



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ ΚΑΙ ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΡΓΩΝ ΥΠΟΔΟΜΗΣ ΚΑΙ ΑΓΡΟΤΙΚΗΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΔΟΜΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ

**ΚΑΛΩΔΙΩΤΗ ΠΕΖΟΓΕΦΥΡΑ ΜΕ ΚΑΤΑΣΤΡΩΜΑ ΑΠΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ ΜΕ
ΟΠΛΙΣΜΟ FRP: ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΠΛΑΚΑΣ ΚΑΤΑΣΤΡΩΜΑΤΟΣ ΣΥΜΦΩΝΑ ΜΕ
ΤΙΣ ΑΡΧΕΣ ΤΟΥ ΕΥΡΩΚΩΔΙΚΑ 2**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
Κοβεντάρου Ελένη

Επιβλέπων: Καττής Μαρίνος
Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π

ΑΘΗΝΑ, ΜΑΡΤΙΟΣ 2008

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ	3
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΤΑ ΣΥΝΘΕΤΑ ΠΟΛΥΜΕΡΗ ΥΛΙΚΑ, Η ΕΞΕΛΙΞΗ ΚΑΙ ΟΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΟΥΣ	
1.1 Γενικά	5
1.2 Τα Υλικά FRP στις Δομικές Κατασκευές από Οπλισμένο Σκυρόδεμα	7
1.3 Μηχανικές Ιδιότητες των FRP και Σύγκρισή τους με αυτές του Χάλυβα	8
1.4 Οι Πρώτες Πιλοτικές Κατασκευές με Οπλισμό FRP	11
1.5 Ανάλυση Κόστους	14
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΟΙ ΟΡΙΑΚΕΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΚΑΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΟΤΗΤΑΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΜΕ ΟΠΛΙΣΜΟ FRP, ΣΥΜΦΩΝΑ ΜΕ ΤΙΣ ΑΡΧΕΣ ΤΟΥ EC2	
2.1 Οι Βασικές Αρχές και Παραδοχές της Ανάλυσης και του Σχεδιασμού Δομικών Στοιχείων Οπλισμένου Σκυροδέματος με την Θεωρία των Οριακών Καταστάσεων	16
2.2 Η Οριακή Κατάσταση Καμπτικής Αντοχής	19
2.3 Η Οριακή Κατάσταση Λειτουργικότητας	29
2.4 Κατασκευαστικές Λεπτομέρειες	35
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΟΙ ΟΡΙΑΚΕΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΚΑΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΟΤΗΤΑΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΜΕ ΟΠΛΙΣΜΟ FRP, ΣΥΜΦΩΝΑ ΜΕ ΤΟΝ ΚΩΔΙΚΑ ΤΟΥ ACI	
3.1 Οι Βασικές Αρχές και Παραδοχές της Ανάλυσης και του Σχεδιασμού Δομικών Στοιχείων Σκυροδέματος με τη Θεωρία των Οριακών Καταστάσεων	37
3.2 Η Οριακή Κατάσταση Καμπτικής Αντοχής	39
3.3 Η Οριακή Κατάσταση Λειτουργικότητας	42
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΤΑΣΤΡΩΜΑΤΟΣ ΠΕΖΟΓΕΦΥΡΑΣ ΑΠΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ ΜΕ ΟΠΛΙΣΜΟ FRP, ΣΥΜΦΩΝΑ ΜΕ ΤΙΣ ΑΡΧΕΣ ΤΟΥ EC2	
4.1 Αρχιτεκτονική Περιγραφή της Κατασκευής	45
4.2 Προσομοίωση και Στατική Ανάλυση του Δομικού Συστήματος	46

4.3	Ανάλυση της Οριακής Κατάστασης Αντοχής του Δομικού Συστήματος	52
4.4	Ανάλυση της Οριακής Κατάστασης Λειτουργικότητας του Δομικού Συστήματος	57
	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	67
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	68
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α	71
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β	74

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η διάβρωση των ράβδων χάλυβα, κατά τη χρήση τους ως οπλισμός σε κατασκευές από σκυρόδεμα, αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα μειονεκτήματά τους, αναφορικά με την ανθεκτικότητα των κατασκευών αυτών. Έτσι, είναι αναγκαία η συντήρηση των δομικών κατασκευών, που υπόκεινται συχνά σε συνθήκες υψηλής υγρασίας, λόγω των έντονων καιρικών φαινομένων, το κόστος της οποίας είναι ιδιαίτερα υψηλό.

Το πρόβλημα της διάβρωσης φαίνεται να αντιμετωπίζεται αποτελεσματικά με τη χρήση ενός νέου οπλισμού στις κατασκευές σκυροδέματος, που είναι γνωστός ως οπλισμός FRP. Τα υλικά από FRP παρουσιάζουν μεγάλες διαφορές στις ιδιότητές τους συγκριτικά με τον χάλυβα. Όπως είναι λογικό, για την παγίωση τους στο χώρο των κατασκευών, είναι απαραίτητη η έρευνα για τον έλεγχο της ανθεκτικότητάς τους κάτω από όλες τις πιθανές χημικές και φυσικές καταπονήσεις, τις οποίες ενδέχεται να αντιμετωπίσει μια κατασκευή. Ταυτόχρονα, η είσοδος του νέου αυτού υλικού στη δομική βιομηχανία, κυρίως σε χώρες όπως η Ιαπωνία, οι Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής, ο Καναδάς και κάποιες Ευρωπαϊκές, έχει θέσει επιτακτικά την ανάγκη ανάπτυξης της απαραίτητης τεχνογνωσίας για την ασφαλή χρήση του στην πράξη. Έτσι, οι αρμόδιοι κρατικοί φορείς στις χώρες που προαναφέρθηκαν, πανεπιστήμια και ερευνητικά κέντρα, που ασχολούνται με το σκυρόδεμα σε όλες σχεδόν τις χώρες του κόσμου, έχουν θέσει ως άμεση ερευνητική προτεραιότητα την διασαφήνιση της μηχανικής συμπεριφοράς, τόσο του νέου αυτού οπλισμού, όσο και των δομικών στοιχείων σκυροδέματος που οπλίζει.

Παρόλο που η έρευνα στο πεδίο των FRP είναι πολύ πρόσφατη, η Ιαπωνική Ένωση Πολιτικών Μηχανικών JSCE (JSCE Recommendations for the Design and Construction of Fiber Reinforced Materials - JSCE 1997), το Αμερικάνικο Ινστιτούτο Σκυροδέματος ACI (ACI 440.IR), η Καναδική Ένωση Προτύπων, το Καναδικό δίκτυο ISIS (ISIS Design Manual 3) και το Ινστιτούτο των Δομικών Μηχανικών του Ηνωμένου Βασιλείου (Interim Guidance of the Design of Reinforcing Concrete structures using FRP CIStruct), έχουν αναπτύξει την “πρώτη γενιά” οδηγιών σχεδιασμού για κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα με οπλισμό FRP. Πέρα από τις παραπάνω ενώσεις, πρόσφατα η Ιταλία και η Αίγυπτος (Egyptian Ministry of Housing, Utilities, and Urban Development 2005), έχουν αναπτύξει τις δικές τους οδηγίες και συστάσεις για την χρήση του οπλισμού αυτού σε κατασκευές σκυροδέματος. Όλες οι παραπάνω οδηγίες στηρίζονται σε ήδη υπάρχοντες κανονισμούς που αφορούν στις κατασκευές με οπλισμό από χάλυβα.

Η προβλεπόμενη δυναμική είσοδος του οπλισμού αυτού στη δομική βιομηχανία της χώρας μας, θέτει άμεσα και επιτακτικά στους εμπλεκόμενους φορείς, δηλαδή στα Πανεπιστήμια, ερευνητικά κέντρα και πολιτεία, τη διαμόρφωση του απαραίτητου θεσμικού πλαισίου για τη σωστή χρήση αυτού του νέου οπλισμού στην πράξη. Επίσης, καλεί τους σχετικούς ερευνητικούς φορείς καθώς και τα ερευνητικά εργαστήρια των Πανεπιστημίων, να συμπεριλάβουν στην ερευνητική τους δραστηριότητα τα υλικά FRP και να συνεισφέρουν στην περαιτέρω ανάπτυξη της απαραίτητης τεχνογνωσίας και στην κωδικοποίηση της ήδη αναπτυχθείσας γνώσης, σε οδηγίες και

κανονισμούς για τους μηχανικούς της πράξης. Στην κατεύθυνση αυτή, η ομάδα της δομικής μηχανικής του Εργαστηρίου Δομικής Μηχανικής και Στοιχείων Τεχνικών Έργων της ΣΑΤΜ του ΕΜΠ, τα τελευταία χρόνια, έχει αναπτύξει μία έντονη και συνεχή ερευνητική δραστηριότητα πάνω στο νέο αυτό οπλισμό. Βασικό αντικείμενο της δραστηριότητας αυτής, είναι η θεωρητική και πειραματική διερεύνηση ορισμένων βασικών ζητημάτων που αφορούν στη μηχανική συμπεριφορά δομικών στοιχείων σκυροδέματος με οπλισμό FRP και την ανάπτυξη ενός πλαισίου αρχών που θα διέπει τη εφαρμογή του οπλισμού αυτού στην Ελλάδα. Παράλληλα, το εργαστήριο αυτό πήρε την πρωτοβουλία για την συγκρότηση ερευνητικής ομάδας για τη διαμόρφωση πρότασης για τη μελέτη και κατασκευή της πρώτης πιλοτικής εφαρμογής του οπλισμού αυτού στην Ελλάδα. Το πιλοτικό αυτό έργο επιλέχθηκε να είναι μία πεζογέφυρα σε Δήμο της Αττικής, Στην πρόταση αυτή θα συμπεριλαμβάνεται η σύνταξη ενός προσχεδίου κανονισμού εφαρμογής του οπλισμού αυτού στην Ελλάδα, όπως ήδη έχει γίνει σε πολλές άλλες χώρες.

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας αποτελεί ο προκαταρκτικός σχεδιασμός της πλάκας καταστρώματος της πεζογέφυρας της παραπάνω πρότασης, με εφαρμογή των βασικών οδηγιών που έχει μέχρι σήμερα αναπτύξει το Εργαστήριο Δομικής Μηχανικής της ΣΑΤΜ του ΕΜΠ. Για λόγους σύγκρισης, σε άλλη διπλωματική εργασία, ο σχεδιασμός του καταστρώματος γίνεται με εφαρμογή του κώδικα ACI 44.1 R-03, 2003 που ήδη βρίσκεται σε εφαρμογή στην Αμερική.

Επίσης, στην παρούσα εργασία, πριν την ανάλυση και τον σχεδιασμό του καταστρώματος της πεζογέφυρας, γίνεται μία συνοπτική και συστηματική παρουσίαση των βασικών οδηγιών που έχει αναπτύξει το Εργαστήριο Δομικής Μηχανικής για τον σχεδιασμό κατασκευών από ράβδους FRP καθώς και των αντίστοιχων οδηγιών του ACI 44.1 R-03, 2003. Το αποτέλεσμα αυτό, αποτελεί την προσαρμογή της μεθόδου των οριακών καταστάσεων που έχει αναπτυχθεί διεθνώς για τα FRP στην φιλοσοφία των Ευρωκωδίκων.

Η δομή της διπλωματικής εργασίας έχει ως ακολούθως: Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μία παρουσίαση της ιστορικής αναδρομής της εξέλιξης των σύνθετων υλικών και των εφαρμογών τους στη δομική βιομηχανία. Στο κεφάλαιο αυτό, ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στη εφαρμογή του οπλισμού FRP σε έργα γεφυροποιίας, στην ανάπτυξη των κωδίκων και κανονισμών στις διάφορες χώρες, καθώς και στη σύγκριση του κόστους του νέου αυτού οπλισμού με τον οπλισμό από χάλυβα. Στο δεύτερο και τρίτο κεφάλαιο γίνεται μία συστηματική και κριτική παρουσίαση των βασικών αρχών σχεδιασμού κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος με οπλισμό FRP, που έχει αναπτυχθεί από το Εργαστήριο Δομικής Μηχανικής της ΣΑΤΜ του ΕΜΠ, καθώς επίσης και των αντίστοιχων αρχών που περιέχονται στον κώδικα ACI 44.1 R-03, 2003. Στο τέταρτο κεφάλαιο γίνεται η αρχιτεκτονική παρουσίαση της πεζογέφυρας, η περιγραφή του δομικού συστήματος και η ανάλυση και ο σχεδιασμός του καταστρώματός της. Στο πέμπτο κεφάλαιο, συνοψίζονται τα συμπεράσματα που έχουν προκύψει από την παραπάνω μελέτη.

1 ΤΑ ΣΥΝΘΕΤΑ ΠΟΛΥΜΕΡΗ ΥΛΙΚΑ, Η ΕΞΕΛΙΞΗ ΚΑΙ ΟΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΟΥΣ

1.1 Γενικά

Τα σύνθετα υλικά έχουν προκύψει ως αποτέλεσμα της ανάπτυξης της γνώσης της τεχνολογίας των υλικών και της ανάγκης σχεδιασμού υλικών με βάση τις ανάγκες που καθορίζουν οι εκάστοτε υψηλών απαιτήσεων εφαρμογές. Δύο ή περισσότερα διακριτά υλικά μπορούν να συνδυαστούν σχηματίζοντας ένα σύνθετο υλικό, το οποίο να κατέχει βελτιωμένες ιδιότητες σε σχέση με τις ιδιότητες των συστατικών υλικών του για ένα συγκεκριμένο πεδίο εφαρμογών.

Ένας τύπος σύνθετου υλικού είναι τα FRP (Fiber Reinforced Polymers), τα οποία αποτελούνται από μία δέσμη ινών που είναι ενσωματωμένη σε μία μήτρα ρητίνης. Ο όρος FRP περιγράφει μια ομάδα υλικών τα οποία κατασκευάζονται από συνθετικές και οργανικές ίνες συγκολλημένες με ρητίνη. Οι ίνες, οι οποίες αναλαμβάνουν κυρίως εφελκυστικές τάσεις παράλληλα στη διεύθυνση τους, είναι εμποτισμένες με κάποιο θερμοσκληρυνόμενο πολυμερές (εποξειδική ρητίνη, πολυεστέρας κ.α.). Οι πιο συνηθισμένες κατηγορίες αυτού του σύνθετου υλικού είναι τα FRP από άνθρακα (CFRP), από αραμίδιο (AFRP) και από γυαλί (GFRP). Οι ίνες παρέχουν αντοχή και ακαμψία στο σύνθετο υλικό και γενικά φέρουν τα περισσότερα από τα εφαρμοζόμενα φορτία. Η μήτρα ενεργεί κατά τέτοιο τρόπο ώστε να συνδέει και να προστατεύει τις ίνες καθώς και να φροντίζει για τη μεταφορά της τάσης από ίνα σε ίνα μέσω διατμητικών τάσεων.

Παρατηρούμε λοιπόν ότι στη δημιουργία σύνθετων υλικών, ένα άκαμπτο, ανθεκτικό και υψηλής αντοχής υλικό, εμβαπτίζεται σε ένα εύκαμπτο και πλαστικό υλικό. Το πρώτο, αποτελεί τον «οπλισμό» και λειτουργεί ως φορέας παραλαβής των φορτίων, ενώ το δεύτερο αποτελεί τη μήτρα που προσδίδει συνοχή στο σύνθετο υλικό και μεταβιβάζει τα ασκούμενα φορτία στον οπλισμό [1].

Η ιδέα για κατασκευή κτιρίων με σύνθετα υλικά προϋπήρχε από τα αρχαία χρόνια. Πολιτισμοί σε όλο τον κόσμο έχουν χρησιμοποιήσει βασικά στοιχεία του περιβάλλοντα χώρου στη δημιουργία οικημάτων, συμπεριλαμβανομένης της λάσπης (ίλυς), του άχυρου, του ξύλου και του πηλού (άργιλος). Οι πλίνθοι κατασκευάζονταν από λάσπη και άχυρο, με τη λάσπη να ενεργεί όπως η ρητίνη στη σύνθετη κατασκευή FRP και το άχυρο να ενεργεί ως «οπλισμός». Ο «οπλισμός» αυτός συγκρατεί την πλίνθο αρηγμάτωση κατά τη διάρκεια της διαδικασίας ξήρανσης και συστολής του [1].

Ενώ η ιδέα των σύνθετων υλικών υπήρχε για αρκετές χιλιετίες, η ένταξη της τεχνολογίας των σύνθετων FRP στον βιομηχανικό κόσμο έγινε περίπου πριν από έναν αιώνα. Τα υλικά αυτά εμφανίστηκαν στο προσκήνιο αμέσως μετά το 1900, με τη χημική βιομηχανία να κάνει μεγάλα βήματα ώστε να δημιουργήσει πλαστικά υλικά από ίνες (βινύλιο, πολυεστέρας και ίνες

γυαλιού), με υψηλότερη αντοχή, μεγαλύτερη ακαμψία και μικρότερη πυκνότητα. Η ραγδαία ανάπτυξή τους οφείλεται κυρίως στις μεγάλες ανάγκες που δημιουργήθηκαν στην αεροναυπηγική για την εξερεύνηση του διαστήματος [10].

Με κίνητρο τις ανάγκες της ηλεκτρονικής και αμυντικής τεχνολογίας και των τεχνολογιών του διαστήματος, οι ερευνητές δημιούργησαν προϊόντα από τα υλικά αυτά με ιδιαίζουσες ιδιότητες, όπως το αλεξίσφαιρο γιλέκο Kavelan. Το πρώτο γνωστό προϊόν με υλικά FRP ήταν ένα κάλυμμα βάρκας, το οποίο κατασκευάστηκε στα μέσα της δεκαετίας του 1930 [34].

Από αυτή την αφετηρία, οι εφαρμογές των σύνθετων υλικών FRP δημιούργησαν στη συνέχεια ένα επαναστατικό κύμα στη δομική βιομηχανία. Τα σύνθετα υλικά FRP κάνουν ουσιαστικά την εμφάνισή τους στις αρχές της δεκαετίας του 1940, με εφαρμογές κυρίως στην αεροναυπηγική και στο πολεμικό ναυτικό. Η αεροπορία και το ναυτικό των Ηνωμένων Πολιτειών Αμερικής επένδυσαν σε σύνθετα FRP, με υψηλό λόγο αντοχής βάρους, και με μεγάλη αντοχή σε περιβάλλον διάβρωσης, όπως είναι οι καιρικές συνθήκες, η θάλασσα και γενικά το υφάλμυρο περιβάλλον. Από το 1945 και μετά, πάνω από 3.2 εκατομμύρια kg από ίνες γυαλιού χρησιμοποιήθηκαν σε στρατιωτικές εφαρμογές [34].

Σύντομα, τα οφέλη των FRP, ιδιαίτερα των ικανοτήτων αντοχής τους στη διάβρωση, έγιναν ευρέως γνωστά. Σωλήνες από ίνες γυαλιού, για παράδειγμα, πρωτοεμφανίστηκαν το 1948 και χρησιμοποιήθηκαν ευρέως από τις πετρελαιοβιομηχανίες [34]. Τα σύνθετα FRP αποδείχθηκαν μία αξιόλογη εναλλακτική λύση σε σχέση με άλλα παραδοσιακά υλικά, ακόμα και σε συνθήκες υψηλής πίεσης και με μεγάλες διαμέτρους σε περιπτώσεις χημικών επεξεργασιών. Εκτός από την υψηλή αντοχή σε διάβρωση, ο σωλήνας FRP προσφέρει επίσης διάρκεια στο χρόνο και αντοχή, συνεπώς ελαχιστοποιεί την ανάγκη για εσωτερική επένδυση, εξωτερική επίστρωση και καθοδική προστασία.

Από τις αρχές της δεκαετίας του 1950, τα FRP χρησιμοποιήθηκαν ευρέως ως εξοπλισμός σε χημικές επεξεργασίες, σε πολτοποίηση χαρτιού, σε επεξεργασία αποβλήτων, και σε βιομηχανίες κατασκευών [34]. Πάρα πολλά προϊόντα και εγκαταστάσεις από FRP βοήθησαν στο να γίνει μία αποδοτική αρχή σε αυτά τα πεδία εφαρμογής.

Στις μετέπειτα από το 1940 δεκαετίες, εισήχθησαν νέες και συχνά επαναστατικές εφαρμογές των FRP [34]. Η ίδια τεχνολογία, η οποία παρήγαγε τους πλαστικούς οπλισμούς που απαιτήθηκαν για το πυρηνικό ερευνητικό έργο του Manhattan στον Β΄ Παγκόσμιο Πόλεμο, οδήγησε στην εξέλιξη των υψηλής απόδοσης σύνθετων υλικών για κινητήρες πυραύλων και για δεξαμενές, τις δεκαετίες του 1960 και 1970. Πιο συγκεκριμένα, δεξαμενές με τοιχώματα από ίνες γυαλιού χρησιμοποιήθηκαν από το εργαστήριο Skylab ώστε να παρέχουν οξυγόνο σε αστροναύτες [1]. Το 1953, το πρώτο αυτοκίνητο Chevrolet Corvette με πλαίσια γυαλιού, μπήκε στη γραμμή παραγωγής [34].

Τη δεκαετία του 1960 το ναυτικό της Βρετανίας και των Ηνωμένων Πολιτειών χρησιμοποίησε ναρκαλιευτικά σκάφη βασισμένα στα FRP, επειδή τα υλικά αυτά είναι αντιμαγνητικά και συμπεριφέρονται καλύτερα από άλλα όταν καλούνται να λειτουργήσουν σε έντονα διαβρωτικό θαλάσσιο περιβάλλον. Στις εφαρμογές αυτές παρατηρήθηκε ότι ένα από τα χαρακτηριστικά των FRP είναι η ικανότητά τους να μειώνουν τη δυνατότητα ανίχνευσης με radar ενός πλοίου ή αεροσκάφους. Υψηλής απόδοσης σύνθετα υλικά χρησιμοποιήθηκαν σε αεροσκάφη προηγμένης τεχνολογίας, όπως είναι τα F-117 Stealth Fighter και B-2 Bomber. Επί του παρόντος, σύνθετα FRP χρησιμοποιούνται σε διαστημικές εφαρμογές και συμπεριλαμβάνονται σε διάφορες προκαταρκτικές δοκιμές της NASA [34].

Ως προς τη ζήτηση των σύνθετων υλικών, η ναυτιλιακή αγορά ήταν ο μεγαλύτερος καταναλωτής τη δεκαετία του 1960. Τη δεκαετία του 1970, η αγορά αυτοκινήτων, ξεπερνώντας τη ναυτιλιακή αγορά, κατέλαβε την πρώτη θέση την οποία και διατήρησε [34].

