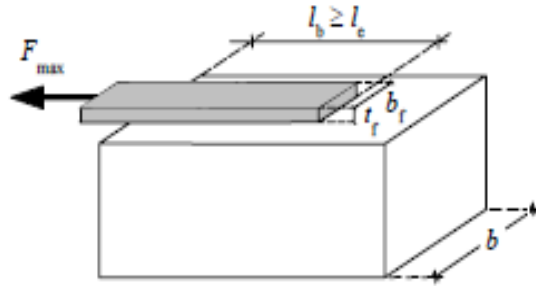
Σχήμα 3.5: Καμπτική ενίσχυση με ΙΟΠ – τρόποι αστοχίας

4. Στα επόμενα γίνεται αναφορά μόνο για τους δύο πρώτους τρόπους αστοχίας, καθώς είναι οι συχνότεροι. Για να μετριαστεί ο κίνδυνος να συμβούν οι άλλοι δύο τρόποι αστοχίας συστήνεται στις δύο στηρίξεις και προετοιμασία όμοια με αυτήν που προτείνεται παρακάτω.

3.3.1.2. Ενεργεία που απορροφάται κατά την θραύση

1. Πριν από την καμπτικό και διατμητικό σχεδιασμό πρέπει να γίνεται αποτίμηση της μέγιστης δύναμης η οποία μπορεί να μεταφερθεί από σκυρόδεμα στο ΙΟΠ καθώς και αποτίμηση

2. Με τη δοκιμή αγκύρωσης όπως παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα



Σχήμα 3.6: Δύναμη ολίσθησης διεπιφάνειας ΙΟΠ – σκυροδέματος

η οριακή τιμή της δύναμης που μεταφέρεται στο ΙΟΠ εξαρτάται από μήκος l_b . Το μήκος αγκύρωσης που απαιτείται l_e , ορίζεται ως το μήκος το οποίο εάν ξεπεραστεί δεν αυξάνεται η μεταφερόμενη δύναμη μεταξύ σκυροδέματος και ΙΟΠ.

3. Το μήκος αγκύρωσης, l_e που απαιτείται υπολογίζεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$l_e = \sqrt{\frac{E_f t_f}{2f_{ctm}}} \text{ [το μήκος σε mm]}$$

όπου E_f και t_f είναι το μέτρο ελαστικότητας και το πάχος του σύνθετου υλικού αντίστοιχα και f_{ctm} η εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος.

4. Η ενέργεια κατά την θραύση Γ_{Fk} στην διεπιφάνεια ΙΟΠ – σκυροδέματος εκφράζεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$\Gamma_{Fk} = 0.03k_b\sqrt{f_{ck}f_{ctm}} \text{ [οι δυνάμεις σε N και το μήκος σε mm]}$$

όπου f_{ctm} είναι η χαρακτηριστική αντοχή του σκυροδέματος.

Η τιμή που υπολογίζεται από την παραπάνω εξίσωση προτείνεται σαν χαρακτηριστική τιμή, k_b είναι γεωμετρικός συντελεστής που εξαρτάται και από το πλάτος της δοκού b και από το πλάτος του σύνθετου υλικού b_f και υπολογίζεται από τον ακόλουθο τύπο

$$k_b = \sqrt{\frac{2 - \frac{b_f}{b}}{1 + \frac{b_f}{400}}} \geq 1 \quad [\text{μήκος σε mm}]$$

$b_f/b \geq 0.33$ (ενώ αν $b_f/b \leq 0.33$, τότε για τον παραπάνω υπολογισμό χρησιμοποιούμε $b_f/b = 0.33$).

3.3.1.3. Σχεδίαση για την οριακή κατάσταση αποκόλλησης στην ακραία διατομή του ΙΟΠ (τρόπος αστοχίας 1)

1. Για ελάσματα/φύλλα ΙΟΠ το διατιθέμενο μήκος αγκύρωσης πρέπει να είναι μεγαλύτερο ή ίσο με το απαιτούμενο μήκος αγκύρωσης. Η οριακή αντοχή f_{fbb} είναι ίση με:

$$f_{fbb} = \frac{1}{\gamma_{f,d}\sqrt{\gamma_c}} \sqrt{\frac{2 E_f \Gamma_{Fk}}{t_f}} \quad (3.3.1)$$

Όπου $\gamma_{f,d}$ είναι ο συντελεστής ασφαλείας για το σύνθετο υλικό ενώ γ_c ο συντελεστής ασφαλείας για το σκυρόδεμα.

2. Για μήκος αγκύρωσης l_b μικρότερο από το απαιτούμενο l_e η αντοχή μειώνεται σύμφωνα με την ακόλουθη εξίσωση:

$$f_{fbb,rid} = f_{fbb} \frac{l_b}{l_e} \left(2 - \frac{l_b}{l_e} \right)$$

3. Όταν χρησιμοποιούνται διατάξεις αγκύρωσης του σύνθετου υλικού (κάθετες ράβδοι ΙΟΠ, κολάρα U από σύνθετα υλικά κλπ.) η μέγιστη αντοχή πρέπει να εκτιμάται από πειραματικές δοκιμές (ad-hoc).

3.3.1.4. Αποκόλληση στην μεσαία διατομή λόγω καμπτικών ρωγμών (Τρόπος αστοχίας 2)

1. Για να προληφθεί η αποκόλληση στην μεσαία διατομή η διαφορά τάσης $\Delta\sigma$ στο σύστημα ενίσχυσης σύνθετων υλικών μεταξύ δύο διαδοχικών ρωγμών

δεν πρέπει να υπερβαίνει την οριακή τιμή $\Delta\sigma_k$. Η τελική τιμή εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά της συγκόλλησης σκυροδέματος και ΙΟΠ, την απόσταση μεταξύ δύο εγκάρσιων ρωγμών στο σκυρόδεμα και από την τιμή της τάσης σ_f στο ΙΟΠ.

2. Εναλλακτικά μια απλοποιημένη διαδικασία μπορεί να χρησιμοποιηθεί. Η μέγιστη τάση πρέπει να είναι μικρότερη από $f_{fd,2}$:

$$f_{fd,2} = k_{cr} f_{fd} = \frac{k_{cr}}{\gamma_{f,d} \sqrt{\gamma_c}} \sqrt{\frac{2E_f \Gamma_{Fk}}{t_f}}$$

Όπου k_{cr} μπορεί να ληφθεί ίσο με 3 εάν δεν είναι διαθέσιμα άλλα δεδομένα. Η σχετική παραμόρφωση ε_{fd} του σύνθετου υλικού δίνεται από την σχέση:

$$\varepsilon_{fd} = \frac{f_{fd,2}}{E_f}$$

3.3.1.5. Τάσεις που ασκούνται στην διεπιφάνεια για την οριακή κατάσταση λειτουργικότητας

Η συγκέντρωση τάσεων στην διεπιφάνεια σκυροδέματος – ΙΟΠ ενισχυμένων δοκών με σύνθετα υλικά δημιουργείται κοντά σε εγκάρσιες ρωγμές σκυροδέματος ή στις άκρες της ενίσχυσης.

Σε συνθήκες λειτουργικότητας οι ρηγματώσεις θα πρέπει να αποφεύγονται. Για την ανάλυση θεωρείται ελαστική γραμμική συμπεριφορά τόσο για τον χάλυβα όσο και για το σκυρόδεμα.

Για μόνιμα ή κινητά φορτία η ισοδύναμη διατμητική δύναμη $\tau_{b,e}$ θα πρέπει να είναι μικρότερη από την τάση f_{bd}

$$\tau_{b,e} \leq f_{bd}$$

Η παραπάνω διατμητική δύναμη $\tau_{b,e}$ ισούται με

$$\tau_{b,e} = k_{id} \cdot \tau_m$$

όπου:

$k_{id} \geq 1$ συντελεστής και υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$k_{id} = (k_{\sigma}^{1.5} + 1.15k_{\tau}^{1.5})^{2/3}$$

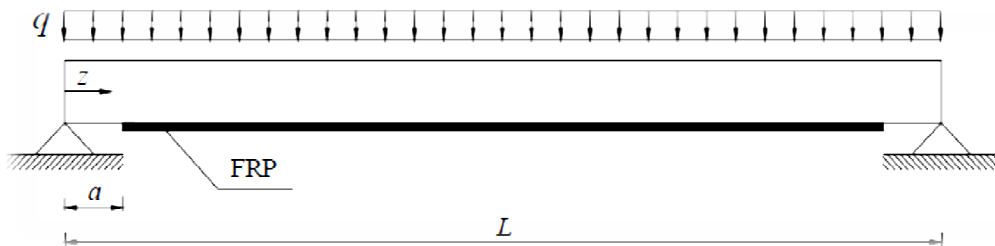
και οι αντίστοιχοι συντελεστές k_{σ} και k_{τ} ισούνται με:

$$k_{\sigma} = k_{\tau} \cdot \beta \cdot t_m$$

$$k_{\tau} = 1 + \alpha \cdot a \cdot \frac{M_{z=\alpha}}{V_{z=a}} \cdot a$$

$M_{z=\alpha}$ είναι η ροπή που ενεργεί στην διατομή στο σημείο που σταματάει το ΙΟΠ

$V_{z=a}$ η διατμητική δύναμη στο σημείο που σταματάει το ΙΟΠ (σχήμα)



Σχήμα 3.7: Προσδιορισμός γεωμετρικών παραμέτρων δοκού

α και β είναι ελαστικές παράμετροι που εξαρτώνται από τα χαρακτηριστικά της διεπιφάνειας και του ΙΟΠ και υπολογίζονται ως εξής:

$$\alpha = \sqrt{\frac{K_1}{E_f t_f}}$$

$$\beta = \left(\frac{b_f \cdot 2.30 \cdot K_1}{4 \cdot E_f \cdot I_f} \right)^{1/4}$$

E_f , t_f , b_f και I_f είναι αντίστοιχα το μέτρο ελαστικότητας, το πάχος, το πλάτος και η ροπή αδράνειας του ΙΟΠ, ενώ K_1 είναι η κλίση του πρώτου κλάδου του διαγράμματος σ-ε και ισούται με:

$$K_1 = \frac{1}{t_a/G_a + t_c/G_c}$$

G_a και G_c το μέτρο διάτμησης της ρητίνης και του σκυροδέματος

t_a το πάχος της ρητίνης

t_c η επικάλυψη σκυροδέματος (20-30mm)

τ_m η μέση διατμητική τάση σύμφωνα με την θεωρία Jourawski

$$\tau_m = \frac{V_{(z=a)} \cdot t_f \cdot (h - x_e)}{I_c / n_f}$$

x_e και I_c είναι η απόσταση της θλιβόμενης ίνας από τον ουδέτερο άξονα και η ροπή αδράνειας της παραμορφωμένης διατομής

$n_f = E_f / E_c$ ο λόγος Poisson

Εάν στην ακραία διατομή που φτάνει η ενίσχυση ΙΟΠ τοποθετηθούν ΙΟΠ σχήματος U τότε το k_σ θεωρείται μηδέν γιατί αμελούνται οι τάσεις.

Η τάση f_{bd} είναι συνάρτηση της εφελκυστικής αντοχής του σκυροδέματος f_{ctk}

$$f_{bd} = k_b \cdot \frac{f_{ctk}}{\gamma_b}$$

$\gamma_b = 1$ για κινητά φορτία και $\gamma_b = 1.2$ για μόνιμα φορτία

$k_b \geq 1$

3.3.2. Ενίσχυση σε κάμψη

3.3.2.1. Ανάλυση στην οριακή κατάσταση αστοχίας

1. Ο καμπτικός σχεδιασμός στην οριακή κατάσταση αστοχίας ενισχυόμενων μελών οπλισμένου σκυροδέματος με σύνθετα υλικά απαιτεί όπως κάθε σχεδιασμός οι αντοχές να είναι μεγαλύτερες από τις δράσεις.

$$M_{sd} \leq M_{Rd}$$

2. Η ανάλυση μελών ο/σ ενισχυμένων με ΙΟΠ άνθρακα στην οριακή κατάσταση αστοχίας βασίζεται στις ακόλουθες θεμελιώδεις υποθέσεις:

- Διατομές κάθετες στον αξονά της δοκού πριν την παραμόρφωση παραμένουν επιπεδες και κάθετες στον αξονα της δοκού και μετα την παραμόρφωση
 - Ύπαρξη συνάφειας μεταξύ ΙΟΠ – σκυροδέματος και σκυροδέματος-χάλυβα
 - Το σκυρόδεμα δεν παραλαμβάνει εφελκυστικές τάσεις
 - Το ΙΟΠ θεωρείται γραμμικά ελαστικό υλικό μέχρι την αστοχία του
3. Η ενίσχυση με ΙΟΠ είναι αποτελεσματική για χαμηλό λόγο ποσοστά χάλυβα (π.χ. ο χάλυβας διαρρέει στην αστοχία), οι κανόνες εις το εξής θα αναφέρονται αποκλειστικά σε αυτή την κατάσταση.
4. Υποτίθεται ότι η καμπτική αστοχία επέρχεται όταν συμβεί ένα από τα παρακάτω:
- Η μέγιστη παραμόρφωση της θλιβόμενης ίνας του σκυροδέματος, ϵ_{cu} , φτάσει την μέγιστη που ορίζει ο κανονισμός
 - Η παραμόρφωση των ΙΟΠ (σε εφελκυσμό) φτάσει την μέγιστη τιμή της ϵ_{fd} η παραπάνω παραμόρφωση υπολογίζεται ως εξής:

$$\epsilon_{fd} = \min \left\{ \eta_a \frac{\epsilon_{fk}}{\gamma_f}, \epsilon_{fad} \right\} \quad (3.3.2)$$

όπου

ϵ_{fk} είναι η χαρακτηριστική παραμόρφωση αστοχίας του συστήματος ενίσχυσης

γ_f και η_a είναι συντελεστές οι οποίοι ορίζονται στους πίνακες

ϵ_{fad} είναι μέγιστη παραμόρφωση κατά την αποκόλληση των ΙΟΠ

E_f το μέτρο ελαστικότητας των ΙΟΠ

5. Η διατμητική φέρουσα ικανότητα των ενισχυόμενων μελών οφείλει να είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη διατμητική
6. Πρέπει να λαμβάνεται υπόψη ότι κατά την ενίσχυση, το μέλος ΙΟΠ είναι φορτισμένο και υπάρχουν παραμένουσες παραμορφώσεις πριν καν την εφαρμογή των σύνθετων υλικών.

3.3.2.2. Παραμορφώσεις στην κατασκευή πριν την ενίσχυση με ΙΟΠ

Όταν εφαρμόζονται τα ινοπλισμένα πολυμερή σε ένα μέλος ο/σ η αρχική παραμόρφωση πρέπει να λαμβάνεται υπόψη στην περίπτωση που η αρχική ροπή, M_0 , εξαιτίας των φορτίων που καταπονούν το δομικό στοιχείο είναι την ροπή ρηγμάτωσης. Αλλιώς η αρχική παραμόρφωση αγνοείται.

Ο σχεδιασμός γίνεται θεωρώντας γραμμική ελαστική συμπεριφορά για όλα τα υλικά σε όλα τα δομικά στοιχεία για τα οποία γίνεται ανάλυση.

3.3.2.3. Καμπτική ενίσχυση μελών οπλισμένου σκυροδέματος με ΙΟΠ

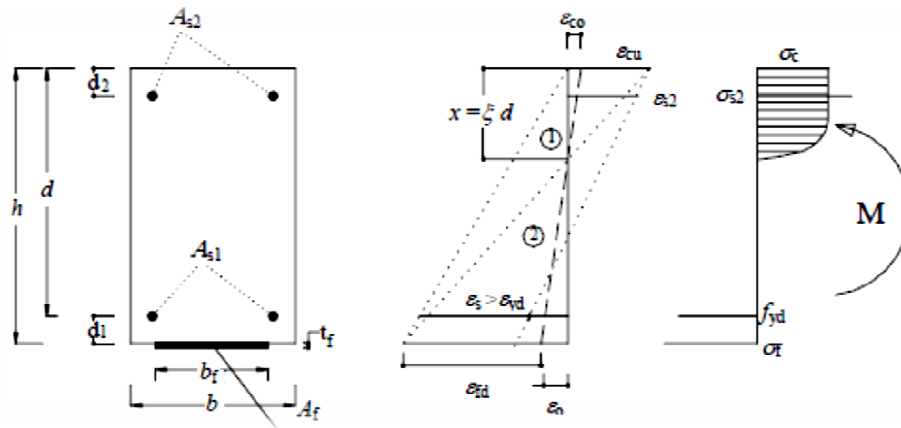
Η ανάλυση σε κάμψη ενός δομικού στοιχείου ενισχυμένου με ΙΟΠ γίνεται χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις ισορροπίας και συμβιβαστού των παραμορφώσεων. Η τάση σε κάθε σημείο πρέπει να αντιστοιχεί σε μια παραμόρφωση σε αυτό το σημείο καθώς και οι εσωτερικές δυνάμεις που αναπτύσσονται οφείλουν να ισορροπούν με τις εξωτερικές δυνάμεις που καταπονούν το δομικό στοιχείο.

Δύο τύποι αστοχίας παρατηρούνται και εξαρτώνται από την μέγιστη παραμόρφωση του σύνθετου υλικού πριν την θραύση ή τη μέγιστη θλιπτική τάση που μπορεί να αναπτυχθεί στο σκυρόδεμα.

Όταν ο σχεδιασμός γίνεται στην περιοχή 1 η αστοχία οφείλεται σε σκίσιμο του συστήματος ενίσχυσης (ΙΟΠ). Κάθε διάγραμμα παραμορφώσεων αντιστοιχεί σε εκείνη την μορφή αστοχίας που έχει σαν αμετάβλητο στοιχείο την τιμή της παραμόρφωσης του ΙΟΠ ϵ_{fd} και καθορίζεται από την παραπάνω εξίσωση.

Η κατανομή των παραμορφώσεων στο πλάτος του δομικού στοιχείου πρέπει να είναι γραμμική και να ικανοποιεί τις θεμελιώδεις υποθέσεις που αναλύθηκαν παραπάνω. Οι υπολογισμοί έχουν ως εξής:

- ΙΟΠ : $\varepsilon_f = \varepsilon_{fd}$
- Σκυρόδεμα σε θλίψη : $\varepsilon_c = (\varepsilon_{fd} + \varepsilon_o) \frac{x}{(h-x)} \leq \varepsilon_{cu}$
- Χάλυβας σε θλίψη : $\varepsilon_{s2} = (\varepsilon_{fd} + \varepsilon_o) \frac{x-d_2}{(h-x)}$
- Χάλυβας σε εφελκυσμό : $\varepsilon_{s1} = (\varepsilon_{fd} + \varepsilon_o) \frac{d-x}{(h-x)}$



Σχήμα 3.8: Τρόποι αστοχίας δομικού στοιχείου ενισχυμένου με ΙΟΠ

Όταν ο σχεδιασμός γίνεται στην περιοχή 2, η αστοχία προκύπτει εξαιτίας της σύνθλιψης του σκυροδέματος (παραμόρφωση ίση με ε_{cu}) και ενώ το ΙΟΠ δεν έχει φτάσει την μέγιστη τιμή της παραμόρφωσης του. Η κατανομή των έχει ως εξής:

- ΙΟΠ : $\varepsilon_f = \frac{\varepsilon_{cu}}{x} (h - x) - \varepsilon_o \leq \varepsilon_{fd}$
- Σκυρόδεμα σε θλίψη : $\varepsilon_c = \varepsilon_{cu}$
- Χάλυβας σε θλίψη : $\varepsilon_{s2} = \varepsilon_{cu} \frac{x-d_2}{x}$
- Χάλυβας σε εφελκυσμό : $\varepsilon_{s1} = \varepsilon_{cu} \frac{d-x}{x}$

Και για τις δύο παραπάνω περιπτώσεις αστοχίας η θέση του ουδέτερου άξονα x υπολογίζεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$0 = \psi \cdot b \cdot x \cdot \overline{f_{cd}} \cdot A_{s2} \cdot \sigma_{s2} - A_{s1} \cdot f_{yd} - A_f \cdot \sigma_f \quad (3.3.3)$$

όπου:

$\overline{f_{cd}}$ ισούται με την αντοχή σε θλίψη του σκυροδέματος και

Και η ροπή M_{Rd} του ενισχυμένου δομικού στοιχείου υπολογίζεται από την επόμενη εξίσωση:

$$M_{Rd} = \frac{1}{\gamma_{Rd}} \cdot [\psi \cdot b \cdot x \cdot \overline{f_{cd}} \cdot (d - \lambda \cdot x) + A_{s2} \cdot \sigma_{s2} \cdot (d - d_2) + A_f \cdot \sigma_f \cdot d_1] \quad (3.3.4)$$

Ο συντελεστής γ_{Rd} λαμβάνεται ίσος με 1.00.

Εάν ο χάλυβας βρεθεί στην ελαστική περιοχή οι τάσεις θα προσδιοριστούν πολλαπλασιάζοντας τις αντίστοιχες παραμορφώσεις με το μέτρο ελαστικότητας, αλλιώς μπορεί να υποτεθεί ότι είναι ίσες με f_{yd} .

Λόγω του ότι τα ΙΟΠ παρουσιάζουν ελαστική συμπεριφορά μέχρι την αστοχία οι τάσεις πρέπει να λαμβάνονται ως το μετρό ελαστικότητας επί την παραμόρφωση.

Για να αποφευχθεί η περίπτωση ο χαλύβδινος οπλισμός να βρίσκεται στην ελαστική περιοχή κατά την αστοχία ο αδιάστατος συντελεστής $\xi = x/d$ δεν πρέπει να υπερβαίνει την οριακή τιμή ξ_{lim} η οποία καθορίζεται από την σχέση:

$$\xi_{lim} = \frac{\epsilon_{cu}}{\epsilon_{cu} + \epsilon_{yd}}$$

3.3.2.4. Καμπτική ενίσχυση μελών οπλισμένου σκυροδέματος με ΙΟΠ με ύπαρξη ροπής και αξονικής δύναμης

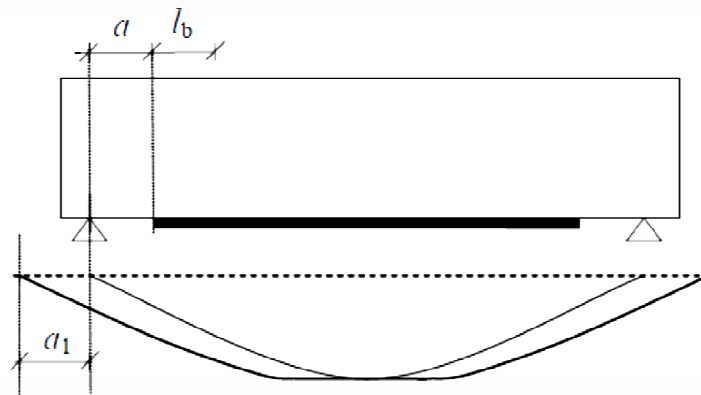
Ότι έχει αναφερθεί παραπάνω ισχύει και σε αυτή την περίπτωση παρόλα αυτά η ύπαρξη αξονικής δύναμης N_{sd} χρειάζεται να ληφθεί υπόψη όταν προσδιορίζεται η φέρουσα ικανότητα σε καμπτική καταπόνηση M_{Rd} .

Η αποτελεσματικότητα της ενίσχυσης στη συμβολή δοκού-υποστυλώματος να εξασφαλίζεται με κατάλληλες κατασκευαστικές λεπτομέρειες. Επιπροσθέτως το σύνθετο υλικό κατά μήκος της δοκού που υποβάλλεται σε συνδυασμό αξονικής δύναμης και καμπτικών φορτίων πρέπει να είναι κατάλληλα αγκυρωμένο προς αποφυγή αποκόλλησης του ΙΟΠ ή ρηγμάτωσης του σκυροδέματος. Όταν υπολογίζεται η μέγιστη παραμόρφωση από την εξίσωση 3.3.2, για τον σχεδιασμό πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η τιμή που αντιστοιχεί στην πρώτο όρο.

Ο δεξιός όρος της εξίσωσης (3.3.3) δεν θα είναι πλέον ίσος με μηδέν αλλά ίσος με N_{sd} .

3.3.2.5. Αστοχία συγκόλλησης ΙΟΠ στο δοκίμιο

Η αποκόλληση των ελασμάτων/φύλλων ΙΟΠ εξαρτώνται από ένα πλήθος παραμέτρων όπως η θέση και ο τύπος των ρωγμών(καμπτικών ή διατμητικών), η τραχύτητα της επιφάνειας του σκυροδέματος καθώς και η συγκέντρωση τάσεων κοντά στην ζώνη αποκόλλησης.



Σχήμα 3.9: Μετατόπιση διαγράμματος ροπών

Η μέγιστη απόσταση a (όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα) για την αποφυγή της αποκόλλησης πρέπει να υπολογίζεται εξισώνοντας την οριακή αντοχή από την εξίσωση 3.3.1, για $l_b \geq l_e$, με την τάση που υπολογίζεται στην οριακή κατάσταση αστοχίας του ΙΟΠ σε απόσταση $a + l_b$ από τις στηρίξεις. Εάν το

διατιθέμενο μήκος αγκύρωσης είναι $l_b < l_e$ τότε η εξίσωση 3.3.1 αντικαθίσταται από την εξίσωση 3.3.2.

Όταν το σύνθετο υλικό τελειώνει κοντά στις στηρίξεις του δομικού στοιχείου όπου οι διατμητικές δυνάμεις δημιουργούν λοξές ρωγμές, η ροπή που θα εισάγεται στους υπολογισμούς θα πρέπει να είναι αυξημένη και να ισούται με

$$M = V_{sd} \cdot a_1$$

όπου

V_{sd} είναι η υπολογισμένη τέμνουσα δύναμη

$a_1 = 0.9 \cdot d \cdot (1 - \cot \alpha)$, α είναι η γωνία του υπάρχοντος οπλισμού διάτμησης και

d το στατικό ύψος.

Στις περιπτώσεις που χρησιμοποιούνται διατάξεις προς αποφυγή της αποκόλλησης στα ακραία σημεία πρέπει να αγνοούνται οι διατάξεις τις παραγράφου 3.1.3. Οι τρόποι αγκύρωσης του ΙΟΠ πρέπει να ελέγχονται ως προς την αποτελεσματικότητά τους με πειράματα που θα έχουν προηγηθεί. Τα πειράματα που οφείλουν να γίνονται, θα πρέπει να διεξάγονται με τα υλικά που χρησιμοποιούνται σε κάθε εφαρμογή (π.χ. ρητίνη και τύπος ινών) και τη διάταξη που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί (κατακόρυφοι ράβδοι ΙΟΠ εντός του σκυροδέματος, φύλλα ΙΟΠ μορφής U κλπ.) καθώς επίσης πρέπει να ακολουθείται η ίδια διαδικασία προετοιμασίας της επιφάνειας του σκυροδέματος και οι ίδιες περιβαλλοντικές συνθήκες.

3.3.2.6. Ανάλυση στην κατάσταση λειτουργικότητας

Υποθέσεις σχεδιασμού:

Αυτή η ενότητα διαπραγματεύεται τις ακόλουθες οριακές καταστάσεις λειτουργικότητας:

- όριο τάσεων
- έλεγχος παραμορφώσεων

- έλεγχος ρηγματώσεως

Στην οριακή κατάσταση λειτουργικότητας πρέπει να ελεγχθούν τα παρακάτω:

- οι τάσεις πρέπει να ελέγχονται προς αποφυγή διαρροής του εφελκόμενου χάλυβα και ερπυστικά φαινόμενα στο σκυρόδεμα και το ΙΟΠ
- οι παραμορφώσεις δεν πρέπει να ξεπερνούν τις οριακές τιμές τους για την ομαλή λειτουργία των κατασκευών ώστε να μην προκαλούνται ζημιές σε μη-δομικά στοιχεία και για να μην δημιουργείται αίσθημα φόβου στους κατοίκους
- Υπερβολικές ρηγματώσεις μπορούν να μειώσουν σημαντικά την αντοχή των κατασκευών, την λειτουργικότητα τους και να μειώσουν την αποδοτικότητα της επικόλλησης των ΙΟΠ.

Σχεδίαση στην οριακή κατάσταση λειτουργικότητας επιτυγχάνεται θεωρώντας ότι όλα τα υλικά παρουσιάζουν γραμμικά ελαστική συμπεριφορά τόσο στην ρηγματωμένη όσο και στην αρηγματώτη κατάσταση. Οι παραδοχές για τον σχεδιασμό είναι οι ακόλουθες:

- Γραμμική –ελαστική συμπεριφορά όλων των υλικών
- Διατομές κάθετες στον άξονα της δοκού την παραμόρφωση παραμένουν επίπεδες και κάθετες στον άξονα της δοκού και μετά την παραμόρφωση
- Καλή συνάφεια μεταξύ χάλυβα και σκυροδέματος και σκυροδέματος – ΙΟΠ

Η αρχική υπόθεση επιτρέπει τη χρήση μιας τιμής του μέτρου ελαστικότητας για κάθε υλικό. Η δεύτερη συνεπάγεται την γραμμικότητα του διαγράμματος των παραμορφώσεων. Η τρίτη μαζί με την πρώτη υπόθεση επιτρέπει τον καθορισμό του λόγου poisson:

$$\eta_s = \frac{\sigma_s}{\sigma_c} = \frac{E_s}{E_c} \text{ και } \eta_f = \frac{\sigma_f}{\sigma_c} = \frac{E_f}{E_c}$$

Οι τάσεις των ΙΟΠ στην οριακή κατάσταση λειτουργικότητας, υπολογίζονται για οιασδήποτε μόνιμες συνθήκες φόρτισης και οφείλουν να ικανοποιούν τον περιορισμό $\sigma_f = \eta \cdot f_{fk}$ όπου f_{fk} είναι η χαρακτηριστική αντοχή κατά την αστοχία του ΙΟΠ και η είναι συντελεστής που ορίζεται από τον παρακάτω πίνακα

Loading mode	Type of fiber/resin	η_1
Continuous (creep and relaxation)	Glass/Epoxy	0.30
	Aramid/Epoxy	0.50
	Carbon/Epoxy	0.80
Cyclic (fatigue)	All	0.50

Πίνακας 3.1: Διορθωτικός συντελεστής για μακροχρόνια φόρτιση διαφόρων τύπων ινών

Έστω M_o η καμπτική ροπή στο δομικό στοιχείο πριν την εφαρμογή των ΙΟΠ και υποθέτοντας ότι M_1 είναι η ροπή που αναπτύσσεται μετά την ενίσχυση με τα σύνθετα υλικά οι τάσεις υπολογίζονται εξαιτίας του συνδυασμού των ροπών $M = M_o + M_1$.

τέταρτο κεφάλαιο

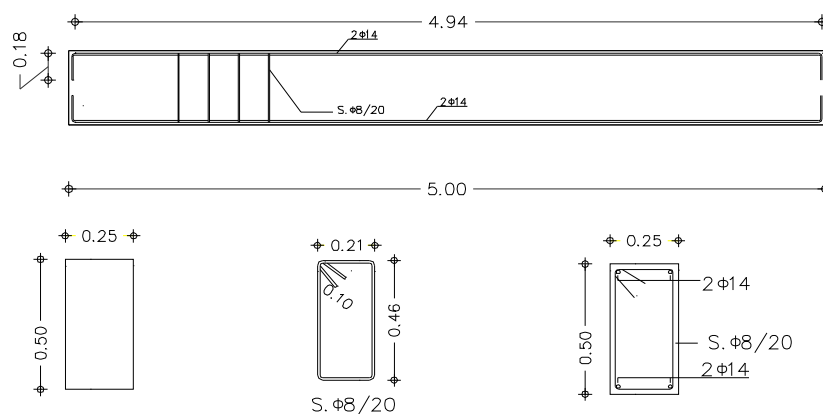
πειραματική διαδικασία

4.1. Γενικά

Στο εργαστήριο Αντισεισμικής Τεχνολογίας έγιναν πειράματα φόρτισης τεσσάρων σημείων σε τέσσερις δοκούς. Οι δοκοί ενισχύθηκαν εξωτερικά με ύφασμα ινοπλισμένων πολυμερών(ΙΟΠ). Ο κύριος σκοπός των πειραμάτων ήταν η διερεύνηση της απόκρισης των ενισχυμένων αυτών δοκών, δηλαδή η αντοχή, η παραμόρφωση και ο τρόπος αστοχίας τους, υπό την φόρτιση τεσσάρων σημείων. Ως υλικό ενίσχυσης χρησιμοποιήθηκε ΙΟΠ της εταιρείας BETONTEX. Η εφαρμογή των σύνθετων υλικών έγινε υπό την επίβλεψη του διευθυντή της εταιρείας.

Οι τέσσερις ενισχυμένες δοκοί με ΙΟΠ άνθρακα δοκιμάστηκαν μέχρι την αστοχία σε φόρτιση τεσσάρων σημείων. Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των δοκών(μήκος, πλάτος, ύψος) ήταν $5000 \times 250 \times 500 \text{mm}^3$ (το μήκος μεταξύ των

στηρίξεων ήταν 4500mm). Κάθε μια από τις δοκούς περιείχε χαλύβδινο οπλισμό δύο $\Phi 14$ -mm στην θλιβόμενη και εφελκόμενη παρειά αντίστοιχα, ενώ έναντι διάτμησης είχε οπλιστεί με συνδετήρες $\Phi 8$ -mm σε απόσταση 200mm. Η επικάλυψη σκυροδέματος ήταν 20mm. Λεπτομέρειες της διάταξης των οπλισμών των δοκών φαίνονται στο Σχήμα 4.1. Η ονομαστική θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος ήταν 22MPa. Η τιμή αυτή καθορίστηκε με τις δοκιμές σε κύβους σκυροδέματος. Τέλος ο χάλυβας που χρησιμοποιήθηκε ήταν S500.



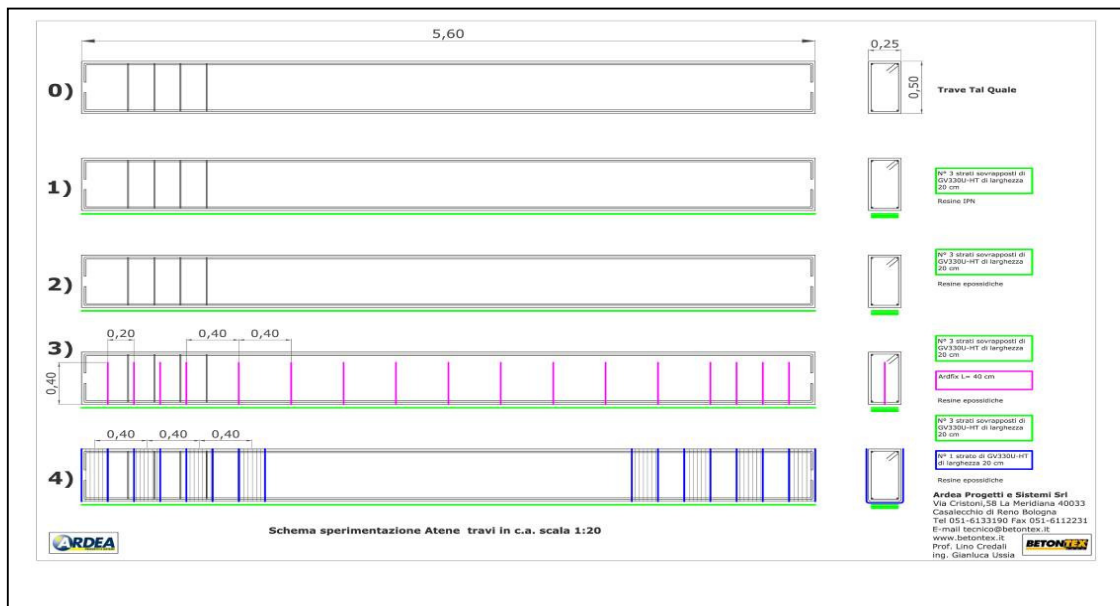
Σχήμα 4.1: Γεωμετρία δοκών Ο/Σ και διάταξη χαλύβδινου οπλισμού δοκών

Στο σχήμα 4.2 περιγράφεται η ενίσχυση των δοκών. Τα ακόλουθα δοκίμια υποβλήθηκαν σε κάμψη τεσσάρων σημείων:

- Δοκός 1: Το σύστημα ενίσχυσης αποτελείται από τρεις στρώσεις ΙΟΠ της εταιρίας BETONTEX GV330-U-HT, $w=200\text{mm}$, ο τύπος της ρητίνης που χρησιμοποιήθηκε ήταν BETONTEX IPN01-IPN02, No ARDFIX connector
- Δοκός 2: Το σύστημα ενίσχυσης αποτελείται από τρεις στρώσεις ΙΟΠ της εταιρίας BETONTEX GV330-U-HT, $w=200\text{mm}$, ο τύπος της ρητίνης που χρησιμοποιήθηκε ήταν BETONTEX RC01-RC02, No ARDFIX connector
- Δοκός 3: Το σύστημα ενίσχυσης αποτελείται από τρεις στρώσεις ΙΟΠ της εταιρίας BETONTEX GV330-U-HT, $w=200\text{mm}$, ο τύπος της ρητίνης που χρησιμοποιήθηκε ήταν BETONTEX RC01-RC02, με ARDFIX connector

Δοκός 4: Το σύστημα ενίσχυσης αποτελείται από τρεις στρώσεις ΙΟΠ της εταιρίας BETONTEX GV330-U-HT, $w=200\text{mm}$, ο τύπος της ρητίνης που χρησιμοποιήθηκε ήταν BETONTEX RC01-RC02, and U-Shape Ties

Στο σχήμα 4.2, ως δοκίμιο 0 ορίζεται η δοκός χωρίς ενίσχυση ΙΟΠ και η οποία δεν έχει δοκιμαστεί ακόμα.



Σχήμα 4.2: Γεωμετρία δοκών Ο/Σ και διάταξη χαλύβδινου οπλισμού δοκών

Ιδιότητες	Μονάδες	Μέθοδος	Betontex GV330-U-HT
Βάρος ινών	g/m^2	ISO3374	300
Διατομή ινών ανά for cm πλάτους	mm^2/cm	CNR DT 200	1,70
Εφελκυστική αντοχή	MPa	ASTM D3039	≥ 3500
Μέτρο Ελαστικότητας	GPa	ASTM D3039	230
Παραμόρφωση θραύσης	%	ASTMD3039	$\geq 1,2 \%$

Πίνακας 4.1a: Μηχανικά χαρακτηριστικά του ΙΟΠ BETONTEX

Resin Grade	BETONTEX-RC01	BETONTEX-RC02
Functionality	Primer, surface preparation	Tixotropic Impregnating and adhesive
Resin A / Catalyst B ratio	2:1	2:1
Mixing ratio by weight	100:50	100:50
Gel Time at 20°C	50-60 (min.)	50-60 (min.)
Hardening Time at 20°C	180-240 (min)	180-240 (min)
Total Hardening Time at 20 °C	14-16 (hrs)	14-16 (hrs)
Application Temperature range (°C)	From +5°C to 30°C	From +5°C to 30°C

Πίνακας 4.1b: Ιδιότητες των εποξειδικών ρητινών της BETONTEX

4.2. Πειραματική διαδικασία

Οι δοκοί στις οποίες εφαρμόστηκαν τα σύνθετα υλικά ΙΟΠ άνθρακα καθαρίστηκαν καλά. Στην συνέχεια οι γωνίες της δοκού εξομαλύνθηκαν και λειάνθηκαν για να αποκτήσουν καμπυλότητα με ακτίνα 30mm. Η επιφάνεια καθαρίστηκε καλά στην συνέχεια διαβρέχτηκε με νερό υπό πίεση ενώ εν συνεχεία στεγνώθηκε. Σύμφωνα με τις οδηγίες επικόλλησης των σύνθετων υλικών η υγρασία της τελικής επιφάνειας δεν επιτρέπεται να είναι περισσότερο από 4%.

Για την σωστή τοποθέτηση του σύνθετου υλικού, η επιφάνεια αναμονής επαλείφθηκε με ρητίνη πυράντοχη για την πρώτη δοκό και εποξικής όσο αφορά τις υπόλοιπες δοκούς που ενισχύθηκαν. Το πάχος της ρητίνης ήταν περίπου 1-2 mm. Μετά από λίγα λεπτά εφαρμόστηκαν οι στρώσεις ΙΟΠ, ενώ πριν εφαρμοστεί η επόμενη στρώση στην επιφάνεια έγινε επάλειψη της αντίστοιχης ρητίνης.



Εικόνα 4.1: Τρόπος διάνοιξης οπών για την τοποθέτηση αγκυριών



Εικόνα 4.2: Τρόπος τοποθέτησης αγκυριών και φύλλων ΙΟΠ

Όλες οι ενισχυμένες δοκοί δοκιμάστηκαν σε κάμψη υπό την επιβολή φορτίων σε τέσσερα σημεία. Το φορτίο των 250 kN επιβλήθηκε κεντρικά με υδραυλικό γρύλο.



Εικόνα 4.3: Τρόπος επιβολής του φορτίου

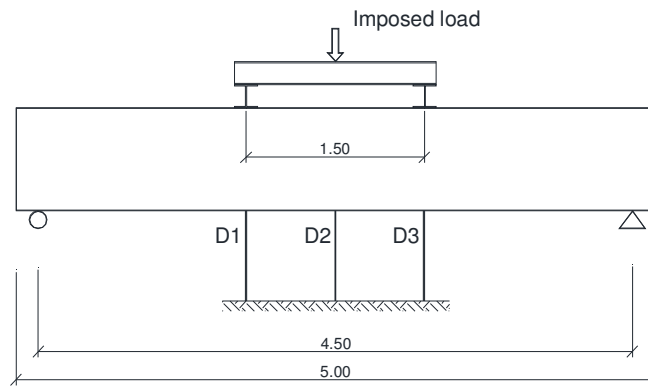
Ο ρυθμός επιβολής του φορτίου ήταν 0.30 kN/sec . Μια άκαμπτη μεταλλική δοκός χρησιμοποιήθηκε για να κατανείμει το φορτίο στα σημεία επιβολής των δύο δυνάμεων. Σε κάθε δοκό χρησιμοποιήθηκαν τρεις διατάξεις μέτρησης των μετατοπίσεων για να μετρηθεί η παραμόρφωση στο μέσον της δοκού και στο $1/3$ και $2/3$ του ανοίγματος των δοκών. Η δοκιμή εκτελέστηκε χρησιμοποιώντας ελεγχόμενη φόρτιση. Το φορτίο αυξανόταν σταδιακά μέχρι την αστοχία. Ένα κελί για την καταγραφή της φόρτισης χρησιμοποιήθηκε για το επιβαλλόμενο φορτίο. Όλα τα δεδομένα συλλέχθηκαν και καταγράφηκαν στον Η/Υ. Η πειραματική διάταξη και η διάταξη των οργάνων που χρησιμοποιήθηκαν απεικονίζονται στην εικόνα 3 και στο σχήμα 4, αντίστοιχα.



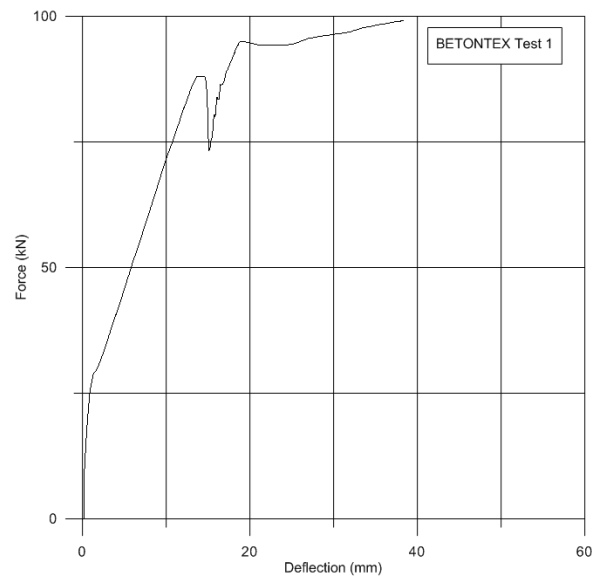
Εικόνα 4.4: Γενική άποψη πειραματικής διάταξης



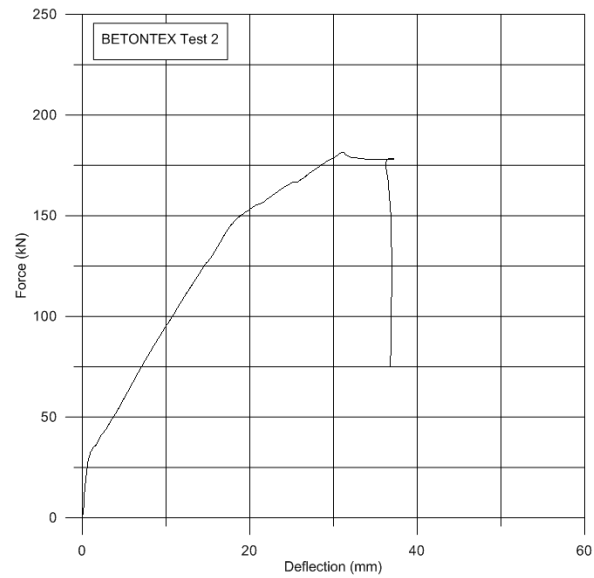
Εικόνα 4.5: Κυλιόμενες στηρίξεις δοκών



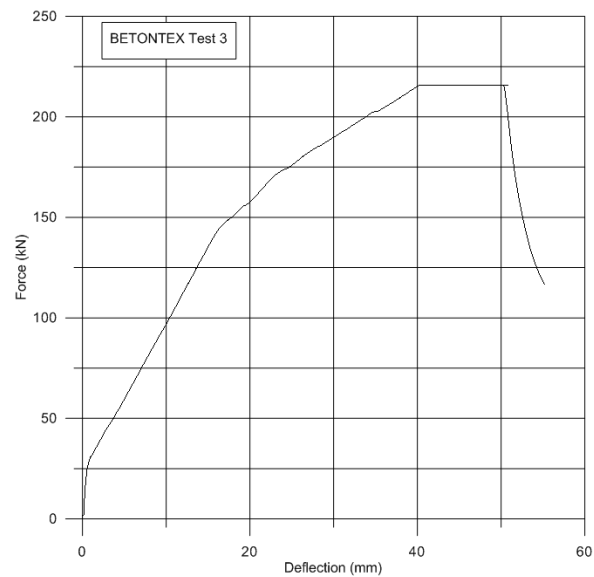
Σχήμα 4.3: Τοποθέτηση των οργάνων



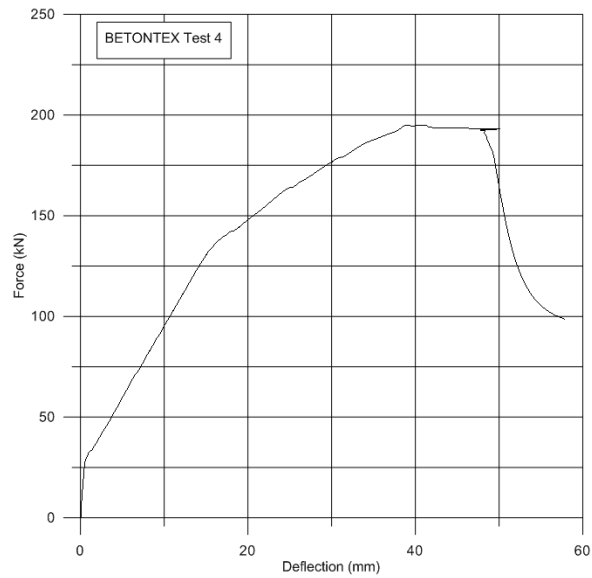
Σχήμα 4.4: Διάγραμμα φορτίου – παραμόρφωσης για το 1^ο πείραμα



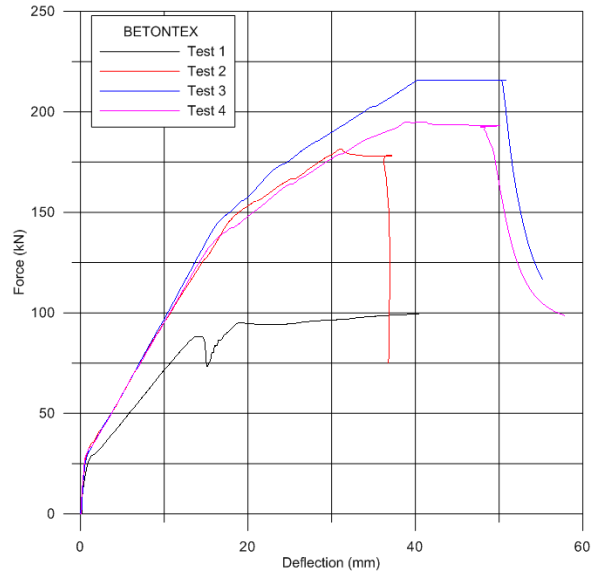
Σχήμα 4.5: Διάγραμμα φορτίου – παραμόρφωσης για το 2^ο πείραμα



Σχήμα 4.6: Διάγραμμα φορτίου – παραμόρφωσης για το 3^ο πείραμα



Σχήμα 4.7: Διάγραμμα φορτίου – παραμόρφωσης για το 4^ο πείραμα

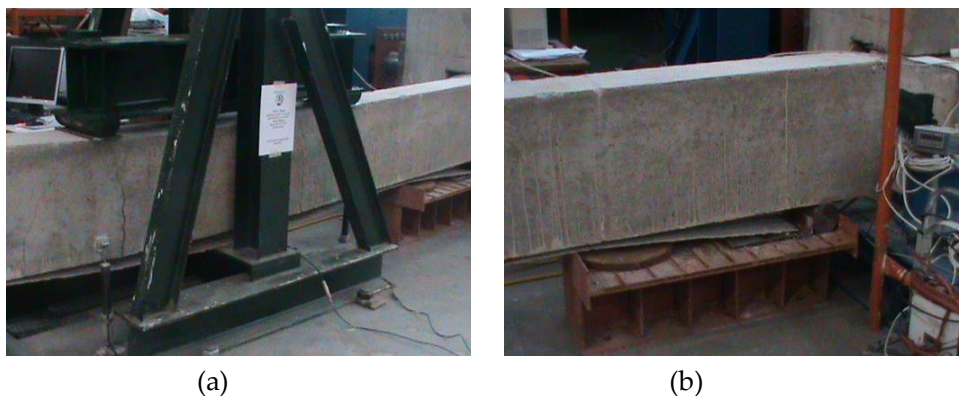


Σχήμα 4.8: Συγκριτικό διάγραμμα φορτίου – παραμόρφωσης για όλα τα πειραματικά αποτελέσματα

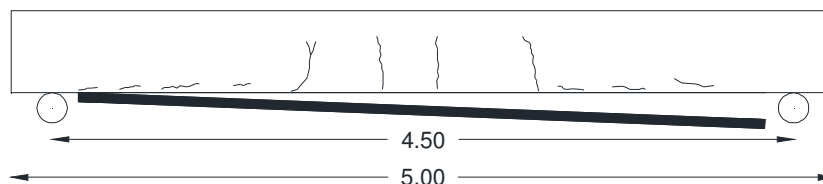
4.3. Μορφές αστοχίας των πειραμάτων

Στις παρακάτω εικόνες και σχήματα παρουσιάζονται οι τρόποι αστοχίας των δοκών που τέθηκαν υπό δοκιμή

- i. **Για το 1^ο πείραμα** παρατηρήθηκαν αρχικά μικρές οριζόντιες ρωγμές στα δύο άκρα της δοκού. Με την αύξηση του φορτίου οι ρωγμές αναπτύσσονται και πολλαπλασιάζονται προς τα πάνω. Η δοκιμή σταμάτησε όταν έγινε η αποκόλληση του ΙΟΠ. Δεν πραγματοποιήθηκε αποκόλληση των στρώσεων του σύνθετου υλικού, ενδεχομένως λόγω του καλού εμποτισμού της ρητίνης IPN.



Εικόνα 4.6: Πείραμα 1^ο: (a), (b): Η αποκόλληση του ΙΟΠ στο τέλος της δοκιμής.

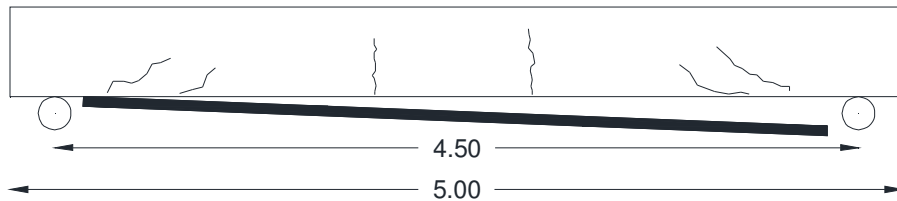


Σχήμα 4.9: 1^ο πείραμα: Μορφή αστοχίας στο τέλος της δοκιμής

- ii. *Για το 2^ο πείραμα* παρατηρήθηκε αστοχία λόγω αποκόλλησης του σύνθετου υλικού από το σκυροδέμα. Επίσης, παρατηρήθηκαν ο σχηματισμός καμπτικών ρωγμών στο μέσο του ανοίγματος.



Εικόνα 4.7: Πείραμα 2^ο: (a): Αποκόλληση σε όλο το μήκος της δοκού στο τέλος της δοκιμής, (b): Καμπτική ρωγμή στο μέσο του ανοίγματος της δοκού στο τέλος της δοκιμής

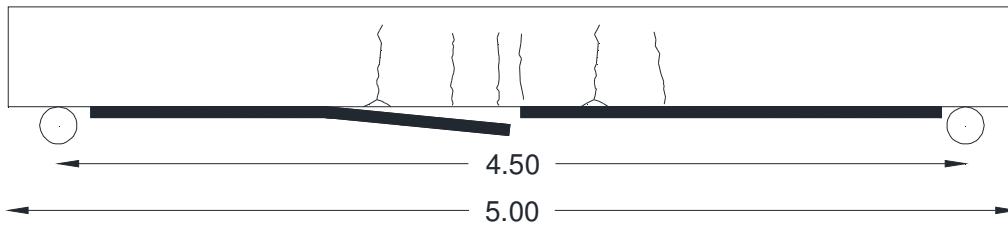


Σχήμα 4.10: 2^ο πείραμα: Μορφή αστοχίας στο τέλος της δοκιμής

- iii. *Για το 3^ο πείραμα* παρατηρήθηκαν καμπτικές ρωγμές στο μέσον του ανοίγματος. Το πείραμα σταμάτησε όταν επήλθε θραύση του σύνθετου υλικού στο μέσο του ανοίγματος. Κατά τη διάρκεια αυτής της δοκιμής δεν πραγματοποιήθηκε αποκόλληση μεταξύ του σύνθετου υλικού και της επιφάνειας του σκυροδέματος.



Εικόνα 4.8: Πείραμα 3^ο: (a), (b): Αποκόλληση σε όλο το μήκος της δοκού στο τέλος της δοκιμής, θραύση του ΙΟΠ

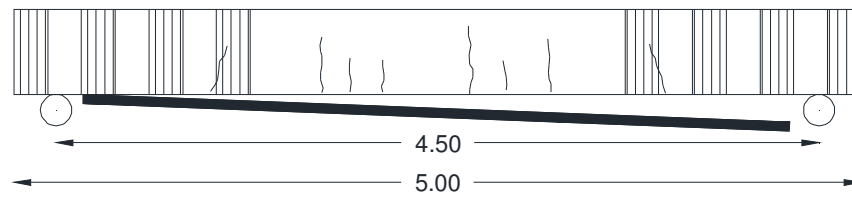


Σχήμα 4.11: 3^ο πείραμα: Μορφή αστοχίας στο τέλος της δοκιμής

- iv. **Για το 4^ο πείραμα** παρατηρήθηκαν καμπτικές ρωγμές στο μέσον του ανοίγματος. Το πείραμα σταμάτησε όταν επήλθε θραύση των λωρίδων σχήματος U και πραγματοποιήθηκε η αποκόλληση μεταξύ του σύνθετου υλικού και της επιφάνειας του σκυροδέματος.



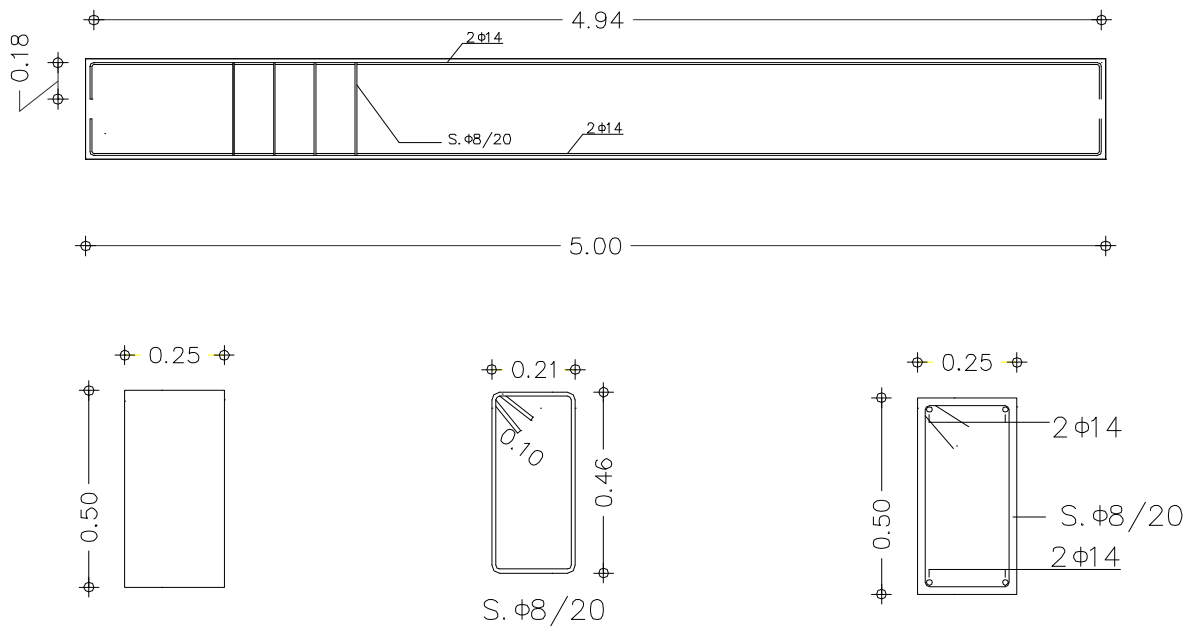
Εικόνα 4.9: Πείραμα 4^ο: (a), (b): Η αποκόλληση του ΙΟΠ στο τέλος της δοκιμής.



Σχήμα 4.12: 4^ο πείραμα: Μορφή αστοχίας στο τέλος της δοκιμής

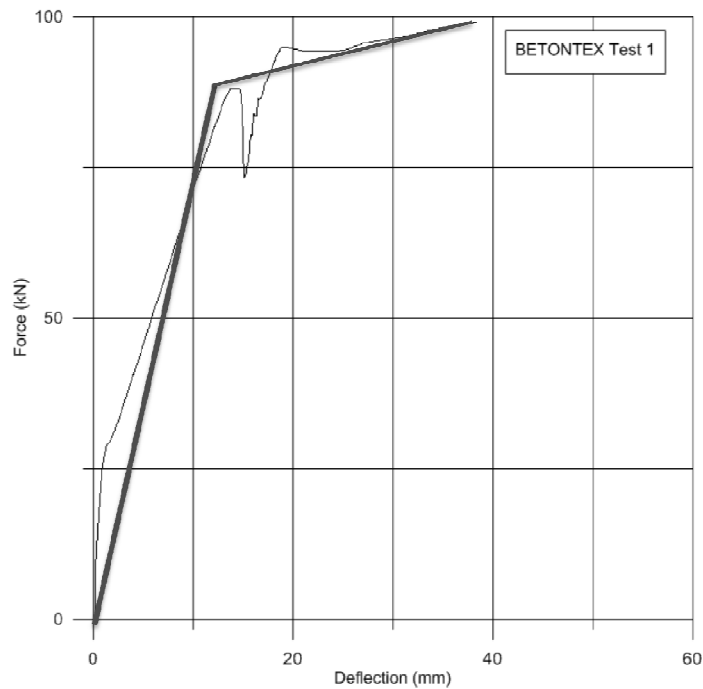
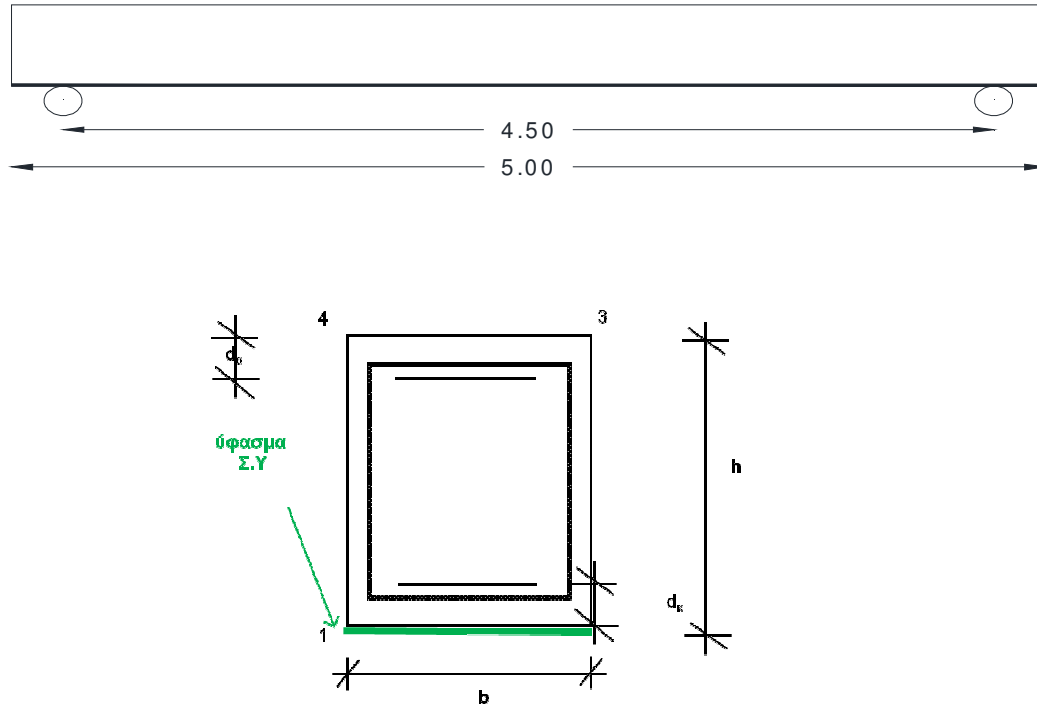
πέμπτο κεφάλαιο

αναλυτικά αποτελέσματα των πειραμάτων



Σχήμα 5.1: Η αρχική διατομή της δοκού πριν την τοποθέτηση των σύνθετων υλικών

5.1. Πείραμα 1^ο: Δοκός ενισχυμένη με 3 στρώσεις ΙΟΠ άνθρακα GV330U- HT πλάτος 20cm- ρητίνη IPN



Σχήμα 5.2: Διάγραμμα δύναμης – παραμόρφωσης όπως προέκυψε από το 1^ο πείραμα και η προσομοίωσή του σε διγραμμικό

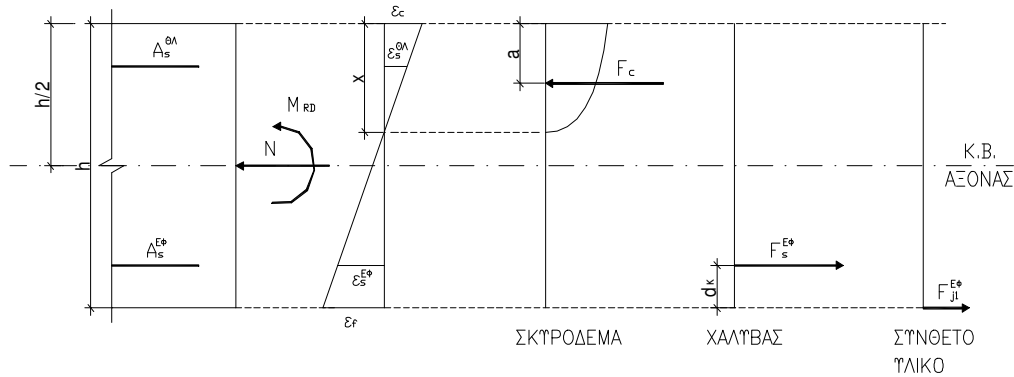
Στοιχεία Δοκού

Διατομή δοκού ($h \cdot b$)	50cm x	25cm
Ποιότητα σκυροδέματος		C22
Ποιότητα χάλυβα		S500
Μέτρο ελαστικότητας χάλυβα	$E_s =$	200 GPa
Άνω οπλισμός	2Φ	14
Κάτω οπλισμός	2Φ	14
Συνδετήρες διατομής	$\Phi_w =$	8
Διατομή άνω οπλισμού	$\Phi_{L\alpha} =$	14
Διατομή κάτω οπλισμού	$\Phi_{L\kappa} =$	14
Επικάλυψη σκυροδέματος	$c =$	2,00cm
Αμφιέριστη δοκός μήκους	$l =$	4,5 m
Απόσταση εφελκόμενου οπλισμού	$d_\kappa = c + \Phi_w + 0.5\Phi_{L\kappa} =$	3,50cm
Απόσταση θλιβόμενου οπλισμού	$d_\alpha = c + \Phi_w + 0.5\Phi_{L\alpha} =$	3,50cm

Πίνακας 5.1: Παράθεση στοιχείων δοκού για το 1^ο πείραμα**Χαρακτηριστικά σύνθετου υλικού ενίσχυσης**

Μέτρο Ελαστικότητας Σύνθετου Υλικού	$E_j =$	230,0 GPa
Το Σύνθετο Υλικό τοποθετείται σε λωρίδες πλάτους	$w_j =$	0,200 m
Πάχος υφάσματος	$t_j =$	0,165 mm
Συνολικό εμβαδόν υφάσματος	$A_f =$	99mm ²
Χαρακτηριστική αντοχή σύνθετου υλικού	$f_{fu} =$	3500,0 MPa
Οριακή παραμόρφωση αστοχίας Σύνθετου Υλικού	$\epsilon_{fuk} =$	1,5%
Αριθμός υφασμάτων	$n_j =$	3
	$\epsilon_{su} = f_{yd} / E_s =$	2,5‰

Πίνακας 5.2: Παράθεση χαρακτηριστικών σύνθετου υλικού για το 1^ο πείραμα**Υπολογισμοί****5.1.1. Δοκιμές στη διαρροή**



Σχήμα 5.3: Ανάλυση διατομής υπό μεγέθη ορθής έντασης (M+N) με κυριαρχούσα κάμψη για το 1^ο πείραμα

Παραμορφώσεις στην κατάσταση αστοχίας της δοκού του πρώτου πειράματος

Μέγιστη τιμή δύναμης **F=87,65kN**

$F_{j1} = A_j f_{j1}$, συνολική δύναμη μανδύα

$$\varepsilon_c = -0,2085\%$$

$$\varepsilon_f = 0,77\%$$

$$\alpha = \begin{cases} \frac{\varepsilon_c(6 - \varepsilon_c)}{12}, & \varepsilon_c \leq 0,002 \\ \frac{3 \cdot \varepsilon_c - 2}{3 \cdot \varepsilon_c}, & \varepsilon_c > 0,002 \end{cases} \Rightarrow \alpha = 0,10$$

$$\zeta' = \begin{cases} \frac{8 - \varepsilon_c}{4 \cdot (6 - \varepsilon_c)}, & \varepsilon_c \leq 0,002 \\ \frac{\varepsilon_c(3 \cdot \varepsilon_c - 4) + 2}{2 \cdot \varepsilon_c(3 \cdot \varepsilon_c - 2)}, & \varepsilon_c > 0,002 \end{cases} \Rightarrow \zeta' = 0,336$$

$$x = \zeta \cdot d = \frac{\varepsilon_c}{(\varepsilon_c + \varepsilon_{s1})} \cdot d \Rightarrow x = 10,67 \text{ cm}$$

$$a = \zeta' \cdot x \Rightarrow a = 0,0359 \text{ m}$$

$$\varepsilon_{s2} = -0,14\% \Rightarrow f_{s2} = 434,78$$

$$\varepsilon_{s1} = 0,70\% \Rightarrow f_{s1} = 434,78$$

$$F_c = \alpha \cdot 0,85 \cdot f_{cd} \cdot x \cdot b \Rightarrow F_c = 18,26 \text{ kN} \quad (\text{Σκυρόδεμα})$$

$$F_s = A_s \cdot f_s \quad \eta$$

$$F_s^{\Theta\Lambda} = 133,86 \text{ kN} \quad (\text{Θλιβόμενος χάλυβας})$$

$$F_s^{E\Phi} = 133,86 \text{ kN} \quad (\text{Εφελκόμενος χάλυβας})$$

$$F_{j1}^{E\Phi} = 18,26 \text{ kN} \quad (\text{Εφελκόμενο Σύνθετο Υλικό})$$

$$\text{Πρέπει } F_c + F_s^{\Theta\Lambda} - F_s^{E\Phi} - F_{j1}^{E\Phi} - N = 0$$

Ροπή Αντοχής:

Υπολογίζεται η ροπή αντοχής της ενισχυμένης διατομής ως προς τον κεντροβαρικό άξονα:

$$M_{RD} = F_c(0,5h-a) + F_{j1}^{E\Phi}0,5h + F_s^{E\Phi}(0,5h-d_c) + F_s^{\Theta\Lambda}(0,5h-d_a)$$

$$M_{RD} = 66,032 \text{ kNm}$$

5.1.2. Δοκιμές στην οριακή κατάσταση αστοχίας

$$\varepsilon_c = -1,5319\%$$

$$\varepsilon_f = 6,708\%$$

$$\alpha = \left\{ \begin{array}{l} \frac{\varepsilon_c(6 - \varepsilon_c)}{12}, \quad \varepsilon_c \leq 0,002 \\ \frac{3 \cdot \varepsilon_c - 2}{3 \cdot \varepsilon_c}, \quad \varepsilon_c > 0,002 \end{array} \right\} \Rightarrow \alpha = 0,57$$

$$\zeta' = \left\{ \begin{array}{l} \frac{8 - \varepsilon_c}{4 \cdot (6 - \varepsilon_c)}, \quad \varepsilon_c \leq 0,002 \\ \frac{\varepsilon_c(3 \cdot \varepsilon_c - 4) + 2}{2 \cdot \varepsilon_c(3 \cdot \varepsilon_c - 2)}, \quad \varepsilon_c > 0,002 \end{array} \right\} \Rightarrow \zeta' = 0,362$$

$$x = \xi \cdot d = \frac{\varepsilon_c}{(\varepsilon_c + \varepsilon_{s1})} \cdot d \Rightarrow x = 9,30 \text{ cm}$$

$$a = \zeta' \cdot x \Rightarrow a = 0,0336 \text{ m}$$

$$\varepsilon_{s2} = -0,96\% \Rightarrow f_{s2} = 191,02$$

$$\varepsilon_{s1} = 6,13\% \Rightarrow f_{s1} = 500,00$$

$$F_c = \alpha \cdot 0,85 \cdot f_{cd} \cdot x \cdot b \Rightarrow F_c = 247,87 \text{ kN} \quad (\text{Σκυρόδεμα})$$

$$F_s = A_s \cdot f_s \quad \eta$$

$$F_s^{\Theta\Lambda} = 58,81 \text{ kN} \quad (\text{Θλιβόμενος χάλυβας})$$

$$F_s^{E\Phi} = 153,94 \text{ kN} \quad (\text{Εφελκόμενος χάλυβας})$$

$$F_{j1}^{E\Phi} = 152,74 \text{ kN} \quad (\text{Εφελκόμενο Σύνθετο Υλικό})$$

$$\text{Πρέπει } F_c + F_s^{\Theta\Lambda} - F_s^{E\Phi} - F_{j1}^{E\Phi} - N = 0$$

Μέγιστη τιμή δύναμης **F=98,26kN**

Ροπή Αντοχής:

Υπολογίζεται η ροπή αντοχής της ενισχυμένης διατομής ως προς τον κεντροβαρικό άξονα:

$$M_{RD} = F_c(0.5h-a) + F_{j1}^{E\Phi}0.5h + F_s^{E\Phi}(0.5h-d_k) + F_s^{\Theta\Lambda}(0.5h-d_a)$$

$$M_{RD} = 137,56 \text{ kNm} \quad (M_{(g)}=63,28 \text{ kNm} \quad \text{και} \quad M_{(p)}=74,28\text{kNm})$$

Η τιμή σχεδιασμού της ενεργού τάσεως σ_{jd} του νέου οπλισμού, εκτιμάται με βάση μία κρίσιμη τιμή της τάσης $\sigma_{j,crit}$, οφείλει δε να είναι μικρότερη από την τιμή σ_{jd} που αντιστοιχεί στην δυσμενέστερη από τις ακόλουθες δύο μορφές αστοχίας:

1. **Αστοχία του ίδιου του υλικού ενίσχυσης, οπότε,**

$$\sigma_{j,crit} = f_{jk} \quad \text{και}$$

$$\sigma_{jd} = \frac{1}{\gamma_m} \cdot f_{jk}$$

όπου

f_{jk} είναι η χαρακτηριστική τιμή αντοχής του υλικού ενίσχυσης και

γ_m είναι ο επί μέρους συντελεστής ασφαλείας για το υλικό ενίσχυσης

Η παραμόρφωση αστοχίας του σύνθετου υλικού είναι ίση με $\varepsilon_{frp,u}=1,5\%$

Επομένως η τιμή σχεδιασμού της ενεργού τάσης του νέου σπλισμού είναι ίση με: $\sigma_{jd} = f_{jk}/\gamma_m = 3500 \text{MPa}$

* Λόγω του ότι η ανάλυση γίνεται βάση πειραματικών δεδομένων δεν θα χρησιμοποιηθούν συντελεστές ασφαλείας

2. **Πρώωρη αποκόλληση του υλικού ενίσχυσης λόγω ανεπάρκειας της σύνδεσης κατά μήκος του στοιχείου ή της αγκύρωσης των άκρων του, οπότε,**

$$\sigma_{jd} = \sigma_{j,crit} \cdot \gamma_{Rd}$$

όπου,

γ_{Rd} είναι κατάλληλος συντελεστής ασφαλείας, ο οποίος καλύπτει τις αβεβαιότητες του προσομοιώματος

$\sigma_{j,crit}$ είναι η τάση του υλικού η οποία οδηγεί σε αποκόλληση

Γι' αυτήν τη μορφή αστοχίας, μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι παρακάτω προσεγγιστικές σχέσεις:

$$\sigma_{j,crit} \cong \beta \frac{\tau_b^{αποκ.}}{t_j} L_e$$

Όπου

$\beta = \beta_w \cdot \beta_L$, διορθωτικός συντελεστής

$$\tau_b^{αποκ.} \cong f_{ctm}$$

L_e το ενεργό μήκος αγκύρωσης (δηλ. το μήκος πέραν του οποίου η αναλαμβανόμενη απ' το υλικό ενίσχυσης δύναμη, δεν αυξάνεται άλλο), που υπολογίζεται από τη σχέση θεωρώντας ότι το άνοιγμα της κρίσιμης ρωγμής ισούται με 0,5mm, και λαμβάνεται ίσο με:

$$L_e = \sqrt{\frac{E_j \cdot t_j}{2 \cdot f_{ctm}}} (MPa, mm)$$

t_j, E_j είναι το πάχος και το μέτρο ελαστικότητας του υλικού ενίσχυσης αντίστοιχα. Στην περίπτωση που χρησιμοποιούνται k επάλληλες στρώσεις υλικού ενίσχυσης πάχους t_{j1} λαμβάνεται $t_j = \psi \cdot k \cdot t_{j1}$, όπου ψ ο μειωτικός συντελεστής πολλών στρώσεων.

$$\beta_w = \sqrt{\frac{2 - b_j / b_w}{1 + b_j / b_w}}, \text{ συντελεστής επιρροής πλάτος οπλισμού ενίσχυσης}$$

b_j το πλάτος του υλικού ενίσχυσης

b_w το πλάτος του εφελκυσμένου πέλματος του δομικού στοιχείου επί του οποίου επικολλάται το υλικό ενίσχυσης

$$\beta_L = \sin\left(\frac{\pi\lambda}{2}\right) \cong \lambda \cdot (2 - \lambda) \text{ συντελεστής επιρροής του διατιθέμενου μήκους}$$

αγκύρωσης, όπου $\lambda = \frac{L_{av}}{L_e} < 1,0$ και L_{av} το διατιθέμενο μήκος αγκύρωσης

του οπλισμού ενίσχυσης

$$\beta_L = 1,0 \text{ όταν } \lambda > 1,0.$$

Αυτή η μορφή αστοχίας συμβαίνει συνήθως με τη μορφή απόσχισης της επικάλυψης του διαμήκους οπλισμού του στοιχείου στην περιοχή όπου απολήγει ο οπλισμός ενίσχυσης.