1.2 Τα Υλικά FRP στις Δομικές Κατασκευές από Οπλισμένο Σκυρόδεμα

Ενώ η πλειοψηφία των ιστορικών δεδομένων σχετικά με τις κατασκευές από FRP προέρχεται από τις αεροναυπηγικές, τις ναυτιλιακές καθώς και τις βιομηχανίες που σχετίζονται με αντιδιαβρωτικά υλικά, τα FRP χρησιμοποιούνται ως υλικά κατασκευών εδώ και αρκετές δεκαετίες. Πρωτοεμφανίστηκαν ως οπλισμός σε κατασκευές από σκυρόδεμα στα μέσα της δεκαετίας του 1950, ξεκινώντας από ημιμόνιμες κατασκευές και συνεχίζοντας με την αποκατάσταση ιστορικών μνημείων και διάφορες άλλες κατασκευαστικές εφαρμογές [34]. Τα βασικά προϊόντα που αναπτύχθηκαν ήταν θόλοι, καλύμματα και εξωτερικά πλαίσια κτιρίων.

Μία σπουδαία εξέλιξη των FRP, αναφορικά με την επιστήμη του πολιτικού μηχανικού, ήταν η εφαρμογή τους σε αποκαταστάσεις και ενισχύσεις κατασκευών από σκυρόδεμα. Στα τέλη της δεκαετίας του 1970 και στις αρχές του 1980, πολλές εφαρμογές με οπλισμό FRP πραγματοποιήθηκαν σε Ευρώπη και Ασία. Κατά το τέλος της δεκαετίας του 1980 και στις αρχές του 1990, καθώς το κόστος των υλικών FRP μειωνόταν συνεχώς και η ανάγκη για ανταγωνιστική ανανέωση των υποδομών γινόταν όλο και πιο ξεκάθαρη στον ανεπτυγμένο κόσμο, αυξήθηκε η πίεση για χρήση τέτοιων νέων υλικών, ώστε να δημιουργηθούν μεγαλύτερες προσδοκίες αναφορικά με τη λειτουργικότητα των υποδομών. Με την υποστήριξη ερευνητικών προγραμμάτων, τα οποία χρηματοδοτήθηκαν από βιομηχανίες και κυβερνήσεις ανά τον κόσμο, τα υλικά από FRP βρήκαν ευρεία αποδοχή από τη χαρακτηριστικά συντηρητική βιομηχανία των κατασκευών σε περιπτώσεις ειδικών απαιτήσεων, όπως σε κατασκευές οι οποίες υπόκειντο σε έντονο χημικό περιβάλλον [1].

1.3 Μηχανικές Ιδιότητες των FRP και Σύγκρισή τους με αυτές του Χάλυβα

Η χρήση των FRP ως υλικά οπλισμού έχει τα πλεονεκτήματα του μικρού βάρους, της υψηλής εφελκυστικής αντοχής, της αντοχής στη διάβρωση, της ελαστικότητας και της ηλεκτρομαγνητικής αντίστασης. Τα μειονεκτήματα των FRP είναι το μικρό μέτρο ελαστικότητας, το υψηλό κόστος, η μικρή αστοχία παραμόρφωσης, οι μέθοδοι αγκύρωσής του, η συνάφεια με το σκυρόδεμα και η ευαισθησία του στην υπεριώδη ακτινοβολία [11].

Τα FRP από ίνες άνθρακα και αραμιδίου έχουν υψηλά χαρακτηριστικά κόπωσης, τα τριπλάσια αυτών του χάλυβα, ενώ τα χαρακτηριστικά κόπωσης του FRP από ίνες γυαλιού είναι γενικά μικρότερα από του χάλυβα. Η κόπωση των ράβδων οπλισμού GFRP είναι περίπου η μισή από την αντοχή τους [31]. Από τους τρεις τύπους FRP που αναφέρθηκαν εδώ, το CFRP (ινοπλισμένο πολυμερές από άνθρακα) έχει τη μεγαλύτερη εφελκυστική ικανότητα. Το FRP από αραμίδιο (AFRP) παρουσιάζει τη μεγαλύτερη αστοχία παραμόρφωσης και επηρεάζεται πολύ από το νερό. Τα υλικά FRP αντέχουν σε υψηλές θερμοκρασίες της τάξης των 225F (107 °C). Στη θερμοκρασία των 400F (752 °C), ο οπλισμός από FRP χάνει μερική από την ελαστική ικανότητά του [27].

Η οριακή αντοχή των ράβδων FRP είναι μεγαλύτερη από αυτή του χάλυβα για την ίδια διάμετρο, ωστόσο αντίθετα από το χάλυβα, η θλιπτική αντοχή τους είναι μικρότερη από την εφελκυστική. Τα διαγράμματα τάσης - παραμόρφωσης για τα FRP δείχνουν ότι είναι γραμμικώς ελαστικά υλικά μέχρι τη θραύση. Οι τάσεις στις ράβδους FRP με ίνες από γυαλί, είναι αρκετά μικρότερες της οριακής, όταν προκύψει αστοχία.

Το μέτρο ελαστικότητάς τους ισούται με το ένα τέταρτο του μέτρου ελαστικότητας του χάλυβα και μπορεί να οδηγήσει στην οριακή κατάσταση αστοχίας. Η μικρότερη ακαμψία μπορεί να οδηγήσει σε εκτροπή του φορτίου, η οποία είναι σχεδόν γραμμική. Στην οριακή φόρτιση, η εκτροπή στα GFRP είναι η διπλάσια αυτής του χάλυβα, αλλά λόγω της μεγαλύτερης αντοχής και ολκιμότητας κατά την αστοχία, η εκτροπή του οπλισμού από χάλυβα είναι μεγαλύτερη [14].

Το ειδικό βάρος των FRP είναι το ένα τέταρτο του ειδικού βάρους του χάλυβα και επιπλέον τα υλικά αυτά έχουν τους ίδιους συντελεστές θερμικής διαστολής με το σκυρόδεμα, ιδιότητες που τα καθιστούν ευκολότερα στο χειρισμό. Η αντοχή συνάφειας των ράβδων οπλισμού FRP δεν είναι τόσο υψηλή, όσο αυτή των ράβδων από χάλυβα. Συγκεκριμένα έχει προσδιοριστεί ότι είναι τα 2/3 αυτής [14], [26].

Λόγω των παραπάνω ιδιοτήτων τους, καθώς και των προβλημάτων διάβρωσης που δημιουργεί η χρήση χάλυβα στις κατασκευές οπλισμένου σκυροδέματος, τα FRP επιλέχθηκαν ως υλικά οπλισμού στην κατασκευή έργων από τις ΗΠΑ, κάποιες Ασιατικές και Ευρωπαϊκές χώρες. Στα πλαίσια του πεδίου κατασκευών μεγάλων έργων, διάφορα νέα κατασκευαστικά συστήματα με υλικά FRP έχουν προταθεί, σχεδιαστεί και πειραματικά επαληθευτεί. Αυτά περιλαμβάνουν καταστρώματα γεφυρών προς

αποκατάσταση και επανακατασκευή υφισταμένων καθώς και κατασκευή νέων [24], [25]. Ωστόσο, στα προηγούμενα χρόνια δόθηκε μεγαλύτερο ενδιαφέρον στα καταστρώματα γεφυρών, λόγω των εγγενών πλεονεκτημάτων τους στην αντοχή και ακαμψία ανά μονάδα βάρους, σε σύγκριση με τα καταστρώματα γεφυρών από σκυρόδεμα, οπλισμένων με χάλυβα. Μειώνοντας το βάρος των προς αποκατάσταση καταστρωμάτων στις εργασίες επισκευής, εμφανίζεται η δυνατότητα γρήγορης αντικατάστασης και μείωσης του νεκρού φορτίου, με συνέπεια να αυξάνεται η τιμή του ωφέλιμου φορτίου της κατασκευής.

Γέφυρες με καταστρώματα από σκυρόδεμα και οπλισμό από χάλυβα αντιπροσωπεύουν ένα μεγάλο τμήμα των κατασκευών που υφίστανται μεγάλες φθορές. Μία συνήθης αιτία στην οποία οφείλονται αυτές οι φθορές, είναι το γεγονός ότι ο οπλισμός από χάλυβα, που χρησιμοποιείται για ενίσχυση της καμπτικής ικανότητας των κατασκευών, είναι επιρρεπής στη διάβρωση. Ο χαλύβδινος οπλισμός διαβρώνεται όταν βρίσκεται σε υφάλμυρα και υψηλής υγρασίας περιβάλλοντα. Όταν ο χάλυβας διαβρώνεται, η σκουριά εξαπλώνεται και δημιουργεί εφελκυστικές δυνάμεις στο σκυρόδεμα. Καθώς το σκυρόδεμα φτάνει το όριο του εφελκυσμού του, αρχίζει να ρηγματώνεται και να θρυμματίζεται. Το γεγονός αυτό δημιουργεί ένα περιβάλλον στο οποίο η διάβρωση μπορεί να επεκταθεί. Η διάβρωση των χαλύβδινων ράβδων οπλισμού στα καταστρώματα γεφυρών από σκυρόδεμα, η οποία οδηγεί σε υπερβολική ρηγμάτωση, θρυμματισμό, μειωμένη αντοχή και έλλειψη κατασκευαστικής αρτιότητας, αποτελεί σοβαρό πρόβλημα όταν μετράται σε σχέση με το κόστος αποκατάστασης και τις διακοπές της κυκλοφορίας [31].

Το κατάστρωμα μίας γέφυρας είναι ένα στοιχείο της κατασκευής, το οποίο μεταφέρει τα φορτία κάθετα τόσο στις στηρίξεις, όσο και στις διαμήκεις δοκούς ή στα τόξα που στηρίζονται στα βάθρα. Η σύνδεση του καταστρώματος σε αυτά τα υποστηρίγματα, γίνεται τυπικά μέσω της εφαρμογής ράβδων διάτμησης ή μίας κοχλιωτής σύνδεσης σε συνθήκες απλής στήριξης, η οποία αναγκαστικά δεν καλύπτει τις ανάγκες σύνθετων δράσεων [10]. Πρέπει να σημειωθεί ότι η πλάκα του καταστρώματος από σκυρόδεμα είναι το πιο ευαίσθητο στοιχείο της γέφυρας στη διάβρωση, διότι είναι άμεσα εκτεθειμένο σε μεγάλες συγκεντρώσεις χλωριδίων, τα οποία χρησιμοποιούνται για την αφαίρεση του χιονιού και του πάγου.

Ο χαλύβδινος οπλισμός με εποξειδική επικάλυψη θεωρήθηκε ως μία λύση στο παραπάνω πρόβλημα. Παρόλα αυτά δεν είχε τον αναμενόμενο βαθμό απόδοσης. Συμπληρωματικές μέθοδοι για παράταση του χρόνου ζωής της κατασκευής, ή μέθοδοι που παρέχουν προστασία στις γέφυρες, είναι η χρήση στεγανωτικών υλικών, η αύξηση του βάθους επίστρωσης, η αύξηση της πυκνότητας του σκυροδέματος και η χρήση προσθετικών υλικών προς επιβράδυνση της χημικής διαδικασίας [26], [31].

Κατασκευαστές και προμηθευτές σύνθετων υλικών ανέπτυξαν ταχύτατα, προϊόντα για έργα υποδομής, τα οποία θεωρούνται το πεδίο εφαρμογής της μεγαλύτερης εν δυνάμει αγοράς FRP [34]. Η επισκευή και ο οπλισμός σκυροδέματος, η επισκευή καταστρώματος γεφυρών, η τεχνολογία υβριδικών σύνθετων υλικών (η συνένωση σύνθετων υλικών με σκυρόδεμα, ξύλο και χάλυβα) και οι αναβαθμισμένες τεχνικές κατασκευής προβλητών είναι μόνο

μερικά από τα πεδία εφαρμογής των FRP. Χρησιμοποιώντας ράβδους οπλισμού από FRP, που δεν υφίστανται διάβρωση σε καταστρώματα γεφυρών από σκυρόδεμα, μπορούμε να παρατείνουμε τη διάρκεια λειτουργίας της γέφυρας και να μειώσουμε το κόστος συντήρησής της.

Τα καταστρώματα γεφυρών και οι ανωδομές από FRP κατασκευάζονται συνήθως από βινυλοεστερική ή πολυεστερική ρητίνη και ίνες γυαλιού. Η ανθεκτικότητα των FRP εξαρτάται από διάφορους παράγοντες όπως ο τύπος των ινών, ο όγκος και η προέλευσή τους, ο τύπος της ρητίνης, η κατασκευαστική μέθοδος που ακολουθείται καθώς και τα υλικά σύνδεσης που χρησιμοποιούνται στο τελικό στάδιο παραγωγής τους. Τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των γεφυρών και ανωδομών από FRP παρουσιάζονται παρακάτω:

Πλεονεκτήματα

- Μικρό βάρος. Μία νέα ανωδομή μήκους 10m κατασκευασμένη εξ ολοκλήρου από υλικά FRP ζυγίζει περίπου 270 kg/m²
- Αντίσταση στα χημικά τα οποία χρησιμοποιούνται για την αφαίρεση του χιονιού και του πάγου, με αποτέλεσμα τη μείωση του κόστους συντήρησης
- Γρήγορη εγκατάσταση λόγω της προκατασκευασμένης φύσης τους
- Λιγότερα έξοδα για υποστήριξη και προστασία της κυκλοφορίας
- Μεγαλύτερη ανθεκτικότητα. Ελαττώνεται η ρηγμάτωση, η διάβρωση του οπλισμού και ο θρυμματισμός του σκυροδέματος
- Μεγάλη διάρκεια ζωής. Τα καταστρώματα από FRP αναμένονται να προσφέρουν μεγάλη διάρκεια λειτουργίας με μικρή συντήρηση. Καθώς δεν μπορεί να γίνει συγκεκριμένη εκτίμηση της διάρκειας λειτουργίας ενός καταστρώματος από FRP επί του παρόντος, δεν είναι απίθανο η διάρκεια λειτουργίας του να είναι ισοδύναμη με αυτή ολόκληρης της γέφυρας
- Αντοχή σε κόπωση
- Η κατασκευή σε ελεγχόμενο περιβάλλον συμβάλλει στον καλό ποιοτικό έλεγχο
- Ευκολία και ταχύτητα εγκατάστασης
- Σε περιπτώσεις ανάπλασης μίας γέφυρας με χρήση ελαφρών FRP, το περιβαλλοντικό αντίκτυπο είναι μικρότερο, καθώς και οι απαιτήσεις σε άδειες και σχετικά έγγραφα
- Μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε εξειδικευμένες κατασκευές, όπου υπάρχει εξοπλισμός επικοινωνίας κτλ, λόγω του ότι είναι ηλεκτρομαγνητικά αδρανή.

Μειονεκτήματα

- Υψηλότερο αρχικό κόστος συγκριτικά με μία συμβατική κατασκευή καταστρώματος γέφυρας. Το κόστος μονάδας των FRP είναι μεγαλύτερο από αυτό των συμβατικών υλικών.

- Τα χαμηλά μέτρα ελαστικότητας των FRP οδηγούν σε μεγάλα βέλη κάμψης τα οποία δεν επιτρέπουν στο σχεδιαστή να εκμεταλλευτεί πλήρως την αντοχή τους.
- Δεν υπάρχει επίσημη κατασκευαστική διαδικασία.
- Η αντίδρασή τους στις θερμοκρασιακές αλλαγές είναι ελαφρώς διαφορετική από αυτή του σκυροδέματος και του χάλυβα και πρέπει αυτό να ληφθεί σοβαρά υπόψη όταν κατασκευάζεται ένα κατάστρωμα από FRP από σκυρόδεμα, ή όταν χρησιμοποιούνται FRP για ανωδομές.
- Προηγούμενα τεχνικά έργα έχουν υποστεί αστοχία στην επιφάνεια φθοράς (π.χ ρηγμάτωση). Διενεργούνται έρευνες προκειμένου να προσδιοριστούν τα καταλληλότερα υλικά για την φθειρόμενη επιφάνεια.
- Η έλλειψη γνώσης και εκπαίδευσης που διακρίνει τον τεχνικό κόσμο, λόγω της σχετικά πρόσφατης και ραγδαίας ανάπτυξης της συγκεκριμένης τεχνικής [8].

1.4 Οι Πρώτες Πιλοτικές Κατασκευές με Οπλισμό FRP

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, τα νέα αυτά υλικά χρησιμοποιήθηκαν ευρέως ως ενίσχυση σε υπάρχουσες γέφυρες και ως οπλισμός σε νέες, στις Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής, την Ιαπωνία και κάποιες Ευρωπαϊκές χώρες. Οι πρώτες γέφυρες που κατασκευάστηκαν χρησιμοποιώντας FRP και είχαν το χαρακτήρα πιλοτικών έργων ήταν, λόγω της φύσης της κατασκευής, πεζογέφυρες. Η πρώτη πεζογέφυρα από FRP χτίστηκε στο Ισραήλ το 1975. Η πρώτη οδογέφυρα, στους τένοντες της οποίας χρησιμοποιήθηκαν σύνθετα υλικά οπλισμού, χτίστηκε στη Γερμανία το 1986. Το πρώτο κατάστρωμα γέφυρας οπλισμένο εξ ολοκλήρου από σύνθετα υλικά κατασκευάστηκε στην Κίνα. Η πρώτη πεζογέφυρα εξ ολοκλήρου οπλισμένη από σύνθετα υλικά κατασκευάστηκε το 1992 στο Aberfeldy της Σκωτίας. Στις Ηνωμένες Πολιτείες, το πρώτο κατάστρωμα γέφυρας, με οπλισμό FRP κατασκευάστηκε το 1996 στο McKinleyville, και ακολούθησε η εξ ολοκλήρου από σύνθετα υλικά κατασκευή της πρώτης οδογέφυρας, (the No-Name Creek Bridge) το 1996, στο Russell του Κάνσας [1].

Βόρεια Αμερική

Στη Βόρεια Αμερική, οι σημαντικές αυξομειώσεις της θερμοκρασίας, οι κύκλοι πήξης και τήξης, οι κύκλοι υγρασίας και ξηρασίας, τα χημικά προϊόντα που χρησιμοποιούνται ενάντια στον πάγο καθώς επίσης και η χρήση αλατιού για προστασία από το χιόνι, επιδεινώνουν το φαινόμενο της διάβρωσης σε χώρους στάθμευσης και σε καταστρώματα γεφυρών. Στις Ηνωμένες Πολιτείες υπάρχουν περίπου 560.000-600.000 οδογέφυρες. Ένα ποσοστό, γύρω στο 40% των γεφυρών αυτών, απαιτεί επισκευή λόγω κατασκευαστικών βλαβών [2]. Πολυάριθμες πεζογέφυρες από σύνθετα υλικά κατασκευάστηκαν σε πολιτείες της Αμερικής και σε απομακρυσμένες περιοχές, όπου δεν ήταν δυνατό να μεταφερθεί βαρύς κατασκευαστικός εξοπλισμός ή για να συνδέσουν περιοχές εκατέρωθεν αυτοκινητοδρόμων και σιδηροδρόμων, με αποτέλεσμα τη μείωση του κόστους μεταφοράς.

Η πρώτη σύνθετη οδογέφυρα, που κατασκευάστηκε στις ΗΠΑ δόθηκε στην κυκλοφορία στα τέλη του 1996 στο Russell του Kansas. Από τότε και άλλες υποδειγματικές μελέτες, στις οποίες χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικές γεωμετρικές παραλλαγές των σύνθετων συστημάτων καταστρωμάτων από GFRP, κατασκευάστηκαν σε πολιτείες όπως η Δυτική Virginia, το Delaware, το Ohio, το Idaho, το Maryland και η Νέα Υόρκη [29].

Η γέφυρα Morristown, η οποία βρίσκεται στο Vermont των Ηνωμένων Πολιτειών, είναι γέφυρα μονού ανοίγματος με χαλύβδινες δοκούς, με απόσταση των βάθρων της ίση με 43.90 m. Το κατάστρωμα αποτελείται από μία συμπαγή συνεχή πλάκα από σκυρόδεμα, η οποία οπλίσθηκε με ράβδους FRP από ίνες γυαλιού (GFRP), σε δύο ανεξάρτητα στρώματα στο επάνω και κάτω τμήμα της. Σε κρίσιμες περιοχές της γέφυρας τοποθετήθηκαν αισθητήρες οπτικών ινών για την παρακολούθηση της μηχανικής συμπεριφοράς της. Το κατάστρωμα της γέφυρας αυτής αποτελεί το πρώτο κατάστρωμα στον κόσμο του μεγέθους και της κατηγορίας του, που είναι εξ ολοκλήρου οπλισμένο με ράβδους GFRP [16].

Μία άλλη γέφυρα στις Ηνωμένες Πολιτείες, με κατάστρωμα από σκυρόδεμα, που έχει οπλισθεί με FRP, είναι στην πόλη Wausau του Wisconsin. Η γέφυρα αυτή βρίσκεται στον αυτοκινητόδρομο 151 των Η.Π.Α., που έχει μία μέση ημερήσια κυκλοφορία 18.600 οχημάτων. Είναι μία γέφυρα δύο ανοιγμάτων, μήκους 32.7 m το καθένα, και με δύο λωρίδες κυκλοφορίας. Το κατάστρωμα της γέφυρας είναι πλάτους 12.75 m και στηρίζεται σε πέντε προεντεταμένες δοκούς των 1.37 m από σκυρόδεμα, με μεταξύ τους απόσταση 2.65 m. Πρόκειται για τον πρώτο συνδυασμό αυτών των υλικών με ένα διπλής κατεύθυνσης πλέγμα οπλισμού από FRP, επιλεγμένο ώστε να μειώνεται το κόστος κατασκευής. Επιπλέον, αυτή είναι η πρώτη εφαρμογή όπου χρησιμοποιήθηκαν προεντεταμένες δοκοί και όπου απαιτήθηκε «σύνθετη δράση» μεταξύ του καταστρώματος και των δοκών [30].

Η αρχική γέφυρα Sierrita de la Cruz Creek στο Potter County του Texas, αντικαταστάθηκε διότι κρίθηκε κατασκευαστικά ανεπαρκής και λειτουργικά απαρχαιωμένη [6]. Η νέα γέφυρα που κατασκευάστηκε από FRP, έχει μήκος 168.6 m και κατάστρωμα που αποτελείται από 7 ανοίγματα με μεταξύ τους απόσταση 24.1m [23].

Η γέφυρα δύο ανοιγμάτων Stormwater Cannel στο Salton Sea, με μήκος 20 m και πλάτος 13 m, δόθηκε στην κυκλοφορία το 2001. Η γέφυρα αυτή αποτελείται από κατάστρωμα με οπλισμό FRP και δοκούς υποστηριζόμενες από ένα βάθρο με οπλισμό χάλυβα. Το σύστημα του καταστρώματος κατασκευάστηκε από πλαίσια με ίνες από γυαλί και οι δοκοί στήριξης από ίνες άνθρακα. Αυτή η πειραματική οδογέφυρα εξυπηρετεί την κυκλοφορία (συμπεριλαμβανομένων και βαρέων οχημάτων) από το Μεξικό έως τις Ηνωμένες Πολιτείες [7].