Επομένως: $\tau_b^{αποκ.} \cong f_{ctm} = 2,4 \text{MPa}$

$$L_e = 155,46 \text{mm}$$

$$\beta_w = 0,816$$

$$\beta_L = 1$$

$$L_{av} = 1750 \text{mm} > L_e = 155,46 \text{mm}$$

$$\sigma_{j,cr} = 604,00 \text{MPa}$$

5.1.3. Τιμή σχεδιασμού της ενεργού τάσεως σ_{jd}

Ο νέος οπλισμός υπολογίζεται έτσι ώστε σε συνεργασία με τον υφιστάμενο παλιό οπλισμό να αναλαμβάνονται οι εφελκυστικές δυνάμεις που αντιστοιχούν στη συνολική καμπτική ένταση στην περιοχή ενίσχυσης. Προσεγγιστικά, για τον υπολογισμό της απαιτούμενης διατομής του οπλισμού ενίσχυσης (A_j), σε βαθμό προμελέτης, μπορεί να χρησιμοποιηθεί η σχέση:

$$A_j = \frac{\Delta M_{do}}{z \cdot \sigma_{jd}}$$

$$A_j = \frac{\Delta M_{do}}{z \cdot \sigma_{jd}} \Rightarrow \sigma_{jd} = \frac{\Delta M_{do}}{z \cdot A_j}$$

Όπου

ΔM_{do} είναι η πρόσθετη διατομή που καλείται να αναλάβει η ενισχυμένη διατομή (επιπλέον της M_{do} την οποία μπορεί να αναλάβει η αρχική)

z , ο μοχλοβραχίονας των εσωτερικών δυνάμεων (ο οποίος μπορεί να ληφθεί ίσος με $0,9d_j$) και

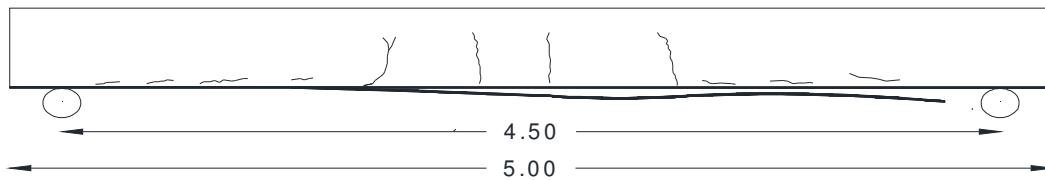
d_j το στατικό ύψος της διατομής, μετρούμενα από τη στάθμη του εξωτερικού οπλισμού.

Οι τιμές των $\sigma_{j,crit}$ και σ_{jd} μπορεί να εκτιμώνται για κάθε μορφή αστοχίας, με χρήση αξιόπιστων πηγών της διεθνούς βιβλιογραφίας.

$$\left. \begin{array}{l} M(P) = 74,279 \text{ kNm} \\ M(\text{ι.δ.}) = 63,28 \text{ kNm} \end{array} \right\} \Rightarrow \Delta M = 137,56 \text{ kNm}$$

$$z = 0,9 \cdot d_j = 0,9 \cdot (h - d + n_j \cdot t_j) = 42,30 \text{ cm}$$

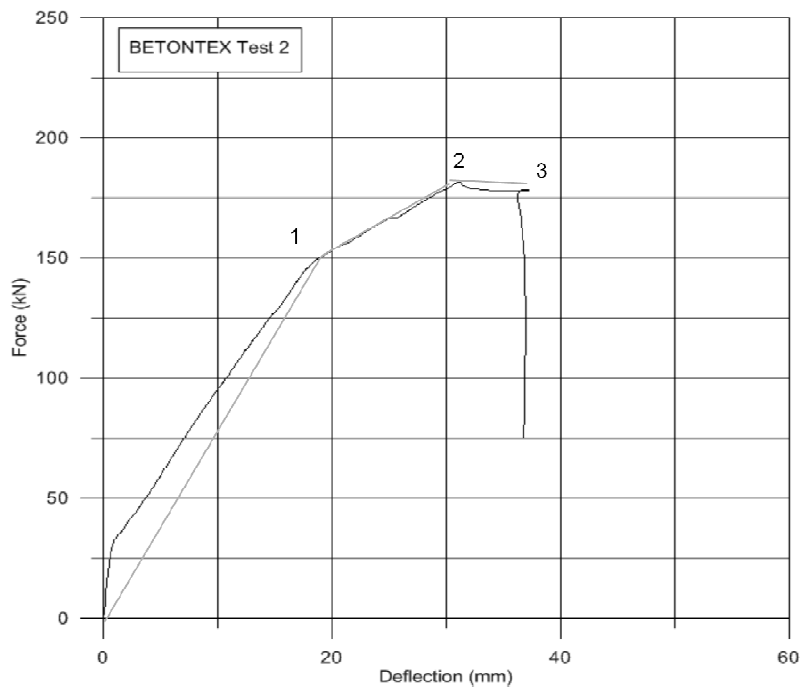
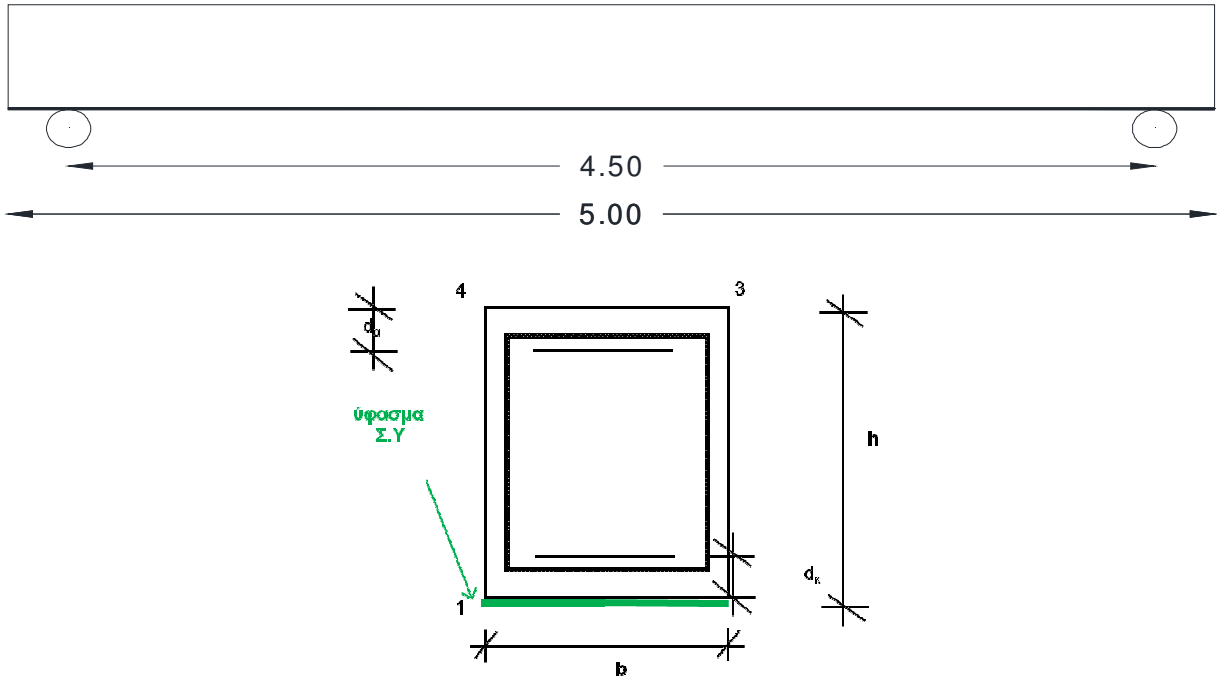
$$\sigma_{jd} = 326,66 \text{ MPa}$$



Σχήμα 5.4: Σχηματική απεικόνιση της δοκού μετά το πέρας του 1^ο πειράματος

Κατά τη διάρκεια της δοκιμής της δοκού με ρητίνη IPN παρατηρήθηκαν αρχικά μικρορρηγματώσεις στα άκρα, στην συνέχεια με αύξηση της επιβαλλόμενης δύναμης εμφανίστηκαν καμπτικές ρωγμές στο τμήμα της δοκού μεταξύ των επιβαλλόμενων φορτίων και τέλος με περαιτέρω αύξηση του φορτίου ξεκόλλησε το σύνθετο υλικό.

5.2. Πείραμα 2^ο: Δοκός ενισχυμένη με 3 στρώσεις ΙΟΠ άνθρακα GV330U- HT πλάτος 20cm- ρητίνη εποξειδική



Σχήμα 5.5: Διάγραμμα δύναμης – παραμόρφωσης όπως προέκυψε από το 2^ο πείραμα και η προσομοίωσή του σε τριγωνικό

Στοιχεία Δοκού

Διατομή δοκού ($h \cdot b$)	50cm x	25cm
Ποιότητα σκυροδέματος		C22
Ποιότητα χάλυβα		S500
Μέτρο ελαστικότητας χάλυβα	$E_s =$	200 GPa
Άνω οπλισμός	2Φ	14
Κάτω οπλισμός	2Φ	14
Συνδετήρες διατομής	$\Phi_w =$	8
Διατομή άνω οπλισμού	$\Phi_{L\alpha} =$	14
Διατομή κάτω οπλισμού	$\Phi_{L\kappa} =$	14
Επικάλυψη σκυροδέματος	$c =$	2,00cm
Αμφιέριστη δοκός μήκους	$l =$	4,5 m
Απόσταση εφελκόμενου οπλισμού	$d_{\kappa} = c + \Phi_w + 0.5\Phi_{L\kappa} =$	3,50cm
Απόσταση θλιβόμενου οπλισμού	$d_{\alpha} = c + \Phi_w + 0.5\Phi_{L\alpha} =$	3,50cm

Πίνακας 5.3: Παράθεση στοιχείων δοκού για το 2^ο πείραμα

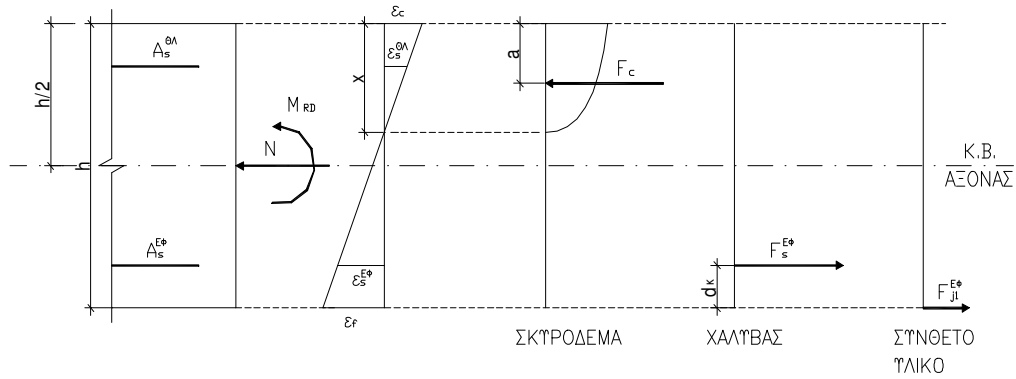
Χαρακτηριστικά σύνθετου υλικού ενίσχυσης

Μέτρο Ελαστικότητας Σύνθετου Υλικού	$E_j =$	230,0 GPa
Το Σύνθετο Υλικό τοποθετείται σε λωρίδες πλάτους	$w_j =$	0,200 m
Πάχος υφάσματος	$t_j =$	0,165 mm
Συνολικό εμβαδόν υφάσματος	$A_f =$	99mm ²
Χαρακτηριστική αντοχή σύνθετου υλικού	$f_{fu} =$	3500,0 MPa
Οριακή παραμόρφωση αστοχίας Σύνθετου Υλικού	$\epsilon_{fuk} =$	1,5%
Αριθμός υφασμάτων	$n_j =$	3
	$\epsilon_{su} = f_{yd} / E_s =$	2,5‰

Πίνακας 5.4: Παράθεση χαρακτηριστικών σύνθετου υλικού για το 2^ο πείραμα

Υπολογισμοί

5.2.1. Δοκιμές στη διαρροή



Σχήμα 5.6: Ανάλυση διατομής υπό μεγέθη ορθής έντασης (M+N) με κυριαρχούσα κάμψη για το 2^ο πείραμα

Παραμορφώσεις στην κατάσταση αστοχίας της δοκού του δεύτερου πειράματος

Μέγιστη τιμή δύναμης **F=150kN**

$F_{j1} = A_j \cdot f_{j1}$, συνολική δύναμη μανδύα

$$\varepsilon_c = -0,1,6077\text{‰}$$

$$\varepsilon_f = 5,07\text{‰}$$

$$\alpha = \begin{cases} \frac{\varepsilon_c(6 - \varepsilon_c)}{12}, & \varepsilon_c \leq 0,002 \\ \frac{3 \cdot \varepsilon_c - 2}{3 \cdot \varepsilon_c}, & \varepsilon_c > 0,002 \end{cases} \Rightarrow \alpha = 0,59$$

$$\zeta' = \begin{cases} \frac{8 - \varepsilon_c}{4 \cdot (6 - \varepsilon_c)}, & \varepsilon_c \leq 0,002 \\ \frac{\varepsilon_c(3 \cdot \varepsilon_c - 4) + 2}{2 \cdot \varepsilon_c(3 \cdot \varepsilon_c - 2)}, & \varepsilon_c > 0,002 \end{cases} \Rightarrow \zeta' = 0,364$$

$$x = \xi \cdot d = \frac{\varepsilon_c}{(\varepsilon_c + \varepsilon_s)} \cdot d \Rightarrow x = 12,04 \text{ cm}$$

$$a = \zeta' \cdot x \Rightarrow a = 0,0438 \text{ m}$$

$$\varepsilon_{s2} = -1,14\% \Rightarrow f_{s2} = 434,78$$

$$\varepsilon_{s1} = 4,60\% \Rightarrow f_{s1} = 434,78$$

$$F_c = \alpha \cdot 0,85 \cdot f_{cd} \cdot x \cdot b \Rightarrow F_c = 120,44 \text{ kN} \quad (\text{Σκυρόδεμα})$$

$$F_s = A_s \cdot f_s \quad \eta$$

$$F_s^{\Theta\Lambda} = 133,86 \text{ kN} \quad (\text{Θλιβόμενος χάλυβας})$$

$$F_s^{E\Phi} = 133,86 \text{ kN} \quad (\text{Εφελκόμενος χάλυβας})$$

$$F_{j1}^{E\Phi} = 120,44 \text{ kN} \quad (\text{Εφελκόμενο σύνθετο Υλικό})$$

$$\text{Πρέπει } F_c + F_s^{\Theta\Lambda} - F_s^{E\Phi} - F_{j1}^{E\Phi} - N = 0$$

Ροπή Αντοχής:

Υπολογίζεται η ροπή αντοχής της ενισχυμένης διατομής ως προς τον κεντροβαρικό άξονα:

$$M_{RD} = F_c(0,5h-a) + F_{j1}^{E\Phi} \cdot 0,5h + F_s^{E\Phi}(0,5h-d_s) + F_s^{\Theta\Lambda}(0,5h-d_s)$$

$$M_{RD} = 112,504 \text{ KNm}$$

5.2.2. Δοκιμές στην οριακή κατάσταση αστοχίας

$$\varepsilon_c = -1,9843\%$$

$$\varepsilon_f = 5,94\%$$

$$\alpha = \begin{cases} \frac{\varepsilon_c(6 - \varepsilon_c)}{12}, & \varepsilon_c \leq 0,002 \\ \frac{3 \cdot \varepsilon_c - 2}{3 \cdot \varepsilon_c}, & \varepsilon_c > 0,002 \end{cases} \Rightarrow \alpha = 0,66$$

$$\zeta' = \begin{cases} \frac{8 - \varepsilon_c}{4 \cdot (6 - \varepsilon_c)}, & \varepsilon_c \leq 0,002 \\ \frac{\varepsilon_c(3 \cdot \varepsilon_c - 4) + 2}{2 \cdot \varepsilon_c(3 \cdot \varepsilon_c - 2)}, & \varepsilon_c > 0,002 \end{cases} \Rightarrow \zeta' = 0,375$$

$$x = \zeta \cdot d = \frac{\varepsilon_c}{(\varepsilon_c + \varepsilon_{s1})} \cdot d \Rightarrow x = 12,51 \text{ cm}$$

$$a = \zeta' \cdot x \Rightarrow a = 0,0469m$$

$$\varepsilon_{s2} = -1,43\text{‰} \Rightarrow f_{s2} = 434,78$$

$$\varepsilon_{s1} = 5,39\text{‰} \Rightarrow f_{s1} = 434,78$$

$$F_c = \alpha \cdot 0,85 \cdot f_{cd} \cdot x \cdot b \Rightarrow F_c = 141,25 \text{ kN} \quad (\text{Σκυρόδεμα})$$

$$F_s = A_s \cdot f_s \quad \eta$$

$$F_s^{\Theta\Lambda} = 133,86 \text{ kN} \quad (\text{Θλιβόμενος χάλυβας})$$

$$F_s^{E\Phi} = 133,86 \text{ kN} \quad (\text{Εφελκόμενος χάλυβας})$$

$$F_{j1}^{E\Phi} = 141,25 \text{ kN} \quad (\text{Εφελκόμενο Σύνθετο Υλικό})$$

$$\text{Πρέπει } F_c + F_s^{\Theta\Lambda} - F_s^{E\Phi} - F_{j1}^{E\Phi} - N = 0$$

Μέγιστη τιμή δύναμης **F=162,087325kN**

Ροπή Αντοχής:

Υπολογίζεται η ροπή αντοχής της ενισχυμένης διατομής ως προς τον κεντροβαρικό άξονα:

$$M_{RD} = F_c(0,5h-a) + F_{j1}^{E\Phi} \cdot 0,5h + F_s^{E\Phi}(0,5h-d_s) + F_s^{\Theta\Lambda}(0,5h-d_s)$$

$$M_{RD} = 121,565 \text{ kNm}$$

5.2.3. Δοκιμές στην οριακή κατάσταση αστοχίας

$$\varepsilon_c = -2,8704\text{‰}$$

$$\varepsilon_f = 12,6453\text{‰}$$

$$\alpha = \left\{ \begin{array}{l} \frac{\varepsilon_c(6 - \varepsilon_c)}{12}, \quad \varepsilon_c \leq 0,002 \\ \frac{3 \cdot \varepsilon_c - 2}{3 \cdot \varepsilon_c}, \quad \varepsilon_c > 0,002 \end{array} \right\} \Rightarrow \alpha = 0,77$$

$$\zeta' = \left\{ \begin{array}{l} \frac{8 - \varepsilon c}{4 \cdot (6 - \varepsilon c)}, \quad \varepsilon c \leq 0,002 \\ \frac{\varepsilon c(3 \cdot \varepsilon c - 4) + 2}{2 \cdot \varepsilon c(3 \cdot \varepsilon c - 2)}, \quad \varepsilon c > 0,002 \end{array} \right\} \Rightarrow \zeta' = 0,401$$

$$x = \xi \cdot d = \frac{\varepsilon c}{(\varepsilon c + \varepsilon s1)} \cdot d \Rightarrow x = 9,25 \text{ cm}$$

$$a = \zeta' \cdot x \Rightarrow a = 0,0371 \text{ m}$$

$$\varepsilon_{s2} = -1,78\% \Rightarrow f_{s2} = 356,86$$

$$\varepsilon_{s1} = 11,56\% \Rightarrow f_{s1} = 500,00$$

$$F_c = \alpha \cdot 0,85 \cdot f_{cd} \cdot x \cdot b \Rightarrow F_c = 332,00 \text{ kN} \quad (\text{Σκυρόδεμα})$$

$$F_s = A_s \cdot f_s \quad \eta$$

$$F_s^{\Theta\Lambda} = 109,87 \text{ kN} \quad (\text{Θλιβόμενος χάλυβας})$$

$$F_s^{E\Phi} = 153,94 \text{ kN} \quad (\text{Εφελκόμενος χάλυβας})$$

$$F_{j1}^{E\Phi} = 287,93 \text{ kN} \quad (\text{Εφελκόμενο Σύνθετο Υλικό})$$

$$\text{Πρέπει } F_c + F_s^{\Theta\Lambda} - F_s^{E\Phi} - F_{j1}^{E\Phi} - N = 0$$

Μέγιστη τιμή δύναμης **F=181,448783kN**

Ροπή Αντοχής:

Υπολογίζεται η ροπή αντοχής της ενισχυμένης διατομής ως προς τον κεντροβαρικό άξονα:

$$M_{RD} = F_c(0.5h-a) + F_{j1}^{E\Phi}0.5h + F_s^{E\Phi}(0.5h-d_k) + F_s^{\Theta\Lambda}(0.5h-d_\alpha)$$

$$\mathbf{M_{RD} = 199,37kNm} \quad (M_{(g)} = 63,28 \text{ kNm} \quad \text{και} \quad M_{(p)} = 136,09 \text{ kNm})$$

Η τιμή σχεδιασμού της ενεργού τάσεως σ_{jd} του νέου οπλισμού, εκτιμάται με βάση μία κρίσιμη τιμή της τάσης σ_{crit} , οφείλει δε να είναι μικρότερη από την τιμή σ_{jd} που αντιστοιχεί στην δυσμενέστερη από τις ακόλουθες δύο μορφές αστοχίας:

1. **Αστοχία του ιδίου του υλικού ενίσχυσης, οπότε,**

$$\sigma_{j,crit} = f_{jk} \text{ και}$$

$$\sigma_{jd} = \frac{1}{\gamma_m} \cdot f_{jk}$$

όπου

f_{jk} είναι η χαρακτηριστική τιμή αντοχής του υλικού ενίσχυσης και

γ_m είναι ο επί μέρους συντελεστής ασφαλείας για το υλικό ενίσχυσης

Η παραμόρφωση αστοχίας του σύνθετου υλικού είναι ίση με $\epsilon_{fr,m}=1,5\%$

Επομένως η τιμή σχεδιασμού της ενεργού τάσης του νέου οπλισμού είναι ίση με: $\sigma_{jd} = f_{jk}/\gamma_m = 3500 \text{ MPa}$

* Λόγω του ότι η ανάλυση γίνεται βάση πειραματικών δεδομένων δεν θα χρησιμοποιηθούν συντελεστές ασφαλείας

2. **Πρόωρη αποκόλληση του υλικού ενίσχυσης λόγω ανεπάρκειας της σύνδεσης κατά μήκος του στοιχείου ή της αγκύρωσης των άκρων του, οπότε,**

$$\sigma_{jd} = \sigma_{j,crit} \cdot \gamma_{Rd}$$

όπου,

γ_{Rd} είναι κατάλληλος συντελεστής ασφαλείας, ο οποίος καλύπτει τις αβεβαιότητες του προσομοιώματος

$\sigma_{j,crit}$ είναι η τάση του υλικού η οποία οδηγεί σε αποκόλληση

Γι' αυτήν τη μορφή αστοχίας, μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι παρακάτω προσεγγιστικές σχέσεις:

$$\sigma_{j,crit} \cong \beta \frac{\tau_b^{αποκ.}}{t_j} L_e$$

Όπου

$$\beta = \beta_w \cdot \beta_L, \text{ διορθωτικός συντελεστής}$$

$$\tau_b^{αποκ.} \cong f_{ctm}$$

L_e το ενεργό μήκος αγκύρωσης (δηλ. το μήκος πέραν του οποίου η αναλαμβανόμενη απ' το υλικό ενίσχυσης δύναμη, δεν αυξάνεται άλλο),

που υπολογίζεται από τη σχέση θεωρώντας ότι το άνοιγμα της κρίσιμης ρωγμής ισούται με 0,5mm, και λαμβάνεται ίσο με:

$$L_e = \sqrt{\frac{E_j \cdot t_j}{2 \cdot f_{cm}}} \text{ (MPa, mm)}$$

t_j, E_j είναι το πάχος και το μέτρο ελαστικότητας του υλικού ενίσχυσης αντίστοιχα. Στην περίπτωση που χρησιμοποιούνται k επάλληλες στρώσεις υλικού ενίσχυσης πάχους t_{j1} λαμβάνεται $t_j = \psi \cdot k \cdot t_{j1}$, όπου ψ ο μειωτικός συντελεστής πολλών στρώσεων.

$$\beta_w = \sqrt{\frac{2 - b_j / b_w}{1 + b_j / b_w}}, \text{ συντελεστής επιρροής πλάτος οπλισμού ενίσχυσης}$$

b_j το πλάτος του υλικού ενίσχυσης

b_w το πλάτος του εφελκόμενου πέλματος του δομικού στοιχείου επί του οποίου επικολλάται το υλικό ενίσχυσης

$$\beta_L = \sin\left(\frac{\pi \lambda}{2}\right) \cong \lambda \cdot (2 - \lambda) \text{ συντελεστής επιρροής του διατιθέμενου μήκους}$$

αγκύρωσης, όπου $\lambda = \frac{L_{av}}{L_e} < 1,0$ και L_{av} το διατιθέμενο μήκος αγκύρωσης του οπλισμού ενίσχυσης

$$\beta_L = 1,0 \text{ όταν } \lambda > 1,0.$$

Αυτή η μορφή αστοχίας συμβαίνει συνήθως με τη μορφή απόσχισης της επικάλυψης του διαμήκους οπλισμού του στοιχείου στην περιοχή όπου απολήγει ο οπλισμός ενίσχυσης.

Επομένως: $\tau_b^{αποκ.} \cong f_{cm} = 2,4$

$$L_e = 155,46 \text{ mm}$$

$$\beta_w = 0,816$$

$$\beta_L = 1$$

$$L_{av} = 1750 \text{ mm} > L_e = 155,46 \text{ mm}$$

$$\sigma_{j,cr} = 604,00 \text{ MPa}$$

5.2.4. Τιμή σχεδιασμού της ενεργού τάσεως σ_{jd}

Ο νέος οπλισμός υπολογίζεται έτσι ώστε σε συνεργασία με τον υφιστάμενο παλιό οπλισμό να αναλαμβάνονται οι εφελκυστικές δυνάμεις που αντιστοιχούν στη συνολική καμπτική ένταση στην περιοχή ενίσχυσης. Προσεγγιστικά, για τον υπολογισμό της απαιτούμενης διατομής του οπλισμού ενίσχυσης (A_j), σε βαθμό προμελέτης, μπορεί να χρησιμοποιηθεί η σχέση:

$$A_j = \frac{\Delta M_{do}}{z \cdot \sigma_{jd}}$$

$$A_j = \frac{\Delta M_{do}}{z \cdot \sigma_{jd}} \Rightarrow \sigma_{jd} = \frac{\Delta M_{do}}{z \cdot A_j}$$

Όπου

ΔM_{do} είναι η πρόσθετη διατομή που καλείται να αναλάβει η ενισχυμένη διατομή (επιπλέον της M_{do} την οποία μπορεί να αναλάβει η αρχική)

z , ο μοχλοβραχίονας των εσωτερικών δυνάμεων (ο οποίος μπορεί να ληφθεί ίσος με $0,9d_j$) και

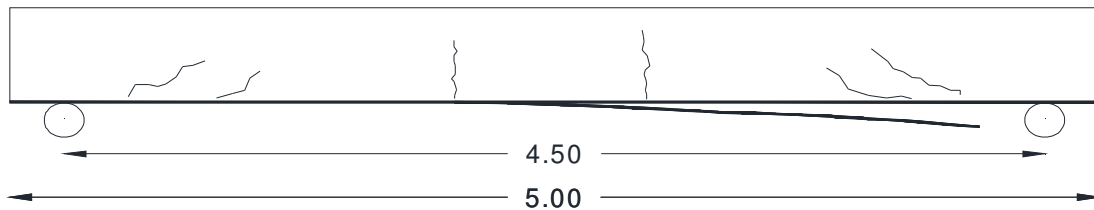
d_j το στατικό ύψος της διατομής, μετρούμενα από τη στάθμη του εξωτερικού οπλισμού.

Οι τιμές των $\sigma_{j,cr1}$ και σ_{jd} μπορεί να εκτιμώνται για κάθε μορφή αστοχίας, με χρήση αξιόπιστων πηγών της διεθνούς βιβλιογραφίας.

$$\left. \begin{array}{l} M(P) = 136,09 \text{ kNm} \\ M(l.d.) = 63,28 \text{ kNm} \end{array} \right\} \Rightarrow \Delta M = 199,37 \text{ kNm}$$

$$z = 0,9 \cdot d_j = 0,9 \cdot (h - d + n_j \cdot t_j) = 42,30 \text{ cm}$$

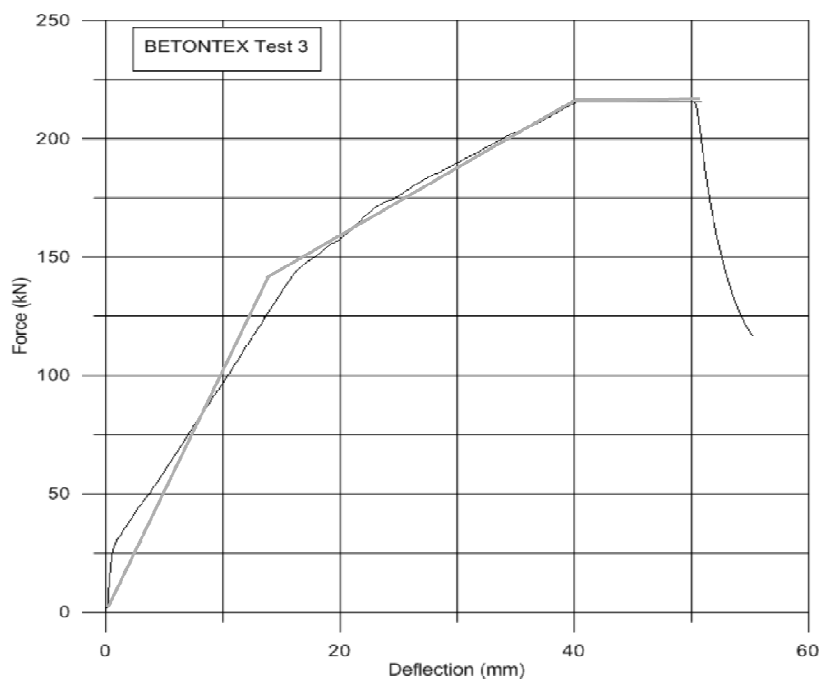
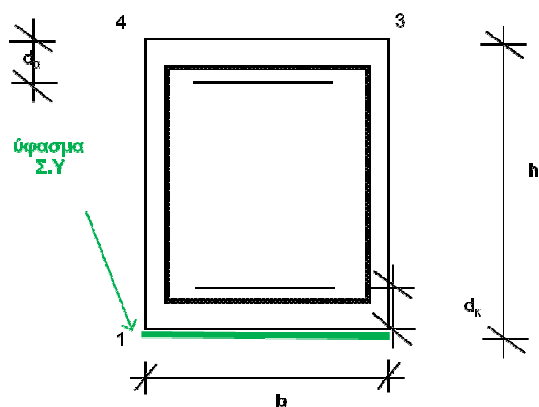
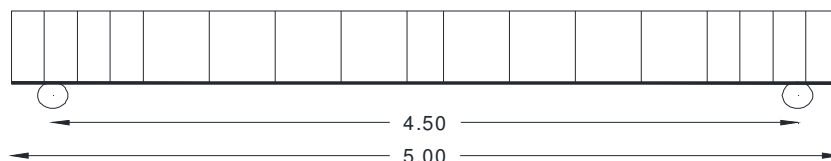
$$\sigma_{jd} = 474,26 \text{ MPa}$$



Σχήμα 5.7: Σχηματική απεικόνιση της δοκού μετά το πέρας του 2^ο πειράματος

Ο τρόπος αστοχίας της δοκού αυτού του πειράματος δε διέφερε ουσιαστικά από τον τρόπο αστοχίας της προηγούμενης δοκού, η μόνη ουσιαστική διαφορά ήταν η αύξηση του επιβαλλόμενου φορτίου μέχρι τη στιγμή της αποκόλλησης των σύνθετων υλικών.