Τον Οκτώβριο του 2001, η γέφυρα Dickey Creek στη λεωφόρο 601 στο Sugar Grove, δόθηκε επίσημα στην κυκλοφορία. Το μήκος της είναι 11.5 m και σε αυτή χρησιμοποιήθηκαν CFRP στα πλέγματα, ώστε να είναι οι δοκοί πιο οικονομικές [7].

Η γέφυρα Val-Alain, η οποία διασχίζει τον ποταμό Henri στο Κεμπέκ του Καναδά, είναι τύπου πλάκας σε δοκούς, με λοξό άνοιγμα 20 μοιρών πάνω από ένα μεμονωμένο άνοιγμα μήκους 48.89 m και συνολικού πλάτους ίσο με 12.57m. Η πλάκα από σκυρόδεμα στο κατάστρωμα και τα προστατευτικά της γέφυρας, οπλίστηκαν με ράβδους GFRP. Η χρήση τέτοιου μη μεταλλικού οπλισμού, σε συνδυασμό με σκυρόδεμα υψηλής απόδοσης, παρέχει μία αναμενόμενη ζωή λειτουργίας μεγαλύτερη των 75 ετών. Στον Καναδά, άλλες γέφυρες σκυροδέματος, με οπλισμό FRP, κατασκευάστηκαν στο δήμο Sherbrook (γέφυρα Joffre) και στο δήμο Wotton (γέφυρα Wotton) [15].

Ιαπωνία

Η Ιαπωνία είναι η πρώτη χώρα στον κόσμο σε αριθμό πρακτικών εφαρμογών και σε χρήση των FRP ως οπλισμού σκυροδέματος. Από τα τέλη της δεκαετίας του 1980, ο ρυθμός χρήσης των FRP ως οπλισμός σκυροδέματος ήταν σταθερά αυξανόμενος. Ειδικά, μετά τα τέλη της δεκαετίας του 1990, τα φύλλα FRP εφαρμόστηκαν σε πολλές κατασκευές, για τη βελτίωση της αντισεισμικής τους συμπεριφοράς και της ανθεκτικότητάς τους στο χρόνο. Ο μεγάλος σεισμός Hanshin ήταν το κίνητρο για αυτές τις εργασίες.

Στη Ιαπωνία, η εφαρμογή των ράβδων οπλισμού σκυροδέματος από FRP στην πράξη άρχισε από το 1987. Ο συνολικός αριθμός εφαρμογών μέχρι σήμερα, ανέρχεται περίπου στις 180, ενώ το ποσό των χρησιμοποιούμενων ράβδων FRP ανέρχεται στα 0.9 εκατομμύρια μέτρα. Ο αριθμός των εφαρμογών μειώνεται σταθερά από το 1996, παρόλα αυτά, το ποσό των χρησιμοποιούμενων υλικών δεν μειώθηκε ιδιαίτερα.

Στην Ιαπωνία, η πρώτη πεζογέφυρα από FRP κατασκευάστηκε στην Okinawa το 2000, με μήκος ανοιγμάτων 19.7 και 17.2 m. Η Okinawa είναι μία περιοχή, όπου οι κατασκευές υφίστανται την σοβαρότερη διάβρωση, λόγω του υφάλμυρου περιβάλλοντος. Η τοπική αυτοδιοίκηση κατασκεύασε παραθαλάσσιους χώρους ψυχαγωγίας κατά μήκος του αγροτικού δρόμου Ikei-Tairagawa, κατασκευασμένου σε αβαθή νερά ανάμεσα στα νησιά Okinawa Main και Henza. Η γέφυρα αυτή επιτρέπει στους επισκέπτες να διασχίζουν με ασφάλεια τον δρόμο. Το περιβάλλον είναι έντονα διαβρωτικό, αφού το νησί Okinawa Main βρίσκεται στο πέρασμα τυφώνων και επιπλέον ο δρόμος περιβάλλεται από θάλασσα. Γι' αυτό το λόγο είναι απαραίτητο να λαμβάνονται μέτρα ενάντια στη φθορά λόγω αλατιού στις κατασκευές από σκυρόδεμα και χάλυβα στην περιοχή της Okinawa. Προκειμένου να αποφευχθεί μεγάλη φθορά της γέφυρας λόγω του αλατιού, επιλέχθηκαν ως κύρια κατασκευαστικά υλικά τα FRP. Η κατασκευή πεζογέφυρας από GFRP είναι μία κατασκευαστική επιλογή η οποία δεν απαιτεί τέτοια μέτρα [21], [22].

Ευρώπη

Η πρώτη γέφυρα, η οποία ενισχύθηκε από FRP ήταν η γέφυρα Ibach στη Lucerne της Ελβετίας. Το μεσαίο άνοιγμα μήκους 39 m της δοκού με

κιβωτοειδή διατομή, είχε καταστραφεί. Το άνοιγμα είχε πλάτος 16 m και είχε ένα μέσο διαμήκης κορμό. Η ζημιά προέκυψε από το χωρισμό ενός προεντεταμένου τένοντα στο εξωτερικό πλέγμα. Η επισκευή περιέλαβε την εφαρμογή φύλλων FRP από άνθρακα πάχους 2 mm και πλάτους 150 mm το καθένα. Η επισκευή ήταν επιτυχής και συνέβαλε ενδεχομένως στην περαιτέρω χρήση των FRP από άνθρακα για επισκευή γεφυρών [7].

Η γέφυρα Nossa Senhora da Guia στο Ponte de Lima της Πορτογαλίας ενισχύθηκε με FRP από άνθρακα. Η οδογέφυρα από οπλισμένο σκυρόδεμα, με δοκό διπλής κιβωτοειδούς διατομής, αποτελείται από ανοίγματα των 50 m. Ένα λάθος στο σχεδιασμό οδήγησε στην ανεπάρκεια του καμπτικού οπλισμού, που είχε ως αποτέλεσμα τη διαμήκη ρηγμάτωση της άνω πλάκας. Χρησιμοποιήθηκε ένα σύστημα προέντασης προκειμένου να αναπτυχθεί αρνητική ροπή στη γέφυρα, έτσι ώστε να κλείσουν οι ρωγμές. Κατόπιν, τοποθετήθηκαν ελάσματα FRP στο κατώτατο σημείο της πλάκας. Η εφαρμογή της προέντασης διατηρήθηκε για αρκετές μέρες, κατά τις οποίες η εποξική ρητίνη διόρθωνε τις ζημιές (2001) [7].

Η γέφυρα Pontresina συνδέει τις όχθες του ποταμού Flaz στην Pontresina, η οποία βρίσκεται στις Ελβετικές Άλπεις, σε υψόμετρο 1790 m. Η γέφυρα έχει προσωρινό χαρακτήρα, αφού χρησιμοποιείται κυρίως κατά τη διάρκεια του χειμώνα εξυπηρετώντας το χειμερινό τουρισμό. Απαιτείται απομάκρυνσή της κατά την άνοιξη, λόγω της υψηλής στάθμης του νερού του ποταμού και επανεγκατάστασή της το φθινόπωρο. Με ημερομηνία κατασκευής το 1997, έχει εγκατασταθεί και απομακρυνθεί 8 φορές μέχρι το καλοκαίρι του 2005. Όλα τα κατασκευαστικά μέρη τη γέφυρας αποτελούνται από GFRP [20].

1.5 Ανάλυση Κόστους

Από τα στοιχεία της σχετικής βιβλιογραφίας μέχρι το έτος 2005, ένας σχετικά μεγάλος αριθμός καταστρωμάτων από FRP βρίσκονται ήδη σε λειτουργία, και διάφορα άλλα είναι προγραμματισμένο να εγκατασταθούν στο άμεσο μέλλον [17]. Ωστόσο, υπάρχει η ανάγκη να αποσαφηνιστούν και να διερευνηθούν τα παρακάτω: η ανάπτυξη προτύπων σχεδιασμού και οδηγιών, η συμπεριφορά των πλαισίων και των συνδέσεων στην κόπωση, τα χαρακτηριστικά αντοχής κάτω από τη δράση μηχανικών και περιβαλλοντικών φορτίων, οι μηχανισμοί αστοχίας και η οριακή αντοχή, συμπεριλαμβανομένων τοπικών και παγκόσμιων μοντέλων κάμψης και η αποδοτικότητα και η αντοχή των επιστρώσεων [28]. Μετά από τέσσερα χρόνια ερευνών από το ISIS CANADA είναι πλέον αποδεδειγμένο ότι τα νέα FRP είναι πολύ πιο ανθεκτικά σε συνθήκες πυρκαγιάς από ότι στο παρελθόν. Επιπρόσθετα, η κατάλληλη τοποθέτηση των διαπιστωμένα ασφαλών κιγκλιδωμάτων παραμένει ένα ανοιχτό θέμα, εάν λάβουμε υπόψη μας την ποικιλία των μορφών των καταστρωμάτων. Αναμένεται ότι με τη μελλοντική έρευνα, η αξιοπιστία των ράβδων GFRP ως οπλισμός σε καταστρώματα γεφυρών από σκυρόδεμα θα ελεγχθεί, οδηγώντας σε ανακούφιση της κατασκευής, βελτίωση της ανθεκτικότητας των καταστρωμάτων, και μείωση των δαπανών συντήρησής τους [9].

Το καθεστώς της βιομηχανίας των καταστρωμάτων γεφυρών από FRP δεν είναι διαφορετικό από εκείνο που αντιμετώπισαν οι προγενέστερες βιομηχανίες, όπως αυτή του χάλυβα και του σκυροδέματος, με συνέπεια την είσοδο νέων υλικών σε μία καλά οχυρωμένη αγορά. Ίσως τα μελλοντικά καταστρώματα από FRP, να εξελιχθούν έτσι ώστε να εκμεταλλεύονται περισσότερο τις ιδιότητες και τις μεθόδους κατασκευής των υλικών τους, ως αποτέλεσμα της εμπειρίας και της ευχέρειας που θα υπάρχει με την παραγωγή τέτοιων υλικών [10].

Το κόστος των ράβδων GFRP αποτελεί έναν πολύ σημαντικό παράγοντα αναφορικά με τη χρήση τους. Το 2002, η Υπηρεσία Μεταφορών του Vermont (VTTrans) διενήργησε μία συγκριτική ανάλυση κόστους μεταξύ του GFRP και του επενδυμένου με εποξική ρητίνη χαλύβδινου οπλισμού στη γέφυρα Morristown. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης αυτής έδειξαν ότι η χρήση ράβδων GFRP κόστισε 50.000 δολάρια (Ηνωμένες Πολιτείες), περισσότερο από το κόστος της χρήσης χαλύβδινου οπλισμού επενδυμένου με εποξική ρητίνη. Όταν λάβουμε το κόστος του οπλισμού ως ποσοστό του συνολικού κόστους κατασκευής της γέφυρας (1,4 εκατ. δολάρια - Ηνωμένες Πολιτείες), θα διαπιστώσουμε πως η πραγματική αύξηση στο συνολικό κόστος κατασκευής είναι μόνο το 3.57% [15].

Η κατασκευή ενός καταστρώματος γέφυρας οπλισμένου με υλικά FRP, αυτού της οδογέφυρας στο Waupun του Wisconsin των Ηνωμένων Πολιτειών, χρησιμοποιώντας συμβατική κατασκευαστική τεχνολογία και εργασία, πραγματοποιήθηκε με εξοικονόμηση της τάξης του 57% στις εργασίες κατασκευής συγκριτικά με την αντίστοιχη κατασκευή ενός καταστρώματος με χαλύβδινο οπλισμό, ενώ το κόστος των υλικών ήταν κατά 60% μεγαλύτερο. Φαίνεται πως, δεδομένης της εξοικονόμησης χρόνου κατασκευής και των μακροπρόθεσμων ενδεχόμενων πλεονεκτημάτων, ο οπλισμός των καταστρωμάτων γεφυρών με FRP, θα μπορούσε να διασφαλίζει εξοικονόμηση κόστους, παρόλα τα τωρινά αρχικά τους κόστη. Ταυτόχρονα, οι ράβδοι από GFRP είναι χαμηλότερου κόστους σε σύγκριση με τις άλλες διαθέσιμες μορφές ράβδων FRP (άνθρακα και αραμιδίου) [19], [18]. Το υψηλότερο κόστος μπορεί να αποσβεσθεί κάτω από ορισμένες συνθήκες, ειδικότερα όταν απαιτείται πλήρης επανακατασκευή, λόγω της απουσίας μίας εναλλακτικής λύσης ελαφρύτερου καταστρώματος. Παραμένει να προσδιοριστεί εάν το υψηλό αρχικό κόστος των καταστρωμάτων από FRP μπορεί να δικαιολογηθεί, λαμβάνοντας υπόψη και τους υπόλοιπους οικονομικούς παράγοντες που διέπουν μία κατασκευή [10]. Επιπρόσθετα, η χρήση μεγαλύτερων προκατασκευασμένων πλεγμάτων από FRP προς αντικατάσταση των ράβδων FRP, μπορεί να οδηγήσει σε ακόμα μεγαλύτερη εξοικονόμηση εργασίας και χρόνου.

2 ΟΙ ΟΡΙΑΚΕΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΚΑΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΟΤΗΤΑΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΜΕ ΟΠΛΙΣΜΟ FRP, ΣΥΜΦΩΝΑ ΜΕ ΤΙΣ ΑΡΧΕΣ ΤΟΥ EC2

2.1 Οι Βασικές Αρχές και Παραδοχές της Ανάλυσης και του Σχεδιασμού Δομικών Στοιχείων Οπλισμένου Σκυροδέματος με τη Θεωρία των Οριακών Καταστάσεων

Λόγω της ραγδαίας αύξησης της χρήσης των FRP ως οπλισμού σε κατασκευές σκυροδέματος, έχουν υπάρξει διεθνείς προσπάθειες να αναπτυχθούν οδηγίες που θα διέπουν το σχεδιασμό των κατασκευών αυτών. Αυτές οι προσπάθειες έχουν καταλήξει στο να δημοσιευθούν αρκετοί κώδικες και οδηγίες σχεδιασμού. Στην πλειονότητά τους οι κώδικες αυτοί βασίζονται στις αρχές σχεδιασμού μελών σκυροδέματος με το συμβατικό οπλισμό του χάλυβα, θεωρώντας κάποιες τροποποιήσεις προκειμένου να ενσωματώσουν τις ουσιαστικές διαφορές που υπάρχουν μεταξύ των δύο υλικών. Το κεφάλαιο αυτό παρουσιάζει συνοπτικά την καμπτική αντοχή δομικών στοιχείων σκυροδέματος με οπλισμό FRP, όπως προτείνονται από το Αμερικάνικο Ινστιτούτο Σκυροδέματος (ACI 44.1 R-03, 2003), το ISIS του Καναδά (ISIS-M03-01, 2001), την Ένωση Προτύπων Καναδά (CAN/CSA-5806-02, 2002) και την ιαπωνική Ένωση Πολιτικών Μηχανικών (Machida, 1997), καθώς και με βάση τις αρχές του Ευρωκώδικα 2.

Η βασική αρχή, πάνω στην οποία στηρίζεται η ανάπτυξη της θεωρίας καμπτικής αντοχής ενός δομικού στοιχείου, διατυπώνεται ως εξής: η αναπτυσσόμενη ροπή M_{Sd} σε ένα δομικό στοιχείο, η οποία προκύπτει από τον κατάλληλο συνδυασμό παραγοντοποιημένων φορτίσεων, δεν πρέπει να υπερβαίνει την καμπτική αντοχή σχεδιασμού M_{Rd} που διαθέτει το στοιχείο. Στον Ευρωκώδικα, η συνθήκη αυτή για την οριακή κατάσταση αντοχής διατυπώνεται από τη μαθηματική σχέση:

$$M_{Sd} \leq M_{Rd} \quad (2.1)$$

όπου

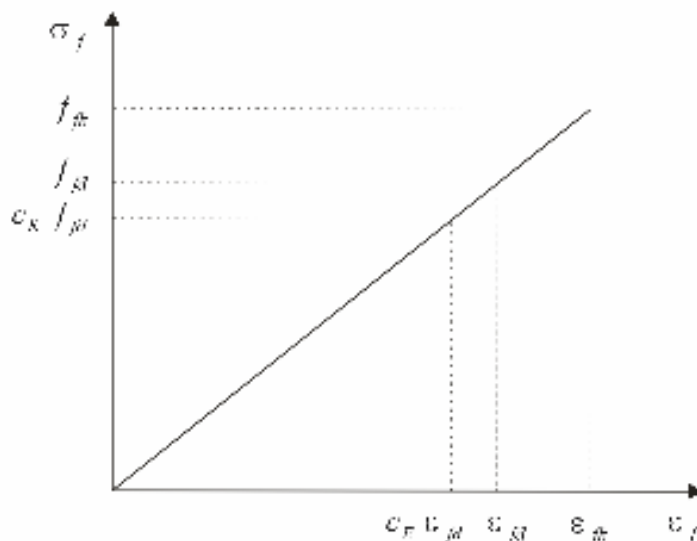
$$M_{Sd} = 1.35 M_g + 1.5 M_q, \quad (2.2)$$

είναι η ονομαστική αντοχή M_{Rd} των δομικών στοιχείων, με M_g και M_q να είναι οι καμπτικές αντοχές στη διατομή που αντιστοιχούν στα μόνιμα και κινητά φορτία, προσδιορίζεται από τη συμβιβαστικότητα των παραμορφώσεων, την ισορροπία των εσωτερικών δυνάμεων και από τον τύπο αστοχίας του δομικού στοιχείου που θα θεωρήσουμε.

Οι υποθέσεις στις οποίες βασίζεται η ανάπτυξη των σχέσεων της καμπτικής αντοχής των δομικών στοιχείων με οπλισμό FRP είναι

- Οι ορθές παραμορφώσεις στο σκυρόδεμα και στις ράβδους FRP, που αναπτύσσονται λόγω κάμψης σε μία διατομή, είναι ανάλογες των αποστάσεων από τον ουδέτερο άξονα.
- Η μέγιστη θλιπτική παραμόρφωση του σκυροδέματος που μπορεί να χρησιμοποιηθεί, είναι 3.5% , σύμφωνα με τις αρχές του Ευρωκώδικα.¹
- Η εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος αμελείται.
- Η εφελκυστική αντοχή των ράβδων FRP είναι γραμμικά ελαστική μέχρι την αστοχία (διάρρηξη).
- Υπάρχει “τέλειο” δέσιμο μεταξύ των ράβδων FRP και του σκυροδέματος.
- Το FRP θεωρείται ως γραμμικό ελαστικό υλικό μέχρι τη θραύση του.
- Οι διατομές των δομικών στοιχείων παραμένουν επίπεδες και κάθετες στον άξονα των στοιχείων και μετά την παραμόρφωση τους, μέχρι την αστοχία τους.

Σε εφελκυσμό, η μηχανική συμπεριφορά των ράβδων FRP είναι γραμμικά ελαστική μέχρι τη θραύση τους. Το διάγραμμα τάσεων – παραμορφώσεων για τις ράβδους των FRP παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.1α. Η θραύση αντιστοιχεί στην τιμή f_{fk} , η οποία είναι η χαρακτηριστική αντοχή των ράβδων FRP, που αντιστοιχεί στη χαρακτηριστική παραμόρφωση ε_{fk} .



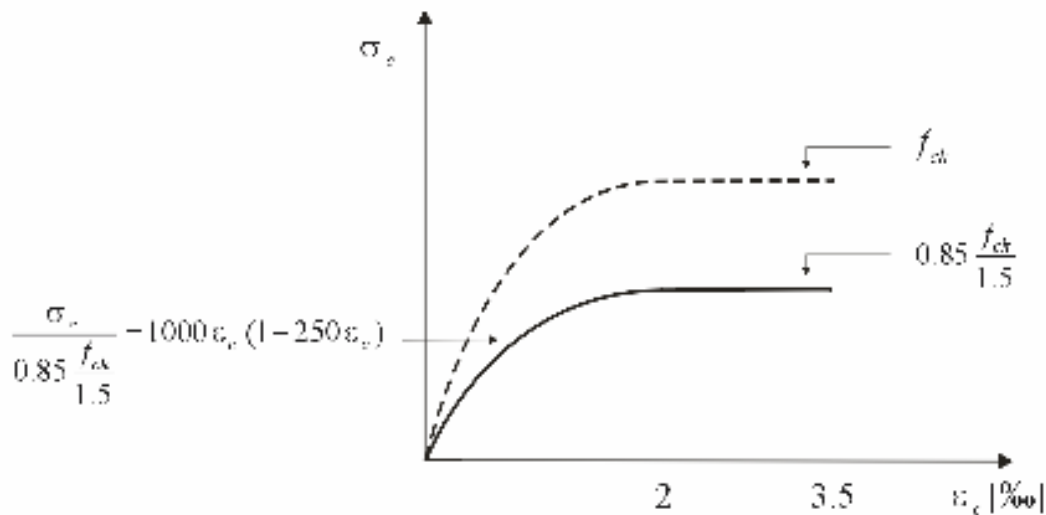
Σχήμα 2.1α: Διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων FRP

Στον προσδιορισμό της καμπτικής αντοχής ενός δομικού στοιχείου σκυροδέματος με οπλισμό FRP θα υιοθετηθεί το διάγραμμα τάσεων – παραμορφώσεων που δείχνεται στο Σχήμα 2.1β.² Στο διάγραμμα αυτό, με f_{ck}

¹ Σύμφωνα με το ACI, η μέγιστη θλιπτική παραμόρφωση του σκυροδέματος που μπορεί να χρησιμοποιηθεί είναι 3% .

² Το ίδιο έχει χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό της καμπτικής αντοχής δομικών στοιχείων σκυροδέματος με οπλισμό χάλυβα.

δηλώνεται η χαρακτηριστική τιμή της αντοχής του σκυροδέματος και με f_{cd} η αντοχή σχεδιασμού που παρέχεται από τον τύπο $f_{fd} = f_{fk} / \gamma_f$, όπου γ_f είναι ο συντελεστής ασφάλειας του υλικού, που προτείνεται να είναι 1.3. Ο συντελεστής 0.85 εισάγεται για να ληφθεί υπόψη η μείωση της θλιπτικής αστοχίας του σκυροδέματος, λόγω της μακροχρόνιας και επαναλαμβανόμενης δράσης των φορτίων. Πρέπει να διευκρινισθεί ότι το ιδεατό διάγραμμα που υιοθετείται αποτελείται από ένα παραβολικό κλάδο μέχρι την παραμόρφωση $\varepsilon_{co} = 2\text{‰}$ και από έναν οριζόντιο κλάδο από την παραμόρφωση $\varepsilon_{co} = 2\text{‰}$ μέχρι την παραμόρφωση $\varepsilon_{cu} = 3.5\text{‰}$.