**5.3. Πείραμα 3^ο: Δοκός ενισχυμένη με 3 στρώσεις ΙΟΠ άνθρακα GV330U-
αγκύρια ΙΟΠ μήκους 40cm- ρητίνη εποξειδική**



Σχήμα 5.8: Διάγραμμα δύναμης – παραμόρφωσης όπως προέκυψε από το 3^ο πείραμα και η προσομοίωσή του σε τριγωνικό

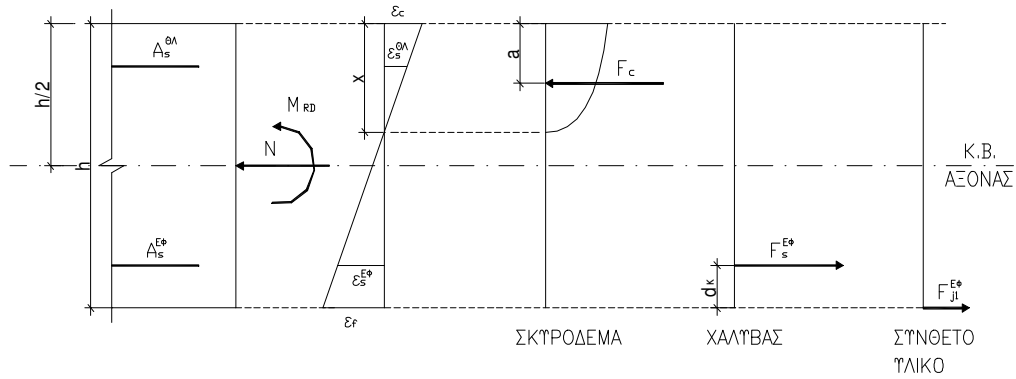
Στοιχεία Δοκού

Διατομή δοκού (h*b)	50cm x	25cm
Ποιότητα σκυροδέματος		C22
Ποιότητα χάλυβα		S500
Μέτρο ελαστικότητας χάλυβα	$E_s=$	200 GPa
Άνω οπλισμός	2Φ	14
Κάτω οπλισμός	2Φ	14
Συνδετήρες διατομής	$\Phi_w=$	8
Διατομή άνω οπλισμού	$\Phi_{L\alpha}=$	14
Διατομή κάτω οπλισμού	$\Phi_{L\kappa}=$	14
Επικάλυψη σκυροδέματος	c=	2,00cm
Αμφιέριστη δοκός μήκους	l =	4,5 m
Απόσταση εφελκόμενου οπλισμού	$d_{\kappa}=c+\Phi_w+0.5\Phi_{L\kappa}=$	3,50cm
Απόσταση θλιβόμενου οπλισμού	$d_{\alpha}=c+\Phi_w+0.5\Phi_{L\alpha}=$	3,50cm

Πίνακας 5.5: Παράθεση στοιχείων δοκού για το 3^ο πείραμα**Χαρακτηριστικά σύνθετου υλικού ενίσχυσης**

Μέτρο Ελαστικότητας Σύνθετου Υλικού	$E_j=$	230,0 GPa
Το Σύνθετο Υλικό τοποθετείται σε λωρίδες πλάτους	$w_j=$	0,200 m
Πάχος υφάσματος	$t_j=$	0,165 mm
Συνολικό εμβαδόν υφάσματος	$A_f=$	99mm ²
Χαρακτηριστική αντοχή σύνθετου υλικού	$f_{ft}=$	3500,0 MPa
Οριακή παραμόρφωση αστοχίας Σύνθετου Υλικού	$\epsilon_{fik}=$	1,5%
Αριθμός υφασμάτων	$n_j=$	3
	$\epsilon_{su}=f_{yd}/E_s=$	2,5‰

Πίνακας 5.6: Παράθεση χαρακτηριστικών σύνθετου υλικού για το 3^ο πείραμα**Υπολογισμοί****5.3.1. Δοκιμές στη διαρροή**



Σχήμα 5.9: Ανάλυση διατομής υπό μεγάλη ορθής έντασης (M+N) με κυριαρχούσα κάμψη για το 3^ο πείραμα

Παραμορφώσεις στην κατάσταση αστοχίας της δοκού του τρίτου πειράματος

Μέγιστη τιμή δύναμης **F=141,05kN**

$F_{jt} = A_j \cdot f_{jt}$, συνολική δύναμη μανδύα

$$\varepsilon_c = -1,362\%$$

$$\varepsilon_f = 4,43\%$$

$$\alpha = \begin{cases} \frac{\varepsilon_c(6 - \varepsilon_c)}{12}, & \varepsilon_c \leq 0,002 \\ \frac{3 \cdot \varepsilon_c - 2}{3 \cdot \varepsilon_c}, & \varepsilon_c > 0,002 \end{cases} \Rightarrow \alpha = 0,53$$

$$\zeta' = \begin{cases} \frac{8 - \varepsilon_c}{4 \cdot (6 - \varepsilon_c)}, & \varepsilon_c \leq 0,002 \\ \frac{\varepsilon_c(3 \cdot \varepsilon_c - 4) + 2}{2 \cdot \varepsilon_c(3 \cdot \varepsilon_c - 2)}, & \varepsilon_c > 0,002 \end{cases} \Rightarrow \zeta' = 0,358$$

$$x = \xi \cdot d = \frac{\varepsilon_c}{(\varepsilon_c + \varepsilon_{s1})} \cdot d \Rightarrow x = 11,76 \text{ cm}$$

$$a = \zeta' \cdot x \Rightarrow a = 0,0421 \text{ m}$$

$$\varepsilon_{s2} = -0,96\% \Rightarrow f_{s2} = 434,78$$

$$\varepsilon_{s1} = 4,02\% \Rightarrow f_{s1} = 434,78$$

$$F_c = \alpha \cdot 0,85 \cdot f_{cd} \cdot x \cdot b \Rightarrow F_c = 105,23 \text{ kN} \quad (\text{Σκυρόδεμα})$$

$$F_s = A_s \cdot f_s \quad \eta$$

$$F_s^{\Theta\Lambda} = 133,86 \text{ kN} \quad (\text{Θλιβόμενος χάλυβας})$$

$$F_s^{E\Phi} = 133,86 \text{ kN} \quad (\text{Εφελκόμενος χάλυβας})$$

$$F_{j1}^{E\Phi} = 105,23 \text{ kN} \quad (\text{Εφελκόμενο σύνθετο Υλικό})$$

$$\text{Πρέπει } F_c + F_s^{\Theta\Lambda} - F_s^{E\Phi} - F_{j1}^{E\Phi} - N = 0$$

Ροπή Αντοχής:

Υπολογίζεται η ροπή αντοχής της ενισχυμένης διατομής ως προς τον κεντροβαρικό άξονα:

$$M_{RD} = F_c(0,5h-a) + F_{j1}^{E\Phi} \cdot 0,5h + F_s^{E\Phi}(0,5h-d_k) + F_s^{\Theta\Lambda}(0,5h-d_\alpha)$$

$$M_{RD} = 105,79 \text{ kNm}$$

1. **Αστοχία του ίδιου του υλικού ενίσχυσης, οπότε,**

$$\sigma_{j,crit} = f_{jk} \text{ και}$$

$$\sigma_{jd} = \frac{1}{\gamma_m} \cdot f_{jk}$$

όπου

f_{jk} είναι η χαρακτηριστική τιμή αντοχής του υλικού ενίσχυσης και

γ_m είναι ο επί μέρους συντελεστής ασφαλείας για το υλικό ενίσχυσης

Η παραμόρφωση αστοχίας του σύνθετου υλικού είναι ίση με $\varepsilon_{fr,m} = 4,43\%$

Επομένως η τιμή σχεδιασμού της ενεργού τάσης του νέου οπλισμού είναι ίση με: $\sigma_{jd} = f_{jk}/\gamma_m = 1063,8 \text{ MPa}$

5.3.2. Δοκιμές στην οριακή κατάσταση αστοχίας

$$\varepsilon_c = -1,9843\%$$

$$\varepsilon_f = 5,94\%$$

$$\alpha = \begin{cases} \frac{\varepsilon_c(6 - \varepsilon_c)}{12}, & \varepsilon_c \leq 0,002 \\ \frac{3 \cdot \varepsilon_c - 2}{3 \cdot \varepsilon_c}, & \varepsilon_c > 0,002 \end{cases} \Rightarrow \alpha = 0,66$$

$$\zeta' = \begin{cases} \frac{8 - \varepsilon_c}{4 \cdot (6 - \varepsilon_c)}, & \varepsilon_c \leq 0,002 \\ \frac{\varepsilon_c(3 \cdot \varepsilon_c - 4) + 2}{2 \cdot \varepsilon_c(3 \cdot \varepsilon_c - 2)}, & \varepsilon_c > 0,002 \end{cases} \Rightarrow \zeta' = 0,375$$

$$x = \zeta \cdot d = \frac{\varepsilon_c}{(\varepsilon_c + \varepsilon_{s1})} \cdot d \Rightarrow x = 12,51 \text{ cm}$$

$$a = \zeta' \cdot x \Rightarrow a = 0,0469 \text{ m}$$

$$\varepsilon_{s2} = -1,43\% \Rightarrow f_{s2} = 434,78$$

$$\varepsilon_{s1} = 5,39\% \Rightarrow f_{s1} = 434,78$$

$$F_c = \alpha \cdot 0,85 \cdot f_{cd} \cdot x \cdot b \Rightarrow F_c = 141,25 \text{ kN} \quad (\text{Σκυρόδεμα})$$

$$F_s = A_s \cdot f_s \text{ ή}$$

$$F_s^{\Theta\Lambda} = 133,86 \text{ kN} \quad (\text{Θλιβόμενος χάλυβας})$$

$$F_s^{E\Phi} = 133,86 \text{ kN} \quad (\text{Εφελκόμενος χάλυβας})$$

$$F_{j1}^{E\Phi} = 141,25 \text{ kN} \quad (\text{Εφελκόμενο Σύνθετο Υλικό})$$

$$\text{Πρέπει } F_c + F_s^{\Theta\Lambda} - F_s^{E\Phi} - F_{j1}^{E\Phi} - N = 0$$

Μέγιστη τιμή δύναμης **F=215,10kN**

Ροπή Αντοχής:

Υπολογίζεται η ροπή αντοχής της ενισχυμένης διατομής ως προς τον κεντροβαρικό άξονα:

$$M_{RD} = F_c(0.5h-a) + F_{jt}^{E\Phi}0.5h + F_s^{E\Phi}(0.5h-d_k) + F_s^{\Theta\Lambda}(0.5h-d_a)$$

$$M_{RD} = 161,327 \text{ kNm}$$

1. Αστοχία του ιδίου του υλικού ενίσχυσης, οπότε,

$$\sigma_{j,\text{crit}} = f_{jk} \text{ και}$$

$$\sigma_{jd} = \frac{1}{\gamma_m} \cdot f_{jk}$$

όπου

f_{jk} είναι η χαρακτηριστική τιμή αντοχής του υλικού ενίσχυσης και

γ_m είναι ο επί μέρους συντελεστής ασφαλείας για το υλικό ενίσχυσης

Η παραμόρφωση αστοχίας του σύνθετου υλικού είναι ίση με $\varepsilon_{fr,m} = 10,21\%$

Επομένως η τιμή σχεδιασμού της ενεργού τάσης του νέου οπλισμού είναι ίση με: $\sigma_{jd} = f_{jk}/\gamma_m = 2449,7 \text{ MPa}$

5.3.3. Δοκιμές στην οριακή κατάσταση αστοχίας

$$\varepsilon_c = -3,5\%$$

$$\varepsilon_f = 15,00\%$$

$$\alpha = \left\{ \begin{array}{l} \frac{\varepsilon_c(6 - \varepsilon_c)}{12}, \varepsilon_c \leq 0,002 \\ \frac{3 \cdot \varepsilon_c - 2}{3 \cdot \varepsilon_c}, \varepsilon_c > 0,002 \end{array} \right\} \Rightarrow \alpha = 0,81$$

$$\zeta' = \left\{ \begin{array}{l} \frac{8 - \varepsilon_c}{4 \cdot (6 - \varepsilon_c)}, \varepsilon_c \leq 0,002 \\ \frac{\varepsilon_c(3 \cdot \varepsilon_c - 4) + 2}{2 \cdot \varepsilon_c(3 \cdot \varepsilon_c - 2)}, \varepsilon_c > 0,002 \end{array} \right\} \Rightarrow \zeta' = 0,416$$

$$x = \xi \cdot d = \frac{\varepsilon_c}{(\varepsilon_c + \varepsilon_{s1})} \cdot d \Rightarrow x = 9,48 \text{ cm}$$

$$a = \zeta' \cdot x \Rightarrow a = 0,0395 \text{ m}$$

$$\varepsilon_{s2} = -2,21\% \Rightarrow f_{s2} = 442,95$$

$$\varepsilon_{s1} = 13,70\% \Rightarrow f_{s1} = 500,00$$

$$F_c = \alpha \cdot 0,85 \cdot f_{cd} \cdot x \cdot b \Rightarrow F_c = 359,12 \text{ kN} \quad (\text{Σκυρόδεμα})$$

$$F_s = A_s \cdot f_s \quad \eta$$

$$F_s^{\Theta\Lambda} = 136,37 \text{ kN} \quad (\text{Θλιβόμενος χάλυβας})$$

$$F_s^{E\Phi} = 153,94 \text{ kN} \quad (\text{Εφελκόμενος χάλυβας})$$

$$F_{j1}^{E\Phi} = 341,55 \text{ kN} \quad (\text{Εφελκόμενο σύνθετο Υλικό})$$

$$\text{Πρέπει } F_c + F_s^{\Theta\Lambda} - F_s^{E\Phi} - F_{j1}^{E\Phi} - N = 0$$

Μέγιστη τιμή δύναμης **F=213,50kN**

Ροπή Αντοχής:

Υπολογίζεται η ροπή αντοχής της ενισχυμένης διατομής ως προς τον κεντροβαρικό άξονα:

$$M_{RD} = F_c(0,5h-a) + F_{j1}^{E\Phi} \cdot 0,5h + F_s^{E\Phi}(0,5h-d_s) + F_s^{\Theta\Lambda}(0,5h-d_s)$$

$$M_{RD} = \mathbf{223,41kNm} \quad (M_{(g)}=63,28 \text{ kNm} \quad \text{και} \quad M_{(p)}=160,13\text{kNm})$$

Η τιμή σχεδιασμού της ενεργού τάσεως σ_{jd} του νέου οπλισμού, εκτιμάται με βάση μία κρίσιμη τιμή της τάσης $\sigma_{j,crit}$, οφείλει δε να είναι μικρότερη από την τιμή σ_{jd} που αντιστοιχεί στην δυσμενέστερη από τις ακόλουθες δύο μορφές αστοχίας:

1. **Αστοχία του ιδίου του υλικού ενίσχυσης, οπότε,**

$$\sigma_{j,crit} = f_{jk} \quad \text{και}$$

$$\sigma_{jd} = \frac{1}{\gamma_m} \cdot f_{jk}$$

όπου

f_{jk} είναι η χαρακτηριστική τιμή αντοχής του υλικού ενίσχυσης και

γ_m είναι ο επί μέρους συντελεστής ασφαλείας για το υλικό ενίσχυσης

Η παραμόρφωση αστοχίας του σύνθετου υλικού είναι ίση με $\epsilon_{fr,m}=1,5\%$

Επομένως η τιμή σχεδιασμού της ενεργού τάσης του νέου οπλισμού είναι ίση με: $\sigma_{jd} = f_{jk}/\gamma_m = 3500,0 \text{MPa}$

* Λόγω του ότι η ανάλυση γίνεται βάση πειραματικών δεδομένων δεν θα χρησιμοποιηθούν συντελεστές ασφαλείας

2. **Πρώρη αποκόλληση του υλικού ενίσχυσης** λόγω ανεπάρκειας της σύνδεσης κατά μήκος του στοιχείου ή της αγκύρωσης των άκρων του, οπότε,

$$\sigma_{jd} = \sigma_{j,crit} \cdot \gamma_{Rd}$$

όπου,

γ_{Rd} είναι κατάλληλος συντελεστής ασφαλείας, ο οποίος καλύπτει τις αβεβαιότητες του προσομοιώματος

$\sigma_{j,crit}$ είναι η τάση του υλικού η οποία οδηγεί σε αποκόλληση

Γι' αυτήν τη μορφή αστοχίας, μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι παρακάτω προσεγγιστικές σχέσεις:

$$\sigma_{j,crit} \cong \beta \frac{\tau_b^{αποκ.}}{t_j} L_e$$

Όπου

$\beta = \beta_w \cdot \beta_L$, διορθωτικός συντελεστής

$$\tau_b^{αποκ.} \cong f_{ctm}$$

L_e το ενεργό μήκος αγκύρωσης (δηλ. το μήκος πέραν του οποίου η αναλαμβανόμενη απ' το υλικό ενίσχυσης δύναμη, δεν αυξάνεται άλλο), που υπολογίζεται από τη σχέση θεωρώντας ότι το άνοιγμα της κρίσιμης ρωγμής ισούται με 0,5mm, και λαμβάνεται ίσο με:

$$L_e = \sqrt{\frac{E_j \cdot t_j}{2 \cdot f_{ctm}}} \text{ (MPa, mm)}$$

t_j, E_j είναι το πάχος και το μέτρο ελαστικότητας του υλικού ενίσχυσης αντίστοιχα. Στην περίπτωση που χρησιμοποιούνται k επάλληλες στρώσεις υλικού ενίσχυσης πάχους t_{j1} λαμβάνεται $t_j = \psi \cdot k \cdot t_{j1}$, όπου ψ ο μειωτικός συντελεστής πολλών στρώσεων.

$$\beta_w = \sqrt{\frac{2 - b_j / b_w}{1 + b_j / b_w}}, \text{ συντελεστής επιρροής πλάτος οπλισμού ενίσχυσης}$$

b_j το πλάτος του υλικού ενίσχυσης

b_w το πλάτος του εφελκόμενου πέλματος του δομικού στοιχείου επί του οποίου επικολλάται το υλικό ενίσχυσης

$$\beta_L = \sin\left(\frac{\pi\lambda}{2}\right) \cong \lambda \cdot (2 - \lambda) \text{ συντελεστής επιρροής του διατιθέμενου μήκους}$$

αγκύρωσης, όπου $\lambda = \frac{L_{av}}{L_e} < 1,0$ και L_{av} το διατιθέμενο μήκος αγκύρωσης

του οπλισμού ενίσχυσης

$$\beta_L = 1,0 \text{ όταν } \lambda > 1,0.$$

Αυτή η μορφή αστοχίας συμβαίνει συνήθως με τη μορφή απόσχισης της επικάλυψης του διαμήκους οπλισμού του στοιχείου στην περιοχή όπου απολήγει ο οπλισμός ενίσχυσης.

Επομένως: $\tau_b^{αποκ.} \cong f_{ctm} = 2,4$

$$L_e = 155,46 \text{ mm}$$

$$\beta_w = 0,816$$

$$\beta_L = 1$$

$$L_{av} = 1750 \text{ mm} > L_e = 155,46 \text{ mm}$$

$$\sigma_{j,cr} = 604,00 \text{ MPa}$$

5.2.4. Τιμή σχεδιασμού της ενεργού τάσεως σ_{jd}

Ο νέος οπλισμός υπολογίζεται έτσι ώστε σε συνεργασία με τον υφιστάμενο παλιό οπλισμό να αναλαμβάνονται οι εφελκυστικές δυνάμεις που αντιστοιχούν στη συνολική καμπτική ένταση στην περιοχή ενίσχυσης. Προσεγγιστικά, για τον υπολογισμό της απαιτούμενης διατομής του οπλισμού ενίσχυσης (A_j), σε βαθμό προμελέτης, μπορεί να χρησιμοποιηθεί η σχέση:

$$A_j = \frac{\Delta M_{do}}{z \cdot \sigma_{jd}}$$

$$A_j = \frac{\Delta M_{do}}{z \cdot \sigma_{jd}} \Rightarrow \sigma_{jd} = \frac{\Delta M_{do}}{z \cdot A_j}$$

Όπου

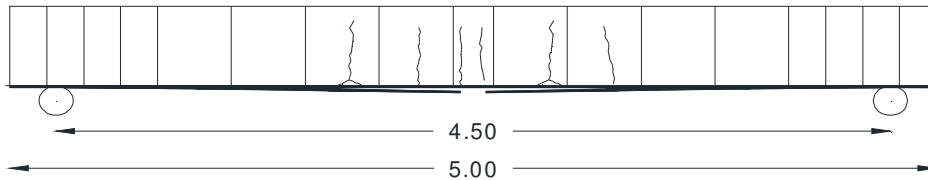
- ΔM_{d0} είναι η πρόσθετη διατομή που καλείται να αναλάβει η ενισχυμένη διατομή (επιπλέον της M_{d0} την οποία μπορεί να αναλάβει η αρχική)
- z , ο μοχλοβραχίονας των εσωτερικών δυνάμεων (ο οποίος μπορεί να ληφθεί ίσος με $0,9d_j$) και
- d_j το στατικό ύψος της διατομής, μετρούμενα από τη στάθμη του εξωτερικού οπλισμού.

Οι τιμές των $\sigma_{j,cr}$ και σ_{jd} μπορεί να εκτιμώνται για κάθε μορφή αστοχίας, με χρήση αξιόπιστων πηγών της διεθνούς βιβλιογραφίας.

$$\left. \begin{array}{l} M(P) = 145,93 \text{ kNm} \\ M(\text{ι.δ.}) = 63,28 \text{ kNm} \end{array} \right\} \Rightarrow \Delta M = 223,41 \text{ kNm}$$

$$z = 0,9 \cdot d_j = 0,9 \cdot (h - d + n_j \cdot t_j) = 42,30 \text{ cm}$$

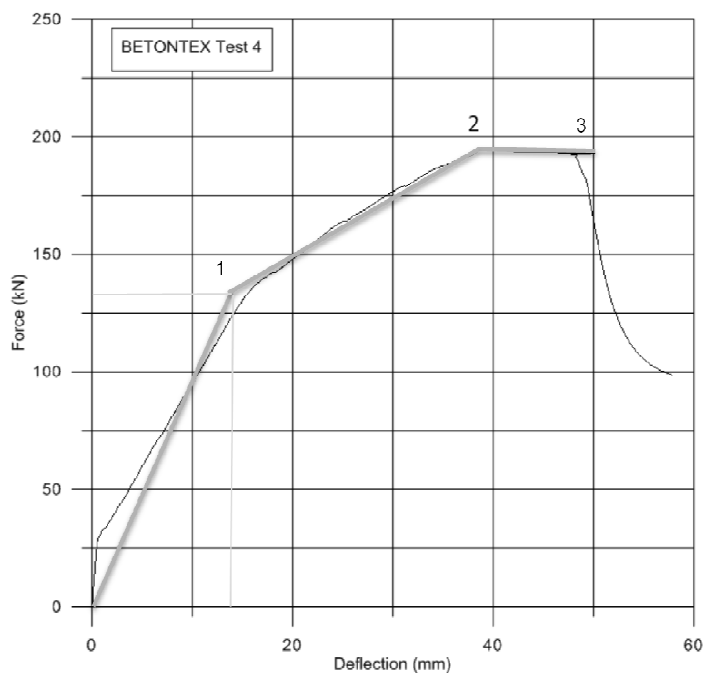
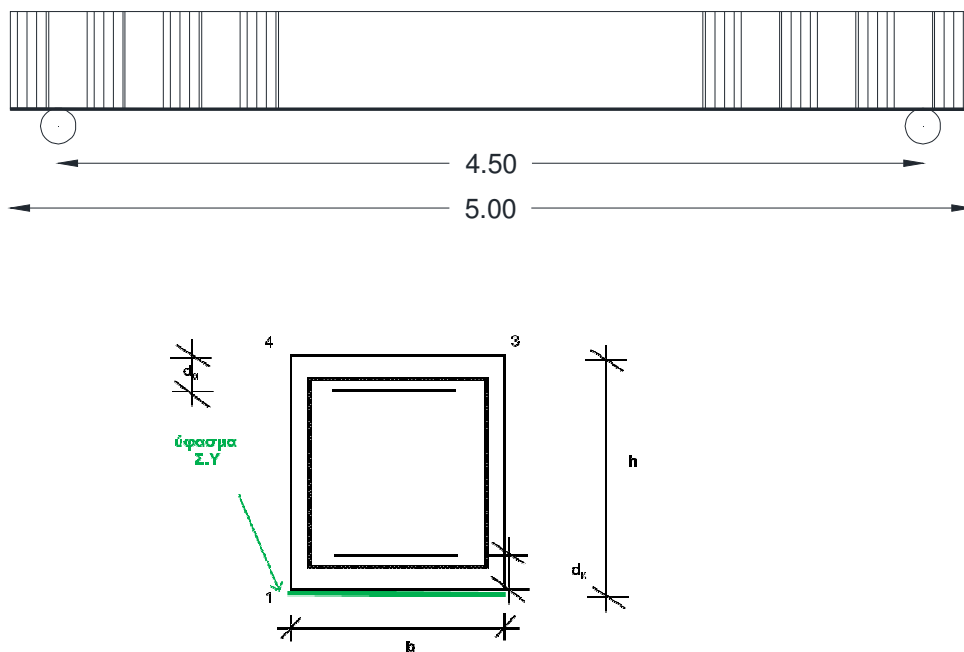
$$\sigma_{j,i} = 533,55 \text{ MPa}$$



Σχήμα 5.10: Σχηματική απεικόνιση της δοκού μετά το πέρας του 3^ο πειράματος

Οι ρηγματώσεις που παρατηρήθηκαν κατά την αστοχία της δοκού ήταν κατά κύριο λόγο καμπτικού τύπου και παρατηρήθηκαν στο τμήμα μεταξύ των επιβαλλόμενων φορτίων. Σε μερικά σημεία στην εφελκόμενη παρειά παρατηρήθηκε αποδιοργάνωση σκυροδέματος που ίσως οφείλεται στην τοποθέτηση των ράβδων (αγκύρια) FRP. Σημαντικό είναι το γεγονός ότι στη συγκεκριμένη δοκιμή δεν πραγματοποιήθηκε αποκόλληση των σύνθετων υλικών αλλά θραύση αυτών στη μεσαία περίπου διατομή.

5.4. Πείραμα 4^ο: Δοκός ενισχυμένη με 3 στρώσεις ΙΟΠ άνθρακα GV330U- HT – 1 στρώση GV330U- HT – πλάτος 20cm σε μορφή U στα άκρα της δοκού (4 λωρίδες/20cm) - ρητίνη εποξειδική



Σχήμα 5.11: Διάγραμμα δύναμης – παραμόρφωσης όπως προέκυψε από το 4^ο πείραμα και η προσομοίωσή του σε τριγωνικό

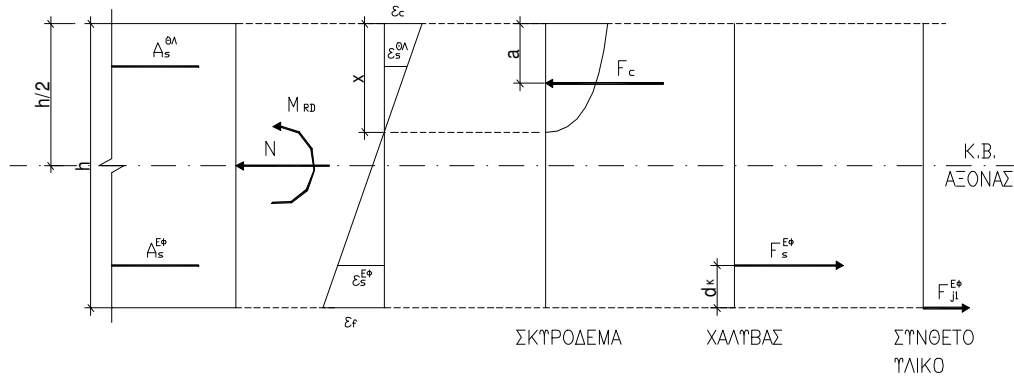
Στοιχεία Δοκού

Διατομή δοκού (h*b)	50cm x	25cm
Ποιότητα σκυροδέματος		C22
Ποιότητα χάλυβα		S500
Μέτρο ελαστικότητας χάλυβα	$E_s=$	200 GPa
Άνω οπλισμός	2Φ	14
Κάτω οπλισμός	2Φ	14
Συνδετήρες διατομής	$\Phi_w=$	8
Διατομή άνω οπλισμού	$\Phi_{L\alpha}=$	14
Διατομή κάτω οπλισμού	$\Phi_{L\kappa}=$	14
Επικάλυψη σκυροδέματος	c=	2,00cm
Αμφιέριστη δοκός μήκους	l =	4,5 m
Απόσταση εφελκόμενου οπλισμού	$d_{\kappa}=c+\Phi_w+0.5\Phi_{L\kappa}=$	3,50cm
Απόσταση θλιβόμενου οπλισμού	$d_{\alpha}=c+\Phi_w+0.5\Phi_{L\alpha}=$	3,50cm

Πίνακας 5.7: Παράθεση στοιχείων δοκού για το 4^ο πείραμα**Χαρακτηριστικά σύνθετου υλικού ενίσχυσης**

Μέτρο Ελαστικότητας Σύνθετου Υλικού	$E_j=$	230,0 GPa
Το Σύνθετο Υλικό τοποθετείται σε λαωρίδες πλάτους	$w_j=$	0,200 m
Πάχος υφάσματος	$t_j=$	0,165 mm
Συνολικό εμβαδόν υφάσματος	$A_f=$	99mm ²
Χαρακτηριστική αντοχή σύνθετου υλικού	$f_{ft}=$	3500,0 MPa
Οριακή παραμόρφωση αστοχίας Σύνθετου Υλικού	$\epsilon_{fik}=$	1,5%
Αριθμός υφασμάτων	$n_j=$	3
	$\epsilon_{su}=f_{yd}/E_s=$	2,5‰

Πίνακας 5.8: Παράθεση χαρακτηριστικών σύνθετου υλικού για το 4^ο πείραμα**Υπολογισμοί****5.4.1. Δοκιμές στη διαρροή**



Σχήμα 5.12: Ανάλυση διατομής υπό μεγέθη ορθής έντασης ($M+N$) με κυριαρχούσα κάμψη για το 4^ο πείραμα

Παραμορφώσεις στην κατάσταση αστοχίας της δοκού του τέταρτου πειράματος

Μέγιστη τιμή δύναμης **F=132,811kN**

$$F_{jl} = A_j \cdot f_{jl}, \text{ συνολική δύναμη μανδύα}$$

$$\varepsilon_c = -2,984\%$$

$$\varepsilon_f = 3,93\%$$

$$\alpha = \begin{cases} \frac{\varepsilon_c(6 - \varepsilon_c)}{12}, & \varepsilon_c \leq 0,002 \\ \frac{3 \cdot \varepsilon_c - 2}{3 \cdot \varepsilon_c}, & \varepsilon_c > 0,002 \end{cases} \Rightarrow \alpha = 0,47$$

$$\zeta' = \begin{cases} \frac{8 - \varepsilon_c}{4 \cdot (6 - \varepsilon_c)}, & \varepsilon_c \leq 0,002 \\ \frac{\varepsilon_c(3 \cdot \varepsilon_c - 4) + 2}{2 \cdot \varepsilon_c(3 \cdot \varepsilon_c - 2)}, & \varepsilon_c > 0,002 \end{cases} \Rightarrow \zeta' = 0,354$$

$$x = \xi \cdot d = \frac{\varepsilon_c}{(\varepsilon_c + \varepsilon_s)} \cdot d \Rightarrow x = 11,57 \text{ cm}$$

$$a = \zeta' \cdot x \Rightarrow a = 0,0409 \text{ m}$$

$$\varepsilon_{s2} = -0,82\% \Rightarrow f_{s2} = 434,78$$

$$\varepsilon_{s1} = 3,57\% \Rightarrow f_{s1} = 434,78$$

$$F_c = \alpha \cdot 0,85 \cdot f_{cd} \cdot x \cdot b \Rightarrow F_c = 93,35 \text{ kN} \quad (\text{Σκυρόδεμα})$$

$$F_s = A_s \cdot f_s \quad \eta$$

$$F_s^{\Theta\Lambda} = 133,86 \text{ kN} \quad (\text{Θλιβόμενος χάλυβας})$$

$$F_s^{E\Phi} = 133,86 \text{ kN} \quad (\text{Εφελκόμενος χάλυβας})$$

$$F_{j1}^{E\Phi} = 18,26 \text{ kN} \quad (\text{Εφελκόμενο Σύνθετο Υλικό})$$

$$\text{Πρέπει } F_c + F_s^{\Theta\Lambda} - F_s^{E\Phi} - F_{j1}^{E\Phi} - N = 0$$

Ροπή Αντοχής:

Υπολογίζεται η ροπή αντοχής της ενισχυμένης διατομής ως προς τον κεντροβαρικό άξονα:

$$M_{RD} = F_c(0,5h-a) + F_{j1}^{E\Phi} \cdot 0,5h + F_s^{E\Phi}(0,5h-d_k) + F_s^{\Theta\Lambda}(0,5h-d_\alpha)$$

$$M_{RD} = 100,42 \text{ kNm}$$

1. **Αστοχία του ιδίου του υλικού ενίσχυσης, οπότε,**

$$\sigma_{j,crit} = f_{jk} \text{ και}$$

$$\sigma_{jd} = \frac{1}{\gamma_m} \cdot f_{jk}$$

όπου

f_{jk} είναι η χαρακτηριστική τιμή αντοχής του υλικού ενίσχυσης και

γ_m είναι ο επί μέρους συντελεστής ασφαλείας για το υλικό ενίσχυσης

Η παραμόρφωση αστοχίας του σύνθετου υλικού είναι ίση με $\varepsilon_{fr,m} = 1,1825\%$

Επομένως η τιμή σχεδιασμού της ενεργού τάσης του νέου οπλισμού είναι ίση με: $\sigma_{jd} = f_{jk}/\gamma_m = 28381 \text{ MPa}$

5.4.2. Δοκιμές στην οριακή κατάσταση αστοχίας

$$\varepsilon_c = -2,984\text{‰}$$

$$\varepsilon_f = 7,73\text{‰}$$

$$\alpha = \begin{cases} \frac{\varepsilon_c(6 - \varepsilon_c)}{12}, & \varepsilon_c \leq 0,002 \\ \frac{3 \cdot \varepsilon_c - 2}{3 \cdot \varepsilon_c}, & \varepsilon_c > 0,002 \end{cases} \Rightarrow \alpha = 0,78$$

$$\zeta' = \begin{cases} \frac{8 - \varepsilon_c}{4 \cdot (6 - \varepsilon_c)}, & \varepsilon_c \leq 0,002 \\ \frac{\varepsilon_c(3 \cdot \varepsilon_c - 4) + 2}{2 \cdot \varepsilon_c(3 \cdot \varepsilon_c - 2)}, & \varepsilon_c > 0,002 \end{cases} \Rightarrow \zeta' = 0,404$$

$$x = \xi \cdot d = \frac{\varepsilon_c}{(\varepsilon_c + \varepsilon_{s1})} \cdot d \Rightarrow x = 13,92\text{cm}$$

$$a = \zeta' \cdot x \Rightarrow a = 0,0409\text{m}$$

$$\varepsilon_{s2} = -2,23\text{‰} \Rightarrow f_{s2} = 434,78$$

$$\varepsilon_{s1} = 6,98\text{‰} \Rightarrow f_{s1} = 434,78$$

$$F_c = \alpha \cdot 0,85 \cdot f_{cd} \cdot x \cdot b \Rightarrow F_c = 183,78 \text{ kN} \quad (\text{Σκυρόδεμα})$$

$$F_s = A_s \cdot f_s \cdot \eta$$

$$F_s^{\Theta\Lambda} = 133,86 \text{ kN} \quad (\text{Θλιβόμενος χάλυβας})$$

$$F_s^{E\Phi} = 133,86 \text{ kN} \quad (\text{Εφελκόμενος χάλυβας})$$

$$F_{j1}^{E\Phi} = 183,78 \text{ kN} \quad (\text{Εφελκόμενο Σύνθετο Υλικό})$$

$$\text{Πρέπει } F_c + F_s^{\Theta\Lambda} - F_s^{E\Phi} - F_{j1}^{E\Phi} - N = 0$$

Μέγιστη τιμή δύναμης **F=183,245kN**

Ροπή Αντοχής:

Υπολογίζεται η ροπή αντοχής της ενισχυμένης διατομής ως προς τον κεντροβαρικό άξονα:

$$M_{RD} = F_c(0.5h-a) + F_{jt}^{E\Phi}0.5h + F_s^{E\Phi}(0.5h-d_k) + F_s^{\Theta\Lambda}(0.5h-d_\alpha)$$

$$M_{RD} = 139,105 \text{ kNm}$$

1. **Αστοχία του ιδίου του υλικού ενίσχυσης, οπότε,**

$$\sigma_{j,\text{crit}} = f_{jk} \text{ και}$$

$$\sigma_{jd} = \frac{1}{\gamma_m} \cdot f_{jk}$$

όπου

f_{jk} είναι η χαρακτηριστική τιμή αντοχής του υλικού ενίσχυσης και

γ_m είναι ο επί μέρους συντελεστής ασφαλείας για το υλικό ενίσχυσης

Η παραμόρφωση αστοχίας του σύνθετου υλικού είναι ίση με $\varepsilon_{frp,u} = 2,9843\%$

Επομένως η τιμή σχεδιασμού της ενεργού τάσης του νέου οπλισμού είναι ίση με: $\sigma_{jd} = f_{jk}/\gamma_m = 71623 \text{ MPa}$

5.4.3. Δοκιμές στην οριακή κατάσταση αστοχίας

$$\varepsilon_c = -2,8575\%$$

$$\varepsilon_f = 12,60\%$$

$$\alpha = \begin{cases} \frac{\varepsilon_c(6 - \varepsilon_c)}{12}, & \varepsilon_c \leq 0,002 \\ \frac{3 \cdot \varepsilon_c - 2}{3 \cdot \varepsilon_c}, & \varepsilon_c > 0,002 \end{cases} \Rightarrow \alpha = 0,77$$

$$\zeta' = \begin{cases} \frac{8 - \varepsilon_c}{4 \cdot (6 - \varepsilon_c)}, & \varepsilon_c \leq 0,002 \\ \frac{\varepsilon_c(3 \cdot \varepsilon_c - 4) + 2}{2 \cdot \varepsilon_c(3 \cdot \varepsilon_c - 2)}, & \varepsilon_c > 0,002 \end{cases} \Rightarrow \zeta' = 0,401$$

$$x = \xi \cdot d = \frac{\varepsilon_c}{(\varepsilon_c + \varepsilon_{s1})} \cdot d \Rightarrow x = 9,25 \text{ cm}$$

$$a = \zeta' \cdot x \Rightarrow a = 0,0371 \text{ m}$$

$$\varepsilon_{s2} = -1,78\% \Rightarrow f_{s2} = 355,16$$

$$\varepsilon_{s1} = 11,51\% \Rightarrow f_{s1} = 500$$

$$F_c = \alpha \cdot 0,85 \cdot f_{cd} \cdot x \cdot b \Rightarrow F_c = 331,39 \text{ kN} \quad (\text{Σκυρόδεμα})$$

$$F_s = A_s \cdot f_s \quad \eta$$

$$F_s^{\Theta\Lambda} = 109,34 \text{ kN} \quad (\text{Θλιβόμενος χάλυβας})$$

$$F_s^{E\Phi} = 153,94 \text{ kN} \quad (\text{Εφελκόμενος χάλυβας})$$

$$F_{j1}^{E\Phi} = 286,8 \text{ kN} \quad (\text{Εφελκόμενο Σύνθετο Υλικό})$$

$$\text{Πρέπει } F_c + F_s^{\Theta\Lambda} - F_s^{E\Phi} - F_{j1}^{E\Phi} - N = 0$$

Μέγιστη τιμή δύναμης **F=181,82kN**

Ροπή Αντοχής:

Υπολογίζεται η ροπή αντοχής της ενισχυμένης διατομής ως προς τον κεντροβαρικό άξονα:

$$M_{RD} = F_c(0,5h-a) + F_{j1}^{E\Phi} \cdot 0,5h + F_s^{E\Phi}(0,5h-d_s) + F_s^{\Theta\Lambda}(0,5h-d_s)$$

$$M_{RD} = \mathbf{198,87kNm} \quad (M_{(g)}=63,28 \text{ kNm} \quad \text{και} \quad M_{(p)}=136,37\text{kNm})$$

Η τιμή σχεδιασμού της ενεργού τάσεως σ_{jd} του νέου οπλισμού, εκτιμάται με βάση μία κρίσιμη τιμή της τάσης $\sigma_{j,crit}$, οφείλει δε να είναι μικρότερη από την τιμή σ_{jd} που αντιστοιχεί στην δυσμενέστερη από τις ακόλουθες δύο μορφές αστοχίας:

1. **Αστοχία του ιδίου του υλικού ενίσχυσης, οπότε,**

$$\sigma_{j,crit} = f_{jk} \quad \text{και}$$

$$\sigma_{jd} = \frac{1}{\gamma_m} \cdot f_{jk}$$

όπου

f_{jk} είναι η χαρακτηριστική τιμή αντοχής του υλικού ενίσχυσης και

γ_m είναι ο επί μέρους συντελεστής ασφαλείας για το υλικό ενίσχυσης

Η παραμόρφωση αστοχίας του σύνθετου υλικού είναι ίση με $\epsilon_{fr,m}=1,5\%$

Επομένως η τιμή σχεδιασμού της ενεργού τάσης του νέου οπλισμού είναι ίση με: $\sigma_{jd} = f_{jk}/\gamma_m = 3500 \text{MPa}$

* Λόγω του ότι η ανάλυση γίνεται βάση πειραματικών δεδομένων δεν θα χρησιμοποιηθούν συντελεστές ασφαλείας

2. **Πρώρη αποκόλληση του υλικού ενίσχυσης** λόγω ανεπάρκειας της σύνδεσης κατά μήκος του στοιχείου ή της αγκύρωσης των άκρων του, οπότε,

$$\sigma_{jd} = \sigma_{j,crit} \cdot \gamma_{Rd}$$

όπου,

γ_{Rd} είναι κατάλληλος συντελεστής ασφαλείας, ο οποίος καλύπτει τις αβεβαιότητες του προσομοιώματος

$\sigma_{j,crit}$ είναι η τάση του υλικού η οποία οδηγεί σε αποκόλληση

Γι' αυτήν τη μορφή αστοχίας, μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι παρακάτω προσεγγιστικές σχέσεις:

$$\sigma_{j,crit} \cong \beta \frac{\tau_b^{αποκ.}}{t_j} L_e$$

Όπου

$\beta = \beta_w \cdot \beta_L$, διορθωτικός συντελεστής

$$\tau_b^{αποκ.} \cong f_{ctm}$$

L_e το ενεργό μήκος αγκύρωσης (δηλ. το μήκος πέραν του οποίου η αναλαμβανόμενη απ' το υλικό ενίσχυσης δύναμη, δεν αυξάνεται άλλο), που υπολογίζεται από τη σχέση θεωρώντας ότι το άνοιγμα της κρίσιμης ρωγμής ισούται με 0,5mm, και λαμβάνεται ίσο με:

$$L_e = \sqrt{\frac{E_j \cdot t_j}{2 \cdot f_{ctm}}} \text{ (MPa, mm)}$$

t_j, E_j είναι το πάχος και το μέτρο ελαστικότητας του υλικού ενίσχυσης αντίστοιχα. Στην περίπτωση που χρησιμοποιούνται k επάλληλες στρώσεις υλικού ενίσχυσης πάχους t_{j1} λαμβάνεται $t_j = \psi \cdot k \cdot t_{j1}$, όπου ψ ο μειωτικός συντελεστής πολλών στρώσεων.

$$\beta_w = \sqrt{\frac{2 - b_j / b_w}{1 + b_j / b_w}}, \text{ συντελεστής επιρροής πλάτος οπλισμού ενίσχυσης}$$

b_j το πλάτος του υλικού ενίσχυσης

b_w το πλάτος του εφελκόμενου πέλματος του δομικού στοιχείου επί του οποίου επικολλάται το υλικό ενίσχυσης

$$\beta_L = \sin\left(\frac{\pi\lambda}{2}\right) \cong \lambda \cdot (2 - \lambda) \text{ συντελεστής επιρροής του διατιθέμενου μήκους}$$

αγκύρωσης, όπου $\lambda = \frac{L_{av}}{L_e} < 1,0$ και L_{av} το διατιθέμενο μήκος αγκύρωσης

του οπλισμού ενίσχυσης

$\beta_L = 1,0$ όταν $\lambda > 1,0$.

Αυτή η μορφή αστοχίας συμβαίνει συνήθως με τη μορφή απόσχισης της επικάλυψης του διαμήκους οπλισμού του στοιχείου στην περιοχή όπου απολήγει ο οπλισμός ενίσχυσης.

Επομένως: $\tau_b^{αποκ.} \cong f_{ctm} = 2,4$

$L_e = 155,46 \text{ mm}$

$\beta_w = 0,816$

$\beta_L = 1$

$L_{av} = 1750 \text{ mm} > L_e = 155,46 \text{ mm}$

$\sigma_{j,cr} = 604,00 \text{ MPa}$

5.4.4. Τιμή σχεδιασμού της ενεργού τάσεως σ_{jd}

Ο νέος οπλισμός υπολογίζεται έτσι ώστε σε συνεργασία με τον υφιστάμενο παλιό οπλισμό να αναλαμβάνονται οι εφελκυστικές δυνάμεις που αντιστοιχούν στη συνολική καμπτική ένταση στην περιοχή ενίσχυσης. Προσεγγιστικά, για τον υπολογισμό της απαιτούμενης διατομής του οπλισμού ενίσχυσης (A_j), σε βαθμό προμελέτης, μπορεί να χρησιμοποιηθεί η σχέση:

$$A_j = \frac{\Delta M_{do}}{z \cdot \sigma_{jd}}$$

$$A_j = \frac{\Delta M_{do}}{z \cdot \sigma_{jd}} \Rightarrow \sigma_{jd} = \frac{\Delta M_{do}}{z \cdot A_j}$$

Όπου

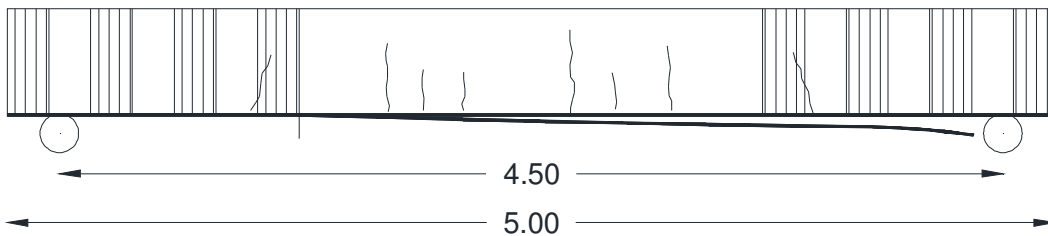
- ΔM_{d0} είναι η πρόσθετη διατομή που καλείται να αναλάβει η ενισχυμένη διατομή (επιπλέον της M_{d0} την οποία μπορεί να αναλάβει η αρχική)
- z , ο μοχλοβραχίονας των εσωτερικών δυνάμεων (ο οποίος μπορεί να ληφθεί ίσος με $0,9d_j$) και
- d_j το στατικό ύψος της διατομής, μετρούμενα από τη στάθμη του εξωτερικού οπλισμού.

Οι τιμές των $\sigma_{j,cr}$ και σ_{jd} μπορεί να εκτιμώνται για κάθε μορφή αστοχίας, με χρήση αξιόπιστων πηγών της διεθνούς βιβλιογραφίας.

$$\left. \begin{array}{l} M(P) = 136,37 \text{ kNm} \\ M(\text{ι.δ.}) = 63,28 \text{ kNm} \end{array} \right\} \Rightarrow \Delta M = 198,87 \text{ kNm}$$

$$z = 0,9 \cdot d_j = 0,9 \cdot (h - d + n_j \cdot t_j) = 42,30 \text{ cm}$$

$$\sigma_{j,i} = 476,87 \text{ MPa}$$



Σχήμα 5.13: Σχηματική απεικόνιση της δοκού μετά το πέρας του 4^ο πειράματος

Η τελευταία πειραματική διαδικασία της δοκού με λωρίδες U έδειξε ότι η αστοχία επήλθε με την αποκόλληση των σύνθετων υλικών. Παρατηρήθηκαν αρκετές καμπτικές ρωγμές στο τμήμα της δοκού μεταξύ των φορτίων.

έκτο κεφάλαιο

αναλυτικός υπολογισμός πλάκας οπλισμένου σκυροδέματος με σύνθετα υλικά

6.1. Γενικά χαρακτηριστικά πλάκας και υλικού ενίσχυσης

Σύμφωνα με την διαδικασία που αναφέρεται αναλυτικά παρακάτω γίνεται υπολογισμός αύξησης καμπτικής αντοχής πλάκας μετά την ενίσχυση με λωρίδες σύνθετου υλικού.

Στοιχεία Πλάκας

Η πλάκα έχει μοναδιαίο πλάτος	b=	1,00 m
Ύψος πλάκας	h=	0,16 m
Εφελκόμενος οπλισμός	Φ8	/17
Ποιότητα σκυροδέματος:		C22

Ποιότητα χάλυβα		S500
Μέτρο Ελαστικότητας χάλυβα	E	200 GPa
Ενεργό ύψος διατομής	d=	0,136 m
Μοχλοβραχίονας εσωτερικών δυνάμεων	z=	0,122 m
Επικάλυψη σκυροδέματος	c=	2,0 cm
Διάμετρος διαμήκους οπλισμού	$\Phi_L=$	8

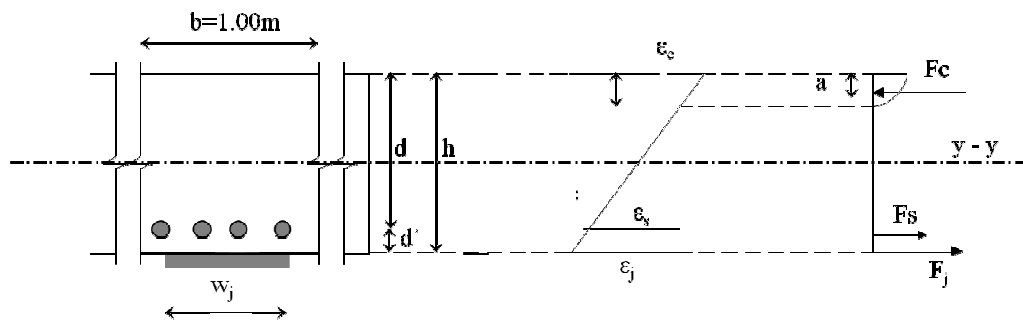
Πίνακας 6.1: Παράθεση στοιχείων πλάκας

Η αναφορά γίνεται σε ένα μέτρο μήκους πλάκας ότι τοποθετείται μία λωρίδα 0,50m.

Χαρακτηριστικά σύνθετου υλικού ενίσχυσης

Μέτρο Ελαστικότητας Σύνθετου Υλικού	$E_j=$	230,0 GPa
Το Σύνθετο Υλικό τοποθετείται σε λωρίδες πλάτους	$w_j=$	0,200 m
Πάχος υφάσματος	$t_j=$	0,165 mm
Συνολικό εμβαδόν υφάσματος	$A_f=$	99mm ²
Χαρακτηριστική αντοχή σύνθετου υλικού	$f_{fu}=$	3500,0 MPa
Οριακή παραμόρφωση αστοχίας Σύνθετου Υλικού	$\epsilon_{fuk}=$	1,5%
Αριθμός υφασμάτων	$n_j=$	3
	$d'=c+0.5\Phi_L=$	2,40cm

Πίνακας 6.2: Παράθεση χαρακτηριστικών σύνθετου υλικού



Σχήμα 6.1: Ανάλυση διατομής υπό μεγέθη ορθής έντασης (M+N) με κυριαρχούσα κάμψη

6.2. Υπολογισμοί

Η επίλυση γίνεται μέσω δοκιμών των παραμορφώσεων σκυροδέματος, οπλισμού και σύνθετου υλικού έως ότου ικανοποιηθεί η ισορροπία των δυνάμεων: $F_c + F_s^{\Theta\Lambda} - F_s^{E\Phi} - F_{j1}^{E\Phi} - N = 0$

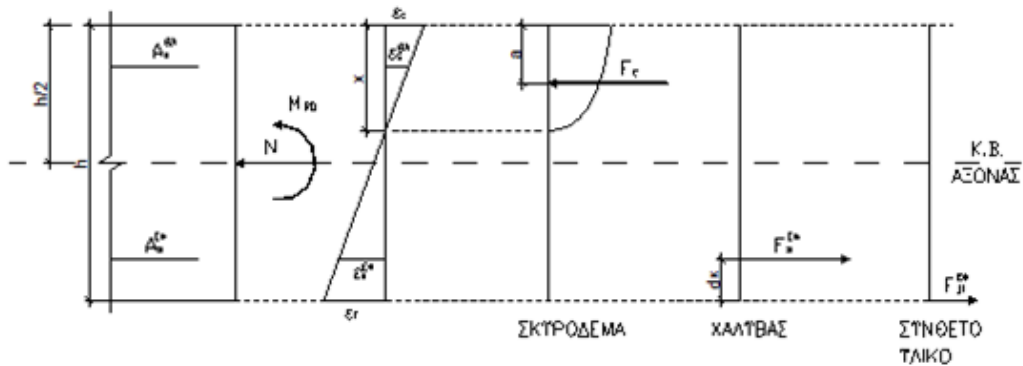
Οι δυνάμεις που αναπτύσσονται δίνονται από τις εξής σχέσεις:

$F_c = \alpha \cdot 0.85 \cdot f_{cd} \cdot x \cdot b$, δύναμη σκυροδέματος εφαρμοζόμενη στο κέντρο βάρους της θλιβόμενης ζώνης.

$F_s = A_s \cdot f_s$, συνολική δύναμη χάλυβα (θλιπτική ή εφελκυστική) εφαρμοζόμενη στις θέσεις των οπλισμών όπου

$$\left\{ \begin{array}{l} f_s = f_{yk}, \text{ όταν } \varepsilon_s > \varepsilon_{sy} \\ f_s = E_s \cdot \varepsilon_s, \text{ όταν } \varepsilon_s < \varepsilon_{sy} \end{array} \right\} \Rightarrow \varepsilon_{sy} = 2,17\text{‰}$$

$F_{j1} = A_j \cdot f_{j1}$, συνολική δύναμη μανδύα της διατομής.



Σχήμα 6.2: Ανάλυση διατομής υπό μεγάλη ορθής έντασης (M+N) με κυριαρχούσα κάμψη λαμβανομένου υπόψη και την επιρροή του σύνθετου υλικού

$$\varepsilon_c = -3,5\text{‰}$$

$$\varepsilon_f = 8,63\text{‰}$$

$$\alpha = \left\{ \begin{array}{l} \frac{\varepsilon_c(6 - \varepsilon_c)}{12}, \varepsilon_c \leq 0,002 \\ \frac{3 \cdot \varepsilon_c - 2}{3 \cdot \varepsilon_c}, \varepsilon_c > 0,002 \end{array} \right\} \Rightarrow \alpha = 0,81$$

$$\zeta' = \left\{ \begin{array}{l} \frac{8 - \varepsilon c}{4 \cdot (6 - \varepsilon c)}, \quad \varepsilon c \leq 0,002 \\ \frac{\varepsilon c(3 \cdot \varepsilon c - 4) + 2}{2 \cdot \varepsilon c(3 \cdot \varepsilon c - 2)}, \quad \varepsilon c > 0,002 \end{array} \right\} \Rightarrow \zeta' = 0,416$$

$$x = \xi \cdot d = \frac{\varepsilon c}{(\varepsilon c + \varepsilon s1)} \cdot d \Rightarrow x = 4,62 \text{ cm}$$

$$a = \zeta' \cdot x \Rightarrow a = 0,0192 \text{ m}$$

$$\varepsilon_s = 6,81\% \Rightarrow f_s = 434,78$$

$$F_c = \alpha \cdot 0,85 \cdot f_{cd} \cdot x \cdot b \Rightarrow F_c = 465,95 \text{ kN} \quad (\text{Σκυρόδεμα})$$

$$F_s = A_s \cdot f_s \quad \eta$$

$$F_s^{E\Phi} = 128,60 \text{ kN} \quad (\text{Εφελκόμενος χάλυβας})$$

$$F_{j1}^{E\Phi} = 337,4 \text{ kN} \quad (\text{Εφελκόμενο Σύνθετο Υλικό})$$

$$\text{Πρέπει } F_c + F_s^{\Theta\Lambda} - F_s^{E\Phi} - F_{j1}^{E\Phi} - N = 0$$

Ροπή Αντοχής:

Υπολογίζεται η ροπή αντοχής της ενισχυμένης διατομής ως προς τον κεντροβαρικό άξονα:

$$M_{RD} = F_c(0.5h-a) + F_{j1}^{E\Phi}0.5h + F_s^{E\Phi}(0.5h-d_k) + F_s^{\Theta\Lambda}(0.5h-d_\alpha)$$

$$M_{RD} = 62,52 \text{ KNm}$$

6.3. Υπολογισμός της ροπής αντοχής της διατομής με βάση τους πίνακες CEB, χωρίς το μανδύα σύνθετου υλικού

Χωρίς το μανδύα σύνθετου υλικού η ροπή αντοχής της διατομής υπολογίζεται με βάση τους πίνακες CEB:

$$\omega = A_s / A_c \cdot (f_{yd} / f_{cd}) = 0,06445$$

$$\acute{\alpha}\rho\alpha \quad \mu_{Rd}=0,084$$

$$M_{Rd}=\mu_{Rd} \cdot b \cdot d^2 \cdot f_{cd}=22,79\text{kNm}$$

Έχουμε αύξηση της ροπής αντοχής κατά **174,36%**

6.4. Υπολογισμός της ροπής αντοχής της διατομής με βάση τον ΚΑΝ.ΕΠΕ.

6.4.1. Αστοχία του ιδίου του υλικού ενίσχυσης, οπότε,

$$\sigma_{j,\text{crit}} = f_{jk} \text{ και}$$

$$\sigma_{jd} = \frac{1}{\gamma_m} \cdot f_{jk}$$

όπου

f_{jk} είναι η χαρακτηριστική τιμή αντοχής του υλικού ενίσχυσης και

γ_m είναι ο επί μέρους συντελεστής ασφαλείας για το υλικό ενίσχυσης

Η παραμόρφωση αστοχίας του σύνθετου υλικού είναι ίση με $\epsilon_{fr,\mu}=1,5\%$

Επομένως η τιμή σχεδιασμού της ενεργού τάσης του νέου οπλισμού είναι ίση με: $\sigma_{jd}=f_{jk}/\gamma_m=2916,67\text{MPa}$

* λόγω του ότι η ανάλυση γίνεται βάση πειραματικών δεδομένων δεν θα χρησιμοποιηθούν συντελεστές ασφαλείας

6.4.2. Πρόωρη αποκόλληση του υλικού ενίσχυσης λόγω ανεπάρκειας της σύνδεσης κατά μήκος του στοιχείου ή της αγκύρωσης των άκρων του, οπότε,

$$\sigma_{jd} = \sigma_{j,\text{crit}} : \gamma_{Rd}$$

όπου,

γ_{Rd} είναι κατάλληλος συντελεστής ασφαλείας, ο οποίος καλύπτει τις αβεβαιότητες του προσομοιώματος

$\sigma_{j,crit}$ είναι η τάση του υλικού η οποία οδηγεί σε αποκόλληση

Γι' αυτήν τη μορφή αστοχίας, μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι παρακάτω προσεγγιστικές σχέσεις:

$$\sigma_{j,crit} \cong \beta \frac{\tau_b^{αποκ.}}{t_j} L_e$$

Όπου

$\beta = \beta_w \cdot \beta_L$, διορθωτικός συντελεστής

$$\tau_b^{αποκ.} \cong f_{cm}$$

L_e το ενεργό μήκος αγκύρωσης (δηλ. το μήκος πέραν του οποίου η αναλαμβανόμενη απ' το υλικό ενίσχυσης δύναμη, δεν αυξάνεται άλλο), που υπολογίζεται από τη σχέση θεωρώντας ότι το άνοιγμα της κρίσιμης ρωγμής ισούται με 0,5mm, και λαμβάνεται ίσο με:

$$L_e = \sqrt{\frac{E_j \cdot t_j}{2 \cdot f_{cm}}} (MPa, mm)$$

t_j, E_j είναι το πάχος και το μέτρο ελαστικότητας του υλικού ενίσχυσης αντίστοιχα. Στην περίπτωση που χρησιμοποιούνται k επάλληλες στρώσεις υλικού ενίσχυσης πάχους t_{j1} λαμβάνεται $t_j = \psi \cdot k \cdot t_{j1}$, όπου ψ ο μειωτικός συντελεστής πολλών στρώσεων.

$$\beta_w = \sqrt{\frac{2 - b_j / b_w}{1 + b_j / b_w}}, \text{ συντελεστής επιρροής πλάτος οπλισμού ενίσχυσης}$$

b_j το πλάτος του υλικού ενίσχυσης

b_w το πλάτος του εφελκόμενου πέλματος του δομικού στοιχείου επί του οποίου επικολλάται το υλικό ενίσχυσης

$$\beta_L = \sin\left(\frac{\pi\lambda}{2}\right) \cong \lambda \cdot (2 - \lambda) \text{ συντελεστής επιρροής του διατιθέμενου μήκους}$$

αγκύρωσης, όπου $\lambda = \frac{L_{av}}{L_e} < 1,0$ και L_{av} το διατιθέμενο μήκος αγκύρωσης του οπλισμού ενίσχυσης

$\beta_L = 1,0$ όταν $\lambda > 1,0$.

Αυτή η μορφή αστοχίας συμβαίνει συνήθως με τη μορφή απόσχισης της επικάλυψης του διαμήκους οπλισμού του στοιχείου στην περιοχή όπου απολήγει ο οπλισμός ενίσχυσης.

Επομένως:

$$L_e=94,27\text{mm}$$

$$\beta_w=1$$

$$\beta_L=1$$

$$\sigma_{j,cr}=1219,93\text{MPa}$$

6.4.3. Τιμή σχεδιασμού της ενεργού τάσεως σ_{jd}

Ο νέος οπλισμός υπολογίζεται έτσι ώστε σε συνεργασία με τον υφιστάμενο παλαιό οπλισμό να αναλαμβάνονται οι εφελκυστικές δυνάμεις που αντιστοιχούν στη συνολική καμπτική ένταση στην περιοχή ενίσχυσης. Προσεγγιστικά, για τον υπολογισμό της απαιτούμενης διατομής του οπλισμού ενίσχυσης (A_j), σε βαθμό προμελέτης, μπορεί να χρησιμοποιηθεί η σχέση:

$$A_j = \frac{\Delta M_{do}}{z \cdot \sigma_{jd}}$$

$$A_j = \frac{\Delta M_{do}}{z \cdot \sigma_{jd}} \Rightarrow \sigma_{jd} = \frac{\Delta M_{do}}{z \cdot A_j}$$

Όπου

ΔM_{do} είναι η πρόσθετη διατομή που καλείται να αναλάβει η ενισχυμένη διατομή (επιπλέον της M_{do} την οποία μπορεί να αναλάβει η αρχική)

z , ο μοχλοβραχίονας των εσωτερικών δυνάμεων (ο οποίος μπορεί να ληφθεί ίσος με $0,9d_j$) και

d_j το στατικό ύψος της διατομής, μετρούμενα από τη στάθμη του εξωτερικού οπλισμού.

Οι τιμές των $\sigma_{j,cr}$ και σ_{jd} μπορεί να εκτιμώνται για κάθε μορφή αστοχίας, με χρήση αξιόπιστων πηγών της διεθνούς βιβλιογραφίας.

$$z=0,9 \cdot d_j=0,9 \cdot (h-d+n_j \cdot t_j)= 42,30\text{cm}$$

Η διατομή του οπλισμού ενίσχυσης σε βαθμό προμελέτης είναι ίση με:

$$A_j = n \cdot t_f \cdot b_f = 170 \text{mm}^2$$

Η πρόσθετη ροπή που καλείται να αναλάβει η ενισχυμένη διατομή είναι ίση με:

$$\Delta M_o = 21,15 \text{kNm}$$

Επομένως: $\sigma_{jt} = 533,55 \text{MPa}$

Άρα η συνολική ροπή που μπορεί να αναλάβει η πλάκα μετά την ενίσχυση είναι ίση με: $M_{Rd} = 43,94 \text{kNm}$

Ως αποτέλεσμα έχουμε αύξηση της ροπής αντοχής κατά **92,83%**

έβδομο κεφάλαιο

πειράματα εξόλκευσης

7.1. Γενικά

Για να αποκτήσουμε τη ακριβή τιμή της τάσης αποκόλλησης για τα πειράματα τα οποία έγιναν αποφασίστηκε να πραγματοποιηθούν στο εργαστήριο Αντισεισμικής Τεχνολογίας τα πειράματα εξόλκευσης ή διαφορετικά να γίνουν τα pull out test. Για τη σωστή διεξαγωγή αυτών των πειραμάτων χρησιμοποιήθηκε κατάλληλο και εξειδικευμένο μηχάνημα και τηρήθηκαν πλήρως όλα όσα υπαγόρευε σχετικός κανονισμός Guide Test Methods for Fiber-Reinforced Polymers (FRPs) for Reinforcing or Strengthening Concrete Structures (ACI 440.3R-04), οποίος αναφέρεται παρακάτω.

7.2. *Guide Test Methods for Fiber-Reinforced Polymers (FRPs) for Reinforcing or Strengthening Concrete Structures (ACI 440.3R-04)*

PART 3—TEST METHODS FOR FRP LAMINATES FOR CONCRETE AND MASONRY

L.1—Test method for direct tension pull-off test

1. Αντικείμενο

1.1. Η συγκεκριμένη πειραματική διαδικασία καθορίζει τις απαιτήσεις προετοιμασίας και της δοκιμής σε εφελκυσμό της συγκόλλησης ενός ελάσματος ινοπλισμένων πολυμερών στην επιφάνεια ενός μέλους σκυροδέματος ή καθορίζει την εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος ή και τα δύο

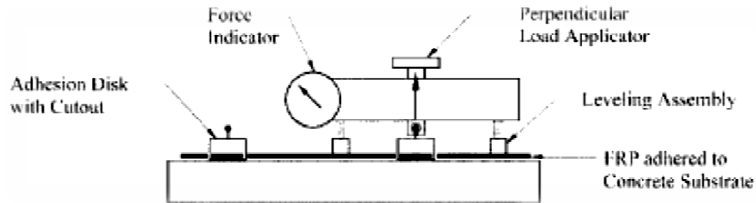
2. Σχετικές αναφορές

2.1. *ASTM standards—D 4541 Standard Test Method for Pull-Off Strength of Coatings Using Portable Adhesion Tester*

3. Σκοπός και χρήση

3.1. Η δοκιμή pull off εκτελείται με την επικόλληση ενός τετραγωνικού (25 επί 40 mm) ή κυκλικού μεταλλικού ελάσματος στην επιφάνεια του σύνθετου υλικού ή του σκυροδέματος χρησιμοποιώντας το εκάστοτε μέσον συγκόλλησης. Αφού το μέσον συγκόλλησης (ρητίνη) σκληρυνθεί η συσκευή τοποθετείται στο μέσον μεταφοράς του φορτίου και ευθυγραμμίζεται ώστε να ασκεί εφελκυστική δύναμη κάθετη στην επιφάνεια του δοκιμίου Ο/Σ. Το δοκίμιο φορτίζεται μέχρις ότου το επικολλημένο εξάρτημα αποκολληθεί από την επιφάνεια του δοκιμίου. Η αντοχή αποκόλλησης υπολογίζεται βάσει της μέγιστης μετρούμενης δύναμης, των δεδομένων βαθμονόμησης του οργάνου και της αρχικής επιφάνειας στην οποία εφαρμόστηκε η εφελκυστική δύναμη αποκόλλησης. Η αποκόλληση της επικολλημένης μεταλλικής πλάκας

από την επιφάνεια του ΙΟΠ είναι ένδειξη κακής προετοιμασίας της επιφάνειας ή χαμηλής ποιότητας ρητίνη. Αυτός ο τρόπος αστοχίας δίνει αποτελέσματα αβάσιμα.



Σχήμα 7.1: Αναπαράσταση της φορητής συσκευής ελέγχου της συγκόλλησης

- 3.2. Αυτή η πειραματική μέθοδος προτείνεται για χρήση εντός και εκτός εργαστηρίου. Εξαιτίας της ολοένα αυξανόμενης χρήσης επικολλητών ελασμάτων ΙΟΠ ως εξωτερικός οπλισμός ενίσχυσης σε μέλη οπλισμένου σκυροδέματος, υπάρχει η ανάγκη εκτίμησης μέσω εφελκισμού της συμπεριφοράς τους σε παρόμοιου τύπου δράσεις.
- 3.3. Οι βασικές ιδιότητες των υλικών που λαμβάνονται από την συγκεκριμένη δοκιμή μπορούν να χρησιμοποιηθούν στον έλεγχο της ποιότητας των ρητινών και στις αναλυτικές σχέσεις σχεδιασμού ενίσχυσης κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος με σύνθετα υλικά.

4. Ορολογία

- 4.1. Δεν εισάγεται καμία νέα ορολογία

5. Εφόδια για την πραγματοποίηση της δοκιμής

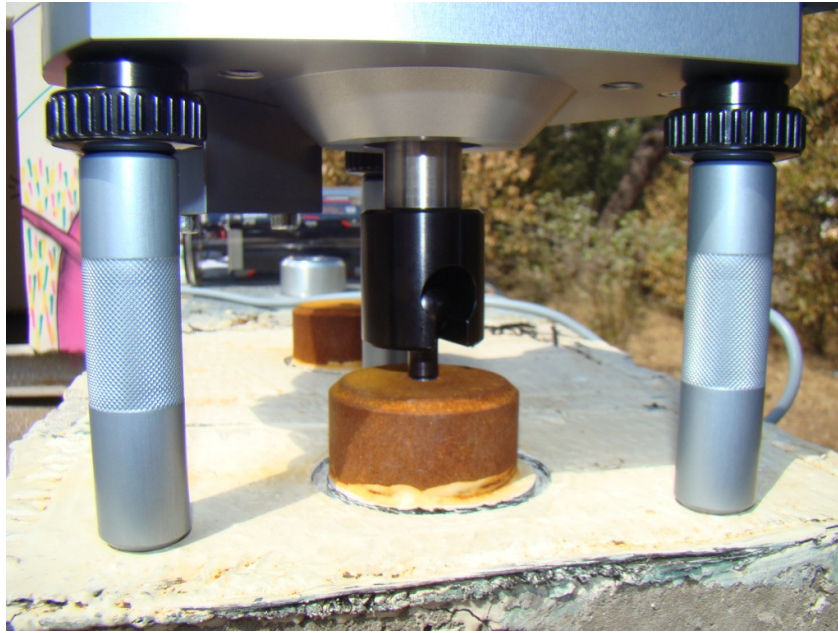
- 5.1. Η φορητή συσκευή για την πραγματοποίηση της δοκιμής πρέπει να συμμορφώνεται με το ASTM D 4541.
- 5.1.1. Χρήση ενός τετραγωνικού μεταλλικού ελάσματος 25 επί 40 ή κυκλικού. Και τα δύο είναι αποδεκτά.

- 5.1.2. Χρήση χειροκίνητης ή μηχανοποιημένης διάταξης για την εφαρμογή ομοιόμορφης ταχύτητας.
- 5.1.3. Ύπαρξη μεθόδου καταγραφής της μέγιστης δύναμης που εφαρμόζεται.
- 5.1.4. Να είναι ρυθμισμένη η συσκευή ώστε να ασκεί δύναμη κάθετα στο δοκίμιο και να εφαρμόζει εφελκυστική δύναμη χωρίς ροπή.
- 5.2. Η φορητή μηχανή δοκιμής της συγκόλλησης με ρητίνη ρητίνης (Σχήμα. 1.1) απεικονίζει τα απαραίτητα στοιχεία για το πείραμα.
- 5.2.1. *Επικόλληση εξαρτήματος:* Το επικολλημένο εξάρτημα για την πραγματοποίηση της δοκιμής πρέπει να έχει επίπεδη επιφάνεια από την μια τουλάχιστον πλευρά και από την άλλη να έχει μια ακίδα ή αλλιώς μια



Εικόνα 7.1: Τοποθέτηση μεταλλικού εξαρτήματος για τη δοκιμή εξόλκευσης

- 5.2.2. *Συναρμολόγηση διάταξης* —Η μηχανή ελέγχου θα πρέπει να τοποθετείται σε μια συναρμολογούμενη “στήριξη” η οποία τοποθετείται κεντρικά στο τοποθετημένο από πριν μεταλλικό εξάρτημα



Εικόνα 7.2: Τοποθέτηση της βάσης της μηχανής εξόλκευσης

- 5.2.3.** *Τοποθέτηση βάσης* – Η βάση πρέπει να τοποθετηθεί ακλόνητα και κάθετα στην επιφάνεια του δοκιμίου.
- 5.2.4.** *Συσκευή φόρτισης:* Το χειροκίνητο ή μηχανοποιημένο έμβολο για την άσκηση δύναμης στο επικολλημένο μεταλλικό έλασμα πρέπει να εφαρμόζει με ομοιόμορφη ταχύτητα δύναμη μέχρι να συμβεί η αποκόλληση, έτσι ώστε η μέγιστη τάση να αναπτυχθεί σε λιγότερο από 100 s.



Εικόνα 7.3: Διάταξη μηχανήματος και εξαρτημάτων δοκιμής εξόλκευσης

- 5.2.5. *Ένδειξη δύναμης:* Ο δείκτης δύναμης πρέπει να έχει πληροφορίες βαθμονόμησης και μέγιστη κλίμακα ένδειξης δύναμης μεγαλύτερη από 4450 N.
- 5.2.6. *Μέσον συγκόλλησης:* Ένα υλικό συγκόλλησης με εφελκυστική αντοχή μεγαλύτερη από than 5.5 MPa πρέπει να χρησιμοποιηθεί. Η ρητίνη πρέπει να εφαρμοστεί σύμφωνα με τις οδηγίες του κατασκευαστή.

6. Προετοιμασία δοκιμίου

- 6.1. Η εφαρμογή ΙΟΠ στην επιφάνεια του σκυροδέματος γίνεται σύμφωνα με την διαδικασία που προτείνει ο κατασκευαστής. Οι οδηγίες αυτές θα πρέπει να ακολουθηθούν καθώς και ο χρόνος που θα περάσει από την εφαρμογή των σύνθετων υλικών στην επιφάνεια του σκυροδέματος και της δοκιμής.

7. *Συνθήκες*

- 7.1. Η αποθήκευση καθώς και η δοκιμή πρέπει να πραγματοποιηθούν σε κανονικές ατμοσφαιρικές συνθήκες με θερμοκρασία 23 ± 3 °C και $50 \pm 10\%$ σχετική υγρασία, εκτός εάν διαφορετικές συνθήκες (όπως θερμοκρασία ή αλκαλικό) καθορίζονται σαν μέρος της πειραματικής διαδικασίας.

8. *Μέθοδος δοκιμής*

- 8.1. Επιλογή μιας επίπεδης θέσης σε συμφωνία με το πειραματικό πρόγραμμα.
- 8.2. Προετοιμασία της επιφάνειας ΙΟΠ για την τοποθέτηση του εξαρτήματος για την πραγματοποίηση της δοκιμής. Η επιφάνεια του σύνθετου υλικού πρέπει να έχει καθαριστεί με διαλυτικό μέσον, να έχει εκτραχυνθεί με μεσαίας σκληρότητας υαλόχαρτο, στην συνέχεια πρέπει να ξεπλυθεί με διαλυτικό υγρό και να μείνει για να στεγνώσει.
- 8.3. Αφαίρεση ενός περιμετρικού τμήματος ΙΟΠ έως την επιφάνεια του σκυροδέματος, ανάλογα με το μέγεθος και το σχήμα του μεταλλικού εξαρτήματος που θα επικολληθεί στην επιφάνεια του σύνθετου υλικού, με χρήση τροχού, ακίδας διαμαντιού ή καρβιδίου. Η κοπή σταματάει σε βάθος 6 to 12 mm εντός της επικάλυψης σκυροδέματος.



Εικόνα 7.4: Απεικόνιση της αφαίρεσης του περιμετρικού τμήματος ΙΟΠ

- 8.4. Προσαρμογή του μεταλλικού εξαρτήματος με χρήση του συγκολλητικού μέσου (ρητίνη). Συντήρηση σύμφωνα με τις οδηγίες που παρέχει ο προμηθευτής της ρητίνης.
- 8.5. Τοποθέτηση της φορητής μηχανής δοκιμής πάνω στο μεταλλικό εξάρτημα Ευθυγράμμιση της διάταξης επιβολής του φορτίου κάθετα στο δοκίμιο. Ρύθμιση των “ποδιών” της μηχανής μέτρησης όπως απαιτείται.
- 8.6. Εγκατάσταση ώστε να αφαιρεθεί τυχόν ατελής τοποθέτηση ή χαλαρότητα του οργάνου με βίδωμα του εμβόλου.
- 8.7. Καθορίζεται η ένδειξη της δύναμη να ξεκινάει από το μηδέν.
- 8.8. Εφαρμογή χειροκίνητης ή μηχανοκίνητης φόρτισης ώστε να εφαρμόζεται συνεχόμενη κατακόρυφη κίνηση της κεφαλής του εξαρτήματος με ρυθμό μικρότερο του 1 MPa/s μέχρι να συμβεί η αποκόλληση. Το μέγιστο φορτίο πρέπει να αναπτυχθεί σε λιγότερο από 100 s. Στην συνέχεια γίνεται και μέτρηση της δύναμης αποκόλλησης (pull-off).

9. Υπολογισμοί

9.1. Υπολογισμός και καταγραφή της αντοχής του δεσμού σε αποκόλληση ή την αντοχή του σκυροδέματος, οποιαδήποτε εφαρμόστηκε. (1)

όπου:

σ_p = η τάση αποκόλλησης (MPa)

F_p = η δύναμη αποκόλλησης (N) και

A_a = η επιφάνεια επικόλλησης του εξαρτήματος (mm²).