Σχήμα 2.1β: Διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων για το σκυρόδεμα

Για το διάγραμμα τάσεων – παραμορφώσεων των ράβδων FRP, στην τιμή της τάσης f_{fk} που δίνεται από τη βιομηχανία, δεν λαμβάνονται υπόψη οι επιδράσεις μακράς διάρκειας έκθεσης του οπλισμού σε συνθήκες περιβάλλοντος. Για να ληφθεί υπόψη η μείωση της εφελκυστικής αντοχής των ράβδων FRP από την μακρόχρονη έκθεσή τους σε δυσμενείς περιβαλλοντικές συνθήκες, εισάγεται ο συντελεστής c_E^* που δίνεται από τον Πίνακα 2.1. Η μειωμένη αντοχή $c_E^* f_{fd}$ υφίσταται παραπέρα υποβάθμιση λόγω της κάμψης του δομικού στοιχείου. Η μείωση αυτή εκτιμάται ότι είναι της τάξεως του 10‰ της αντοχής $c_E^* f_{cd}$. Έτσι, η αντοχή που προτείνεται να θεωρηθεί είναι $c_E f_{cd}$, όπου $c_E = 0.9 c_E^*$. Διευκρινίζεται ότι, σε περιοχές κάμψης των ράβδων FRP, η μειωμένη εφελκυστική αντοχή τους υπολογίζεται από τη σχέση

$$f_{fk, bending} = \left(0.05 \frac{r_b}{d_b} + 0.3 \right) f_{fk} \leq f_{fk}, \quad (2.3)$$

όπου r_b είναι η ακτίνα κάμψης και d_b η διάμετρος του οπλισμού.

Συνθήκες περιβάλλοντος	Τύπος FRP	c_E^*
Σκυρόδεμα μη εκτεθειμένο στο έδαφος και στις καιρικές συνθήκες	Άνθρακας	1.0
	Γυαλί	0.8
	Αραμίδιο	0.9
Σκυρόδεμα εκτεθειμένο στο έδαφος και στις καιρικές συνθήκες	Άνθρακας	0.9
	Γυαλί	0.7
	Αραμίδιο	0.8

Πίνακας 2.1: Τιμές του c_E^*

2.2 Η Οριακή Κατάσταση Καμπτικής Αντοχής

Η φιλοσοφία του καμπτικού σχεδιασμού

Τα αποτελέσματα που παρέχονται παρακάτω αναφέρονται στην περίπτωση των ορθογωνικών διατομών και στην περίπτωση τοποθέτησης των ράβδων οπλισμού σε μία μόνο στρώση. Τα αποτελέσματα αυτά, μπορούν να επεκταθούν άμεσα στην περίπτωση των μη ορθογωνικών διατομών, καθώς και στην περίπτωση των πολλαπλών στρώσεων οπλισμού. Για την περίπτωση των πολλαπλών στρώσεων, θα πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι στην κάθε ράβδο αναπτύσσεται διαφορετική τάση, κάτι που δε συμβαίνει στην περίπτωση των ράβδων από χάλυβα.

Η ανάπτυξη των σχέσεων του καμπτικού σχεδιασμού δομικών στοιχείων σκυροδέματος με ράβδους FRP, βασίζεται στις ίδιες παραδοχές που έχουν υιοθετηθεί για ράβδους οπλισμού από χάλυβα. Η γραμμικότητα στη συμπεριφορά των ράβδων FRP στερεί από το δομικό στοιχείο την πλαστική συμπεριφορά, που επιτυγχάνεται στην περίπτωση των ράβδων από χάλυβα, με τον υπό-οπλισμό του δομικού στοιχείου. Στην περίπτωση καμπτικής αστοχίας του, η έλλειψη πλαστιμότητας σε ένα δομικό στοιχείο, οδηγεί στην ξαφνική θραύση του.

Παρακάτω θα δούμε ότι υπάρχουν δύο δυνατοί τύποι καμπτικής αστοχίας ενός δομικού στοιχείου με οπλισμό FRP: αστοχία λόγω θρυμματισμού του σκυροδέματος, που συμβαίνει στην περίπτωση του υπέρ-οπλισμού και αστοχία λόγω διάρρηξης των ράβδων FRP, που συμβαίνει στην περίπτωση του υπό-οπλισμού. Στην περίπτωση του οπλισμού από χάλυβα, η αστοχία του δομικού στοιχείου από θρυμματισμό σκυροδέματος συνιστάται να αποφεύγεται, γιατί συμβαίνει απότομα και ξαφνικά, χωρίς προειδοποίηση. Ο τύπος αυτός αστοχίας, συμβαίνει σε υπερ-οπλισμένες διατομές, οι οποίες λόγω του υψηλού ποσοστού οπλισμού επιδεικνύουν μικρή πλαστιμότητα. Στην περίπτωση των ράβδων FRP, ο τύπος αυτός αστοχίας συνιστάται, καθότι το δομικό στοιχείο επιδεικνύει μία μικρή πλάστιμη συμπεριφορά, που δεν παρατηρείται στον τύπο της αστοχίας από την διάρρηξη των ράβδων οπλισμού FRP.

Ο τύπος αστοχίας του δομικού στοιχείου που τελικά θα επιλεγεί είναι ένα ζήτημα που θα αποφασιστεί από το μελετητή. Και οι δύο τύποι αστοχίας μπορούν να επιλεγθούν, αρκεί να ικανοποιούνται όλες οι απαιτήσεις λειτουργικότητας και αντοχής.

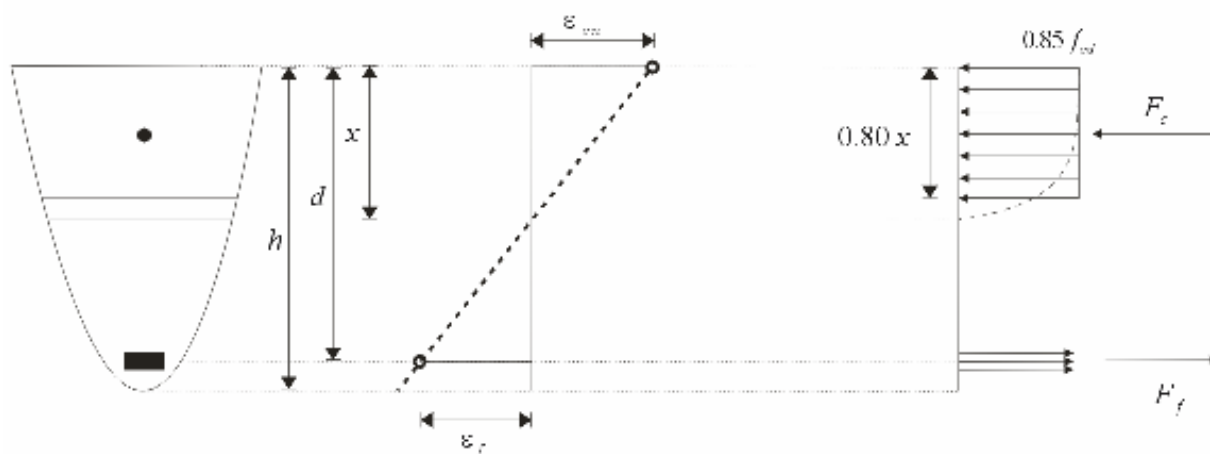
Για να αντισταθμιστεί η έλλειψη πλαστιμότητας, το δομικό στοιχείο θα πρέπει να κατέχει υψηλό “απόθεμα” αντοχής. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με την επιλογή περιθωρίων ασφάλειας υψηλότερων από αυτά που έχουν επιλεγεί για την περίπτωση του παραδοσιακού οπλισμού με ράβδους χάλυβα.

Γενικά, αυτό που πρέπει να επιδιώκεται, είναι η χρήση υψηλής αντοχής σκυροδέματος, προκειμένου να γίνει η καλύτερη αξιοποίηση της υψηλής αντοχής των ράβδων FRP. Μία τέτοια επιλογή οδηγεί στην αύξηση της ακαμψίας της ρηγματωμένης διατομής του δομικού στοιχείου, αλλά και στην αύξηση της ψαθυρότητάς του, κάτι που δεν είναι επιθυμητό.

Σε ορισμένες περιπτώσεις, αν η διατομή δεν βρίσκεται ολόκληρη υπό θλίψη, μπορεί να χρησιμοποιηθεί η απλοποιημένη ορθογωνική κατανομή των θλιπτικών τάσεων. Η κατανομή αυτή ορίζεται ως εξής

- Η διανομή των θλιπτικών τάσεων είναι ομοιόμορφη και εκτείνεται σε ένα μήκος $0.80 x$, όπου x είναι το ύψος της θλιβόμενης ζώνης.
- Η ομοιόμορφη διανομή έχει τιμή ίση με $0.85 f_{cd} / \gamma_c$ για θλιβόμενες ζώνες σταθερού πλάτους, ή για ζώνες των οποίων το πλάτος αυξάνει προς τις ίνες που θλίβονται περισσότερο. Για θλιβόμενες ζώνες των οποίων το πλάτος μειώνεται προς τις ίνες που θλίβονται περισσότερο, η ομοιόμορφη διανομή παίρνεται ίση με $0.80 f_{cd} / \gamma_c$.

Η τελευταία περίπτωση αφορά κυκλικές ή τριγωνικές διατομές με κορυφή προς την ακραία θλιβόμενη ίνα, ή τραπεζοειδείς διατομές.



Σχήμα 2.2: Ορθογωνικό διάγραμμα τάσεων – παραμορφώσεων σκυροδέματος

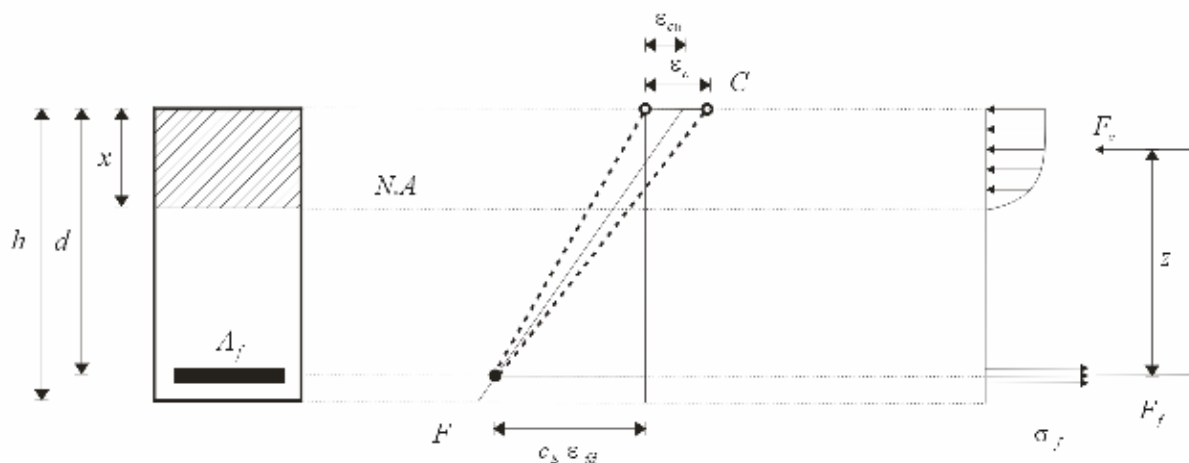
Ένα δομικό στοιχείο σκυροδέματος με οπλισμό FRP, λέμε ότι αστοχεί από κάμψη, όταν

- Σε μία διατομή του καμπτόμενου δομικού στοιχείου η μέγιστη τιμή της θλιπτικής παραμόρφωσης του σκυροδέματος προσεγγίσει την τιμή $\varepsilon_{cu} = 3.5\text{‰}$ (τύπος αστοχίας από θρυμματισμό σκυροδέματος).
- Η εφελκυστική αντοχή παραμόρφωσης σε μία από τις ράβδους FRP προσεγγίσει την εφελκυστική αντοχή $c_E \varepsilon_{fd}$ (τύπος αστοχίας από διάρρηξη του οπλισμού FRP).

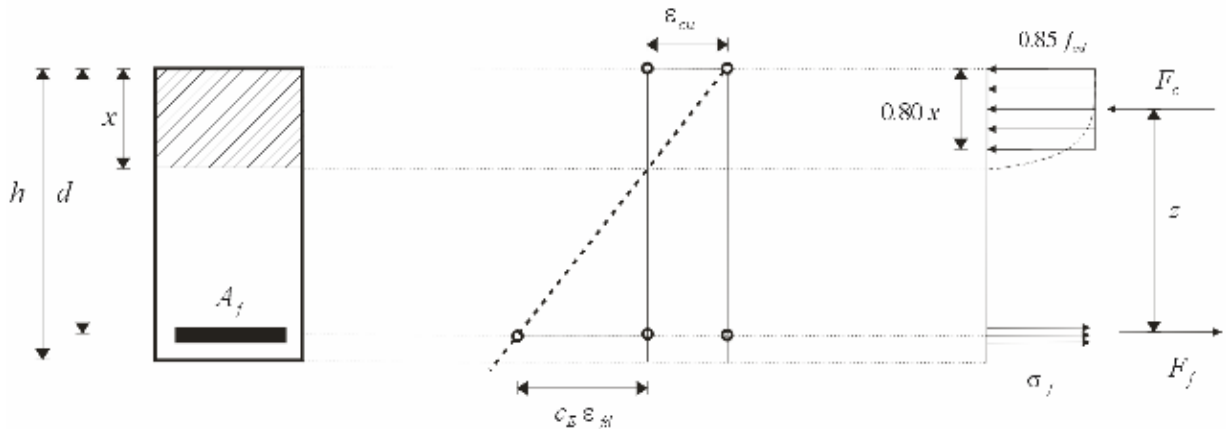
Όταν οι δύο αυτές καταστάσεις συμβούν ταυτόχρονα, τότε η κατάσταση της διατομής χαρακτηρίζεται ως κατάσταση ισόρροπης διατομής.

Οι δύο τύποι της καμπτικής αστοχίας

Οι δύο τύποι καμπτικής αστοχίας που προαναφέρθηκαν, αναφορικά με μία ορθογωνική διατομή, περιγράφονται στα Σχήματα 2.3 και 2.4. Ο τύπος αστοχίας 1, που συνδέεται με την περιοχή 1 του Σχήματος 2.3, συμβαίνει όταν η εφελκυστική παραμόρφωση ε_f της ράβδου FRP προσεγγίσει την μέγιστη εφελκυστική αντοχή της ράβδου FRP. Θα πρέπει να τονιστεί ότι η αστοχία του τύπου 1 αντιστοιχεί σε γραμμικό διάγραμμα παραμόρφωσης της διατομής που διέρχεται από το σημείο F' στο οποίο $\varepsilon_f = c_E \varepsilon_{fd}$.

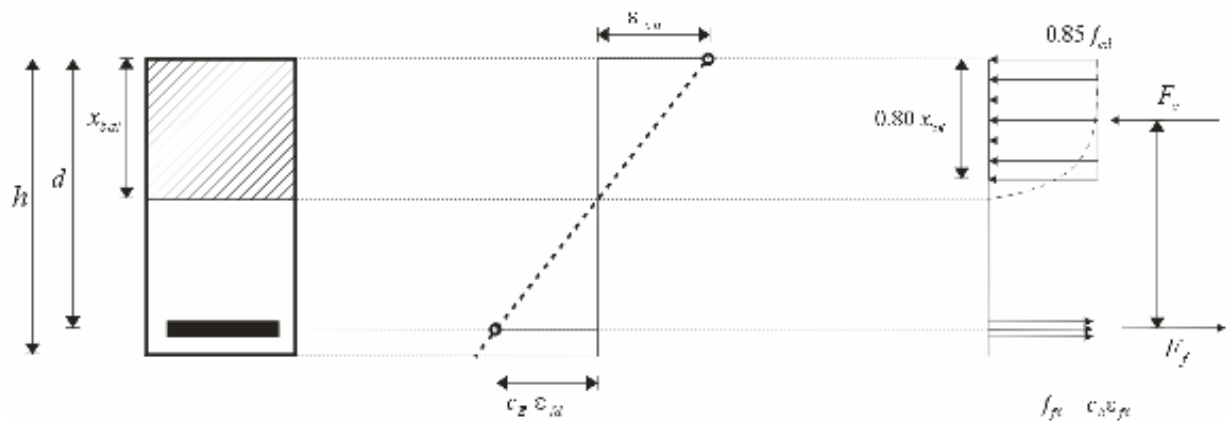


Σχήμα 2.3: Τύπος αστοχίας 1



Σχήμα 2.4: Τύπος αστοχίας 2

Στην περίπτωση της αστοχίας τύπου 2, η μέγιστη παραμόρφωση στο σκυρόδεμα έχει πρώτη πλησιάσει την παραμόρφωση αντοχής ε_{cu} του σκυροδέματος, ενώ την ίδια στιγμή, η εφελκυστική παραμόρφωση ε_f στον οπλισμό FRP είναι μικρότερη από την τιμή $c_E \varepsilon_{fd}$, που αντιστοιχεί στην μέγιστη εφελκυστική της αντοχής. Η γραμμή που χωρίζει τις δύο περιοχές διέρχεται από τα σημεία F και C και αντιστοιχεί στην παραμορφωσιακή κατάσταση της διατομής, η οποία είναι γνωστή ως κατάσταση της ισορροπής διατομής. Η κατάσταση αυτή της διατομής αντιστοιχεί στην περίπτωση εκείνη, κατά την οποία ο οπλισμός έχει φθάσει στην οριακή τιμή, όπου η εφελκυστική παραμόρφωση των ράβδων έχει φτάσει την τιμή $c_E \varepsilon_{fd}$, ενώ την ίδια στιγμή, το σκυρόδεμα έχει φθάσει στην οριακή τιμή του θρυμματισμού του, όπου η θλιπτική του παραμόρφωση έχει προσεγγίσει την τιμή $\varepsilon_{cu} = 3.5\%$. Η κατάσταση αυτή απεικονίζεται στο Σχήμα 2.5.



Σχήμα 2.5: Η ισορροπη διατομή

Η καμπτική αντοχή ενός καμπτόμενου δομικού στοιχείου, εξαρτάται από το αν η αστοχία διέπεται από τον θρυμματισμό του σκυροδέματος ή από τη διάρρηξη του οπλισμού FRP. Ο τύπος αστοχίας που θα συμβεί σε μία διατομή, προσδιορίζεται συγκρίνοντας το λόγο ρ_f του υπάρχοντος οπλισμού

στη διατομή, με το λόγο οπλισμού ρ_{fb} , που αντιστοιχεί στην κατάσταση διατομής που ορίζεται ως ισόρροπη. Ο λόγος του οπλισμού ρ_{fb} , στην περίπτωση της ισόρροπης διατομής, βρίσκεται ότι είναι

$$\rho_{f,bal} = \frac{A_{f,bal}}{b d} = \frac{2.38 E_f}{3.5 E_f + 1000 c_E f_{fd}} \frac{f_{cd}}{c_E f_{fd}} \quad (2.4)$$

Η παραπάνω σχέση προκύπτει από την ισορροπία της συνισταμένης των τάσεων που επενεργούν στη διατομή. Η συνισταμένη των θλιπτικών τάσεων στο σκυρόδεμα, που προκύπτει από το απλοποιημένο διάγραμμα του Σχήματος 2.6, είναι

$$F_c = 0.68 b x_{bal} f_{cd} \quad (2.5)$$

Η συνισταμένη των εφελκυστικών τάσεων στον οπλισμό FRP είναι

$$F_f = A_{f,bal} c_E f_{fd}, \quad (2.6)$$

όπου $A_{f,bal}$ είναι το εμβαδόν της διατομής του οπλισμού FRP στην κατάσταση της ισόρροπης διατομής.

Το πάχος x_{bal} της θλιβόμενης ζώνης, που προσδιορίζεται από το διάγραμμα παραμόρφωσης (Σχήμα 2.6), είναι

$$\left(\frac{x}{b}\right)_{bal} = \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu} + c_E \varepsilon_{fd}}, \quad \text{όπου } \varepsilon_{cu} = 3.5\%_0. \quad (2.7)$$

Αστοχία από θρυμματισμό του σκυροδέματος

Η αστοχία αυτή συμβαίνει όταν το ποσοστό οπλισμού που θα τοποθετηθεί είναι μεγαλύτερο από το ποσοστό που αντιστοιχεί στην ισόρροπη διατομή, δηλαδή όταν $\rho_f > \rho_{fb}$.³

$$\rho_f = \frac{A_f}{b d}. \quad (2.8)$$

Στην παραπάνω σχέση, A_f είναι το εμβαδό του υπάρχοντος οπλισμού, b το πλάτος του ορθογωνικού στοιχείου και d το στατικό του ύψος. Στην περίπτωση αυτή, η τασική διανομή στη θλιβόμενη περιοχή μπορεί να προσεγγισθεί με το ορθογωνικό στερεό των τάσεων (στερεό των τάσεων του Whitman).

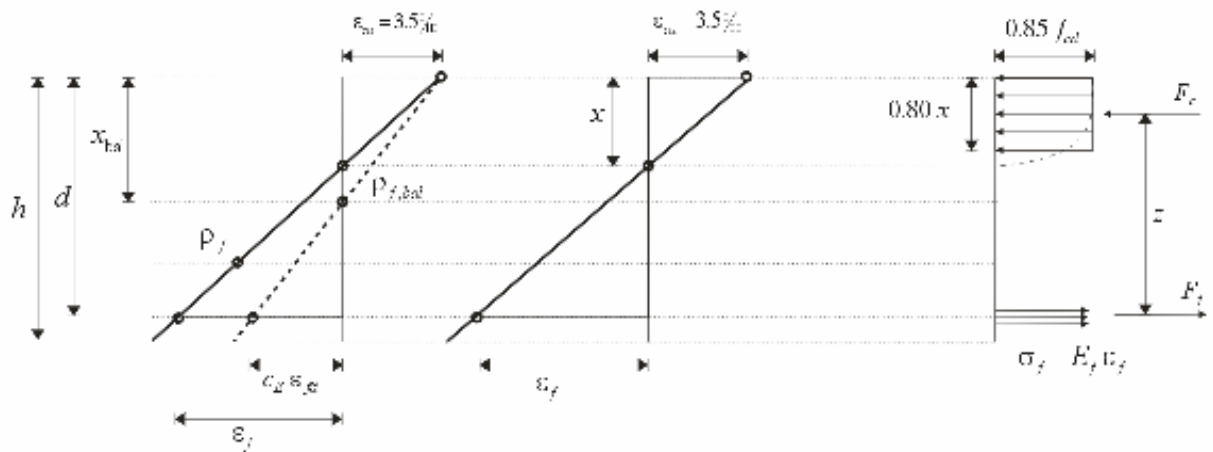
³ Προκειμένου το δομικό στοιχείο να αποκτήσει επαρκή παραμορφωσιμότητα, επιλέγεται ως ποσοστό οπλισμού ρ_f η τιμή $\rho_f = 1.33 \rho_{f,bal}$.

Από το απλοποιημένο διάγραμμα των τάσεων, που επενεργούν στην διατομή, οι συνιστάμενες δυνάμεις στο σκυρόδεμα και στον οπλισμό FRP, προκύπτουν στη μορφή

$$F_c = 0.68 b x_{bal} f_{cd}$$

$$F_s = A_f \sigma_f \tag{2.9}$$

όπου σ_f είναι η εφελκυστική τάση που αναπτύσσεται στον οπλισμό.