9.2. Ερμηνεία των αποτελεσμάτων

9.2.1. Η συγκόλληση των ΙΟΠ στην επιφάνεια του σκυροδέματος είναι απαραίτητη για τα μέλη Ο/Σ ώστε να μεταφέρονται δυνάμεις στο σύνθετο υλικό. Καθοριστικής σημασίας για να επιτευχθεί αυτή η μεταφορά είναι το υλικό που συνδέει τις δύο επιφάνειες καθώς και η αντοχή του σκυροδέματος. Πιθανοί τρόποι αστοχίας σε αυτή τη δοκιμή εφελκυσμού είναι:

9.2.2. Αστοχία συγκόλλησης στην διεπιφάνεια σύνθετου υλικού και σκυροδέματος.

9.2.3. Αστοχία εντός των στρώσεων του σύνθετου υλικού.

9.2.4. Αστοχία του σκυροδέματος.

9.2.5. Συνδυασμός των παραπάνω

9.2.6. Η αστοχία της ρητίνης δεν είναι αποδεκτός μηχανισμός αστοχίας.

10. Έκθεση

Η έκθεση της πειραματικής διαδικασίας πρέπει να περιλαμβάνει τα ακόλουθα:

10.1. Το καταχωρημένο εμπορικό όνομα, το μέγεθος, την ημερομηνία παραγωγής και αν είναι διαθέσιμος ο αριθμός των προϊόντων που έχουν δοκιμαστεί.

- 10.2. Ο τύπος των ινών και το υλικό για το πλέξιμο των ινών όπως αυτά περιγράφονται από τον κατασκευαστή. Επίσης ο όγκος των ινών.
- 10.3. Περιγραφή του συστήματος ενίσχυσης ΙΟΠ.
- 10.4. Μονάδες μέτρησης που παρέχει η συσκευή με τη οποία γίνεται η δοκιμή.
- 10.5. Ταυτοποίηση της συσκευής δοκιμής.
- 10.6. Αναγνώριση κάθε δείγματος και η θέση του.
- 10.7. Η τάση αστοχίας κάθε δείγματος καθώς και ο τρόπος αστοχίας.
- 10.8. Ο μέσος όρος των τάσεων κατά την αστοχία των δειγμάτων.
- 10.9. Η θερμοκρασία πραγματοποίησης της δοκιμής, η σχετική υγρασία του περιβάλλοντος. Η ημερομηνία κατά την οποία έγιναν τα πειράματα και ο χειριστής της συσκευής πραγματοποίησης του πειράματος pull-off.

7.3. *Αποτελέσματα Πειραμάτων*

7.3.1. *Γενικά*

Πραγματοποιήθηκαν δύο κατηγορίες πειραμάτων εξόλκευσης:

- a. Τέσσερις δοκιμές εξόλκευσης (δύο για το κάθε είδος ρητίνης που εφαρμόστηκε) στα δοκάρια τα οποία χρησιμοποιήθηκαν στα πειράματα
- b. Κατασκευάστηκαν έξι κυβικά δοκίμια (τρία είχαν ρητίνη IPN και τρία είχαν εποξειδική ρητίνη) και για το κάθε κυβικό δοκίμιο διεξήχθησαν τρεις δοκιμές

7.3.2. *Αποτελέσματα πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν στα δοκάρια*

Από τα πειράματα του pull out test, που πραγματοποιήθηκαν για τα κυβικά δοκίμια, ελήφθησαν για τα δύο είδη ρητίνης που χρησιμοποιήθηκαν τα εξής αποτελέσματα για την τάση αποκόλλησης:

Ρητίνη IPN: 1^η δοκιμή: 0,52 MPa

2^η δοκιμή: 0,50 MPa

Ο μέσος όρος των τάσεων αποκόλλησης: **0,51 MPa**

Εποξειδική ρητίνη: 1^η δοκιμή: 1,80 MPa

2^η δοκιμή: 1,12 MPa

Ο μέσος όρος των τάσεων αποκόλλησης: **1,46 MPa**

7.3.3. Αποτελέσματα πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν στα κυβικά δοκίμια



Εικόνα 7.5: Απεικόνιση των πέντε κυβικών δοκιμίων που χρησιμοποιήθηκαν για τα πειράματα της εξόλκευσης

Από τα πειράματα του pull out test, που πραγματοποιήθηκαν για τα κυβικά δοκίμια, ελήφθησαν για τα δύο είδη ρητίνης που χρησιμοποιήθηκαν τα εξής αποτελέσματα για την τάση αποκόλλησης:

Ρητίνη IPN:

a. Πρώτο κυβικό δοκίμιο

1 ^η δοκιμή: 2,97MPa	}	⇒ μέσος όρος 2,67MPa
2 ^η δοκιμή: 2,66MPa		
3 ^η δοκιμή: 2,37MPa		



Εικόνα 7.6: Απεικόνιση του αποτελέσματος των δοκιμών από το πρώτο κυβικό δοκίμιο

Στην πρώτη δοκιμή σημειώθηκε αποκόλληση του σκυροδέματος ενώ στη δεύτερη και την τρίτη σημειώθηκε αποκόλληση της 1^{ης} στρώσης FRP.

b. Δεύτερο κυβικό δοκίμιο

$$\left. \begin{array}{l} 1^{\text{η}} \text{ δοκιμή: } 2,21\text{MPa} \\ 2^{\text{η}} \text{ δοκιμή: } 2,98\text{MPa} \\ 3^{\text{η}} \text{ δοκιμή: } 2,60\text{MPa} \end{array} \right\} \Rightarrow \text{μέσος όρος } 2,60\text{MPa}$$



Εικόνα 7.7: Απεικόνιση του αποτελέσματος των δοκιμών από το δεύτερο κυβικό δοκίμιο

Στην πρώτη δοκιμή σημειώθηκε αποκόλληση του σκυροδέματος ενώ στη δεύτερη και την τρίτη σημειώθηκε αποκόλληση της 1^{ης} στρώσης FRP.

c. Τρίτο κυβικό δοκίμιο

$$\left. \begin{array}{l} 1^{\text{η}} \text{ δοκιμή: } 2,38\text{MPa} \\ 2^{\text{η}} \text{ δοκιμή: } 2,60\text{MPa} \\ 3^{\text{η}} \text{ δοκιμή: } 2,03\text{MPa} \end{array} \right\} \Rightarrow \text{μέσος όρος } 2,34\text{MPa}$$



Εικόνα 7.8: Απεικόνιση του αποτελέσματος των δοκιμών από το τρίτο κυβικό δοκίμιο

Στις δύο πρώτες δοκιμές σημειώθηκε αποκόλληση της 1^{ης} στρώσης FRP, ενώ στη τρίτη δοκιμή παρατηρήθηκε αποκόλληση του σκυροδέματος.

Ο μέσος όρος των τάσεων αποκόλλησης για τα δοκάρια: **2,54 MPa**

Εποξειδική ρητίνη RCO:

a. Τέταρτο κυβικό δοκίμιο

$$\left. \begin{array}{l} 1^{\text{η}} \text{ δοκιμή: } 1,77\text{MPa} \\ 2^{\text{η}} \text{ δοκιμή: } 3,56\text{MPa} \\ 3^{\text{η}} \text{ δοκιμή: } 1,40\text{MPa} \end{array} \right\} \Rightarrow \text{μέσος όρος } 2,24\text{MPa}$$



Εικόνα 7.9: Απεικόνιση του αποτελέσματος των δοκιμών από το τέταρτο κυβικό δοκίμιο

Στην πρώτη και την τρίτη δοκιμή σημειώθηκε αποκόλληση του σκυροδέματος ενώ στη δεύτερη σημειώθηκε αποκόλληση του μεταλλικού εξαρτήματος χωρίς να παρασφύρει ούτε κάποια στρώση FRP ούτε επιφάνεια σκυροδέματος.

b. Πέμπτο κυβικό δοκίμιο

$$\left. \begin{array}{l} 1^{\text{η}} \text{ δοκιμή: } 4,05 \text{MPa} \\ 2^{\text{η}} \text{ δοκιμή: } 1,11 \text{MPa} \\ 3^{\text{η}} \text{ δοκιμή: } 1,47 \text{MPa} \end{array} \right\} \Rightarrow \text{μέσος όρος } 2,21 \text{MPa}$$



Εικόνα 7.10: Απεικόνιση του αποτελέσματος των δοκιμών από το πέμπτο κυβικό δοκίμιο

Σε όλες τις δοκιμές του συγκεκριμένου δοκιμίου σημειώθηκε αποκόλληση του σκυροδέματος.

c. Έκτο κυβικό δοκίμιο

$$\begin{array}{l} 1^{\text{η}} \text{ δοκιμή: } 2,81 \text{MPa} \\ 2^{\text{η}} \text{ δοκιμή: } 0,75 \text{MPa} \\ 3^{\text{η}} \text{ δοκιμή: } 0,67 \text{MPa} \end{array}$$

Σε όλες τις δοκιμές του συγκεκριμένου δοκιμίου σημειώθηκε αποκόλληση του σκυροδέματος. Παρατηρείται όμως ότι από την πρώτη δοκιμή προέκυψε πολύ μεγαλύτερη τάση απ' ό τι στις υπόλοιπες και ενδεχομένως η μικρή τάση στις άλλες δύο δοκιμές να οφείλεται στη χαμηλή ποιότητα του σκυροδέματος, για αυτό δε τις λάβουμε υπόψη στο συνολικό μέσο όρο των τάσεων.

Ο μέσος όρος των τάσεων αποκόλλησης για τα κυβικά δοκίμια: **2,31 MPa**

Αξίζει να σημειωθεί ότι στη πρώτη σειρά πειραμάτων, όπου τα δοκάρια ήταν εκτεθειμένα για αρκετό χρονικό διάστημα στις καιρικές συνθήκες, η τάση αποκόλλησης της ρητίνης IPN ήταν πολύ μικρότερη από την τάση αποκόλλησης της εποξειδικής ρητίνης RCO, ενώ στη δεύτερη σειρά πειραμάτων, η οποία πραγματοποιήθηκε στα κυβικά δοκίμια, τα πράγματα αντιστρέφονται, δηλαδή η τάση αποκόλλησης της ρητίνης IPN είναι μεγαλύτερη από την τάση αποκόλλησης της εποξειδικής ρητίνης RCO.

7.4. Συγκριτικός Πίνακας Αποτελεσμάτων των Πειραμάτων Εξόλκευσης και του ΚΑΝ.ΕΠΕ.

Παρακάτω παρατίθενται τα συγκριτικά αποτελέσματα που προέκυψαν από την όλη διαδικασία με βάση την τιμή της τάσης αποκόλλησης που προτείνει ο ΚΑΝ.ΕΠΕ. και με την τιμή της τάσης αποκόλλησης που προέκυψε από τα πειράματα.

ι. Σύγκριση με τα αποτελέσματα από τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν στα δοκάρια

1^ο πείραμα:

ΚΑΝ.ΕΠΕ.	pull out test
$\tau_b^{αποκ.} \cong f_{ctm} = 2,4MPa$	$\tau_b^{αποκ.} = 0,51MPa$
$L_e = \sqrt{\frac{E_j \cdot t_j}{2 \cdot f_{ctm}}} = 155,46mm < L_{av} = 1750mm$	$L_e = \sqrt{\frac{E_j \cdot t_j}{2 \cdot f_{ctm}}} = 334,09mm < L_{av} = 1750mm$
$\beta_w = \sqrt{\frac{2 - b_j / b_w}{1 + b_j / b_w}} = 0,816$	$\beta_w = \sqrt{\frac{2 - b_j / b_w}{1 + b_j / b_w}} = 0,816$
$\beta_L = \sin\left(\frac{\pi\lambda}{2}\right) \cong \lambda \cdot (2 - \lambda) = 1$	$\beta_L = \sin\left(\frac{\pi\lambda}{2}\right) \cong \lambda \cdot (2 - \lambda) = 1$
$\sigma_{j, crit} \cong \beta \frac{\tau_b^{αποκ.}}{t_j} L_e = 604,00MPa$	$\sigma_{j, crit} \cong \beta \frac{\tau_b^{αποκ.}}{t_j} L_e = 281,05MPa$
$\sigma_{jd} = \frac{\Delta M_{do}}{z \cdot A_j} = 326,66MPa$	$\sigma_{jd} = \frac{\Delta M_{do}}{z \cdot A_j} = 326,66MPa$

Πίνακας 7.1: Συγκριτικός πίνακας παράθεσης αποτελεσμάτων βάση της τάσης αποκόλλησης του ΚΑΝ.ΕΠΕ. και του pull out test για το 1^ο πείραμα, από το πείραμα στα δοκάρια

2^ο πείραμα:

ΚΑΝ.ΕΠΕ.	pull out test
$\tau_b^{αποκ.} \cong f_{ctm} = 2,4MPa$	$\tau_b^{αποκ.} = 1,46MPa$
$L_e = \sqrt{\frac{E_j \cdot t_j}{2 \cdot f_{ctm}}} = 155,46mm < L_{av} = 1750mm$	$L_e = \sqrt{\frac{E_j \cdot t_j}{2 \cdot f_{ctm}}} = 197,46mm < L_{av} = 1750mm$
$\beta_w = \sqrt{\frac{2 - b_j / b_w}{1 + b_j / b_w}} = 0,816$	$\beta_w = \sqrt{\frac{2 - b_j / b_w}{1 + b_j / b_w}} = 0,816$
$\beta_L = \sin\left(\frac{\pi\lambda}{2}\right) \cong \lambda \cdot (2 - \lambda) = 1$	$\beta_L = \sin\left(\frac{\pi\lambda}{2}\right) \cong \lambda \cdot (2 - \lambda) = 1$

$\sigma_{j, crit} \cong \beta \frac{\tau_b^{αποκ.}}{t_j} L_e = 604,00MPa$	$\sigma_{j, crit} \cong \beta \frac{\tau_b^{αποκ.}}{t_j} L_e = 475,53MPa$
$\sigma_{jd} = \frac{\Delta M_{do}}{z \cdot A_j} = 474,26MPa$	$\sigma_{jd} = \frac{\Delta M_{do}}{z \cdot A_j} = 474,26MPa$

Πίνακας 7.2: Συγκριτικός πίνακας παράθεσης αποτελεσμάτων βάση της τάσης αποκόλλησης του ΚΑΝ.ΕΠΕ. και του pull out test για το 2^ο πείραμα, από το πείραμα στα δοκάρια

3^ο πείραμα:

ΚΑΝ.ΕΠΕ.	pull out test
$\tau_b^{αποκ.} \cong f_{ctm} = 2,4MPa$	$\tau_b^{αποκ.} = 1,46MPa$
$L_e = \sqrt{\frac{E_j \cdot t_j}{2 \cdot f_{ctm}}} = 155,46mm < L_{av} = 1750mm$	$L_e = \sqrt{\frac{E_j \cdot t_j}{2 \cdot f_{ctm}}} = 197,46mm < L_{av} = 1750mm$
$\beta_w = \sqrt{\frac{2 - b_j / b_w}{1 + b_j / b_w}} = 0,816$	$\beta_w = \sqrt{\frac{2 - b_j / b_w}{1 + b_j / b_w}} = 0,816$
$\beta_L = \sin\left(\frac{\pi\lambda}{2}\right) \cong \lambda \cdot (2 - \lambda) = 1$	$\beta_L = \sin\left(\frac{\pi\lambda}{2}\right) \cong \lambda \cdot (2 - \lambda) = 1$
$\sigma_{j, crit} \cong \beta \frac{\tau_b^{αποκ.}}{t_j} L_e = 604,00MPa$	$\sigma_{j, crit} \cong \beta \frac{\tau_b^{αποκ.}}{t_j} L_e = 475,53MPa$
$\sigma_{jd} = \frac{\Delta M_{do}}{z \cdot A_j} = 533,55MPa$	$\sigma_{jd} = \frac{\Delta M_{do}}{z \cdot A_j} = 533,55MPa$

Πίνακας 7.3: Συγκριτικός πίνακας παράθεσης αποτελεσμάτων βάση της τάσης αποκόλλησης του ΚΑΝ.ΕΠΕ. και του pull out test για το 3^ο πείραμα, από το πείραμα στα δοκάρια

4^ο πείραμα:

ΚΑΝ.ΕΠΕ.	pull out test
$\tau_b^{αποκ.} \cong f_{ctm} = 2,4MPa$	$\tau_b^{αποκ.} = 1,46MPa$
$L_e = \sqrt{\frac{E_j \cdot t_j}{2 \cdot f_{ctm}}} = 155,46mm < L_{av} = 1750mm$	$L_e = \sqrt{\frac{E_j \cdot t_j}{2 \cdot f_{ctm}}} = 197,46mm < L_{av} = 1750mm$
$\beta_w = \sqrt{\frac{2 - b_j / b_w}{1 + b_j / b_w}} = 0,816$	$\beta_w = \sqrt{\frac{2 - b_j / b_w}{1 + b_j / b_w}} = 0,816$
$\beta_L = \sin\left(\frac{\pi\lambda}{2}\right) \cong \lambda \cdot (2 - \lambda) = 1$	$\beta_L = \sin\left(\frac{\pi\lambda}{2}\right) \cong \lambda \cdot (2 - \lambda) = 1$
$\sigma_{j, crit} \cong \beta \frac{\tau_b^{αποκ.}}{t_j} L_e = 604,00MPa$	$\sigma_{j, crit} \cong \beta \frac{\tau_b^{αποκ.}}{t_j} L_e = 475,53MPa$
$\sigma_{jd} = \frac{\Delta M_{do}}{z \cdot A_j} = 476,87MPa$	$\sigma_{jd} = \frac{\Delta M_{do}}{z \cdot A_j} = 476,87MPa$

Πίνακας 7.4: Συγκριτικός πίνακας παράθεσης αποτελεσμάτων βάση της τάσης αποκόλλησης του ΚΑΝ.ΕΠΕ. και του pull out test για το 4^ο πείραμα, από το πείραμα στα δοκάρια

ii. Σύγκριση με τα αποτελέσματα από τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν στα κυβικά δοκίμια

1^ο πείραμα:

ΚΑΝ.ΕΠΕ.	pull out test
$\tau_b^{αποκ.} \cong f_{ctm} = 2,4MPa$	$\tau_b^{αποκ.} = 2,54MPa$
$L_e = \sqrt{\frac{E_j \cdot t_j}{2 \cdot f_{ctm}}} = 155,46mm < L_{av} = 1750mm$	$L_e = \sqrt{\frac{E_j \cdot t_j}{2 \cdot f_{ctm}}} = 149,70mm < L_{av} = 1750mm$
$\beta_w = \sqrt{\frac{2 - b_j / b_w}{1 + b_j / b_w}} = 0,816$	$\beta_w = \sqrt{\frac{2 - b_j / b_w}{1 + b_j / b_w}} = 0,816$
$\beta_L = \sin\left(\frac{\pi\lambda}{2}\right) \cong \lambda \cdot (2 - \lambda) = 1$	$\beta_L = \sin\left(\frac{\pi\lambda}{2}\right) \cong \lambda \cdot (2 - \lambda) = 1$
$\sigma_{j, crit} \cong \beta \frac{\tau_b^{αποκ.}}{t_j} L_e = 604,00MPa$	$\sigma_{j, crit} \cong \beta \frac{\tau_b^{αποκ.}}{t_j} L_e = 627,22MPa$
$\sigma_{jd} = \frac{\Delta M_{do}}{z \cdot A_j} = 326,66MPa$	$\sigma_{jd} = \frac{\Delta M_{do}}{z \cdot A_j} = 326,66MPa$

Πίνακας 7.5: Συγκριτικός πίνακας παράθεσης αποτελεσμάτων βάση της τάσης αποκόλλησης του ΚΑΝ.ΕΠΕ. και του pull out test για το 1^ο πείραμα, από το πείραμα στα κυβικά δοκίμια

2^ο πείραμα:

ΚΑΝ.ΕΠΕ.	pull out test
$\tau_b^{αποκ.} \cong f_{ctm} = 2,4MPa$	$\tau_b^{αποκ.} = 2,31MPa$
$L_e = \sqrt{\frac{E_j \cdot t_j}{2 \cdot f_{ctm}}} = 155,46mm < L_{av} = 1750mm$	$L_e = \sqrt{\frac{E_j \cdot t_j}{2 \cdot f_{ctm}}} = 156,98mm < L_{av} = 1750mm$
$\beta_w = \sqrt{\frac{2 - b_j / b_w}{1 + b_j / b_w}} = 0,816$	$\beta_w = \sqrt{\frac{2 - b_j / b_w}{1 + b_j / b_w}} = 0,816$
$\beta_L = \sin\left(\frac{\pi\lambda}{2}\right) \cong \lambda \cdot (2 - \lambda) = 1$	$\beta_L = \sin\left(\frac{\pi\lambda}{2}\right) \cong \lambda \cdot (2 - \lambda) = 1$
$\sigma_{j, crit} \cong \beta \frac{\tau_b^{αποκ.}}{t_j} L_e = 604,00MPa$	$\sigma_{j, crit} \cong \beta \frac{\tau_b^{αποκ.}}{t_j} L_e = 598,15MPa$
$\sigma_{jd} = \frac{\Delta M_{do}}{z \cdot A_j} = 474,26MPa$	$\sigma_{jd} = \frac{\Delta M_{do}}{z \cdot A_j} = 474,26MPa$

Πίνακας 7.6: Συγκριτικός πίνακας παράθεσης αποτελεσμάτων βάση της τάσης αποκόλλησης του ΚΑΝ.ΕΠΕ. και του pull out test για το 2^ο πείραμα, από το πείραμα στα κυβικά δοκίμια

3^ο πείραμα:

ΚΑΝ.ΕΠΕ.	pull out test
$\tau_b^{αποκ.} \cong f_{ctm} = 2,4MPa$	$\tau_b^{αποκ.} = 2,31MPa$
$L_e = \sqrt{\frac{E_j \cdot t_j}{2 \cdot f_{ctm}}} = 155,46mm < L_{av} = 1750mm$	$L_e = \sqrt{\frac{E_j \cdot t_j}{2 \cdot f_{ctm}}} = 156,98mm < L_{av} = 1750mm$
$\beta_w = \sqrt{\frac{2 - b_j / b_w}{1 + b_j / b_w}} = 0,816$	$\beta_w = \sqrt{\frac{2 - b_j / b_w}{1 + b_j / b_w}} = 0,816$
$\beta_L = \sin\left(\frac{\pi\lambda}{2}\right) \cong \lambda \cdot (2 - \lambda) = 1$	$\beta_L = \sin\left(\frac{\pi\lambda}{2}\right) \cong \lambda \cdot (2 - \lambda) = 1$
$\sigma_{j, crit} \cong \beta \frac{\tau_b^{αποκ.}}{t_j} L_e = 604,00MPa$	$\sigma_{j, crit} \cong \beta \frac{\tau_b^{αποκ.}}{t_j} L_e = 598,15MPa$
$\sigma_{jd} = \frac{\Delta M_{do}}{z \cdot A_j} = 533,55MPa$	$\sigma_{jd} = \frac{\Delta M_{do}}{z \cdot A_j} = 533,55MPa$

Πίνακας 7.7: Συγκριτικός πίνακας παράθεσης αποτελεσμάτων βάση της τάσης αποκόλλησης του ΚΑΝ.ΕΠΕ. και του pull out test για το 3^ο πείραμα, από το πείραμα στα κυβικά δοκίμια

4^ο πείραμα:

ΚΑΝ.ΕΠΕ.	pull out test
$\tau_b^{αποκ.} \cong f_{ctm} = 2,4MPa$	$\tau_b^{αποκ.} = 2,31MPa$
$L_e = \sqrt{\frac{E_j \cdot t_j}{2 \cdot f_{ctm}}} = 155,46mm < L_{av} = 1750mm$	$L_e = \sqrt{\frac{E_j \cdot t_j}{2 \cdot f_{ctm}}} = 156,98mm < L_{av} = 1750mm$
$\beta_w = \sqrt{\frac{2 - b_j / b_w}{1 + b_j / b_w}} = 0,816$	$\beta_w = \sqrt{\frac{2 - b_j / b_w}{1 + b_j / b_w}} = 0,816$
$\beta_L = \sin\left(\frac{\pi\lambda}{2}\right) \cong \lambda \cdot (2 - \lambda) = 1$	$\beta_L = \sin\left(\frac{\pi\lambda}{2}\right) \cong \lambda \cdot (2 - \lambda) = 1$
$\sigma_{j, crit} \cong \beta \frac{\tau_b^{αποκ.}}{t_j} L_e = 604,00MPa$	$\sigma_{j, crit} \cong \beta \frac{\tau_b^{αποκ.}}{t_j} L_e = 598,15MPa$
$\sigma_{jd} = \frac{\Delta M_{do}}{z \cdot A_j} = 476,87MPa$	$\sigma_{jd} = \frac{\Delta M_{do}}{z \cdot A_j} = 476,87MPa$

Πίνακας 7.8: Συγκριτικός πίνακας παράθεσης αποτελεσμάτων βάση της τάσης αποκόλλησης του ΚΑΝ.ΕΠΕ. και του pull out test για το 4^ο πείραμα, από το πείραμα στα κυβικά δοκίμια

όγδοο κεφάλαιο

συμπεράσματα - σύγκριση

8.1. Γενικά

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα βασικά συμπεράσματα που εξάγονται από τα πειράματα που έγιναν στο εργαστήριο Αντισεισμικής Τεχνολογίας και έχουν προαναφερθεί σε προηγούμενα κεφάλαια. Επίσης γίνεται και σύγκριση των τάσεων αποκόλλησης των ΙΟΠ που υπολογίζονται με βάση τον ΚΑΝ.ΕΠΕ που αποτελεί το εθνικό προσάρτημα του Ευρωκώδικα 8. Τέλος στο κεφάλαιο αυτό προτείνεται και τρόπος αγκύρωσης των σύνθετων υλικών ώστε να επιτυγχάνεται θραύση των ΙΟΠ (που είναι και ο αποδεκτός τρόπος αστοχίας σύμφωνα με τον ΚΑΝ. ΕΠΕ) και όχι αποκόλληση τους.

8.2. Συμπεράσματα από την διεξαγωγή των πειραμάτων

Είχε προγραμματιστεί να δοκιμαστεί σε φόρτιση τεσσάρων σημείων μια δοκός αντίστοιχη αυτών οι οποίες ενισχύθηκαν με ινοπλισμένα πολυμερή, χωρίς εξωτερική ενίσχυση. Η δοκός αυτή τελικά δεν δοκιμάστηκε και η αναμενόμενη ροπή και δύναμη κατά την αστοχία της υπολογίστηκε αναλυτικά.

Δεδομένα δοκού:

Γεωμετρικά χαρακτηριστικά:

$$h = 50 \text{ cm}$$

$$b = 25 \text{ cm}$$

$$d_1 = 3,5 \text{ cm}$$

$$d = 46,5 \text{ cm}$$

Ποιότητα σκυροδέματος:

$$C = 22$$

$$f_{ctm} = 2,4 \text{ MPa}$$

$$E_c = 30,5 \text{ GPa}$$

Ποιότητα χάλυβα:

$$S = 500$$

$$E_s = 200 \text{ GPa}$$

Ράβδοι οπλισμού:

$$A_{s1} = 3,0772 \text{ cm}^2$$

$$2\Phi 14$$

$$A_{s2} = 3,0772 \text{ cm}^2$$

$$2\Phi 14$$

Από τους υπολογισμούς προκύπτουν τα παρακάτω για κατά την αστοχία της δοκού:

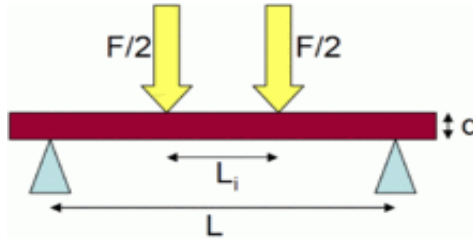
$$n = E_s / E_c = 6,557$$

$$\chi_1 = 24,70983 \text{ cm}$$

$$I_1 = 268.641,74 \text{ cm}^4$$

$$M_{cr} = 25,020 \text{ KNm}^2$$

$$K_{cr} = 0,000305 = 3,05364 * 10^{-4}$$



Σχήμα 8.1 Δοκός υποβαλλόμενη σε φόρτιση τεσσάρων σημείων

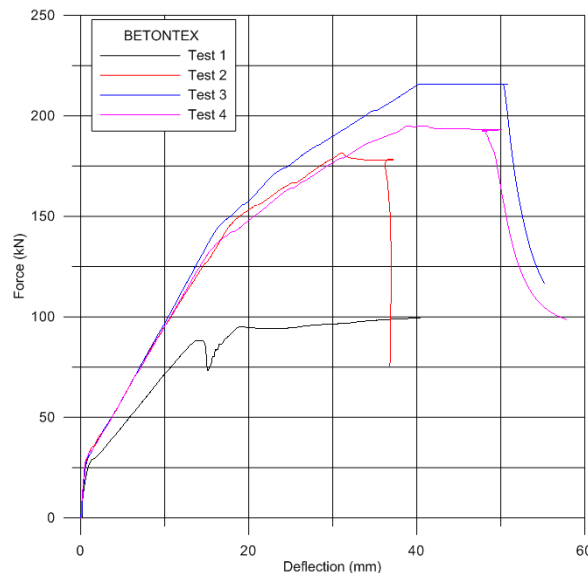
Η ροπή στο μέσον του ανοίγματος μιας αμφίερευστης δοκού υποβαλλόμενης σε φόρτιση τεσσάρων σημείων ισούται με:

$$M = [(L - L_i)/2] \cdot \frac{F}{2}$$

Το άνοιγμα της δοκού είναι 4,5μ ενώ η απόσταση μεταξύ των δύο φορτίων είναι 1,5 μ, οπότε υπολογίζεται από το M_{cr} η δύναμη που αντιστοιχεί στην αστοχία:

$$F_{cr} = \frac{2 \cdot M_{cr}}{1,5} = \frac{2 \cdot 25,02}{1,5} = 33,36 \text{ kN}$$

Όπως φαίνεται και από το παρακάτω διάγραμμα τάσεων – μετατοπίσεων η αντοχή των δοκών με τη χρήση των ΙΟΠ αυξήθηκε καθώς και η ακαμψία τους. Παρόλο που και οι τέσσερις δοκοί είχαν τρεις στρώσεις ΙΟΠ Betontex GV330-U-HT παρατηρούμε πώς η διαφορετική ρητίνη, η αγκύρωση και ο διαφορετικός τρόπος αγκύρωσης επηρεάζουν την αντοχή και την ακαμψία των δοκών. Αναλυτικότερα από τα πειραματικά αποτελέσματα προκύπτουν τα παρακάτω.



Σχήμα 8.2: Συγκεντρωτικό διάγραμμα δύναμης – μετατόπισης τεσσάρων δοκών

Όπως έχει προκύψει από τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στο πέμπτο κεφάλαιο η πρώτη δοκός 1, στην οποία για την επικόλληση των Ινοπλισμένων Πολυμερών ινών άνθρακα χρησιμοποιήθηκε η πυράντοχη ρητίνη IPN αστόχησε σε μικρότερο επιβαλλόμενο φορτίο σε σχέση με την δεύτερη δοκό στην οποία η ρητίνη ήταν εποξική (σ.σ. και οι δύο δοκοί είχαν ενισχυθεί με τρεις (3) στρώσεις σύνθετου υλικού Betontex GV330-U-HT). Η μειωμένη αυτή αντοχή – πρόωγη αστοχία αποδίδεται στην περιορισμένη αποδοτικότητα του εμποτισμού/διείσδυση της ρητίνης IPN στις ίνες του σύνθετου υλικού και την πρόσφυση που αυτή προσέφερε στο ΙΟΠ και την επιφάνεια σκυροδέματος.

Όσον αφορά στην πρώτη και δεύτερη δοκό (απλή εφαρμογή τριών στρώσεων Betontex GV330-U-HT) όπως ήταν αναμενόμενο παρατηρήθηκε αποκόλληση του συστήματος ενίσχυσης.

Η απόκριση της τρίτης δοκού όσον αφορά το διάγραμμα τάσεων- μετατοπίσεων ήταν καλύτερη από όλες τις δοκούς που εξετάστηκαν. Η αστοχία της συγκεκριμένης δοκού προκλήθηκε εξαιτίας της θραύσης των ινών άνθρακα, λόγω υπέρβασης της εφελκυστικής τους αντοχής που σήμανε το τέλος του πειράματος. Να σημειωθεί ότι δεν παρατηρήθηκε κανένα σημάδι αποκόλλησης της ενίσχυσης από το σκυροδέμα. Τα αγκύρια ARDFIX επέδειξαν πολύ καλή συμπεριφορά και συνεισέφεραν στο να ξεπεραστούν όλα τα προβλήματα που σχετίζονται με την αποκόλληση των σύνθετων υλικών από την επιφάνεια του σκυροδέματος

Τέλος και η τέταρτη δοκός έδωσε ικανοποιητικά αποτελέσματα. Η αστοχία προκλήθηκε στην αποκόλληση των ΙΟΠ από το σκυροδέμα αφού πρώτα πραγματοποιήθηκε θραύση των ινών άνθρακα του κολάρου μορφής U που χρησιμοποιήθηκε σαν μια μορφή αγκύρωσης. Η αντοχή της δοκού αυτής συγκριτικά με τις δύο πρώτες ήταν σαφώς υψηλότερη αλλά προφανώς δεν έφτασε την αντοχή της τρίτης δοκού.

8.3. Συμπεράσματα όσον αφορά τις τάσεις αποκόλλησης

Από όσα αναφέρθηκαν στο κεφάλαιο 7, όπου παρουσιάζονται και οι τιμές των τάσεων τα που προκύπτουν από την διεξαγωγή στο εργαστήριο Αντισεισμικής Τεχνολογίας των πειραμάτων εξόλκευσης, ο κανονισμός επεμβάσεων λαμβάνει σαν τάση αποκόλλησης την εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος f_{ctm} η οποία για την ποιότητα του σκυροδέματος που χρησιμοποιήθηκε είναι 2.4MPa.

Με βάση τα πειράματα εξόλκευσης που πραγματοποιήθηκαν στα ΙΟΠ που βρισκόνταν επικολλημένα στην επιφάνεια των δοκών Ο/Σ που εξεταστήκαν στα πλαίσια της πειραματικής διαδικασίας, την οποία πραγματεύεται η παρούσα εργασία, υπάρχει περίπτωση οι τάσεις συνάφειας να μην φθάσουν την τιμή f_{ctm} ώστε να γίνει αποκόλληση της επικάλυψης του σκυροδέματος. Όπως, λοιπόν, προέκυψε από τα pull out tests όντως δεν φτάνει σε καμιά περίπτωση αυτή την τιμή η συνάφεια. Επέρχεται ρήξη της ρητίνης και μάλιστα σε πολύ μικρότερη τιμή που στην περίπτωση της πυράντοχης ρητίνης δεν φτάνει ούτε το 1 MPa (0.51 MPa) ενώ στην περίπτωση της εποξικής ρητίνης είναι λίγο μεγαλύτερη του 1MPa (1.46MPa).

Από την άλλη πλευρά τα πειράματα εξόλκευσης των σύνθετων υλικών από την επιφάνεια του σκυροδέματος που έγιναν στα κυβικά δοκίμια οι τάσεις αποκόλλησης που αναπτύχθηκαν ήταν λίγο μεγαλύτερες από την τιμή που προτείνει ο ΚΑΝ.ΕΠΕ.

Η μεγάλη απόκλιση που παρατηρείται μεταξύ των δύο πειραματικών διαδικασιών για την αποτίμηση της τάσης αποκόλλησης, ενδεχομένως να οφείλεται στις καιρικές συνθήκες (αρκετές εναλλαγές κύκλων ψύξης-θέρμανσης) στις οποίες ήταν εκτεθειμένα οι δοκοί για αρκετούς μήνες μέχρι τη στιγμή που πραγματοποιήθηκαν τα πειράματα εξόλκευσης. Όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο θερμοκρασίες της τάξης των 50-80 °C μειώνουν σημαντικά την ικανότητα ανάληψης δυνάμεων στις ρητίνες και άρα στους σύνθετους οπλισμούς.

Είναι προφανές ότι υψηλότερες θερμοκρασίες όπως αυτές που αναπτύσσονται κατά τη διάρκεια μιας πυρκαγιάς, προκαλούν πλήρη αποσύνθεση των ρητινών και επομένως τα ΙΟΠ δεν μπορούν να φέρουν τάσεις. Ωστόσο κατάρρευση της κατασκευής αναμένεται σε πολύ υψηλότερες θερμοκρασίες.

Με την θεώρηση αυτή του ΚΑΝ.ΕΠΕ οι τάσεις αποκόλλησης που προκύπτουν είναι υπερεκτιμημένες ενώ όπως φάνηκε από τους υπολογισμούς η αποκόλληση των ΙΟΠ άνθρακα γίνεται για μικρότερη τάση (Πιν.7.1 - Πιν.7.4).

Από τους πίνακες που αναφέραμε παραπάνω παρατηρούμε ότι οι τιμές σχεδιασμού της ενεργού τάσεως σ_{jd} βρίσκονται πολύ κοντά σε αυτές που υπολογίστηκαν από τα πειραματικά αποτελέσματα των δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν.

πειράμα \ ενεργή τάση	$\sigma_{j,crit}$	σ_{jd}
πρώτο πείραμα	281,05 MPa	326,66 MPa
δεύτερο πείραμα	475,53 MPa	474,26 MPa
τρίτο πείραμα	475,53 MPa	533,55 MPa
τέταρτο πείραμα	475,53 MPa	476,87 MPa

Παρατηρείται πως ενώ πρέπει $\sigma_{jd} < \sigma_{j,crit}$ οι τιμές που υπολογίστηκαν από τα pull out tests ($\sigma_{j,crit}$) είναι μικρότερες από τις τιμές που προέκυψαν από την ροπή αστοχίας που υπολογίστηκε κατά την διεξαγωγή των πειραμάτων στο εργαστήριο στις τρεις από τις τέσσερις δοκούς. Μόνο η δοκός του δεύτερου πειράματος δίνει αποδεκτά αποτελέσματα $\sigma_{j,crit}$, χωρίς όμως να υπάρχει μεγάλη διαφορά ώστε να είμαστε από την πλευρά της ασφάλειας.

Τα αντίστοιχα αποτελέσματα που λαμβάνονται από την εφαρμογή των διατάξεων του κανονισμού επεμβάσεων (ΚΑΝ.ΕΠΕ.) είναι τα εξής:

πειράμα \ ενεργή τάση	$\sigma_{j,crit}$	σ_{jd}
πρώτο πείραμα	604 MPa	326,66 MPa
δεύτερο πείραμα	604 MPa	474,26 MPa
τρίτο πείραμα	604 MPa	533,55 MPa
τέταρτο πείραμα	604 MPa	476,87 MPa

Για όλα τα πειράματα προκύπτει πως ικανοποιείται η ανισότητα $\sigma_{jd} < \sigma_{j,crit}$ που πρέπει να ισχύει μεταξύ πειραματικών και αναλυτικών αποτελεσμάτων όσον αφορά στην ενεργή τάση του νέου οπλισμού (στην περίπτωση μας ΙΟΠ άνθρακα).

Πρέπει να σημειωθεί πως στις σχέσεις του κανονισμού δεν χρησιμοποιήθηκαν συντελεστές ασφαλείας λόγω της ύπαρξης πειραματικών αποτελεσμάτων.

Τέλος ο αντίστοιχος πίνακας για την σύγκριση των τάσεων που προέκυψαν, αυτή τη φορά από τα δεδομένα που είχαν ληφθεί μετά το πέρας των δοκιμών εξόλκευσης της μεταλλικής πλάκας στην επιφάνεια των συνθετών υλικών από τα κυβικά δοκίμια, είναι ο ακόλουθος:

πειράμα \ ενεργή τάση	$\sigma_{j,crit}$	σ_{jd}
πρώτο πείραμα	634,58 MPa	326,66 MPa
δεύτερο πείραμα	587,70 MPa	474,26 MPa
τρίτο πείραμα	587,70 MPa	533,55 MPa
τέταρτο πείραμα	587,70 MPa	476,87 MPa

Από τα δεδομένα των τάσεων αποκόλλησης στα κυβικά δοκίμια παρατηρείται ότι διατηρείται η φορά της ανισότητας που προστάζει ο κανονισμός για τις σ_{jd} , σ_{jd} , ώστε να ισχύει $\sigma_{jd} < \sigma_{j,crit}$ και μάλιστα παρέχει καλύτερα αποτελέσματα, όσο αφορά τις δοκούς στις οποίες χρησιμοποιήθηκε εποξειδική ρητίνη. Δηλαδή οι τιμές είναι μικρότερες από αυτές που υπολογίζονται, λαμβάνοντας ως τάση αποκόλλησης την τιμή της εφελκυστικής αντοχής του σκυροδέματος f_{ctm} .

Έτσι λοιπόν, ενώ αστοχεί το ΙΟΠ σε μικρότερη τάση όπως προέκυψε από τα πειράματα δεν χρειάζεται να χρησιμοποιηθούν περισσότερες στρώσεις σύνθετου υλικού μειώνοντας με τον τρόπο αυτό το κόστος και μειώνοντας την πιθανότητα αστοχίας των στρώσεων των ΙΟΠ. Είναι γνωστό ότι όσο περισσότερες στρώσεις ανθρακουφάσματος έχουν χρησιμοποιηθεί για την ενίσχυση είναι πιθανότερο να συμβεί η αστοχία που προαναφέρθηκε. Για τον λόγο αυτό ο κανονισμός λαμβάνει μειωτικό συντελεστή της αντοχής του ΙΟΠ για αριθμό στρώσεων μεγαλύτερο από τέσσερις(4).

Τέλος από την μελέτη του Ιταλικού Κανονισμού **CNR-DT 200/2004** προκύπτει ότι η $\tau_{αποκλ}$ πρέπει να λαμβάνεται μικρότερη από την εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος.

Πιο συγκεκριμένα ο Ιταλικός Κανονισμός για επισκευές με ΙΟΠ λαμβάνει υπόψη του το μέτρο διάτμησης της ρητίνης και του σκυροδέματος, το πάχος της ρητίνης, η επικάλυψη σκυροδέματος (20-30mm), το μέτρο ελαστικότητας, το πάχος, το πλάτος και η ροπή αδράνειας του ΙΟΠ, τον λόγο Poisson $\nu_f = E_f/E_c$, η μέση διατμητική τάση σύμφωνα με την θεωρία Jourawski.

Λόγω έλλειψης δεδομένων για την ρητίνη που απαιτούνται δεν υπολογίστηκε η τιμή που προκύπτει από τον συγκεκριμένο κανονισμό.

Συμπερασματικά πριν την εφαρμογή των εξισώσεων του ΚΑΝ.ΕΠΕ για την ανάλυση μια ενίσχυσης προτείνεται να γίνονται πειράματα με υλικά (σκυρόδεμα – ρητίνη – σύνθετα υλικά) ανάλογα με αυτά που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν κατά στην φάση ενίσχυσης και να εκτελούνται δοκιμές, ανάλογες με αυτές που έγιναν στο εργαστήριο (pull out tests) ώστε να διαπιστώνονται απευθείας οι τιμές που πρέπει να χρησιμοποιηθούν.

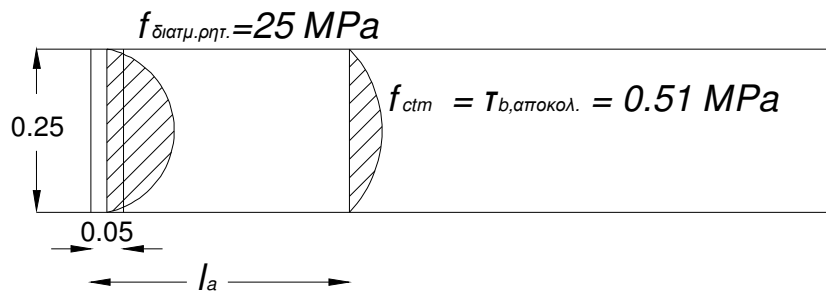
Το παραπάνω συμπέρασμα είναι κάτι που και οι συγγραφείς του Ιταλικού Κανονισμού επαναλαμβάνουν πολλές φορές μέσα στο κείμενο.

8.3 Μέθοδος αγκύρωσης των ΙΟΠ για αποφυγή αποκόλλησης

Η αποκόλληση των σύνθετων υλικών από την επιφάνεια του ενισχυόμενου μέλους είναι μη αποδεκτός τρόπος αστοχίας λόγω του ότι δεν εκμεταλλευόμαστε την αντοχή του πλήρως, ενώ ο σχεδιασμός αυτό προϋποθέτει. Άρα η ενίσχυση δεν προσφέρει στην κατασκευή την αντοχή και ασφάλεια που είναι υπολογισμένη από τα αναλυτικά προσομοιώματα που προτείνει ο κανονισμός να προσφέρει.

Προτείνεται λοιπόν το παρακάτω προσομοίωμα χρησιμοποιώντας ως τρόπο αγκύρωσης την μέθοδο που χρησιμοποιήθηκε στην ενίσχυση της τρίτης δοκού των πειραμάτων που πραγματεύεται η συγκεκριμένη εργασία.

Παρακάτω παρουσιάζεται ο τρόπος



$$\sqrt{2} \cdot E_1 \cdot 5 \cdot b + E_2 \cdot l_a.$$

Το εμβαδόν της καμπύλης που εμφανίζεται διαγραμματισμένο και αντιστοιχεί στην κατανομή των διατμητικών τάσεων έχει μέγιστη τιμή την διατμητική αντοχή της ρητίνης για τον πρώτο όρο της παραπάνω εξίσωσης και την τάση αποκόλλησης όσο αφορά στον δεύτερο όρο υπολογίζεται προσεγγιστικά με ορθογωνική κατανομή διατμητικών τάσεων με μειωμένη την μέγιστη τιμή και ίση με τα 2/3 της μέγιστης. Άρα η παραπάνω σχέση γράφεται ως εξής:

$$2(\sqrt{2} \cdot \left(\frac{2}{3}\right) f_{\text{διατμ.ρητίνης}} \cdot b \cdot b_{\text{υφ}}) + (2/3) \tau_{\text{αποκόλλησης}} \cdot b \cdot l_a = t_f \cdot b_f \cdot 3500$$

Έστω ότι ισχύουν τα ακόλουθα:

$$f_{\text{διατμ.ρητίνης}} = 2,5 \text{ MPa}$$

$$\tau_{\text{αποκόλλησης}} = f_{ctm} = 2,4 \text{ MPa}$$

$$b = b_f = 0.20cm$$

$$t_f = 0.165 \cdot 3mm = 0.495mm = 0.0495cm$$

$$f_{fu} = 3500 MPa$$

$b_{v\phi}$ είναι το πλάτος των σύνθετων υλικών που χρησιμοποιήθηκαν για να τυλιχθούν οι ράβδοι σύνθετων υλικών που χρησιμοποιήθηκαν για αγκύρωση στις διανοιχθείσες οπές της δοκού, καθώς και το πλάτος του φύλλου ΙΟΠ που χρησιμοποιήθηκε ως “καπάκι” στις θέσεις των αγκυρώσεων.

l_a η απόσταση των ράβδων ΙΟΠ που θα χρησιμοποιηθούν ως αγκύρια

Προκύπτει:

$$\begin{aligned} 2 \left(\sqrt{2} \cdot \left(\frac{2}{3} \right) f_{\text{διατμ.ρητίνης}} \cdot b \cdot b_{v\phi} \right) + \left(\frac{2}{3} \right) \tau_{\text{αποκόλλησης}} \cdot b \cdot l_a &= t_f \cdot b_f \cdot f_{fu} \\ \rightarrow 2 \left(\sqrt{2} \cdot \left(\frac{2}{3} \right) \cdot 2,5MPa \cdot 5cm \right) + \left(\frac{2}{3} \right) 2,4 \cdot l_a &= 0,0495cm \cdot 3500MPa \\ \rightarrow 23,57MPa \cdot cm + 1,6 \cdot l_a &= 173,25MPa \cdot cm \rightarrow l_a = \frac{173,25 - 23,57}{1,6} \\ &= 93.55cm \end{aligned}$$

Άρα για να μην συμβεί πρόωρη αποκόλληση των φύλλων σύνθετων υλικών που χρησιμοποιήθηκαν στην ενίσχυση η μέγιστη απόσταση των αγκυρίων για τα παραπάνω δεδομένα οφείλει να είναι αυτή που υπολογίστηκε ακριβώς από πάνω.

π α ρ ά ρ τ η μ α

Λίστα Σχημάτων

	σελίδα
Σχήμα 1.1: Καμπύλη σ-ε για σύνθετα υλικά και χάλυβα (συμβατικό ή προεντεταμένο) [17]	3
Σχήμα 1.2: Συμπεριφορά σε εφελκυσμό διαφόρων τύπων ινών [16]	7
Σχήμα 1.3: Συμπεριφορά σε θλίψη διαφόρων τύπων ινών [16]	7
Σχήμα 1.4: Εφαρμογή με ψεκασμό [16]	9
Σχήμα 1.5: Εφαρμογή με το χέρι [16]	9
Σχήμα 1.6: Περιέλιξη ινών σε άξονα [16]	10
Σχήμα 2.1: Διαστάσεις και οπλισμοί δοκών (σειρά 1)	21
Σχήμα 2.2: Τρόπος επικόλλησης ΙΟΠ (σειρά 1)	21
Σχήμα 2.3: Διαστάσεις και οπλισμοί δοκών (σειρά 2)	22
Σχήμα 2.4: Τρόπος επικόλλησης ΙΟΠ (σειρά 2)	23
Σχήμα 2.5: Παρουσίαση της δοκού με τον υπάρχων οπλισμό της	26
Σχήμα 2.6: Παρουσίαση της δοκού του πειράματος	27
Σχήμα 2.7: Απεικόνιση των στρώσεων ΙΟΠ που χρησιμοποιήθηκαν	28
Σχήμα 2.8: Διάγραμμα τάσεων - παραμορφώσεων	30
Σχήμα 3.1: Παραμορφώσεις σε ορθογωνική διατομή δοκού υπό ροπή M_0 κατά την φάση ενίσχυσης	41
Σχήμα 3.2: Μορφές αστοχίας δοκού ενισχυμένης σε κάμψη με σύνθετα υλικά	42
Σχήμα 3.3: Ανάλυση διατομής στην οριακή κατάσταση αντοχής	43
Σχήμα 3.4: Απώλεια συνάφειας μεταξύ ΙΟΠ και σκυροδέματος	49
Σχήμα 3.5: Καμπτική ενίσχυση με ΙΟΠ – τρόποι αστοχίας	50
Σχήμα 3.6: Δύναμη ολίσθησης διεπιφάνειας ΙΟΠ – σκυροδέματος	51
Σχήμα 3.7: Προσδιορισμός γεωμετρικών παραμέτρων δοκού	54

Σχήμα 3.8: Τρόποι αστοχίας δομικού στοιχείου ενισχυμένου με ΙΟΠ	58
Σχήμα 3.9: Μετατόπιση διαγράμματος ροπών	60
Σχήμα 4.1: Γεωμετρία δοκών Ο/Σ και διάταξη χαλύβδινου οπλισμού δοκών	65
Σχήμα 4.2: Γεωμετρία δοκών Ο/Σ και διάταξη χαλύβδινου οπλισμού δοκών	66
Σχήμα 4.3: Τοποθέτηση των οργάνων	71
Σχήμα 4.4: Διάγραμμα φορτίου – παραμόρφωσης για το 1 ^ο πείραμα	71
Σχήμα 4.5: Διάγραμμα φορτίου – παραμόρφωσης για το 2 ^ο πείραμα	72
Σχήμα 4.6: Διάγραμμα φορτίου – παραμόρφωσης για το 3 ^ο πείραμα	72
Σχήμα 4.7: Διάγραμμα φορτίου – παραμόρφωσης για το 4 ^ο πείραμα	73
Σχήμα 4.8: Συγκριτικό διάγραμμα φορτίου – παραμόρφωσης για όλα τα πειραματικά αποτελέσματα	73
Σχήμα 4.9: 1 ^ο πείραμα: Μορφή αστοχίας στο τέλος της δοκιμής	74
Σχήμα 4.10: 2 ^ο πείραμα: Μορφή αστοχίας στο τέλος της δοκιμής	75
Σχήμα 4.11: 3 ^ο πείραμα: Μορφή αστοχίας στο τέλος της δοκιμής	76
Σχήμα 4.12: 4 ^ο πείραμα: Μορφή αστοχίας στο τέλος της δοκιμής	77
Σχήμα 5.1: Η αρχική διατομή της δοκού πριν την τοποθέτηση των σύνθετων υλικών	77
Σχήμα 5.2: Διάγραμμα δύναμης – παραμόρφωσης όπως προέκυψε από το 1 ^ο πείραμα και η προσομοίωσή του σε διγραμμικό	78
Σχήμα 5.3: Ανάλυση διατομής υπό μεγέθη ορθής έντασης (M+N) με κυριαρχούσα κάμψη για το 1 ^ο πείραμα	80
Σχήμα 5.4: Σχηματική απεικόνιση της δοκού μετά το πέρας του 1 ^ο πειράματος	85
Σχήμα 5.5: Διάγραμμα δύναμης – παραμόρφωσης όπως προέκυψε από το 2 ^ο πείραμα και η προσομοίωσή του σε τριγραμμικό	86

Σχήμα 5.6: Ανάλυση διατομής υπό μεγέθη ορθής έντασης (M+N) με κυριαρχούσα κάμψη για το 2 ^ο πείραμα	88
Σχήμα 5.7: Σχηματική απεικόνιση της δοκού μετά το πέρας του 2 ^ο πειράματος	95
Σχήμα 5.8: Διάγραμμα δύναμης – παραμόρφωσης όπως προέκυψε από το 2 ^ο πείραμα και η προσομοίωσή του σε τριγωνικό	96
Σχήμα 5.9: Ανάλυση διατομής υπό μεγέθη ορθής έντασης (M+N) με κυριαρχούσα κάμψη για το 3 ^ο πείραμα	98
Σχήμα 5.10: Σχηματική απεικόνιση της δοκού μετά το πέρας του 3 ^ο πειράματος	105
Σχήμα 5.11: Διάγραμμα δύναμης – παραμόρφωσης όπως προέκυψε από το 2 ^ο πείραμα και η προσομοίωσή του σε τριγωνικό	106
Σχήμα 5.12: Ανάλυση διατομής υπό μεγέθη ορθής έντασης (M+N) με κυριαρχούσα κάμψη για το 4 ^ο πείραμα	108
Σχήμα 5.13: Σχηματική απεικόνιση της δοκού μετά το πέρας του 4 ^ο πειράματος	115
Σχήμα 6.1: Ανάλυση διατομής υπό μεγέθη ορθής έντασης (M+N) με κυριαρχούσα κάμψη	118
Σχήμα 6.2: Ανάλυση διατομής υπό μεγέθη ορθής έντασης (M+N) με κυριαρχούσα κάμψη λαμβανομένου υπόψη και την επιρροή του σύνθετου υλικού	119
Σχήμα 7.1: Αναπαράσταση της φορητής συσκευής ελέγχου της συγκόλλησης	127
Σχήμα 8.1: Δοκός υποβαλλόμενη σε φόρτιση τεσσάρων σημείων	145
Σχήμα 8.2: Συγκεντρωτικό διάγραμμα δύναμης – μετατόπισης τεσσάρων δοκών	145

Λίστα Πινάκων

	σελίδα
Πίνακας 1.1: Ιδιότητες υάλου–E και υάλου–S .[14]	5
Πίνακας 1.2: Ιδιότητες ρητινών [14]	8
Πίνακας 2.1: Μηχανικά χαρακτηριστικά CFRP sheets & CFRP fabric	19
Πίνακας 2.2: Οριακό φορτίο αστοχία και τρόπος αστοχία δοκών	20
Πίνακας 2.3: Αριθμός φύλλων ΙΟΠ & μέθοδος δοκιμής	22
Πίνακας 2.4: Μηχανικές ιδιότητες σκυροδέματος και χάλυβα	23
Πίνακας 2.5: Αναπτυσσόμενες ροπές και τρόπος αστοχίας	24
Πίνακας 2.6: Μηχανικές ιδιότητες σκυροδέματος/χάλυβα	24
Πίνακας 2.7: Προφορισμένοι ή μη προφορισμένοι ράβδοι	25
Πίνακας 2.8: Σύστημα ΙΟΠ που χρησιμοποιήθηκε	27
Πίνακας 3.1: Διορθωτικός συντελεστής για μακροχρόνια φόρτιση διαφόρων τύπων ινών	63
Πίνακας 4.1a: Μηχανικά χαρακτηριστικά του ΙΟΠ BETONTEX	66
Πίνακας 4.1b: Ιδιότητες των εποξειδικών ρητινών της BETONTEX	67
Πίνακας 5.1: Παράθεση στοιχείων δοκού για το 1 ^ο πείραμα	80
Πίνακας 5.2: Παράθεση χαρακτηριστικών σύνθετου υλικού για το 1 ^ο πείραμα	80
Πίνακας 5.4: Παράθεση χαρακτηριστικών σύνθετου υλικού για το 2 ^ο πείραμα	88
Πίνακας 5.5: Παράθεση στοιχείων δοκού για το 3 ^ο πείραμα	98
Πίνακας 5.6: Παράθεση χαρακτηριστικών σύνθετου υλικού για το 3 ^ο πείραμα	98

Πίνακας 5.7: Παράθεση στοιχείων δοκού για το 4 ^ο πείραμα	108
Πίνακας 5.8: Παράθεση χαρακτηριστικών σύνθετου υλικού για το 4 ^ο πείραμα	108
Πίνακας 6.1: Παράθεση στοιχείων πλάκας	118
Πίνακας 6.2: Παράθεση χαρακτηριστικών σύνθετου υλικού	118
Πίνακας 7.1: Συγκριτικός πίνακας παράθεσης αποτελεσμάτων βάση της τάσης αποκόλλησης του ΚΑΝ.ΕΠΕ. και του pull out test για το 1 ^ο πείραμα, από το πείραμα στα δοκάρια	139
Πίνακας 7.2: Συγκριτικός πίνακας παράθεσης αποτελεσμάτων βάση της τάσης αποκόλλησης του ΚΑΝ.ΕΠΕ. και του pull out test για το 2 ^ο πείραμα, από το πείραμα στα δοκάρια	139
Πίνακας 7.3: Συγκριτικός πίνακας παράθεσης αποτελεσμάτων βάση της τάσης αποκόλλησης του ΚΑΝ.ΕΠΕ. και του pull out test για το 3 ^ο πείραμα, από το πείραμα στα δοκάρια	140
Πίνακας 7.4: Συγκριτικός πίνακας παράθεσης αποτελεσμάτων βάση της τάσης αποκόλλησης του ΚΑΝ.ΕΠΕ. και του pull out test για το 4 ^ο πείραμα, από το πείραμα στα δοκάρια	140
Πίνακας 7.5: Συγκριτικός πίνακας παράθεσης αποτελεσμάτων βάση της τάσης αποκόλλησης του ΚΑΝ.ΕΠΕ. και του pull out test για το 1 ^ο πείραμα, από το πείραμα στα κυβικά δοκίμια	141
Πίνακας 7.6: Συγκριτικός πίνακας παράθεσης αποτελεσμάτων βάση της τάσης αποκόλλησης του ΚΑΝ.ΕΠΕ. και του pull out test για το 2 ^ο πείραμα, από το πείραμα στα κυβικά δοκίμια	141
Πίνακας 7.7: Συγκριτικός πίνακας παράθεσης αποτελεσμάτων βάση της τάσης αποκόλλησης του ΚΑΝ.ΕΠΕ. και του pull out test για το 3 ^ο πείραμα, από το πείραμα στα κυβικά δοκίμια	142
Πίνακας 7.8: Συγκριτικός πίνακας παράθεσης αποτελεσμάτων βάση	142

της τάσης αποκόλλησης του ΚΑΝ.ΕΠΕ. και του pull out test για το 4^ο πείραμα, από το πείραμα στα κυβικά δοκίμια

Λίστα Εικόνων

	σελίδα
Εικόνα 1.1: Ίνες E-glass [16]	4
Εικόνα 1.2: Ίνες άνθρακα [16]	5
Εικόνα 1.3: Ίνες αραμιδίου [16]	6
Εικόνα 1.4: Δείγμα ΙΟΠ για τον προσδιορισμό της εφελκυστικής αντοχής του	12
Εικόνα 1.5: Πραγματοποίηση δοκιμής εφελκυσμού σε δείγματα ΙΟΠ	13
Εικόνα 1.6: Αστοχία δείγματος ΙΟΠ.	13
Εικόνα 4.1: Τρόπος διάνοιξης οπών για την τοποθέτηση αγκυριών	68
Εικόνα 4.2: Τρόπος τοποθέτησης αγκυριών και φύλλων ΙΟΠ	68
Εικόνα 4.3: Τρόπος επιβολής του φορτίου	69
Εικόνα 4.4: Γενική άποψη πειραματικής διάταξης	70
Εικόνα 4.5: Κυλιόμενες στηρίξεις δοκών	70
Εικόνα 4.6: Πείραμα 1 ^ο : (a), (b): Η αποκόλληση του ΙΟΠ στο τέλος της δοκιμής.	74
Εικόνα 4.7: Πείραμα 2 ^ο : (a): Αποκόλληση σε όλο το μήκος της δοκού στο τέλος της δοκιμής, (b): Καμπτική ρωγμή στο μέσο του ανοίγματος της δοκού στο τέλος της δοκιμής	75
Εικόνα 4.8: Πείραμα 3 ^ο : (a), (b): Αποκόλληση σε όλο το μήκος της δοκού	76

στο τέλος της δοκιμής, θραύση του ΙΟΠ

Εικόνα 4.9: Πείραμα 4 ^ο : (a), (b): Η αποκόλληση του ΙΟΠ στο τέλος της δοκιμής.	77
Εικόνα 7.1: Τοποθέτηση μεταλλικού εξαρτήματος για τη δοκιμή εξόλκευσης	128
Εικόνα 7.2: Τοποθέτηση της βάσης της μηχανής εξόλκευσης	129
Εικόνα 7.3: Διάταξη μηχανήματος και εξαρτημάτων δοκιμής εξόλκευσης	130
Εικόνα 7.4: Απεικόνιση της αφαίρεσης του περιμετρικού τμήματος ΙΟΠ	132
Εικόνα 7.5: Απεικόνιση των πέντε κυβικών δοκιμών που χρησιμοποιήθηκαν για τα πειράματα της εξόλκευσης	135
Εικόνα 7.6: Απεικόνιση του αποτελέσματος των δοκιμών από το πρώτο κυβικό δοκίμιο	136
Εικόνα 7.7: Απεικόνιση του αποτελέσματος των δοκιμών από το δεύτερο κυβικό δοκίμιο	136
Εικόνα 7.8: Απεικόνιση του αποτελέσματος των δοκιμών από το τρίτο κυβικό δοκίμιο	137
Εικόνα 7.9: Απεικόνιση του αποτελέσματος των δοκιμών από το τέταρτο κυβικό δοκίμιο	137
Εικόνα 7.10: Απεικόνιση του αποτελέσματος των δοκιμών από το πέμπτο κυβικό δοκίμιο	138

Summary

The present M.Sc. thesis deals with the experimental and analytical study of the effectiveness of Fiber-Reinforced Polymer (FRP) applications on Reinforced Concrete (RC) beams for the purpose of increasing their flexural strength. Results deriving from five testing procedures are examined (parameters such as fiber type, strengthening system etc.), as well as the testing program adopted by the Laboratory of Earthquake Engineering of National Technical University of Athens (NTUA). Moreover, the failure mode of each beam tested is checked according to the provisions of the Greek Assessment & Retrofitting Code.

In chapter 2, testing results of the present thesis are evaluated according to experimental procedures found at the international bibliography. The basic conclusions of five (5) testing programs are presented below, which were conducted in order to study the failure mode of FRP strengthened beams.

- i. P. Alagusundaramoorthy, I.E. Harik, M.ASCE, C.C Choo
Flexural Behavior of R/C Beams Strengthened with Carbon Fiber Reinforced Polymer Sheets or Fabric [1]*

The control beams tested by Alagusundaramoorthy et al [1] failed due to yielding of the reinforcement under tension before the concrete compression strain reached the limit of 0.003. Bending cracks at the area between the two concentrated loads were observed at all beams tested (both control and strengthened). The majority of beams strengthened with CFRP sheets failed due to concrete compression at one of the concentrated loading positions. Upon the beginning of concrete compression, separation of FRP sheets was also observed.

- ii. Koji Takeda et al (1996)
Flexural Behavior of Reinforced Concrete Beams Strengthened with Carbon Fiber Sheets [2]*

The control beams tested by Takeda et al [2] developed bending cracks and finally failed due to concrete compression. The strengthened beams also developed bending cracks, but failed due to rupture of the carbon FRP sheets. Takeda et al [2] concluded that by increasing the number of FRP sheets the flexural stiffness and strength increased, while the strain capacity decreased. As regards the beam that was already loaded before being strengthened, after comparing it to a similar one strengthened with identical carbon FRP, similar behavior was observed. Therefore, the effect of initial loading on flexural behavior of strengthened beams is negligible.

iii. *Hee Sun Kim, Yeong Soo Shin (2010)*

Flexural Behavior of Reinforced Concrete (RC) Beams Retrofitted with Hybrid Fiber Reinforced Polymers (FRPs) under Sustaining Loads [3]

Hee Sun Kim and Yeong Soo Shin [3] concluded that hybrid FRPs improve significantly the stiffness and ultimate strength of beams. The order according to which different type of FRP sheets are applied has a major effect on both strength and stiffness. Beams on which a glass FRP sheet was applied first, demonstrated higher strength and stiffness compared to the others. The effect of initial loading is clear; the effect of hybrid strengthening is less strong at preloaded beams than at non-preloaded beams. However, these consequences on preloaded beams can be easily overcome by retrofitting cracks (resin fill) before the application of composite materials. Strengthened beams fail before the hybrid FRP system reaches its ultimate strength.

iv. *Tom Norris (1997)*

Flexural Behavior of Reinforced Concrete (RC) Beams Retrofitted with Hybrid fiber reinforced polymers (FRPs) under sustaining loads [3]

Tom Norris et al [4] stressed the fact that the increase percentage of strength and stiffness as well as the failure mode depends on the fiber direction. When carbon fibers are perpendicular to the cracks, then the strength and stiffness increase is larger and concrete failure takes place due to stress concentration about the edge of the composite material. When the fibers are applied at an angle of 45° to the cracks, then the strength and stiffness increase observed are smaller, but the failure mode is still the same as above.

v. *C.B. Demakos & G. Dimitrakis*

On the Effect of FRP Sheet Composite Anchorage to Flexural Behavior of Reinforced Concrete Beams [5]

Regarding the FRP anchorage, C.B. Demakos & G. Dimitrakis [5] remarked that the U-shape sheet anchorage mode led to higher value of stiffness at the beams on which it was applied compared to those on which carbon fiber anchors were applied. Additionally, beams with one anchor at each end were more flexible than those with two anchors at each end. In any case, the beams with two anchors at each end failed at a higher load. In general, all beams had a flexural failure mode and demonstrated minor compression cracks on the upper side. The group of beams at which the U-shape sheet anchorage mode was used demonstrated the following behavior; at two out of the three beams the sheet detached from the middle section and at the third detached from the left end section. The response of beams with one anchor at each side was practically the same, apart from the fact that one of these beams developed flexural-shear cracks. The FRP sheet applied on beams with two anchors at each side was ruptured either at the middle or at the left end section and the beams showed

great increase of their stiffness, which might be due to the fact that the distance between the internal anchors is smaller compared to that of beams B-CFRP-1AN-B.

In chapter 3, the three most widely used codes internationally for the FRP strengthening of RC beams were taken into consideration. Those codes and the failure modes of each are mentioned below.

I. Greek Assessment & Retrofitting Code

Failure modes:

1. Failure of the strengthening material

$$\sigma_{j,crit} = f_{jk} \ \& \ \sigma_{jd} = \frac{1}{\gamma_m} \cdot f_{jk}$$

where

f_{jk} characteristic value of material strength

γ_m partial factor of safety for the material

2. Early debonding of the strengthening material due to inadequate bonding along the element or inadequate anchorage at its edges

$$\sigma_{jd} = \frac{1}{\gamma_{Rd}} \cdot \sigma_{j,crit}$$

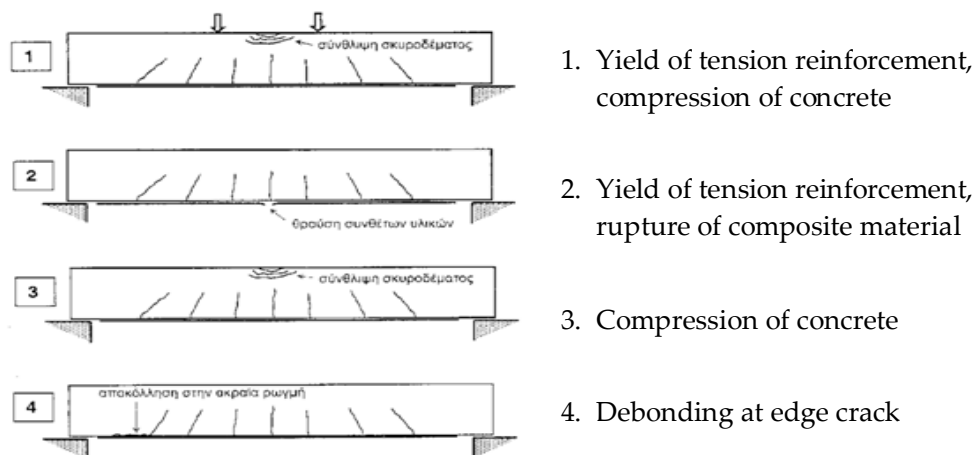
where

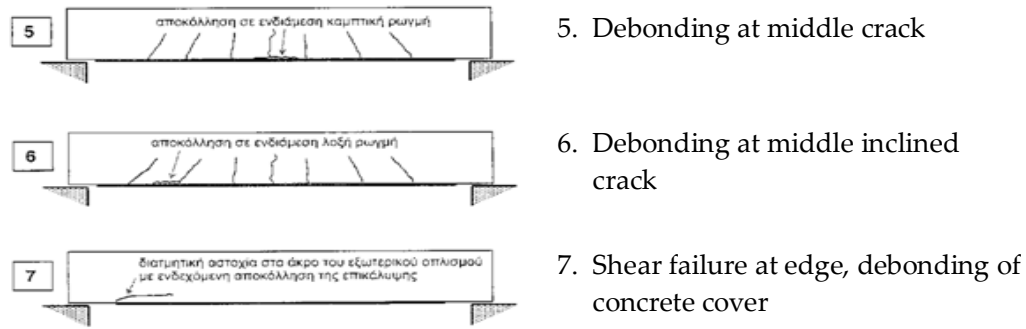
γ_{Rd} factor of safety taking into account all the model uncertainties

$\sigma_{j,crit}$ debonding material stress

II. Model suggested by The International Federation for Structural Concrete (FIB)

Failure modes:





III. Italian Code CNR-DT 200/2004 (Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Existing Structures)

Failure modes due to debonding:

1. debonding at the edge of the FRP sheet
2. debonding at a middle section due to flexural cracks
3. debonding due to inclined shear crack
4. debonding due to concrete surface roughness

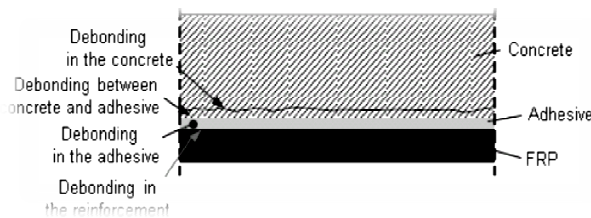


Figure 1a: Debonding between concrete and FRP

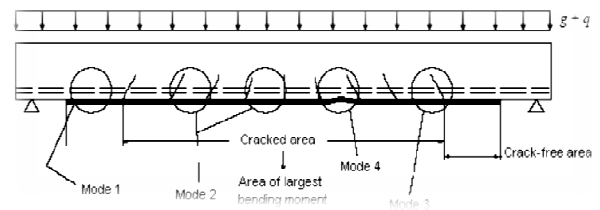


Figure 1b: FRP flexural strengthening - Failure modes

In chapter 4, four-point bending tests were conducted at the Laboratory for Earthquake Engineering (LEE) at the National Technical University of Athens. The tests concerned four full-scale reinforced concrete beams strengthened with externally bonded FRP. The main purpose of this experimental research was to investigate the response of strengthened beams (strength, deflection, failure modes) under a four point bending test. The FRP were provided by BETONTEX and the application of the strengthening material was performed under the supervision of technical personnel of the company. This report contains the test results and the main conclusions derived from this experimental research.

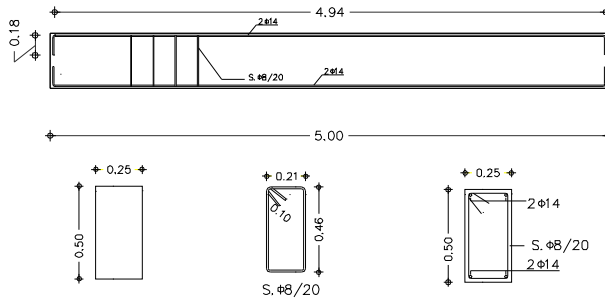


Figure 2: Geometry & reinforcement details of tested beams

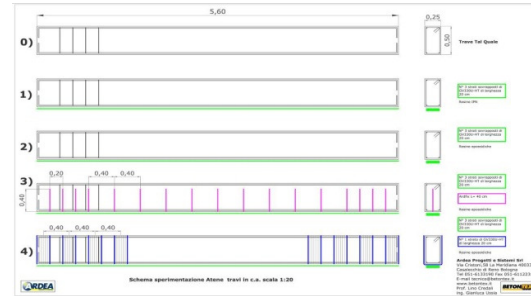


Figure 3: Strengthened RC specimens

The strengthened RC specimens are depicted in Figure 3. The following specimens were tested:

- Specimen 1:** The strengthening system consisted of 3 Layers of BETONTEX GV330-U-HT, $w=200\text{mm}$, resin type BETONTEX IPN01-IPN02, no ARDFIX connector.
- Specimen 2:** The strengthening system consisted of 3 Layers of BETONTEX GV330-U-HT, $w=200\text{mm}$, resin type BETONTEX RC01-RC02, no ARDFIX connector.
- Specimen 3:** The strengthening system consisted of 3 Layers of BETONTEX GV330-U-HT, $w=200\text{mm}$, resin type BETONTEX RC01-RC02 with ARDFIX connectors.
- Specimen 4:** The strengthening system consisted of 3 Layers of BETONTEX GV330-U-HT, $w=200\text{mm}$, resin type BETONTEX RC01-RC02 and U-Shape Ties.

The Specimen 0 in Figure 3 refers to a beam without any strengthening system and has not been tested yet.