Σχήμα 2.6: Αστοχία από θρυμματισμό

Η τάση που αναπτύσσεται στις ράβδους FRP θα είναι

$$\sigma_f = \sqrt{\left(\frac{1.75 E_f}{1000}\right)^2 + \frac{2.38 E_f f_{cd}}{1000 \rho_f}} - \frac{1.75 E_f}{1000} \tag{2.10}$$

Από τη συνθήκη ισοροπίας των δυνάμεων στην διεύθυνση του άξονα του στοιχείου, και λαμβάνοντας υπόψη τη γραμμική συμπεριφορά των ράβδων FRP, προκύπτει η τάση σ_f που αναπτύσσεται στις ράβδους FRP.

Η τάση αυτή θα πρέπει να ικανοποιεί τη σχέση

$$\sigma_f < c_E f_{fd} \tag{2.11}$$

Η παραμόρφωση του οπλισμού FRP δίνεται από τη σχέση

$$\varepsilon_f = \frac{\sigma_f}{E_f} \tag{2.12}$$

Το πάχος της θλιβόμενης ζώνης, σύμφωνα με το διάγραμμα του Σχήματος 2.7, είναι

$$\frac{x}{d} = \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu} + \varepsilon_f} \quad (2.13)$$

Έχοντας υπολογίσει την τάση που καταπονεί τον οπλισμό FRP διατομής, η ροπή σχεδιασμού M_{Rd} είναι

$$M_{Rd} = F_f z = F_c z, \quad (2.14)$$

$$\frac{M_{Rd}}{b d^2} = \rho_f \sigma_f \left(1 - 0.59 \frac{\rho_f \sigma_f}{f_{cd}} \right). \quad (2.15)$$

Ο σχεδιασμός στην οριακή κατάσταση αντοχής απαιτεί την ικανοποίηση της παρακάτω συνθήκης

$$M_{Rd} \geq M_{Sd}.$$

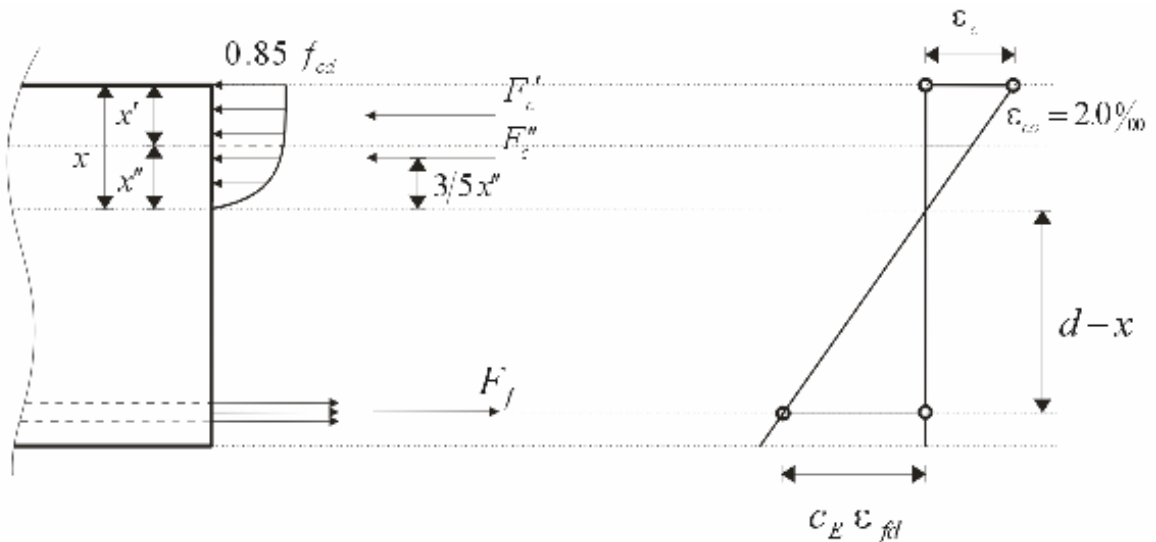
Αστοχία από διάρρηξη του οπλισμού FRP

Όταν $\rho < \rho_f$, η αστοχία του δομικού στοιχείου θα αρχίσει με τη διάρρηξη του οπλισμού FRP. Στην περίπτωση αυτή, το σκυρόδεμα δεν έχει φθάσει στη μέγιστη αντοχή του και επομένως, δε μπορεί να χρησιμοποιηθεί το ορθογωνικό στερεό των τάσεων του Whitman.

Η εφελκυστική τάση σ_f , που αναπτύσσεται στον οπλισμό FRP, έχει προσεγγίσει την τιμή $c_E \varepsilon_{fd}$, ενώ η τάση στο σκυρόδεμα σ_c είναι μικρότερη από την τιμή $0.85 f_{cd}$ ($\sigma_c < 0.85 f_{cd}$). Στην ανάλυση που ακολουθεί θα διακριθούν δύο περιπτώσεις: η περίπτωση όπου για την παραμόρφωση στο σκυρόδεμα ε_c ισχύει $\varepsilon_{co} = 2\text{‰} < \varepsilon_c < \varepsilon_{cu} = 3.5\text{‰}$ και η περίπτωση όπου $\varepsilon_c < \varepsilon_{co} = 2\text{‰}$.

Περίπτωση 1 : $\varepsilon_{co} = 2\text{‰} < \varepsilon_c < \varepsilon_{cu} = 3.5\text{‰}$

Για την περίπτωση αυτή, η παραμορφωσιακή και εντατική κατάσταση περιγράφεται στο Σχήμα 2.7



Σχήμα 2.7: Αστοχία από διάρρηξη του οπλισμού

Οι θλιπτικές τάσεις που αντιστοιχούν στην ομοιόμορφη κατανομή καλύπτουν το πλάτος x' της θλιβόμενης ζώνης, ενώ εκείνες με την παραβολική κατανομή το πλάτος x'' . Είναι

$$x' + x'' = x \quad , \quad (2.16)$$

όπου x είναι το συνολικό πλάτος της θλιβόμενης ζώνης. Από το διάγραμμα παραμορφώσεων του Σχήματος 2.8, έχουμε

$$\frac{x}{d} = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_c + c_E \varepsilon_{fd}} \quad (2.17)$$

και

$$\frac{x''}{d} = \frac{\varepsilon_{co}}{\varepsilon_c + c_E \varepsilon_{fd}} \quad , \quad (2.18)$$

Από τις παραπάνω σχέσεις προκύπτει

$$\frac{x'}{d} = \frac{\varepsilon_c - \varepsilon_{co}}{\varepsilon_c + c_E \varepsilon_{fd}} \quad . \quad (2.19)$$

Επομένως, το πάχος της θλιβόμενης ζώνης είναι

$$\frac{x}{d} = \frac{x'}{d} + \frac{x''}{d} \quad . \quad (2.20)$$

Οι συνιστάμενες δυνάμεις των θλιπτικών τάσεων των δύο θλιπτικών υποπεριοχών της θλιβόμενης περιοχής της διατομής είναι

$$F'_c = 0.85 f_{cd} x' b \quad , \quad (2.21)$$

$$F_c'' = \frac{2}{3} 0.85 f_{cd} x'' b . \quad (2.22)$$

Οι θέσεις των δυνάμεων αυτών σε σχέση με την ουδέτερη γραμμή φαίνονται στο Σχήμα 2.8. Στην περίπτωση αυτή, όλα τα μεγέθη της διατομής έχουν εκφραστεί σε όρους της παραμόρφωσης ε_c του σκυροδέματος. Η τιμή της παραμόρφωσης αυτής προκύπτει από τη συνθήκη ισορροπίας των δυνάμεων κατά τη διεύθυνση του άξονα της δοκού

$$F_c' + F_c'' = F_f . \quad (2.23)$$

Η μέγιστη θλιπτική παραμόρφωση που αναπτύσσεται στο σκυρόδεμα προσδιορίζεται από τη σχέση

$$\varepsilon_c = \frac{\rho_f c_E^2 f_{jd}^2 + 0.566 E_f (f_{cd} / 1000)}{E_f (0.85 f_{cd} - \rho_f c_E f_{jd})} , \quad (2.24)$$

Η τιμή της παραμόρφωσης που θα προκύψει από τη σχέση αυτή, θα πρέπει να βρίσκεται στα όρια που θέσαμε, δηλαδή $\varepsilon_{co} = 2\% < \varepsilon_c < \varepsilon_{cu} = 3.5\%$. Η ροπή αντοχής δίνεται από τη σχέση

$$M_{rd} = F_c' z' + F_c'' z'' \quad (2.25)$$

από όπου, με σχετική αντικατάσταση προκύπτει

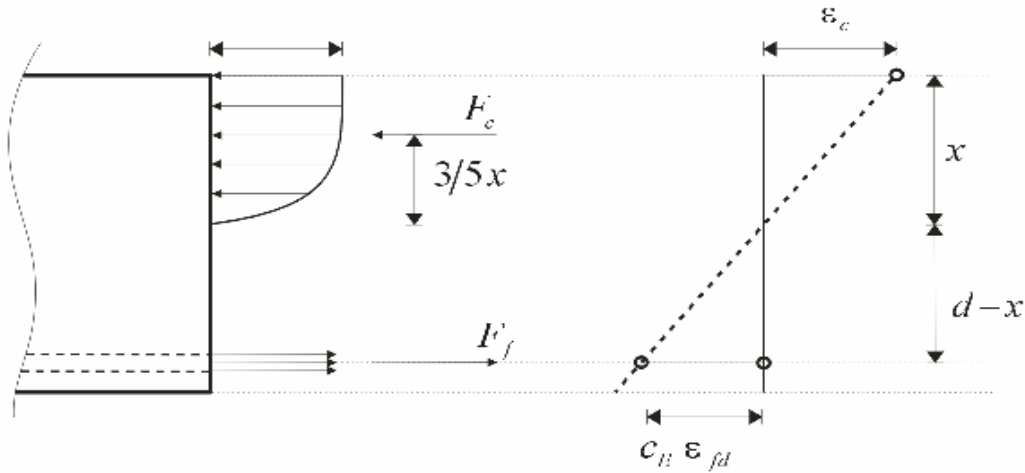
$$\frac{M_{Rd}}{b d^2} = \frac{x'}{d} 0.85 f_{cd} \left(1 - 0.5 \frac{x'}{d} \right) + \frac{x''}{d} 0.56 f_{cd} \left(1 - \frac{x}{d} + 0.6 \frac{x''}{d} \right) \quad (2.26)$$

Ο σχεδιασμός στην οριακή κατάσταση αντοχής απαιτεί την ικανοποίηση της παρακάτω συνθήκης

$$M_{Rd} \geq M_{Sd} .$$

Περίπτωση 2 : $\varepsilon_c < \varepsilon_{co} = 2\%$

Η κατανομή των θλιπτικών τάσεων και το διάγραμμα παραμορφώσεων της διατομής δείχνεται στο Σχήμα 2.8.



Σχήμα 2.8: Αστοχία από διάρρηξη του οπλισμού

Το πλάτος της θλιβόμενης ζώνης x παρέχεται από τη Σχέση (2.17), και η θλιπτική δύναμη F_c υπολογίζεται από τη σχέση

$$F_c = \frac{2}{3} \sigma_{cd} b x . \quad (2.27)$$

Η θλιπτική τάση σ_{cd} στο σκυρόδεμα παρέχεται από την παρακάτω σχέση,

$$\sigma_{cd} = 0.85 f_{cd} \varepsilon_c \left(1 - \frac{1}{4} \varepsilon_c \right), \quad (2.28)$$

που έχει υιοθετηθεί από τον EC2. Στη σχέση αυτή η παραμόρφωση υπεισέρχεται με θετικό πρόσημο. Από την ισορροπία των δυνάμεων στην διεύθυνση του άξονα του δομικού στοιχείου προκύπτει η παρακάτω τριτοβάθμια εξίσωση για την άγνωστη παραμόρφωση ε_c

$$0.142 \varepsilon_c^3 - 0.567 \varepsilon_c^2 + \rho c_E \frac{f_{fd}}{F_{cd}} \varepsilon_c + \rho c_E^2 \frac{f_{fd}^2}{E_f f_{cd}} = 0 . \quad (2.29)$$

Με δεδομένο την παραμόρφωση ε_c , μπορούν να υπολογιστούν όλες οι ποσότητες της διατομής. Η ροπή αντοχής M_{rd} υπολογίζεται από τη σχέση

$$M_{rd} = F_f z , \quad (2.30)$$

από όπου

$$\frac{M_{rd}}{b d^2} + \rho_f c_E f_{fd} \left(1 - 0.40 \frac{x}{d} \right) . \quad (2.31)$$

2.3 Η Οριακή Κατάσταση Λειτουργικότητας

Ως λειτουργικότητα ορίζεται η ικανοποιητική λειτουργία της κατασκευής για τα φορτία που θα την καταπονήσουν κατά τη διάρκεια της ζωής της. Η λειτουργικότητα σχετίζεται

- με τις μέγιστες τάσεις που μπορούν να αναπτυχθούν
- με τη ρηγματώση του σκυροδέματος. Το υπερβολικό εύρος ρωγμών είναι ανεπιθύμητο για αισθητικούς και άλλους λόγους, οι οποίοι μπορούν να βλάψουν ή να υποβαθμίσουν το σκυρόδεμα.
- με το βέλος κάμψης. Το βέλος κάμψης ενός δομικού στοιχείου θα πρέπει να βρίσκεται μέσα σε αποδεκτά όρια, που επιβάλλονται από τη χρήση της κατασκευής. Για παράδειγμα, να μην βλάπτονται τα υποστηριζόμενα μη φέροντα στοιχεία.

Οι μέγιστες τιμές των τάσεων που αναπτύσσονται στα δύο υλικά θα πρέπει να περιορίζονται κατάλληλα, προκειμένου να αποφεύγονται διαρρήξεις στους οπλισμούς FRP, και επίσης, να περιορίζονται τα φαινόμενα ερπυσμού στο σκυρόδεμα. Τόσο οι παραμορφώσεις, όσο και οι βυθίσεις στις κατασκευές, δεν πρέπει να παίρνουν υπερβολικές τιμές, για να μην διαταράσσεται η κανονική λειτουργία της κατασκευής, και να μην προξενούν ανησυχία και ανασφάλεια στους χρήστες. Επιπρόσθετα, τα φαινόμενα ρηγματώσης θα πρέπει να είναι περιορισμένα, ώστε να μην επηρεάζεται η ανθεκτικότητα των κατασκευών στο χρόνο, η λειτουργικότητά τους, η συνάφεια οπλισμού FRP – σκυροδέματος, κτλ.

Η συμπεριφορά μίας κατασκευής στις Οριακές Καταστάσεις Λειτουργικότητας (ΟΚΛ), μπορεί να αναλυθεί λαμβάνοντας υπόψη τόσο την συμπεριφορά της μη ρηγματωμένης, όσο και της ρηγματωμένης διατομής. Μία τέτοια προσέγγιση μπορεί να στηριχθεί στις παρακάτω υποθέσεις

- γραμμικά ελαστική συμπεριφορά των υλικών
- επίπεδες διατομές δοκών πριν τη φόρτιση, παραμένουν επίπεδες και μετά την φόρτιση
- υπάρχει τέλειο δέσιμο ανάμεσα στο σκυρόδεμα και στις ράβδους FRP.

Η πρώτη υπόθεση θεωρεί ότι υπάρχει ένα σταθερό μέτρο ελαστικότητας των υλικών στη διεύθυνση του άξονα των δοκών. Η δεύτερη υπόθεση δηλώνει την γραμμικότητα του διαγράμματος παραμόρφωσης. Η τρίτη, σε συνδυασμό με την πρώτη, επιτρέπει μια “αναλογικότητα” μεταξύ των τάσεων στις ράβδους FRP και στο περιβάλλον σκυρόδεμα που είναι τέλεια “δεμένο” με αυτές. Έτσι, είναι

$$\frac{\sigma_f}{\sigma_c} = \frac{E_f}{E_c} = n_f. \quad (2.32)$$

Η τιμή του λόγου n_f θα ληφθεί υπόψη στην επίδραση του ερπυσμού, τόσο για περιπτώσεις φορτίσεων σύντομης διάρκειας, όσο και για περιπτώσεις φορτίσεων μεγάλης διάρκειας. Η θέση του ουδέτερου άξονα και η ροπή

αδράνειας με την ρηγματωμένη και για τη μη ρηγματωμένη διατομή των δοκών, θα πρέπει να υπολογιστεί για τους ελέγχους ασφαλείας έναντι των Οριακών Καταστάσεων Λειτουργικότητας. Στην ανάλυση της εντατικής κατάστασης της κατασκευής στα πλαίσια των Οριακών Καταστάσεων Λειτουργικότητας, επιπρόσθετα των εφαρμοζόμενων φορτίσεων, θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη και οι επιδράσεις των θερμικών μεταβολών, του ερπυσμού και της συρρίκνωσης.

Έλεγχος ρηγμάτωσης

Ο έλεγχος του εύρους των ρωγμών που εμφανίζονται στα δομικά στοιχεία κατασκευών από σκυρόδεμα με οπλισμό FRP, αποσκοπεί στο να εξασφαλίσει την κατάλληλη χρήση της κατασκευής και στο να προστατέψει τον οπλισμό FRP. Συνήθως, κατά τον έλεγχο αυτό θεωρούνται μόνο οι μόνιμες φορτίσεις της κατασκευής.

Ο υπολογισμός του εύρους των ρωγμών, για τους δύο τύπους αστοχίας που έχουν περιγραφεί προηγουμένως, γίνεται με τη διαδικασία που περιγράφεται παρακάτω.

Αν η εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος δηλωθεί με f_r , τότε η ροπή M_{cr} , που δημιουργεί τη ρηγμάτωση στο σκυρόδεμα, προκύπτει από τη σχέση

$$M_{cr} = \frac{f_r I_{nt}}{c_2}. \quad (2.33)$$

Η εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος f_r , παρέχεται από την εμπειρική σχέση

$$f_r = 0.6 \sqrt{f'_c}. \quad (2.34)$$

Στη παραπάνω σχέση, c_2 είναι η απόσταση του κέντρου βάρους της διατομής από την κάθε επιφάνεια, και

$$I_{nt} = \frac{b h^3}{12}. \quad (2.35)$$

Η τάση που αναπτύσσεται στον οπλισμό FRP για την ροπή M_{cr} , μετά το σχηματισμό της ρηγματωμένης ζώνης, ισούται με

$$f_{fr} = \frac{M_{cr}}{A_{f,prov} J d}, \quad (2.36)$$

όπου $A_{f,prov}$ είναι το εμβαδόν του οπλισμού που έχει τοποθετηθεί, d το στατικό ύψος της διατομής, και

$$J = 1 - \frac{k}{3}, \quad (2.37)$$

με

$$k = \sqrt{(\rho_f n_f)^2 + 2 n_f \rho_f} - \rho_f n_f \quad (2.38)$$

και

$$\rho_{f,prov} = \frac{A_{f,prov}}{b d}, \quad (2.39)$$

το ποσοστό οπλισμού που έχει τοποθετηθεί. Σε μία κατασκευή σκυροδέματος με οπλισμό FRP, ως ένα επιτρεπόμενο εύρος ρωγμών μπορεί να ληφθούν τα 0.5 mm. Τα πειραματικά αποτελέσματα έχουν δείξει ότι οι σχέσεις που χρησιμοποιούνται για τον οπλισμό από χάλυβα μπορούν κατάλληλα να χρησιμοποιηθούν στη περίπτωση του οπλισμού από FRP. Έτσι, η σχέση που μπορεί να χρησιμοποιηθεί και στην περίπτωση των δομικών στοιχείων με οπλισμό FRP είναι

$$w_k = \beta s f_{fm}, \quad (2.40)$$

όπου w_k είναι το χαρακτηριστικό εύρος ρωγμών σε mm και β είναι ένας συντελεστής ίσος με

- $\beta = 1.7$, για ρωγμές λόγω των φορτίων και για παρεμποδιζόμενη ρηγμάτωση σε διατομές με μία ελάχιστη διάσταση μεγαλύτερη από 800 mm.
- $\beta = 1.3$, για παρεμποδιζόμενες διατομές με μία διάσταση μικρότερη από 300 mm, με το β να παρεμβάλλεται γραμμικά στο ενδιάμεσο διάστημα, για παρεμποδιζόμενες διατομές των οποίων η μία διάσταση βρίσκεται μεταξύ των 300 και 800 mm.

Στην παραπάνω σχέση το s_m είναι μία μέση απόσταση μεταξύ των ρωγμών που υπολογίζεται από τη σχέση

$$s_m = 50 + 0.25 k_1 k_2 \frac{d_b}{\rho_r}, \quad (2.41)$$

όπου k_1 είναι ένας συντελεστής που εισάγει τις ιδιότητες των ράβδων FRP, ίσος με 1.6 και k_2 είναι ένας συντελεστής που εξαρτάται από το διάγραμμα παραμορφώσεων και είναι ίσος με 0.5 για κάμψη και 1.0 για καθαρό εφελκυσμό. Το d_b είναι η ισοδύναμη διάμετρος των ράβδων FRP (αν υπάρχουν διάμετροι διαφορετικών τιμών παίρνεται μια μέση τιμή). Το ρ_r είναι ο ισοδύναμος λόγος οπλισμού,

$$\rho_r = \frac{A_{f,prov}}{A_{c,eff}}, \quad (2.42)$$

όπου $A_{c,eff}$ είναι η ισοδύναμη επιφάνεια σε εφελκυσμό, που ορίζεται ως η επιφάνεια του σκυροδέματος που περιβάλλει την εφελκυσμένη ράβδο και έχει πλάτος ίσο με 2.5 φορές την απόσταση μεταξύ της εφελκυσμένης ίνας και του κέντρου βάρους των ράβδων. Το ε_{fm} βρίσκεται από την εξίσωση

$$\varepsilon_{fm} = \frac{\sigma_f}{E_f} \left[1 - \beta_1 \beta_2 \left(\frac{\sigma_{fr}}{\sigma_f} \right)^m \right], \quad (2.43)$$

όπου σ_f είναι η εφελκυστική τάση οπλισμού της ρηγματωμένης διατομής, $\beta_1 = 0.5$ και $\beta_2 = 1$, για μικρής διάρκειας φορτίσεις και $\beta_2 = 0.5$, για μικρής διάρκειας φορτίσεις ή ανακυκλιζόμενες φορτίσεις. Το σ_{fr} είναι η εφελκυστική τάση οπλισμού της ρηγματωμένης διατομής, όταν εμφανίζεται η πρώτη ρωγμή, και $m = 2$.

Έλεγχος βυθίσεων

Για τα ψευδοστατικά φορτία που επενεργούν στην κατασκευή, θα πρέπει για την Οριακή Κατάσταση Λειτουργικότητας, να εξασφαλίζεται η μη διάρρηξη των ράβδων οπλισμού FRP. Αυτό γίνεται, όταν σε κάθε θέση του κυρίου οπλισμού ισχύει

$$\sigma_f \leq c_E f_{fd},$$

όπου f_{fd} είναι η εφελκυστική τάση σχεδιασμού για τις ράβδους FRP που έχει υπολογιστεί για $\gamma_f = 1$ και με την τιμή του c_E που έχει αναφερθεί. Από την άλλη πλευρά, η μέγιστες τιμές των τάσεων για το σκυρόδεμα θα πρέπει να είναι αυτές που ορίζει ο ισχύων Κανονισμός σκυροδέματος (ΕΚΩΣ). Οι βυθίσεις που αναπτύσσονται σε δομικά στοιχεία κατασκευών σκυροδέματος θα πρέπει να ικανοποιούν τις απαιτήσεις του ισχύοντα Κανονισμού Σκυροδέματος. Το μοντέλο του δομικού συστήματος, που θα χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό των βυθίσεων και των ρωγμών, θα πρέπει να προσομοιώνει την πραγματική συμπεριφορά των κατασκευών. Αν κρίνεται αναγκαίο, θα πρέπει να ληφθούν υπόψη και οι ρηγματώσεις στην κατασκευή. Το μοντέλο αυτό θα πρέπει να λαμβάνει υπόψη τα παρακάτω

- το κατάλληλο μέτρο ελαστικότητας του σκυροδέματος
- τον ερπυσμό και τη συρρίκνωση του σκυροδέματος
- την ακαμψία του σκυροδέματος μεταξύ των ρωγμών
- τις θερμικές φορτίσεις
- τα στατικά και δυναμικά φορτία

Τονίζεται ότι, αν για το δομικό σύστημα χρησιμοποιείται μη γραμμική ανάλυση, τότε δεν θα πρέπει να γίνεται χρήση της αρχής της υπέρθεσης.

Ο υπολογισμός της βύθισης για δομικά στοιχεία σκυροδέματος με οπλισμό FRP μπορεί να γίνεται με ολοκλήρωση του διαγράμματος καμπυλότητας. Τέτοια διαγράμματα μπορούν να υπολογιστούν με μη γραμμικές αναλύσεις παίρνοντας υπόψη τόσο τη ρηγμάτωση, όσο και την εφελκυστική ακαμψία του σκυροδέματος. Εναλλακτικά, απλοποιημένες αναλύσεις είναι δυνατόν να γίνουν, όμοια με αυτές που χρησιμοποιούνται για παραδοσιακά μέλη οπλισμένου σκυροδέματος με οπλισμό από χάλυβα. Πειραματικές δοκιμές έχουν δείξει ότι, το μοντέλο που προτείνεται από τον EC2 για τον οπλισμό κατασκευών από χάλυβα, μπορεί να αξιοποιηθεί κατάλληλα για μέλη κατασκευών σκυροδέματος με οπλισμό FRP. Επομένως, η παρακάτω εξίσωση για τον οπλισμό της βύθισης των δομικών μελών μπορεί να χρησιμοποιηθεί

$$f = f_{II} \beta_1 \beta_2 \left(\frac{M_{cr}}{M_s} \right)^2 + f_I \left[1 - \beta_1 \beta_2 \left(\frac{M_{cr}}{M_s} \right)^2 \right], \quad (2.44)$$

όπου

- f_I είναι η βύθιση του στοιχείου για μη ρηγματωμένη διατομή
- f_{II} είναι η βύθιση του στοιχείου για ρηγματωμένη διατομή
- $\beta_1 = 0.5$ για τις ιδιότητες συνάφειας των ράβδων FRP
- $\beta_2 = \begin{cases} 1, & \text{για σύντομη διάρκεια φόρτισης} \\ 0.5, & \text{για μακρά διάρκεια φόρτισης ή ανακυκλιζόμενη φόρτιση} \end{cases}$
- M_s είναι η μέγιστη ροπή κάμψης που επενεργεί στο εξεταζόμενο στοιχείο
- M_{cr} είναι η ροπή ρηγμάτωσης που υπολογίζεται στην ίδια διατομή του M_s

Για ομοιόμορφη φόρτιση των ανοιγμάτων μίας συνεχούς δοκού, οι σχέσεις που δίνουν τα f_I και f_{II} είναι,

$$f_I = k l^2 \left(\frac{1}{r} \right)_I \quad \text{και} \quad f_{II} = k l^2 \left(\frac{1}{r} \right)_{II}, \quad (2.45 \alpha, \beta)$$

με

$$k = \frac{5}{48} (1 - 0.1 \beta), \quad (2.46)$$

όπου

$$\beta = \frac{|M_A + M_B|}{M_s}. \quad (2.47)$$

Τα M_A, M_B είναι οι ροπές ρηγμάτων στα στηρίγματα και M_s είναι η ροπή στο άνοιγμα, και

$$\left(\frac{1}{r}\right)_I = \frac{M_s}{E I_I}, \quad \left(\frac{1}{r}\right)_{II} = \frac{M_s}{E I_{II}} \quad (2.48 \alpha, \beta)$$

οι αντίστοιχες καμπυλότητες. Στις παραπάνω σχέσεις E είναι το μέτρο ελαστικότητας του σκυροδέματος, και οι ροπές αδράνειας I_I και I_{II} δίνονται από τις σχέσεις

$$I_I = k_I \frac{b h^3}{12} \quad \text{και} \quad I_{II} = k_{II} \frac{b h^3}{12}. \quad (2.49 \alpha, \beta)$$

Για τον υπολογισμό του k_I έχουμε

$$k_I = 1 + 12 (0.5 - k_{xI})^2 + 12 a_e \rho_{II} \left(\frac{d}{h} - k k_{xI} \right)^2, \quad (2.50)$$

όπου

$$\rho_{II} = \frac{A_{f,prov}}{b h}, \quad k_{xI} = \frac{0.5 + A_I}{1 + B_I}. \quad (2.51), (2.52)$$

Για τον υπολογισμό του k_{xI} , χρησιμοποιούμε τις σχέσεις

$$A_I = a_e \rho_{II} \frac{d}{h}, \quad B_I = a_e \rho_{II}, \quad a_e = \frac{E_f}{E_{c,eff}}, \quad (2.53), (2.54), (2.55)$$

με

$$E_{c,eff} = \frac{E_c}{1 + \Phi_\infty}. \quad (2.56)$$

Στη Σχέση (2.56), το Φ_∞ είναι ο τελικός συντελεστής φόρτισης που παρέχεται από σχετικούς πίνακες του Ευρωκώδικα 2.

Για τον υπολογισμό του k_{II} έχουμε

$$k_{II} = 4 k_{xII}^3 + 12 a_e \rho_{III} (1 - k_{xII})^2, \quad (2.57)$$

όπου

$$\rho_{III} = \rho_{II}, k_{xII} = -B_{II} + \sqrt{B_{II}^2 + 2A_{II}}. \quad (2.58)$$

Για να υπολογίσουμε το k_{xII} , χρησιμοποιούμε τις σχέσεις

$$A_{II} = a_e \rho_{III} = B_{II}, \quad a_e = \frac{E_f}{E_{c,eff}}, \quad (2.59)$$

με

$$E_{c,eff} = \frac{E_c}{1 + \Phi_\infty}.$$

2.4 Κατασκευαστικές Λεπτομέρειες

Παρακάτω παρέχονται συνοπτικά ορισμένες βασικές οδηγίες για την τοποθέτηση, διάταξη και τα ποσοστά οπλισμού στα οπλισμένα δομικά στοιχεία καθώς και ορισμένοι περιορισμοί που αφορούν στη γεωμετρία.

1. Σε πλάκες οπλίζονται σε μία διεύθυνση, ο οπλισμός διανομής δεν πρέπει να είναι μικρότερος του 20% του κυρίου οπλισμού.
2. Το μήκος αγκύρωσης (development length) δεν πρέπει να είναι μικρότερο από

$$l_d \geq \min\{0.1\sigma_f d_b, 400 \text{ mm}\},$$

όπου σ_f είναι η τάση στην άκρη της αγκυρωμένης ράβδου και d_b η ισοδύναμη διάμετρος.

3. Ο εγκάρσιος κύριος οπλισμός υποστυλωμάτων σκυροδέματος με οπλισμό FRP θα είναι

$$\rho_{\min} = \begin{cases} 0.3\% & \text{με οπλισμό ράβδων άνθρακα} \\ 1.5\% & \text{με οπλισμό ράβδων γυαλιού} \\ 6.8\% & \text{με οπλισμό ράβδων αραμιδίου} \end{cases}$$

4. Για να περιοριστούν οι συγκεντρώσεις τάσεων σε περιοχές καμπτόμενων ράβδων FRP η ακτίνα κάμψης δεν πρέπει να είναι μικρότερη από $6d_b$.
5. Το πάχος επικάλυψης σκυροδέματος θα υπολογιστεί σύμφωνα με τον ισχύοντα κανονισμό. Επιπρόσθετα, το πάχος c θα πρέπει να ικανοποιεί τους παρακάτω περιορισμούς

$$c \geq \begin{cases} 25 \text{ mm} & \text{για πλάκες οπλισμένες σε δύο διευθύνσεις} \\ 30 \text{ mm} & \text{για πλάκες οπλισμένες σε μία διεύθυνση} \\ 25 \text{ mm} & \text{για υποστυλώματα} \end{cases}$$

Επιπρόσθετα, το c θα πρέπει να αυξηθεί κατά 20% για σκυροδέματα αντοχής μικρότερης από 25 MPa .

6. Σε δοκούς σκυροδέματος με οπλισμό FRP θα πρέπει να τοποθετούνται τουλάχιστον τρεις συνδετήρες ανά μέτρο. Σε κάθε άλλη περίπτωση θα πρέπει $S \geq 0.8 d$ (S είναι η απόσταση των συνδετήρων).
7. Σε κόμβο πλαισίων και σε περιοχές συγκεντρωμένων φορτίων, η απόσταση των συνδετήρων σε ένα διάστημα ίσο με το ισοδύναμο ύψος της διατομής δεν θα πρέπει να υπερβαίνει
 - $d/4$
 - $12 d_b$
 - 15 cm
8. Η απόσταση των συνδετήρων FRP σε κολώνες δεν θα πρέπει να υπερβαίνει
 - $12 d_{b,\min}$
 - 25 cm
9. Η απόσταση των συνδετήρων κοντά στις άκρες των υποστυλωμάτων, για ένα μήκος όχι μικρότερο από
 - τη μεγαλύτερη διάσταση της διατομής
 - το 1/6 του καθαρού ύψους του υποστυλώματος
 - 45 cm

3 ΟΙ ΟΡΙΑΚΕΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΚΑΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΟΤΗΤΑΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΜΕ ΟΠΛΙΣΜΟ FRP, ΣΥΜΦΩΝΑ ΜΕ ΤΟΝ ΚΩΔΙΚΑ ΤΟΥ ACI

3.1 Οι Βασικές Αρχές και Παραδοχές της Ανάλυσης και του Σχεδιασμού Δομικών Στοιχείων Οπλισμένου Σκυροδέματος με τη Θεωρία των Οριακών Καταστάσεων

Παρακάτω, θα γίνει μία συνοπτική παρουσίαση των σχέσεων που περιγράφουν την καμπτική αντοχή δομικών στοιχείων σκυροδέματος με οπλισμό FRP, όπως έχουν προταθεί από το Αμερικανικό Ινστιτούτο Σκυροδέματος (ACI 44.1 R-03, 2003).

Σύμφωνα με τους συμβολισμούς του ACI, η δρώσα αντοχή στο καμπτόμενο δομικό στοιχείο, δηλώνεται με M_u και η αντοχή σχεδιασμού με ϕM_n , όπου M_n είναι η ονομαστική αντοχή και ϕ ο συντελεστής μείωσης αντοχής. Η ονομαστική αντοχή του δομικού στοιχείου υπολογίζεται χωρίς τη μείωση των παραμέτρων αντοχής των επιμέρους υλικών, δηλαδή του σκυροδέματος και του οπλισμού, όπως γίνεται στην περίπτωση του EC2. Στην περίπτωση αυτή, το περιθώριο ασφάλειας στον υπολογισμό της καμπτικής αντοχής, υπεισέρχεται με τον συντελεστή μείωσης ϕ . Συνεπώς, η ασφάλεια του δομικού στοιχείου έναντι κάμψης, εξασφαλίζεται όταν ισχύει η σχέση

$$M_u \leq \phi M_n. \quad (3.1)$$

Η δρώσα ροπή M_u υπολογίζεται από το γραμμικό συνδυασμό

$$M_u = 1.4 M_D + 1.7 M_L, \quad (3.2)$$

όπου M_D και M_L είναι οι ροπές στην κρίσιμη διατομή από τα μόνιμα και κινητά φορτία αντίστοιχα.⁴

Όπως και προηγούμενα, η μηχανική συμπεριφορά των ράβδων FRP θεωρείται γραμμικά ελαστική, σύμφωνα με τα διαγράμματα τάσεων – παραμορφώσεων για τις ράβδους FRP που παρουσιάζονται στα Σχήματα 3α, β. Η σχέση τάσεων – παραμορφώσεων αναφέρεται στον εφελκυσμό των ράβδων FRP, και θεωρείται γραμμική μέχρι τη θραύση τους, που αντιστοιχεί στη χαρακτηριστική τιμή f_{fu}^* (Σχήμα 3α), η οποία είναι η εγγυημένη αντοχή, που αντιστοιχεί στην εγγυημένη παραμόρφωση ε_{fu}^* . Η εγγυημένη εφελκυστική αντοχή f_{fu}^* , ορίζεται ως η μέση εφελκυστική αντοχή ενός δείγματος πειραματικών δοκιμίων, μείον τρεις φορές την τυπική απόκλιση σ , δηλαδή $f_{fu}^* = f_{u,ave} - 3\sigma$. Η εφελκυστική αντοχή σχεδιασμού f_{fu} , παρέχεται από τη σχέση

⁴ Οι συντελεστές παραγοντοποίησης φορτίων στην περίπτωση του ACI είναι 1.4 και 1.7, ενώ οι αντίστοιχοι του EC2 είναι 1.35 και 1.50

$$f_{fu} = c_E f_{fu}^*, \quad (3.3)$$

όπου c_E είναι ο συντελεστής περιβαλλοντικής μείωσης, που παρέχεται από τον Πίνακα 2.1, για διάφορους τύπους ράβδων και για διάφορες συνθήκες περιβάλλοντος. Η σχεδιαστική παραμόρφωση αντοχής, δίνεται από τη σχέση

$$\varepsilon_{fu} = \frac{f_{fu}}{E_f}. \quad (3.4)$$

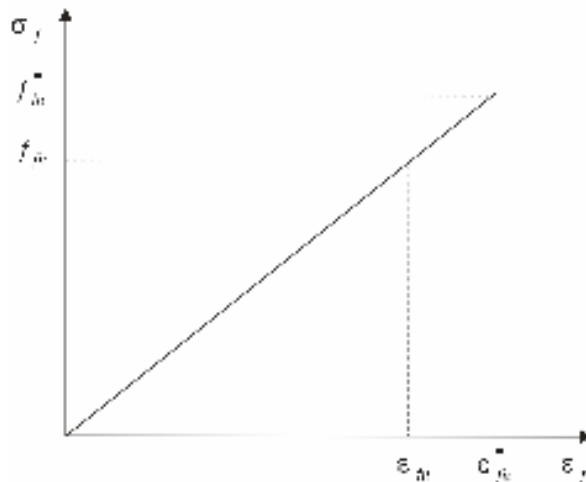
Θα πρέπει να σημειωθεί ότι ο συντελεστής c_E , έχει εισαχθεί έτσι ώστε να ενσωματώνει τη μείωση της εφελκυστικής αντοχής των ράβδων FRP λόγω της έκθεσής τους στο περιβάλλον για μεγάλο χρονικό διάστημα. Η μηχανική συμπεριφορά του σκυροδέματος δείχνεται στο Σχήμα 3.1β. Επίσης, η εφελκυστική αντοχή σχεδιασμού f_{fb} των ράβδων FRP, μειώνεται στα τμήματα που υφίστανται κάμψη σύμφωνα με τη σχέση

$$f_{fb} = c_b f_{fu}, \quad (3.5)$$

όπου ο συντελεστής μείωσης c_b είναι

$$c_b = 0.05 \frac{r_b}{d_b} + 0.3, \quad (3.6)$$

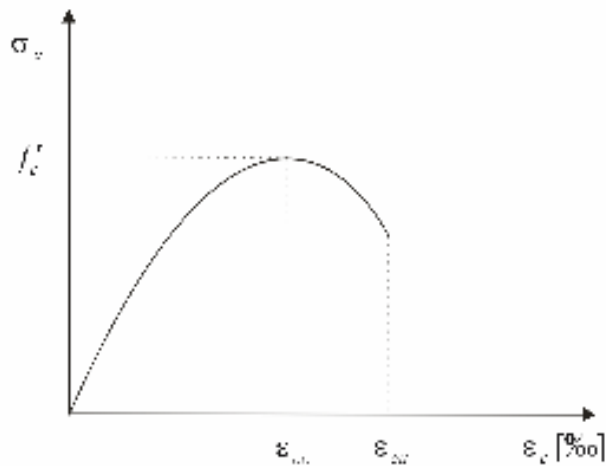
με r_b να είναι η ακτίνα κάμψης και d_b η διάμετρος της καμπτόμενης ράβδου.⁵



Σχήμα 3.1α: Διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων FRP

⁵ Αν η καμπυλότητα της δοκού είναι της τάξεως των $1/25 \text{ m}^{-1}$ και η διάμετρος των ράβδων FRP της τάξεως των 20 cm , τότε ο συντελεστής μείωσης θα είναι

$$c_b = 0.05 \frac{200}{20} + 0.3 = 0.8.$$



Σχήμα 3.1β: Διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων για το σκυρόδεμα

3.2 Η Οριακή Κατάσταση Καμπτικής Αντοχής

Η κατάσταση της ισόρροπης διατομής

Η ισόρροπη διατομή αντιστοιχεί στην οριακή τιμή f_{fu}/E_f της παραμόρφωσης των FRP και στην τιμή ε_{cu} της παραμόρφωσης του σκυροδέματος. Ο λόγος του οπλισμού ρ_{fb} , που αντιστοιχεί στην κατάσταση αυτή, βρίσκεται ότι είναι ⁶

$$\rho_{fb} = 0.85 \beta_1 \frac{f'_c}{f_{fu}} \frac{E_f \varepsilon_{cu}}{E_f \varepsilon_{cu} + f_{fu}}, \quad (3.7)$$

Στη σχέση αυτή, ο συντελεστής β_1 υπολογίζεται από τις σχέσεις

$$\beta_1 = 0.85, \text{ όταν } f'_c \leq 27.6 \text{ MPa}$$

$$\beta_1 = 0.65, \text{ όταν } f'_c \geq 55.2 \text{ MPa}$$

με το β_1 να μεταβάλλεται γραμμικά στο ενδιάμεσο διάστημα. Υπενθυμίζεται ότι

$$\rho_f = \frac{A_f}{b d}, \quad (3.8)$$

με b το πλάτος της ορθογωνικής διατομής και d το στατικό ύψος. Η καμπύλη θλιπτικής τάσης - παραμόρφωσης του σκυροδέματος, που υιοθετείται από τον κώδικα του ACI, έχει τη μορφή που δείχνεται στο Σχήμα

⁶ Η ανάπτυξη της σχέσης αυτής βασίζεται στην παραδοχή για την ορθογωνική διατομή των θλιπτικών τάσεων.

3.1β. Η καμπύλη αυτή έχει μία μέγιστη τιμή που αντιστοιχεί στην τιμή της θλιπτικής αντοχής f'_c και στην τιμή παραμόρφωσης ε_{co} , Ο κατερχόμενος κλάδος, στη θραύση, έχει μία μέγιστη παραμόρφωση $\varepsilon_{cu} = 3.0\%$. Η αναλυτική προσομοίωση της καμπύλης, μπορεί να γίνει είτε με την παραβολή του Hognestad

$$\frac{f_c}{f'_c} = 2 \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{co}} - \frac{\varepsilon_c^2}{\varepsilon_{co}^2}, \quad (3.9)$$

είτε με την καμπύλη Thorenfeldt, Tomaszewicz και Jensen [34],

$$\frac{f_c}{f'_c} = \frac{n(\varepsilon_c / \varepsilon_{co})}{n-1 + (\varepsilon_c / \varepsilon_{co})^n}, \quad (3.10)$$

όπου

$$n = 0.8 + \frac{f'_c}{17}, \quad (3.11)$$

και

$$k = 0.67 + \frac{f'_c}{62} \geq 1, \quad (3.12)$$

όπου k είναι ένας συντελεστής για αυξομείωση της κλίσης του φθίνοντα κλάδου.

Αστοχία από θρυμματισμό του σκυροδέματος

Όταν επιλεγθεί το ποσοστό οπλισμού να είναι μεγαλύτερο από το ποσοστό ρ_{fbal} , τότε η αστοχία του δομικού μέλους που θα συμβεί, θα είναι από θρυμματισμό του σκυροδέματος. Βασιζόμενοι στην ισορροπία των εσωτερικών δυνάμεων και στη συμβιβαστότητα των παραμορφώσεων, εξαγονται οι παρακάτω σχέσεις

$$M_n = A_f f_f \left(d - \frac{a}{2} \right), \quad (3.13)$$

η οποία μας δίνει την ονομαστική αντοχή της διατομής, και

$$a = \frac{A_f f_f}{0.85 f'_c b}, \quad (3.14)$$

$$f_f = E_f \varepsilon_{cu} \frac{\beta_1 d - a}{a}. \quad (3.15)$$

Από τις σχέσεις αυτές προκύπτει η τάση που αναπτύσσεται στις ράβδους οπλισμού FRP

$$f_f = \sqrt{\frac{(E_f \varepsilon_{cu})^2}{4} + \frac{0.85 \beta_1 f'_c}{\rho_f} E_f \varepsilon_{cu}} - 0.5 E_f \varepsilon_{cu} \leq f_{fu}. \quad (3.16)$$

Η ονομαστική αντοχή μπορεί να προσδιοριστεί από την παρακάτω σχέση

$$M_n = \rho_f f_f \left(1 - 0.5 \frac{\rho_f f_f}{f'_c} \right) b d^2, \quad (3.17)$$

που είναι μία εναλλακτική μορφή της Σχέσης 3.13.