Figure 4: Drilling & placing of anchors



Figure 5: Placing of anchors & FRP application

FRP application procedure:

- beam surface cleaning

- Smoothing of beam edges to obtain the proper curvature
- Launching of water under pressure and then drying till beam moisture <4%
- Coating with resin
- Application of FRP layers after a couple of minutes

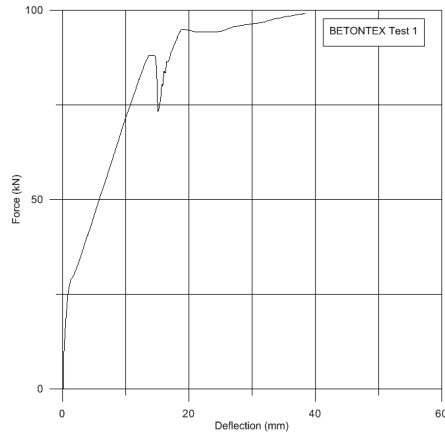


Figure 6: Specimen 1 (Test 1): Load-deflection diagram

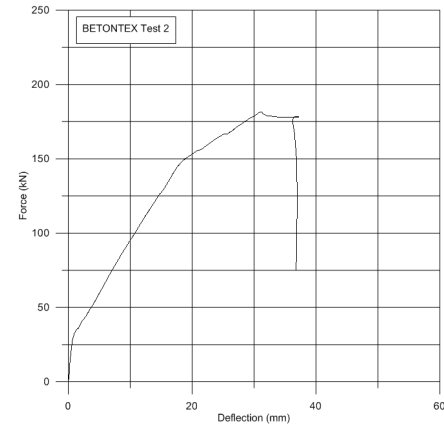


Figure 7: Specimen 2 (Test 2): Load-deflection diagram

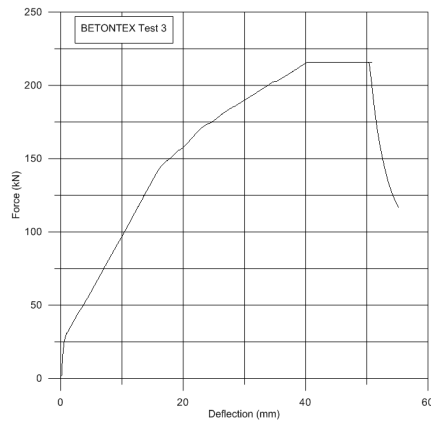


Figure 8: Specimen 3 (Test 3): Load-deflection diagram

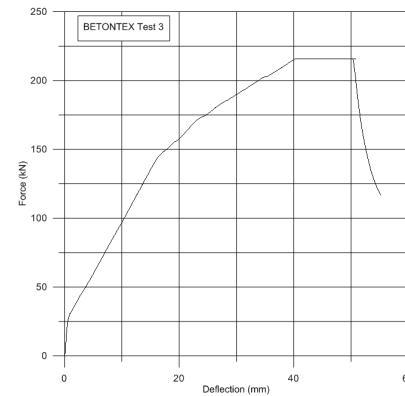


Figure 9: Specimen 4 (Test 4): Load-deflection diagram

Failure modes

For specimen 1, initially, small horizontal cracks were observed at both ends of beam. With load increase, flexural cracks developed and propagated upwards the region of high bending moment. The test stopped when debonding of strengthening material from concrete was observed. No delamination among composite layers appeared, probably due to their good impregnation by the resin IPN.



Figure 10: Specimen 1: (a); (b): Debonding of strengthening system at the end of the test

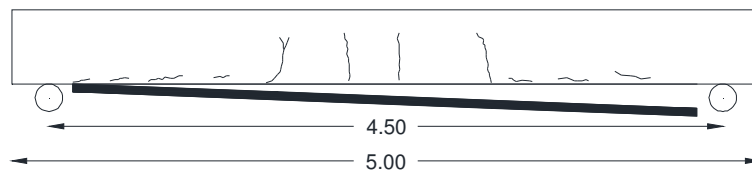


Figure 11: Specimen 2: Crack pattern at the end of the test

For specimen 2, debonding failure between FRP and concrete along the length of beam was observed. Also, flexural cracks developed at the mid-span of the beam.



Figure 12: Specimen 2: (a): Debonding along the length of beam; (b): Flexural cracks at mid-span

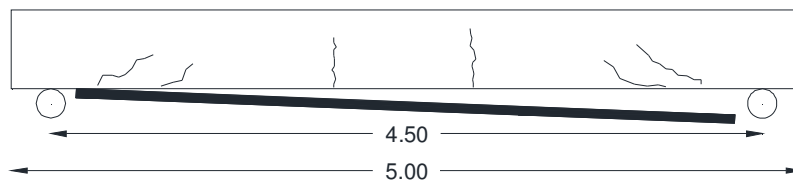


Figure 13: Specimen 2: Crack pattern at the end of test

For specimen 3, flexural cracks at the mid-span of the beam were observed. The test ended when rupture of carbon reinforcement at the mid-span of the beam occurred. During this test no debonding between FRP and concrete was observed.



Figure 14: Specimen 3: (a); (b): Flexural cracks at mid-span, rupture of carbon strengthening system

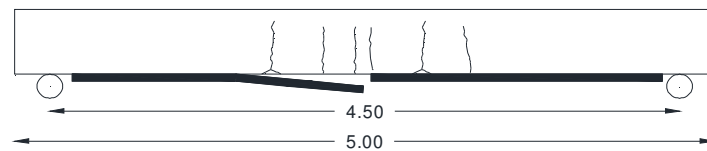


Figure 15: Specimen 3: Crack pattern at the end of test

For specimen 4, flexural cracks at the mid-span of the beam were observed. The test stopped when failure and breaking of U-shape ties of carbon fibers and debonding from concrete were observed.



Figure 16: Specimen 4: (a); (b): Debonding of strengthening system

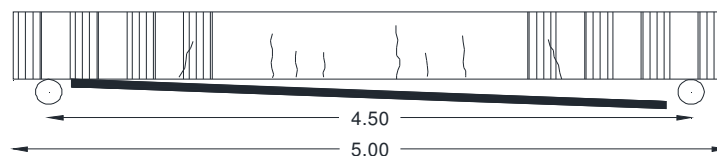


Figure 17: Specimen 4: Crack pattern at the end of test

In chapter 5, stresses and forces developed at the composite materials are analytically calculated according to the provisions of the Greek Assessment & Retrofitting Code and are compared to the ones measured during the experimental procedure. The analytical procedure is presented only for the first specimen, while for the rest specimens only the final results are reported.

Specimen No 1: Strengthening system consisting of 3 Layers of BETONTEX GV330-U-HT, $w=200\text{mm}$, resin type BETONTEX IPN01-IPN02, no ARDFIX connector

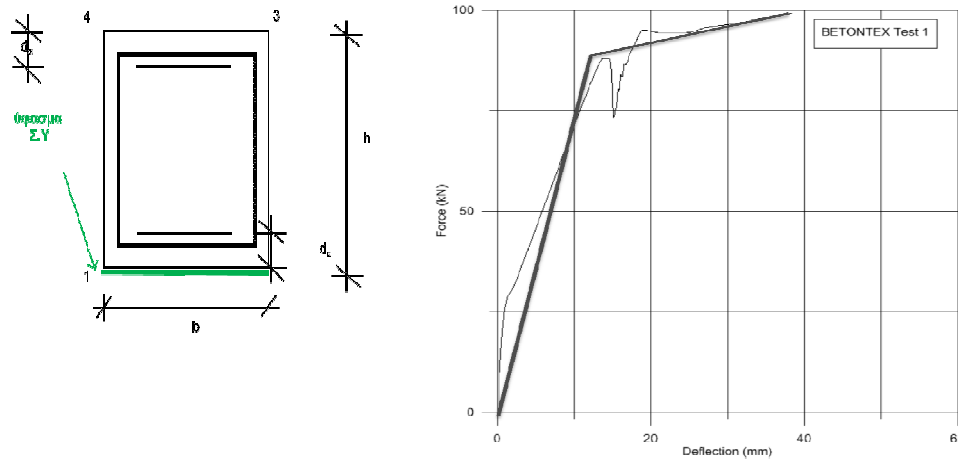


Figure 18: Load-deflection diagram for the first specimen & corresponding bilinear diagram

Section Data

Beam section ($h*b$)	50cm x	25cm
Concrete		C12
Steel		S500
Steel Modulus of Elasticity	$E_s=$	200 GPa
Compression reinforcement	2Φ	14
Tension reinforcement	2Φ	14
Transverse reinforcement diameter	$\Phi_w=$	8
Compression reinforcement diameter	$\Phi_{Lc}=$	14
Tension reinforcement diameter	$\Phi_{Lt}=$	14
Concrete cover	$c=$	2,00cm
Beam length	$l=$	4,5 m
Distance of tension reinforcement from edge	$d_t=c+\Phi_w+0.5\Phi_{Lt}=$	3,50cm
Distance of compression reinforcement from edge	$d_c=c+\Phi_w+0.5\Phi_{Lc}=$	3,50cm

Composite Material Data

Composite Material Modulus of Elasticity	$E_j=$	230,0 GPa
Characteristic value of strength	$f_{jt}=$	3500MPa
Characteristic value of ultimate strain	$\varepsilon_{jtk}=$	1,5%
Thickness of fabric	$t=$	0,17 mm
Width of fabric	$w_j=$	0,50 m
Number of layers of fabric	$n_j=$	3

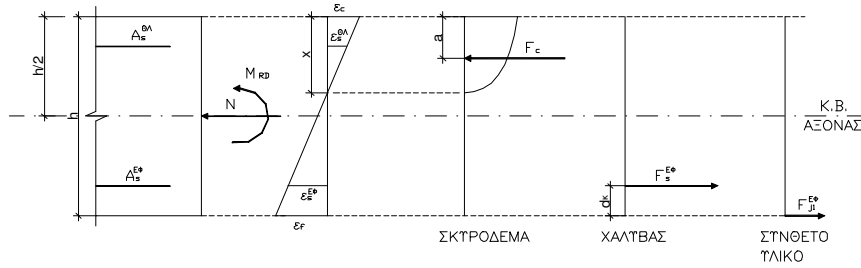


Figure 19: Analysis of section submitted to bending with axial force for the first specimen

Ultimate Limit State

$$\varepsilon_c = -1,5319\text{‰}$$

$$\varepsilon_f = 6,708\text{‰}$$

$$\alpha = \begin{cases} \frac{\varepsilon_c \cdot (6 - \varepsilon_c)}{12}, & \varepsilon_c \leq 0,002 \\ \frac{3 \cdot \varepsilon_c - 2}{3 \cdot \varepsilon_c}, & \varepsilon_c > 0,002 \end{cases} \Rightarrow \alpha = 0,57$$

$$\zeta' = \begin{cases} \frac{8 - \varepsilon_c}{4 \cdot (6 - \varepsilon_c)}, & \varepsilon_c \leq 0,002 \\ \frac{\varepsilon_c \cdot (3 \cdot \varepsilon_c - 4) + 2}{2 \cdot \varepsilon_c \cdot (3 \cdot \varepsilon_c - 2)}, & \varepsilon_c > 0,002 \end{cases} \Rightarrow \zeta' = 0,362$$

$$x = \xi \cdot d = \frac{\varepsilon_c}{(\varepsilon_c + \varepsilon_{s1})} \cdot d \Rightarrow x = 9,30\text{cm}$$

$$a = \zeta' \cdot x \Rightarrow a = 0,0336\text{m}$$

Ultimate Force Value: **F=98,26kN**

$$\varepsilon_{s2} = -0,96\text{‰} \Rightarrow f_{s2} = 191,02$$

$$\varepsilon_{s1} = 6,13\text{‰} \Rightarrow f_{s1} = 500,00$$

$$F_c = \alpha \cdot 0,85 \cdot f_{cd} \cdot x \cdot b \Rightarrow$$

$$F_c = 247,87\text{kN} \quad (\text{concrete})$$

$$F_s = A_s \cdot f_s$$

$$F_{s2} = 58,81\text{kN}$$

(compression steel)

$$F_{s1} = 153,94\text{kN}$$

(tension steel)

$$F_{j1} = 152,74\text{kN}$$

(tension composite material)

$$F_c + F_{s2} - F_{s1} - F_{j1} - N = 0$$

Flexural Strength:

The flexural strength of the FRP strengthened section is calculated:

$$M_{RD} = F_c \cdot (0,5 \cdot h - a) + F_{j1} \cdot 0,5 \cdot h + F_{s1} \cdot (0,5 \cdot h - d_b) + F_{s2} \cdot (0,5 \cdot h - d_t)$$

$$M_{RD} = 137,56\text{ kNm} \quad (M_{(g)} = 63,28\text{ kNm} \quad \& \quad M_{(p)} = 74,28\text{ kNm})$$

The design value of the effective stress σ_{jd} of the new reinforcement is estimated according to the critical stress $\sigma_{j,crit}$ and has to be smaller than the value σ_{jd} corresponding to the worst of the following failure modes:

1. Failure of the Composite Material

The ultimate strain of the composite material is equal to $\varepsilon_{frp,u} = 1,5\%$.

Accordingly, the design value of the effective stress of the new reinforcement is equal to $\sigma_{jd} = f_{jk} / \gamma_m = 3500\text{MPa}$.

(No safety factors were used, since the analysis is based on experimental data.)

2. Early Debonding of the Composite Material

The following approximate relationships are used for this failure mode:

$$\sigma_{j,crit} \cong \beta \frac{\tau_b^{debond.}}{t_j} L_e$$

This failure mode usually occurs simultaneously to the failure of concrete cover of the longitudinal reinforcement at the edge of the strengthening reinforcement.

$$\tau_b^{debond.} \cong f_{ctm} = 2,4MPa$$

$$L_e=155,46mm$$

$$\beta_w=0,816$$

$$\beta_L=1$$

$$L_{av}=1750mm > L_e=155,46mm$$

$$\sigma_{j,cr}=604,00MPa$$

Design Value of effective stress σ_{jd}

The new reinforcement is calculated so that it can undertake in cooperation with the existing reinforcement the tensile forces developed. Approximately, for the calculation of the required section of strengthening reinforcement (A_j) the following relationship can be used:

$$A_j = \frac{\Delta M_{do}}{z \cdot \sigma_{jd}} \Rightarrow \sigma_{jd} = \frac{\Delta M_{do}}{z \cdot A_j}$$

$$\left. \begin{array}{l} M(P)=74,279 \text{ kNm} \\ M(l.d.)=63,28 \text{ kNm} \end{array} \right\} \Rightarrow \Delta M=137,56 \text{ kNm}$$

$$z=0,9 \cdot d_j=0,9 \cdot (h-d+n_j \cdot t_j)=42,30cm$$

$$\sigma_{jd}=326,66MPa$$

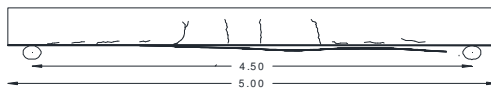
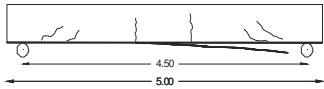
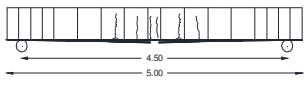
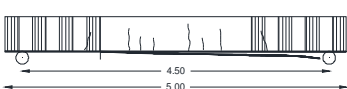


Figure 20: Schematic beam representation after the first test

During the test on the beam with resin IPN the following were observed: initially, small cracks occurred at the edges, then as the load increased, bending cracks showed up at the mid-span and finally there was a debonding of the composite material as the load further increased.

<i>specimen 2:</i>	<i>specimen 3:</i>	<i>specimen 4:</i>
Ultimate Force Value F=181,448783kN	Ultimate Force Value F=213,50kN	Ultimate Force Value F=181,82kN

$M_{RD} = 199,37 \text{ kNm}$ 1. Failure of the Composite Material $\varepsilon_{frp,u} = 1,5\%$ $\sigma_{jd} = f_{jk} / \gamma_m = 3500 \text{ MPa}$ 2. Early Debonding of the Composite Material $\tau_b^{debond.} \cong f_{ctm} = 2,4 \text{ MPa}$ $L_e = 155,46 \text{ mm}$ $\beta_w = 0,816$ $\beta_L = 1$ $L_{av} = 1750 \text{ mm} > L_e = 155,46 \text{ mm}$ $\sigma_{j,cr} = 604,00 \text{ MPa}$ $\Delta M = 199,37 \text{ kNm}$ $z = 0,9 \cdot dj = 0,9 \cdot (h - d + nj \cdot tj) = 42,30 \text{ cm}$ $\sigma_{jd} = 474,26 \text{ MPa}$	$M_{RD} = 223,41 \text{ kNm}$ 1. Failure of the Composite Material $\varepsilon_{frp,u} = 1,2\%$ $\sigma_{jd} = f_{jk} / \gamma_m = 2760 \text{ MPa}$ 2. Early Debonding of the Composite Material $\tau_b^{debond.} \cong f_{ctm} = 2,4 \text{ MPa}$ $L_e = 155,46 \text{ mm}$ $\beta_w = 0,816$ $\beta_L = 1$ $L_{av} = 1750 \text{ mm} > L_e = 155,46 \text{ mm}$ $\sigma_{j,cr} = 604,00 \text{ MPa}$ $\Delta M = 223,41 \text{ kNm}$ $z = 0,9 \cdot dj = 0,9 \cdot (h - d + nj \cdot tj) = 42,30 \text{ cm}$ $\sigma_{jd} = 533,55 \text{ MPa}$	$M_{RD} = 198,87 \text{ kNm}$ 1. Failure of the Composite Material $\varepsilon_{frp,u} = 1,5\%$ $\sigma_{jd} = f_{jk} / \gamma_m = 3500 \text{ MPa}$ 2. Early Debonding of the Composite Material $\tau_b^{debond.} \cong f_{ctm} = 2,4 \text{ MPa}$ $L_e = 155,46 \text{ mm}$ $\beta_w = 0,816$ $\beta_L = 1$ $L_{av} = 1750 \text{ mm} > L_e = 155,46 \text{ mm}$ $\sigma_{j,cr} = 604,00 \text{ MPa}$ $\Delta M = 198,87 \text{ kNm}$ $z = 0,9 \cdot dj = 0,9 \cdot (h - d + nj \cdot tj) = 42,30 \text{ cm}$ $\sigma_{jd} = 476,87 \text{ MPa}$
		

The failure mode of the **2nd specimen** does not differ significantly from the 1st; the only difference was the load increase until the composite material debonding.

The cracks observed during the failure of the **3rd specimen** were primarily of bending type and occurred at the area between the loading positions. Concrete disorganization was observed at the side under tension probably due to the presence of FRP anchors. At this test no debonding happened but the failure was due to the composite material rupture at the mid-span.

The **4th specimen** with U-shape ties failed due to composite material debonding. A lot of bending cracks occurred at the area between the loading positions.

In chapter 6, a FRP strengthened RC slab is calculated.

Slab Data

Slab unit width	b=	1,00 m
-----------------	----	--------

Slab height	h=	0,16 m
Tension reinforcement	Φ8	/17
Concrete		C22
Steel		S500
Steel Modulus of Elasticity	E	200 GPa
Effective slab height	d=	0,136 m
Internal forces level arm	z=	0,122 m
Concrete cover	c=	2,0 cm
Longitudinal reinforcement diameter	Φ _L =	8

A strip of 0,50m width is applied to every 1,00m of slab width.

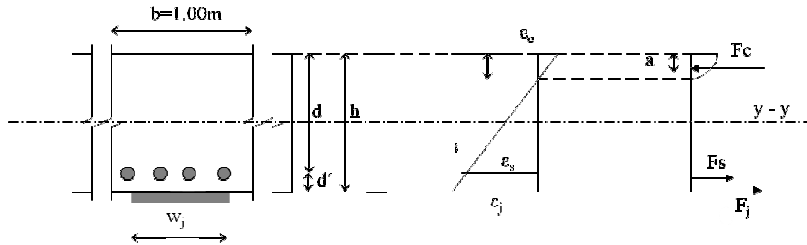


Figure 21: Analysis of section submitted to bending with axial force

Flexural Strength:

The flexural strength of the FRP strengthened section is calculated:

$$M_{RD} = F_c \cdot (0,5 \cdot h - a) + F_{j1} \cdot 0,5 \cdot h + F_{s1} \cdot (0,5 \cdot h - d_b) + F_{s2} \cdot (0,5 \cdot h - d_t)$$

$$M_{RD} = 62,52 \text{ kNm}$$

Calculation of the Section Flexural Strength using the CEB tables without taking into consideration the composite material jacket

$$M_{Rd} = 22,79 \text{ kNm}$$

174,36% increase of the flexural strength.

Calculation of the flexural strength according to the provisions of the Greek Assessment & Retrofitting Code

1. Failure of the Composite Material

$$\varepsilon_{frp,u} = 1,5\% \quad \sigma_{jd} = f_{jk} / \gamma_m = 3500 \text{ MPa}$$

2. Early Debonding of the Composite Material

$$L_e = 94,27 \text{ mm} \quad \beta_w = 1 \quad \beta_L = 1 \quad \sigma_{j,cr} = 1219,93 \text{ MPa}$$

Design Value of Effective Stress σ_{jd}

$$z = 0,9 \cdot d_j = 0,9 \cdot (h - d + n_j \cdot t_j) = 42,30 \text{ cm}$$

The area of the strengthening reinforcement section is equal to:

$$A_j = n \cdot t_f \cdot b_f = 170 \text{ mm}^2$$

The additional moment value for the strengthened section is equal to:

$$\Delta M_o = 21,15 \text{ kNm}$$

$$\sigma_{j,il} = 533,55 \text{ MPa}$$

Consequently, the total moment value that the strengthened slab can undertake is equal to: $M_{Rd}=43,94\text{kNm}$
92,83% increase of the flexural strength.

In chapter 7, in order to provide more complete and proper results, two groups of pull-out tests were conducted:

- a. Four pull-out tests (two for each resin type applied) at the beams tested previously.
- b. Six cubic specimens were constructed (three of them containing resin IPN and the other three epoxy resin) and three tests were conducted for each of them.

Tests Results for the Beams

Resin IPN: 1st test: 0,52 MPa

2nd test: 0,50 MPa

Mean value of debonding stress: **0,51 MPa**

Epoxy Resin: 1st test: 1,80 MPa

2nd test: 1,12 MPa

Mean value of debonding stress: **1,46 MPa**

Tests Results for the Cubic Specimens

Resin IPN:

a) 1st Cubic Specimen

1st test: 2,97 MPa

2nd test: 2,66 MPa

3rd test: 2,37 Mpa

b) 2nd Cubic Specimen

1st test: 2,21 MPa

2nd test: 2,98 MPa

3rd test: 2,60 MPa

c) 3rd Cubic Specimen

1st test: 2,38 MPa

2nd test: 2,60 Mpa

3rd test: 2,03 MPa

Mean Value of Debonding Stress:

2,54 MPa

Epoxy Resin RCO:

a) 4th Cubic Specimen

1st test: 1,77 MPa

2nd test: 3,56 MPa

3rd test: 1,40 Mpa

b) 5th Cubic Specimen

1st test: 4,05 MPa

2nd test: 1,11 MPa

3rd test: 1,47 Mpa

c) 6th Cubic Specimen

1st test: 2,81 MPa

2nd test: 0,75 MPa (not considered)

3rd test: 0,67 MPa (not considered)

Mean Value of Debonding Stress:

2,31 MPa

It is worth noting that in the first series of experiments, where the beams were exposed long enough to weather conditions, the debonding stress of resin IPN was much lower than the debonding stress of the epoxy resin RCO, while in the second series of experiments, conducted in cubic specimens, things were reversed, namely the debonding stress of resin IPN is greater than debonding stress of the epoxy resin RCO.

Tests results along with the values calculated according to the Greek Assessment & Retrofitting Code are presented below.

1st test

Code	Beam pull-out tests	Cubic Specimen pull-out tests
$\tau_b^{debond.} \cong f_{ctm} = 2,4MPa$	$\tau_b^{debond.} = 0,51MPa$	$\tau_b^{debond.} = 2,54MPa$
$L_e = \sqrt{\frac{E_j \cdot t_j}{2 \cdot f_{ctm}}} = 155,46mm < L_{av}$	$L_e = \sqrt{\frac{E_j \cdot t_j}{2 \cdot f_{ctm}}} = 334,09mm < L_{av}$	$L_e = \sqrt{\frac{E_j \cdot t_j}{2 \cdot f_{ctm}}} = 149,70mm < L_{av}$
$\beta_w = \sqrt{\frac{2 - b_j / b_w}{1 + b_j / b_w}} = 0,816$	$\beta_w = \sqrt{\frac{2 - b_j / b_w}{1 + b_j / b_w}} = 0,816$	$\beta_w = \sqrt{\frac{2 - b_j / b_w}{1 + b_j / b_w}} = 0,816$
$\beta_L = \sin\left(\frac{\pi\lambda}{2}\right) \cong \lambda \cdot (2 - \lambda) = 1$	$\beta_L = \sin\left(\frac{\pi\lambda}{2}\right) \cong \lambda \cdot (2 - \lambda) = 1$	$\beta_L = \sin\left(\frac{\pi\lambda}{2}\right) \cong \lambda \cdot (2 - \lambda) = 1$
$\sigma_{j, crit} \cong \beta \frac{\tau_b^{αποκ.}}{t_j} L_e = 604,00MPa$	$\sigma_{j, crit} \cong \beta \frac{\tau_b^{αποκ.}}{t_j} L_e = 281,05MPa$	$\sigma_{j, crit} \cong \beta \frac{\tau_b^{αποκ.}}{t_j} L_e = 627,22MPa$
$\sigma_{jd} = \frac{\Delta M_{do}}{z \cdot A_j} = 326,66MPa$	$\sigma_{jd} = \frac{\Delta M_{do}}{z \cdot A_j} = 326,66MPa$	$\sigma_{jd} = \frac{\Delta M_{do}}{z \cdot A_j} = 326,66MPa$

Table 1: Comparative Table of Results for the 1st test

2nd test

Code	Beam pull-out tests	Cubic Specimen pull-out tests
$\tau_b^{debond.} \cong f_{ctm} = 2,4MPa$	$\tau_b^{debond.} = 1,46MPa$	$\tau_b^{debond.} = 2,31MPa$
$L_e = \sqrt{\frac{E_j \cdot t_j}{2 \cdot f_{ctm}}} = 155,46mm < L_{av}$	$L_e = \sqrt{\frac{E_j \cdot t_j}{2 \cdot f_{ctm}}} = 197,46mm < L_{av}$	$L_e = \sqrt{\frac{E_j \cdot t_j}{2 \cdot f_{ctm}}} = 156,98mm < L_{av}$
$\beta_w = \sqrt{\frac{2 - b_j / b_w}{1 + b_j / b_w}} = 0,816$	$\beta_w = \sqrt{\frac{2 - b_j / b_w}{1 + b_j / b_w}} = 0,816$	$\beta_w = \sqrt{\frac{2 - b_j / b_w}{1 + b_j / b_w}} = 0,816$
$\beta_L = \sin\left(\frac{\pi\lambda}{2}\right) \cong \lambda \cdot (2 - \lambda) = 1$	$\beta_L = \sin\left(\frac{\pi\lambda}{2}\right) \cong \lambda \cdot (2 - \lambda) = 1$	$\beta_L = \sin\left(\frac{\pi\lambda}{2}\right) \cong \lambda \cdot (2 - \lambda) = 1$
$\sigma_{j, crit} \cong \beta \frac{\tau_b^{αποκ.}}{t_j} L_e = 604,00MPa$	$\sigma_{j, crit} \cong \beta \frac{\tau_b^{αποκ.}}{t_j} L_e = 475,53MPa$	$\sigma_{j, crit} \cong \beta \frac{\tau_b^{αποκ.}}{t_j} L_e = 598,15MPa$
$\sigma_{jd} = \frac{\Delta M_{do}}{z \cdot A_j} = 474,26MPa$	$\sigma_{jd} = \frac{\Delta M_{do}}{z \cdot A_j} = 474,26MPa$	$\sigma_{jd} = \frac{\Delta M_{do}}{z \cdot A_j} = 474,26MPa$

Table 2: Comparative Table of Results for the 2nd test

3rd test

Code	Beam pull-out tests	Cubic Specimen pull-out tests
$\tau_b^{debond.} \cong f_{ctm} = 2,4MPa$	$\tau_b^{debond.} = 1,46MPa$	$\tau_b^{debond.} = 2,31MPa$
$L_e = \sqrt{\frac{E_j \cdot t_j}{2 \cdot f_{ctm}}} = 155,46mm < L_{av}$	$L_e = \sqrt{\frac{E_j \cdot t_j}{2 \cdot f_{ctm}}} = 197,46mm < L_{av}$	$L_e = \sqrt{\frac{E_j \cdot t_j}{2 \cdot f_{ctm}}} = 156,98mm < L_{av}$
$\beta_w = \sqrt{\frac{2 - b_j / b_w}{1 + b_j / b_w}} = 0,816$	$\beta_w = \sqrt{\frac{2 - b_j / b_w}{1 + b_j / b_w}} = 0,816$	$\beta_w = \sqrt{\frac{2 - b_j / b_w}{1 + b_j / b_w}} = 0,816$
$\beta_L = \sin\left(\frac{\pi\lambda}{2}\right) \cong \lambda \cdot (2 - \lambda) = 1$	$\beta_L = \sin\left(\frac{\pi\lambda}{2}\right) \cong \lambda \cdot (2 - \lambda) = 1$	$\beta_L = \sin\left(\frac{\pi\lambda}{2}\right) \cong \lambda \cdot (2 - \lambda) = 1$
$\sigma_{j, crit} \cong \beta \frac{\tau_b^{\alpha_{\text{ποκ.}}}}{t_j} L_e = 604,00MPa$	$\sigma_{j, crit} \cong \beta \frac{\tau_b^{\alpha_{\text{ποκ.}}}}{t_j} L_e = 475,53MPa$	$\sigma_{j, crit} \cong \beta \frac{\tau_b^{\alpha_{\text{ποκ.}}}}{t_j} L_e = 598,15MPa$
$\sigma_{jd} = \frac{\Delta M_{do}}{z \cdot A_j} = 533,55MPa$	$\sigma_{jd} = \frac{\Delta M_{do}}{z \cdot A_j} = 533,55MPa$	$\sigma_{jd} = \frac{\Delta M_{do}}{z \cdot A_j} = 533,55MPa$

Table 3: Comparative Table of Results for the 3rd test**4th test**

Code	Beam pull-out tests	Cubic Specimen pull-out tests
$\tau_b^{debond.} \cong f_{ctm} = 2,4MPa$	$\tau_b^{debond.} = 1,46MPa$	$\tau_b^{debond.} = 2,31MPa$
$L_e = \sqrt{\frac{E_j \cdot t_j}{2 \cdot f_{ctm}}} = 155,46mm < L_{av}$	$L_e = \sqrt{\frac{E_j \cdot t_j}{2 \cdot f_{ctm}}} = 197,46mm < L_{av}$	$L_e = \sqrt{\frac{E_j \cdot t_j}{2 \cdot f_{ctm}}} = 156,98mm < L_{av}$
$\beta_w = \sqrt{\frac{2 - b_j / b_w}{1 + b_j / b_w}} = 0,816$	$\beta_w = \sqrt{\frac{2 - b_j / b_w}{1 + b_j / b_w}} = 0,816$	$\beta_w = \sqrt{\frac{2 - b_j / b_w}{1 + b_j / b_w}} = 0,816$
$\beta_L = \sin\left(\frac{\pi\lambda}{2}\right) \cong \lambda \cdot (2 - \lambda) = 1$	$\beta_L = \sin\left(\frac{\pi\lambda}{2}\right) \cong \lambda \cdot (2 - \lambda) = 1$	$\beta_L = \sin\left(\frac{\pi\lambda}{2}\right) \cong \lambda \cdot (2 - \lambda) = 1$
$\sigma_{j, crit} \cong \beta \frac{\tau_b^{\alpha_{\text{ποκ.}}}}{t_j} L_e = 604,00MPa$	$\sigma_{j, crit} \cong \beta \frac{\tau_b^{\alpha_{\text{ποκ.}}}}{t_j} L_e = 475,53MPa$	$\sigma_{j, crit} \cong \beta \frac{\tau_b^{\alpha_{\text{ποκ.}}}}{t_j} L_e = 598,15MPa$
$\sigma_{jd} = \frac{\Delta M_{do}}{z \cdot A_j} = 476,87MPa$	$\sigma_{jd} = \frac{\Delta M_{do}}{z \cdot A_j} = 476,87MPa$	$\sigma_{jd} = \frac{\Delta M_{do}}{z \cdot A_j} = 476,87MPa$

Table 4: Comparative Table of Results for the 4th test**final conclusions:**

- As shown at the load-deflection diagram below, the FRP application led to the increase of beams' strength and stiffness. Although all four beams had three layers of FRP BETONTEX GV330-U-HT, it has been observed that different resin and anchorage significantly influence beams' strength and stiffness.

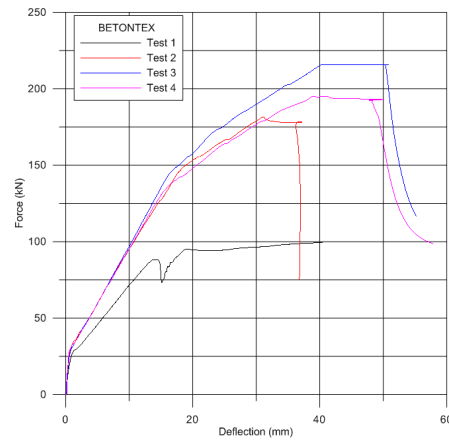


Figure 22: Load-Deflection diagram of four beams

- Before using the Code's equations to analyze a strengthening system, material tests should be conducted (concrete, resin, FRPs), on materials similar to those that will be used during the retrofitting procedure. The required tests are those conducted at the laboratory, which resulted in the exact values that were used at the calculations.
- The composite material debonding from the strengthened element surface is not an acceptable failure mode, since thereby we do not take advantage of its entire strength, while this is a prerequisite for the design. When debonding occurs, retrofitting does not provide the strength calculated with the analytical models offered by the Code.

Βιβλιογραφία

-
- [1] **P. Alagusundaramoorthy, I.E. Harik, M. ASCE, C.C Choo**, "Flexural Behavior of R/C Beams Strengthened with Carbon Fiber Reinforced Polymer Sheets or Fabric", *Journal of Composites for Construction*, Vol. 7, No.4, November 1, 2003: 292-301
- [2] **Koji Takeda, Yoshiyuki Mitsui and Kiyoshi Murakami, Hiromichi Sakai and Moriyasu Nakamura** "Flexural Behavior of reinforced concrete Beams Strengthened with Carbon Fiber Sheets" Elsevier Science, Limited Composites Part A 27A (1996) 981-987
- [3] **Hee Sun Kim, Yeong Soo Shin (2010)** "Flexural Behavior of reinforced concrete (RC) beams retrofitted with hybrid fiber reinforced polymers (FRPs) under sustaining loads"
- [4] **Tom Norris, Hamid Saadatmanesh & Mohammad R. Ehsani (Members ASCE) (1997)** "Shear and Flexural Strengthening of R /C Beams with Carbon Fiber Sheets" *J. Struct. Engrg*, Vol. 123, No.7, July, 1997 903-911
- [5] **C.B.Demakos & G. Dimitrakis** "On the Effect of FRP Sheet Composite Anchorage to Flexural Behavior of Reinforced Concrete Beams"
- [6] **Κωνσταντίνος Σπυράκος**, "Ενίσχυση κατασκευών για σεισμικά φορτία" T.E.E 2004
- [7] **Daniel Gay, Suong V. Hoa, Stephen W. Tsai** "Composite Materials Design and Applications", CRC PRESS Boca Raton London New York Washington, D.C.
- [8] **ACI 440.3R - 04**, "Guide Test Methods for Fiber-Reinforced Polymers (FRPs) for Reinforcing or Strengthening Concrete Structures", Reported by ACI Committee 440
- [9] **Διπλωματική Εργασία Παν. Θεσσαλίας Τμ. Πολιτικών Μηχανικών**, "Θεωρητική διερεύνηση εφαρμογής ινοπλισμένων πολυμερών στην περίσφιγξη κυλίνδρων σκυροδέματος", Αγγελική Παπαϊωάννου (Επίκουρο Καθηγήτρια Μ. Μωρέττη), 2008

-
- [10] **Διπλωματική Εργασία Ε.Μ.Π.** “Ενίσχυση Δομικών Στοιχείων από Οπλισμένο Σκυρόδεμα και Φέρουσα Τοιχοποιία με Ινοπλισμένα Πολυμερή – Συγκριτική Μελέτη” Μαρία Παπαδοπούλου (Καθηγητής Κ. Σπυράκος), 2010
- [11] **Ιωάννης Ραυτογιάννης** “Σύνθετα υλικά”, Αθήνα 2009
- [12] **Fib bulletin 2001**, Task Group 9.3: Externally bonded FRP reinforcement for RC structures
- [13] **Κανονισμός επεμβάσεων (ΚΑΝΕΠΕ)**, Τελικό σχέδιο κειμένου – 3 (Φεβρουάριος 2011)
- [14] **Ε. Κ. Ω. Σ. 2000**, Ο.Α.Σ.Π
- [15] **Ε. Α.Κ. 2000**, Ο.Α.Σ.Π.
- [16] **SP Guide to Composites.**
- [17] **Αθανάσιος Καραμπίνης** , **Σταυρούλα Πανταζοπούλου**, “Χρήση των σύνθετων υλικών στο σχεδιασμό και την ενίσχυση στοιχείων Ο.Σ.” Τεχνικά Χρον. Επιστ. Έκδοση Τ.Ε.Ε., Ι τεύχος 3 (2000)
- [18] **Αθανάσιος Τριανταφύλλου** “Ενισχύσεις κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος με σύνθετα υλικά”, Πάτρα 2004, 2' έκδοση
- [19] **CNR-DT 200/2004**, Advisory committee on technical recommendations for construction
- [20] **Στέφανος Δρίτσος** “Επισκευές και ενισχύσεις κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα”, Πάτρα 2005