Αστοχία από διάρρηξη του οπλισμού FRP

Στην περίπτωση που $\rho_f < \rho_{fb}$, η αστοχία του δομικού μέλους που θα συμβεί, θα είναι από τη διάρρηξη του οπλισμού FRP. Στην περίπτωση αυτή, το ACI προτείνει τον παρακάτω προσεγγιστικό τύπο για τον υπολογισμό της ονομαστικής αντοχής

$$M_n = 0.8 A_f f_{fu} \left(d - \frac{\beta_1 c_b}{2} \right), \quad (3.18)$$

με

$$c_b = \left(\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu} + \varepsilon_{fu}} \right) d, \quad (3.19)$$

και

$$A_f = \rho_f b d. \quad (3.20)$$

Οι συντελεστές μείωσης της καμπτικής αντοχής

Επειδή τα δομικά στοιχεία σκυροδέματος με οπλισμό FRP δεν επιδεικνύουν πλάσιμη συμπεριφορά, θα πρέπει να υιοθετηθεί ένας αρκετά συντηρητικός δείκτης μείωσης αντοχής ϕ , έτσι ώστε να εξασφαλίζεται μία στάθμη αρκετά υψηλής αποθηκευμένης αντοχής. Οι Ιαπωνικές συστάσεις για το σχεδιασμό καμπτόμενων μελών οπλισμένων με FRP, προτείνουν έναν συντελεστή μείωσης αντοχής ίσο με 1/1.3. Άλλοι ερευνητές, όπως ο Benmokrane και οι συνεργάτες του, προτείνουν μία τιμή ίση με 0.75. Το ACI, στα δομικά στοιχεία σκυροδέματος με οπλισμό από χάλυβα και για αστοχία που ελέγχεται από θρυμματισμό σκυροδέματος, προτείνει ένα συντελεστή μείωσης ίσο με 0.70. Την ίδια φιλοσοφία, χρησιμοποιεί για την περίπτωση των δομικών στοιχείων

σκυροδέματος με οπλισμό FRP, όταν η αστοχία τους συμβαίνει με τον θρυμματισμό του σκυροδέματος. Έτσι, προτείνει ένα συντελεστή 0.70 για την περίπτωση που $\rho_f \geq 1.4 \rho_{fb}$ και 0.50 για την περίπτωση που $\rho_f \leq \rho_{fb}$. Η τελευταία περίπτωση αντιστοιχεί στην αστοχία του δομικού στοιχείου από διάρρηξη του οπλισμού FRP. Για τις ενδιάμεσες τιμές, προτείνει μία γραμμική μετάβαση μεταξύ των δύο τιμών. Έτσι έχουμε

$$\phi = \begin{cases} 0.50, & \rho_f \leq \rho_{fb} \\ \frac{\rho_f}{2 \rho_{fb}}, & \rho_{fb} < \rho_f < 1.4 \rho_{fb} \\ 0.70, & \rho_f \geq 1.4 \rho_{fb} \end{cases}$$

Ελάχιστος οπλισμός FRP

Αν το δομικό στοιχείο του σκυροδέματος σχεδιάζεται να αστοχεί από διάρρηξη του οπλισμού FRP, δηλαδή όταν $\rho_f \leq \rho_{fb}$, το ACI προτείνει μία ελάχιστη ποσότητα οπλισμού για να προστατεύεται από αστοχία ρηγμάτωσης του σκυροδέματος. Η ελάχιστη ποσότητα παρέχεται από τον τύπο

$$\rho_{f,\min} = \frac{5 \sqrt{f'_c}}{12 f_{fu}} \quad (3.21)$$

Αν η αστοχία του δομικού μέλους δεν ελέγχεται από τη διάρρηξη των FRP, η ελάχιστη ποσότητα του οπλισμού εξασφαλίζεται και δεν απαιτείται έλεγχος.

3.3 Η Οριακή Κατάσταση Λειτουργικότητας

Μέγιστο εύρος ρωγμών

Το μέγιστο εύρος των ρωγμών, για την περίπτωση των δομικών στοιχείων με οπλισμό FRP, θα πρέπει να τεθεί μεγαλύτερο από αυτό που έχει επιλεχθεί για την περίπτωση του χάλυβα, λόγω του ότι η διάβρωση είναι ο κυριότερος λόγος για τον περιορισμό του εύρους των ρωγμών. Η Ιαπωνική Ένωση Πολιτικών Μηχανικών προτείνει ένα επιτρεπόμενο εύρος ρωγμών 0.5 mm, ο Καναδικός κώδικας σχεδιασμού οδογεφυρών επιτρέπει ρωγή πλάτους 0.5 mm για εξωτερικά δομικά στοιχεία και 0.7 mm για εσωτερικά δομικά στοιχεία. Υπενθυμίζεται ότι για τον χάλυβα, ο ACI 318 επιτρέπει ένα εύρος ρωγμών 0.3 mm για εξωτερικά στοιχεία και 0.4 mm για εσωτερικά στοιχεία. Το ACI, για την περίπτωση των δομικών στοιχείων σκυροδέματος με οπλισμό FRP, υιοθετεί τα όρια ρωγμών που θέτει ο Καναδικός κώδικας. Για τον υπολογισμό του εύρους των αναπτυσσόμενων ρωγμών, προτείνει την παρακάτω τροποποιημένη σχέση των Gergely-Lutz

$$w = \frac{2.2}{E_f} \beta k_b f_f \sqrt[3]{d_c A} \quad (3.22)$$

όπου

$$\beta = \frac{h - k d}{d - k d}, \quad (3.23)$$

$$A = \frac{2 d_c b}{\text{αριθμός ράβδων}} \text{ σε } \text{mm}^2, \quad (3.24)$$

$$d_c = \text{επικάλυψη} + 0.5 d_b \text{ σε mm.} \quad (3.25)$$

Ο συντελεστής k_b εισάγει τον βαθμό της συνάφειας μεταξύ των ράβδων FRP και του σκυροδέματος. Αν δεν υπάρχουν ειδικές έρευνες για τον συγκεκριμένο τύπο που χρησιμοποιείται, θα παίρνεται ίσος με 1.2.

Προσδιορισμός βέλους κάμψης

Αμέσως παρακάτω, παρουσιάζονται οι συστάσεις του ACI που αφορούν βέλη κάμψης, που προέρχονται από άμεσες και μεγάλης διάρκειας στατικές φορτίσεις, και όχι από δυναμικές φορτίσεις, όπως είναι οι σεισμοί, οι άνεμοι, οι ταλαντώσεις μηχανών κτλ.

Η μέθοδος υπολογισμού, που εφαρμόζεται για δομικά στοιχεία καμπτόμενα σε μία διεύθυνση, στηρίζεται στην ελαστική ανάλυση της δοκού, όπου η ρηγμάτωση της δοκού, λαμβάνεται υπόψη με μία μειωμένη τιμή της ροπής αδράνειας με μία τροποποιημένη μορφή του τύπου του Branson. Έτσι, σύμφωνα με τη μεθοδολογία αυτή, η βύθιση της δοκού παρέχεται από μία σχέση της μορφής

$$\Delta = \frac{f(\text{φόρτιση, συνθήκες})}{E_c I_e}. \quad (3.26)$$

Στη σχέση αυτή, στην περίπτωση ενός ανοίγματος μίας συνεχούς δοκού με ομοιόμορφη φόρτιση, όπου γνωρίζουμε τις ροπές στις δύο άκρες της M_a και M_b , και τη ροπή M_m στο μέσον της, παίρνει τη μορφή

$$(\Delta_i) = \frac{5 l^2}{48 E_c (I_e)} [M_m + 0.1 (M_a + M_b)]. \quad (3.27)$$

Στη σχέση αυτή, το I_e παρέχεται με την τροποποιημένη μορφή του τύπου του Branson

$$I_e = \left(\frac{M_{cr}}{M_u} \right)^3 \beta_d I_g + \left[1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_u} \right)^3 \right] I_{cr} \leq I_g, \quad (3.28)$$

όπου

$$I_g = \frac{b h^3}{12}, \quad (3.29)$$

είναι η συνολική ροπή αδράνειας,

$$M_{cr} = \frac{f_r I_g}{c_2}, \quad (3.30)$$

είναι η ροπή κατά τη στιγμή της ρηγμάτωσης,

$$f_r = 0.6 \sqrt{f'_c}, \quad (3.31)$$

είναι η εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος,

με το c_2 δηλώνεται η απόσταση του κέντρου βάρους της διατομής από την εφελκυσόμενη εξωτερική επιφάνεια. Στη σχέση αυτή

$$\beta_d = \alpha_b \left[\frac{E_f}{E_s} + 1 \right], \quad (3.32)$$

με $\alpha_b = 0.5$ για όλους τους τύπους των ράβδων οπλισμού FRP.

Το βέλος κάμψης μακράς διάρκειας λόγω ερπυσμού και συρρίκνωσης προκύπτει από τη σχέση

$$\Delta_{LT} = (\Delta_i)_{LL} + \lambda [(\Delta_i)_{DL} + 0.20 (\Delta_i)_{LL}], \quad (3.33)$$

όπου

$$\lambda = 0.60 \xi, \text{ με } \xi = 2.0. \quad (3.34)$$

Το $(\Delta_i)_{LL}$ είναι το βέλος κάμψης για το ομοιόμορφο κινητό φορτίο, το $(\Delta_i)_{DL}$, είναι το βέλος κάμψης για το ομοιόμορφο μόνιμο φορτίο, και ο τελευταίος όρος της σχέσης αυτής, δηλώνει τη συνεισφορά της μακροχρόνιας φόρτισης στο βέλος κάμψης.

4 ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΤΑΣΤΡΩΜΑΤΟΣ ΠΕΖΟΓΕΦΥΡΑΣ ΑΠΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ ΜΕ ΟΠΛΙΣΜΟ FRP, ΣΥΜΦΩΝΑ ΜΕ ΤΙΣ ΑΡΧΕΣ ΤΟΥ EC2

4.1 Αρχιτεκτονική Περιγραφή της Κατασκευής

Η αρχιτεκτονική περιγραφή της πεζογέφυρας που θα συζητηθεί παρακάτω δείχνεται στην Εικόνα 4.1. Η πεζογέφυρα αυτή προτείνεται να κατασκευαστεί σε γνωστό Δήμα της Αττικής, σε συγκεκριμένη θέση και πρόκειται να ενώσει δύο γειτονιές του Δήμου που διακόπτονται από ρέμα. Το άνοιγμα που πρόκειται να γεφυρωθεί έχει μήκος περίπου 35 m, ενώ το μεγαλύτερο βάθος που εμφανίζεται έχει απόλυτο υψόμετρο ίσο με 318.70 m.

Το δομικό σύστημα της γέφυρας που επιλέχθηκε αποτελείται από το κατάστρωμα που στηρίζεται σε μεταλλικά στοιχεία, τα οποία μεταφέρουν τα φορτία σε δύο μεταλλικές δοκούς οι οποίες μεταλλικές δοκοί μεταφέρουν με τη σειρά τους τα φορτία σε μεταλλικό πυλώνα, μέσω τενόντων, και στο έδαφος, με απευθείας έδραση. Τα σχέδια των κατόψεων και των τομών της γέφυρας επισυνάπτονται στο Παράρτημα Β. Το κατάστρωμα της γέφυρας μπορεί να αναλυθεί ανεξάρτητα από το υπόλοιπο σύστημα, του οποίου η ανάλυση δεν αποτελεί αντικείμενο της παρούσας εργασίας.



Εικόνα 4.1: Η πεζογέφυρα

4.2 Προσομοίωση και Στατική Ανάλυση του Δομικού Συστήματος

Προσομοίωση της γεωμετρίας του καταστρώματος

Το κατάστρωμα της γέφυρας, που είναι κατασκευασμένο από σκυρόδεμα με οπλισμό FRP, στηρίζεται σε κατακόρυφα μεταλλικά στοιχεία που είναι τοποθετημένα ανά 5 μέτρα στη διεύθυνση του άξονα του καταστρώματος (Σχήμα 4.1α, β). Η διάσταση της πλάκας στην εγκάρσια διεύθυνση του άξονα, είναι 2.5 m, το δε πάχος της προεκτιμάται ίσο με 17 cm. Το πάχος h της πλάκας θα οριστικοποιηθεί από τον έλεγχο των λειτουργικών απαιτήσεων που θα υιοθετήσουμε για τη γέφυρα. Το κατάστρωμα της πεζογέφυρας προσομοιώνεται με μία συνεχή δοκό ίσων ανοιγμάτων με πλάτος 1 m, όπως δείχνεται στο Σχήμα 4.1γ. Με πάχος επικάλυψης $c = 0.25$ m και διάμετρο του κύριου οπλισμού $\phi = 19$ mm, η απόσταση του κέντρου του οπλισμού από την κάτω επιφάνεια της διατομής, είναι

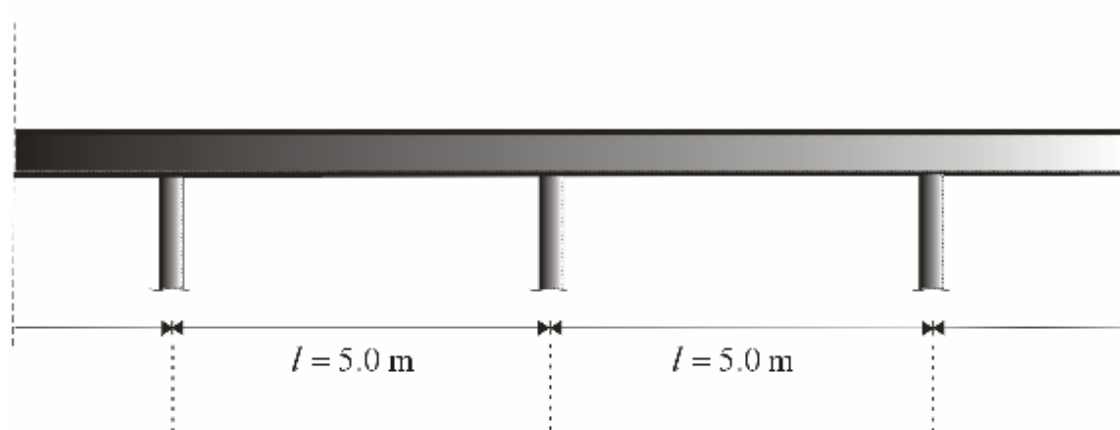
$$d_1 = c + \phi / 2 = 0.25 + 0.0095 = 0.0345 \text{ m},$$

και το στατικό ύψος της διατομής θα είναι ίσο με

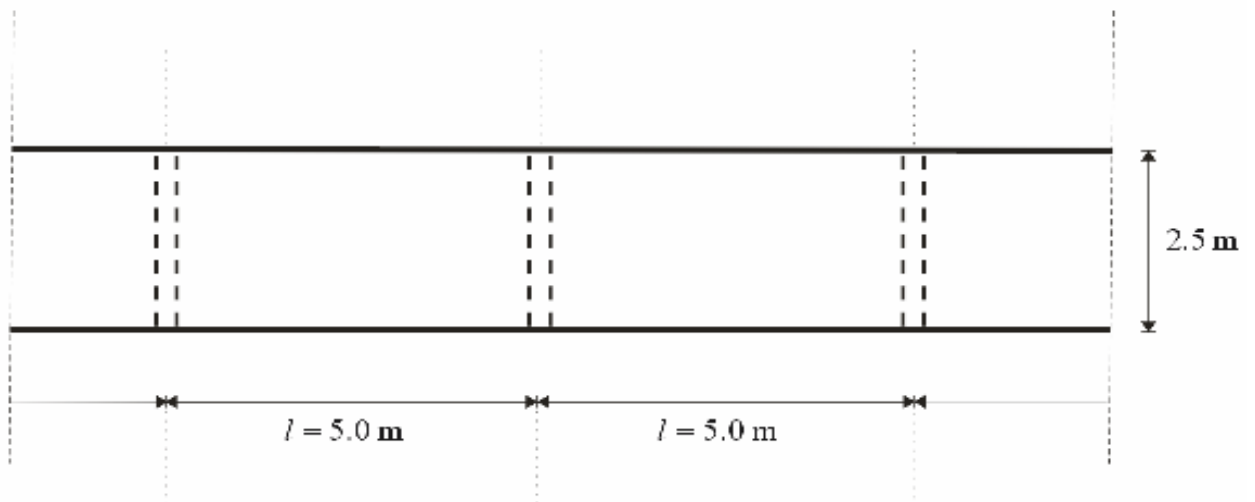
$$d = h - d_1 = 0.17 - 0.0345 = 0.136 \text{ m},$$

από όπου

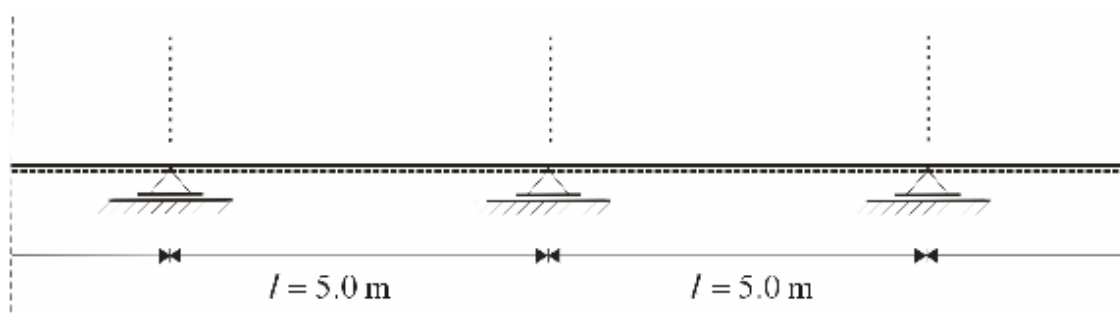
$$d = 136 \text{ mm}.$$



Σχήμα 4.1 (α): Η γεωμετρία του καταστρώματος



Σχήμα 4.1 (β): Συνεχής δοκός “απείρων” ίσων ανοιγμάτων



Σχήμα 4.1 (γ): Το στατικό σύστημα

Προσδιορισμός φορτίων

Τα μόνιμα φορτία της δοκού θα προέρχονται από το ίδιο βάρος και από μία επίστρωση, που θα ληφθεί ίση με 2 KN/m^2 . Το κινητό φορτίο θα ληφθεί ίσο με 5 KN/m^2 . Έτσι θα είναι

Ίδιο βάρος	$0.17 \times 25 = 4.25 \text{ KN/m}^2$
Επικάλυψη	2.00 KN/m^2
Σύνολο μόνιμων φορτίων	$g = 6.25 \text{ KN/m}^2$

και

Κινητό φορτίο	$q = 5.0 \text{ KN/m}^2$.
---------------	----------------------------

Στατική ανάλυση του δομικού συστήματος της πλάκας

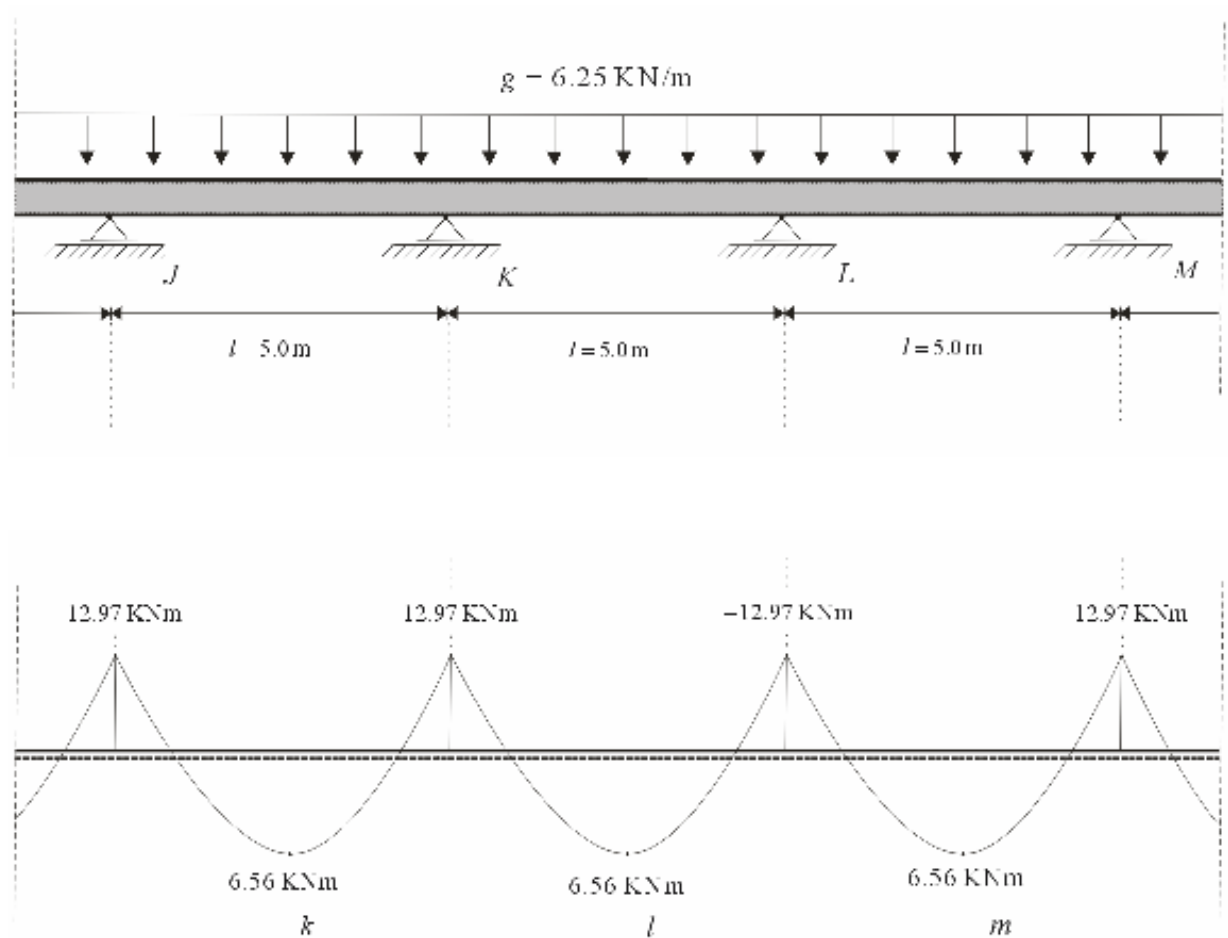
Ο υπολογισμός των εντατικών μεγεθών που αναπτύσσονται στη συνεχή δοκό, που προσομοιώνει την πλάκα της πεζογέφυρας, θα γίνει ξεχωριστά για τα μόνιμα και κινητά φορτία, λαμβάνοντας υπόψη τους δυσμενείς συνδυασμούς τους. Η ανάλυση θα γίνει για μία δοκό απείρων ανοιγμάτων.

Προκειμένου να υπολογίσουμε τις ακραίες τιμές των ροπών στα ανοίγματα και στις στηρίξεις της συνεχούς δοκού, γίνονται τρεις αναλύσεις που δείχνονται στα Σχήματα 4.2, 4.3, 4.4. Στην ανάλυση που δείχνεται στο Σχήμα 4.2, υπολογίζονται οι ροπές στηριγμάτων και ανοιγμάτων, για μία ομοιόμορφη καθολική φόρτιση, ίση με το μόνιμο φορτίο της πλάκας $g = 6.25 \text{ KN/m}^2$. Οι ροπές αυτές είναι στις στηρίξεις

$$M_J = M_K = M_L = M_M = -0.083 g l^2 = -12.97 \text{ KN m } (= M_g)$$

και στα ανοίγματα

$$M_j = M_k = M_l = M_m = 0.042 g l^2 = 6.56 \text{ KN m } (= M_g).$$



Σχήμα 4.2: Το διάγραμμα ροπών του στατικού συστήματος του καταστρώματος, για καθολική φόρτιση $g = 6.25 \text{ KN/m}^2$

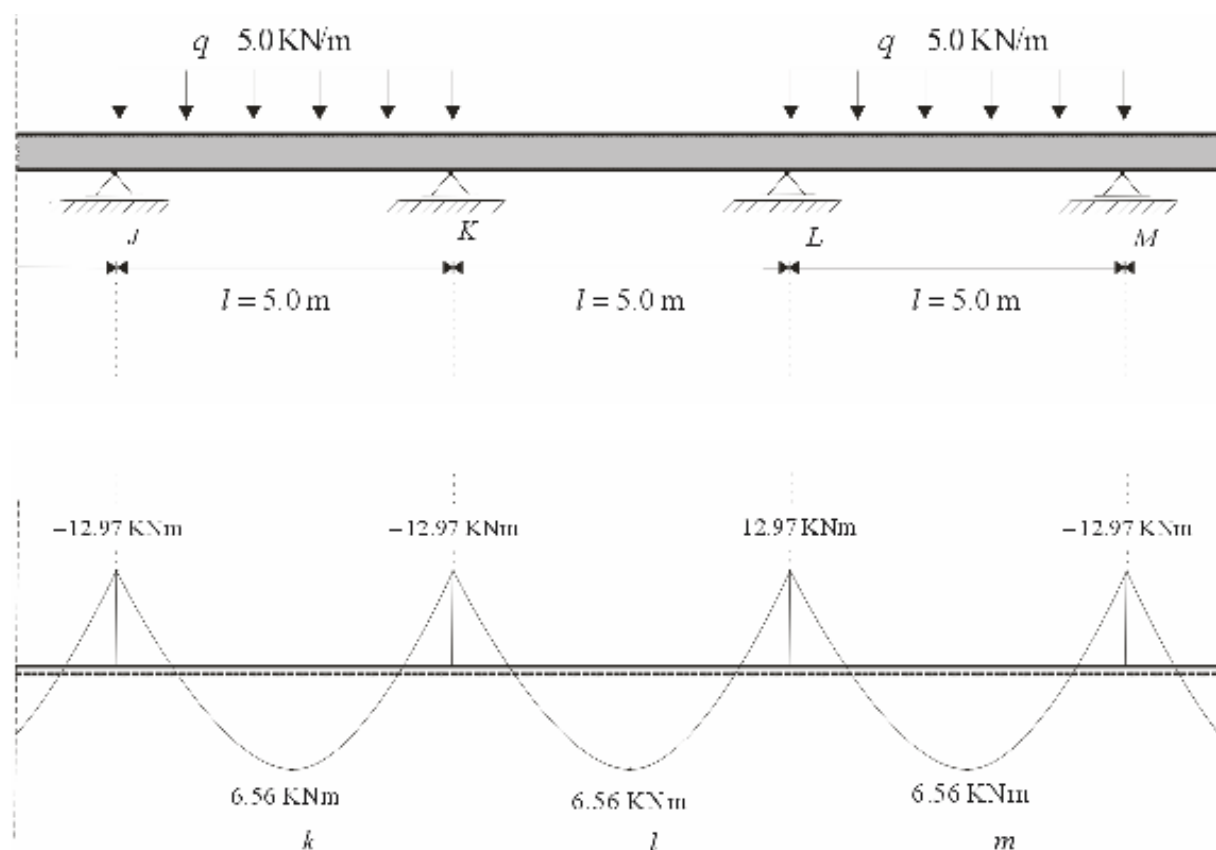
Στη δεύτερη ανάλυση γίνεται ο υπολογισμός των ροπών για τη φόρτιση των ανοιγμάτων της πλάκας για φόρτιση με το κινητό φορτίο $q = 5.0 \text{ KN/m}^2$ όπως δείχνεται στο σχετικό στατικό σύστημα του Σχήματος 4.3 (φόρτιση Τύπου I). Οι ροπές αυτές είναι στις στηρίξεις

$$M_j^I = M_k^I = M_L^I = M_M^I = -0.042 q l^2 = -5.25 \text{ KN m} (= M_q^I)$$

και στα ανοίγματα

$$M_j^I = M_k^I = M_l^I = M_m^I = 0.083 q l^2 = 10.38 \text{ KN m} (= M_q^I).$$

Η ανάλυση αυτή απαιτείται για τον προσδιορισμό των μέγιστων ροπών στα ανοίγματα.

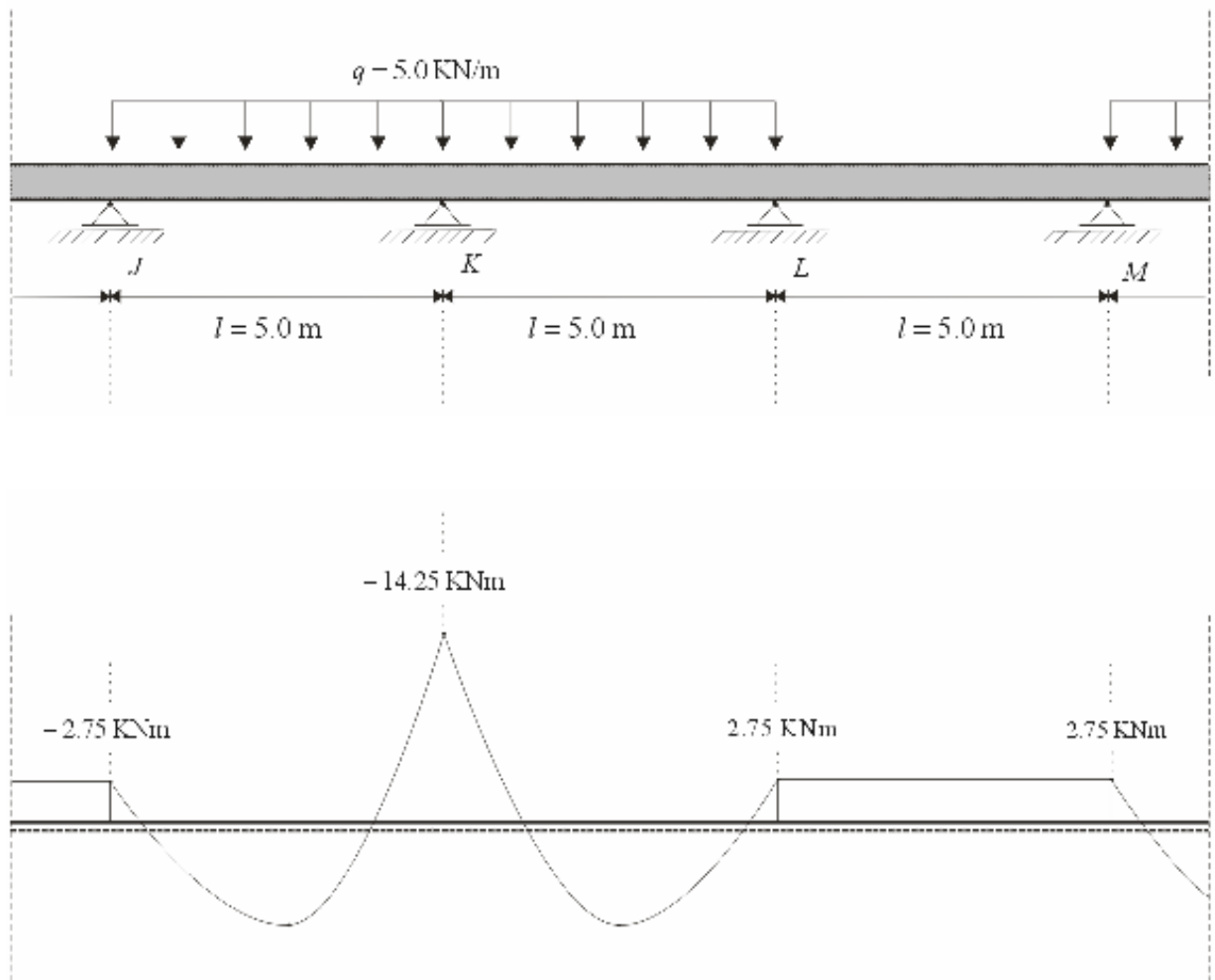


Σχήμα 4.3: Το διάγραμμα ροπών του στατικού συστήματος του καταστρώματος, για καθολική φόρτιση Τύπου I των ανοιγμάτων με το κινητό φορτίο $q = 5.0 \text{ KN/m}^2$

Για τον προσδιορισμό των μέγιστων ροπών στα στηρίγματα, γίνεται η ανάλυση που δείχνεται στο Σχήμα 4.4, για φόρτιση με κινητό φορτίο (φόρτιση Τύπου II), όπως παρουσιάζεται στο σχετικό στατικό σύστημα της πλάκας. Οι ροπές αυτές είναι

$$M_J^{\text{II}} = M_K^{\text{II}} = M_L^{\text{II}} = M_M^{\text{II}} = M_q^{\text{II}} - 0.114 q l^2 = -14.25 \text{ KN m} (= M_q^{\text{II}})$$

$$M_j^{\text{II}} = M_k^{\text{II}} = M_l^{\text{II}} = M_m^{\text{II}} = -0.022 q l^2 = -2.75 \text{ KN m} (= M_q^{\text{II}}).$$



Σχήμα 4.4: Το διάγραμμα ροπών του στατικού συστήματος του καταστρώματος, για τη φόρτιση Τύπου II των στηριγμάτων

Από τα παραπάνω διαγράμματα προκύπτουν με υπέρθεση οι μέγιστες αναπτυσσόμενες ροπές ανοιγμάτων και στηριγμάτων M_{sd} , για τους συνδυασμούς που απαιτούνται για τους ελέγχους αντοχής και λειτουργικότητας. Οι ροπές ανοιγμάτων και στηριγμάτων, αντίστοιχα, για τον έλεγχο αντοχής είναι

$$M_{sd} = 1.35 M_g + 1.50 M_q^I = 1.35 \times 6.56 + 1.50 \times 10.38 = 24.43 \text{ KN m}$$

$$M_{sd} = 1.35 M_g + 1.50 M_q^{\text{II}} = 1.35 \times 12.97 + 1.5 \times 14.25 = 38.88 \text{ KN m}$$

Όμοια, οι ροπές ανοιγμάτων και στηριγμάτων για τον έλεγχο της λειτουργικότητας είναι

$$M_{sd} = 1 M_g + 1 M_q^I = 6.56 + 10.38 = 16.94 \text{ KN m}$$

$$M_{sd} = 1 M_g + 1 M_q^{II} = 12.97 + 14.25 = 27.22 \text{ KN m}$$

Επειδή το κατάστρωμα της πεζογέφυρας θα είναι εκτεθειμένο στις καιρικές συνθήκες, από τον Πίνακα 2.1 προκύπτει ότι $c_E = 0.7$, οπότε

$$c_E = 0.9 \times 0.7 = 0.63.$$

Ο οπλισμός του καταστρώματος που θα χρησιμοποιηθεί θα είναι ράβδοι FRP της εταιρίας CPPI με τις μηχανικές και φυσικές ιδιότητες που αναγράφονται στον Πίνακα A.1 του Παραρτήματος A. Το σκυρόδεμα που θα χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή του καταστρώματος, θα είναι C30. Έτσι, σύμφωνα με τα στοιχεία αυτά, έχουμε

Εγγυημένη αντοχή των ράβδων GFRP :

$$f_{fk} = 720 \text{ MPa}$$

Μέτρο ελαστικότητας των ράβδων GFRP:

$$E_f = 45000 \text{ MPa}$$

Τιμή σχεδιασμού της αντοχής τους:

$$f_{fd} = \frac{f_{fk}}{\gamma_f} = \frac{720}{1.3} = 553.85 \text{ MPa}$$

Εφελκυστική οριακή παραμόρφωση GFRP:

$$\varepsilon_{fd} = \frac{f_{fd}}{E_f} = \frac{553.85}{45000} = 12.31 \text{ ‰}$$

Θλιπτική αντοχή σκυροδέματος:

$$f_{ck} = 30 \text{ MPa}$$

Μέτρο ελαστικότητας σκυροδέματος:

$$E_c = 4560 \sqrt{f_{ck}} = 4560 \sqrt{30}$$
$$E_c = 24976 \text{ MPa}$$

Αντοχή σχεδιασμού σκυροδέματος:

$$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_c} = \frac{30}{1.5} = 20 \text{ MPa}$$

4.3 Ανάλυση της Οριακής Κατάστασης Αντοχής του Δομικού Συστήματος

Το ποσοστό οπλισμού της ισόρροπης διατομής

Όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 2, η καμπτική αντοχή ενός δομικού στοιχείου σκυροδέματος με οπλισμό FRP διέπεται, είτε από θρυμματισμό του σκυροδέματος, είτε από διάρρηξη του οπλισμού FRP. Από την σύγκριση του υπάρχοντος λόγου ρ_f οπλισμού FRP με το λόγο οπλισμού $\rho_{f,bal}$ της ισόρροπης διατομής, προκύπτει ο τύπος αστοχίας που συμβαίνει κάθε φορά. Το ποσοστό οπλισμού των ράβδων FRP για την κατάσταση της ισόρροπης διατομής είναι

$$\begin{aligned}\rho_{f,bal} &= \frac{A_{f,bal}}{b d} = \frac{2.38 E_f}{3.5 E_f + 1000 c_E f_{fd}} \frac{f_{cd}}{c_E f_{fd}} \\ &= \frac{2.38 \times 45000}{3.5 \times 45000 + 1000 \times 0.63 \times 553.85} \frac{20}{0.63 \times 553.85} = 0.012122\end{aligned}$$

ή

$$\rho_{f,bal} = 12.12\text{‰}$$

Αστοχία από θρυμματισμό του σκυροδέματος

Προκειμένου το δομικό στοιχείο να αποκτήσει επαρκή παραμορφωσιμότητα, επιλέγεται ως ποσοστό οπλισμού η τιμή

$$\rho_f = 1.33 \rho_{f,bal} = 1.33 \times \frac{12.12}{1000} = 16.12\text{‰}.$$

Όπως έχει προαναφερθεί, αν ο υπάρχων λόγος οπλισμού ρ_f , είναι μεγαλύτερος από τον $\rho_{f,bal}$, τότε η αστοχία του μέλους θα αρχίσει με τον θρυμματισμό του σκυροδέματος. Για τον οπλισμό αυτό, η τάση που αναπτύσσεται στις ράβδους FRP θα είναι

$$\begin{aligned}\sigma_f &= \sqrt{\left(\frac{1.75 E_f}{1000}\right)^2 + \frac{2.38 E_f f_{cd}}{1000 \rho_f} - \frac{1.75 E_f}{1000}} \\ &= \sqrt{\left(\frac{1.75 \times 45000}{1000}\right)^2 + \frac{2.38 \times 45000 \times 20}{1000 \times 16.12} - \frac{1.75 \times 45000}{1000}}\end{aligned}$$

ή

$$\sigma_f = 294.18 \text{ MPa}.$$

Η τάση αυτή θα πρέπει να ικανοποιεί την σχέση

$$\sigma_f < c_E f_{fd}.$$

Έχουμε

$$\sigma_f = 294.18 \text{ MPa} < c_E f_{fd} = 0.63 \times 553.85 = 348.93 \text{ MPa},$$

που σημαίνει ότι η σχέση αυτή επαληθεύεται. Για το ποσοστό αυτό οπλισμού η παραμόρφωση των ράβδων οπλισμού FRP είναι

$$\varepsilon_f = \frac{\sigma_f}{E_f} = \frac{294.18}{45000} = 6.537 \text{ ‰}.$$

Παίρνοντας τη θλιπτική παραμόρφωση του σκυροδέματος ίση με $\varepsilon_{cu} = 3.5 \text{ ‰}$, το πάχος της θλιβόμενης ζώνης είναι

$$\frac{x}{d} = \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu} + \varepsilon_f} = \frac{3.5}{3.5 + 6.537} = 0.349$$

από όπου για $d = 136 \text{ mm}$ προκύπτει

$$x = 0.349 d = 0.349 \times 136 = 47.46 \text{ mm}.$$

Συνεπώς, η ροπή σχεδιασμού M_{Rd} είναι

$$\frac{M_{Rd}}{b d^2} = \rho_f \sigma_f \left(1 - 0.59 \frac{\rho_f \sigma_f}{f_{cd}} \right) = \frac{16.12}{1000} \times 294.18 \times \left(1 - 0.59 \frac{16.12 \times 294.18}{1000 \times 20} \right)$$

από όπου για $b = 1000 \text{ mm}$ και $d = 136 \text{ mm}$ προκύπτει

$$M_{Rd} = 4.08 b d^2 = 4.08 \times 1000 \times 136^2 = 75.46 \text{ KN m}.$$

Όπως έχει προαναφερθεί, ο σχεδιασμός στην οριακή κατάσταση αντοχής απαιτεί την ικανοποίηση της παρακάτω συνθήκης

$$M_{Rd} \geq M_{Sd}$$

Πράγματι, ισχύει

$$M_{Rd} = 75.46 \text{ KN m} > M_{Sd} = 23.43 \text{ KN m}$$

για τα ανοίγματα και

$$M_{Rd} = 75.46 \text{ KN m} > M_{Sd} = 38.88 \text{ KN m}$$

για τα στηρίγματα.

Ο απαιτούμενος οπλισμός για το ποσοστό $\rho_f = 16.12\%$, είναι

$$A_{f,req} = \rho_f b d = \frac{16.12}{1000} \times 1000 \times 116 = 2192 \text{ mm}^2.$$

Ο κύριος οπλισμός που θα επιλεγεί, θα είναι από ράβδους GFRP Νο19 (=19.1mm). Οι ράβδοι θα τοποθετηθούν στο κάτω μέρος της πλάκας σε παράλληλη διάταξη, ανά 12.5cm, που για κατασκευαστικούς λόγους, θα τοποθετηθεί όπως δείχνεται στο Σχήμα 4.5. Το εμβαδόν διατομής των ράβδων Νο19 είναι

$$A = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{\pi \times 19.1^2}{4} = 286.3 \text{ mm}^2.$$

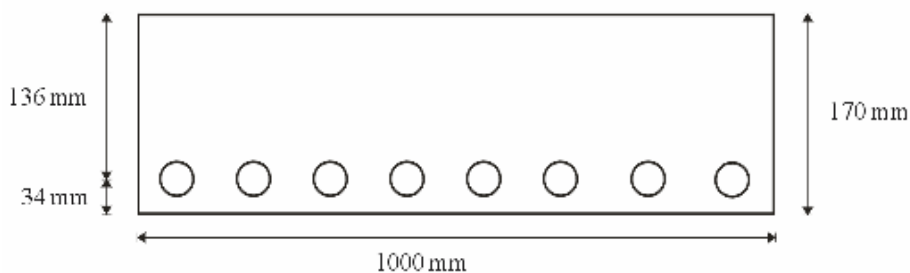
Ο αριθμός n των ράβδων που θα χρησιμοποιηθούν είναι

$$n = \frac{A_{f,req}}{A} = \frac{2192 \text{ mm}^2}{286.3 \text{ mm}^2} = 7.65 \cong 8$$

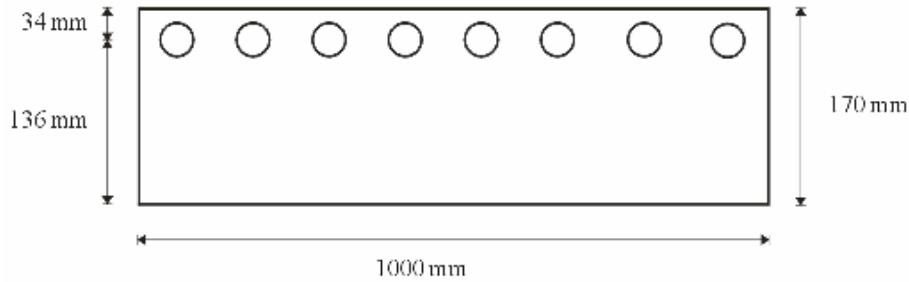
Έτσι, το υπάρχον εμβαδόν οπλισμού είναι

$$A_{f,prov} = 8 \times 286.3 = 2290 \text{ mm}^2 > A_{f,req} = 2192 \text{ mm}^2.$$

Στα στηρίγματα, όπου $M_{sd} = 38.88 \text{ KN m}$, θα τοποθετηθεί για αυτή τη ροπή ο ίδιος οπλισμός δηλαδή Νο19/12.5cm. Η διαθέσιμη αντοχή της διατομής στηριγμάτων είναι ίση και στην περίπτωση των ανοιγμάτων, δηλαδή $M_{Rd} = 75.46 \text{ KN m}$. Ο οπλισμός αυτός θα τοποθετηθεί ως άνω οπλισμός που για κατασκευαστικούς λόγους, θα τοποθετηθεί όπως δείχνεται στο Σχήμα 4.6.



Σχήμα 4.5: Ο οπλισμός στα ανοίγματα



Σχήμα 4.6: Ο οπλισμός στα στηρίγματα

Αστοχία από διάρρηξη του οπλισμού FRP

Στην περίπτωση αυτή, η εφελκυστική τάση σ_f , του οπλισμού FRP, έχει προσεγγίσει την τιμή $c_E \varepsilon_{fd}$, ενώ η τάση στο σκυρόδεμα σ_c είναι μικρότερη από την τιμή $0.85 f_{cd}$.

Επιλέγεται ως ποσοστό οπλισμού το

$$\rho_f = 0.70 \rho_{f,bal} = 0.70 \times \frac{12.12}{1000} = 8.48\%.$$

Σύμφωνα με την Περίπτωση 1, που περιγράφεται στο κεφάλαιο 2, η παραμόρφωση του σκυροδέματος είναι

$$\varepsilon_c = \frac{\rho_f c_E^2 f_{fd}^2 + 0.566 E_f (f_{cd} / 1000)}{E_f (0.85 f_{cd} - \rho_f c_E f_{fd})} \quad \text{ή}$$

$$= \frac{8.48/1000 \times 0.63^2 \times 553.85^2 + 0.566 \times 45000 \times 20/1000}{45000 \times [0.85 \times 20 - 8.48/1000 \times 0.63 \times 553.85]} = 2.44\%.$$

Πράγματι, η παραμόρφωση του σκυροδέματος βρίσκεται στα όρια της Περίπτωσης 1 ($\varepsilon_{co} = 2\% < \varepsilon_c = 2.44 < \varepsilon_{cu} = 3.5\%$). Από τις σχέσεις (2.19), (2.18), οι λόγοι των περιοχών της θλιπτικής ζώνης είναι:

$$\frac{x'}{d} = \frac{\varepsilon_c - \varepsilon_{co}}{\varepsilon_c + c_E \varepsilon_{fd}} = \frac{2.44 - 2}{2.44 + (0.63 \times 12.31)} = 0.043$$

$$\frac{x''}{d} = \frac{\varepsilon_{co}}{\varepsilon_c + c_E \varepsilon_{fd}} = \frac{2}{2.44 + (0.63 \times 12.31)} = 0.196$$

Επομένως, το πάχος x της θλιβόμενης ζώνης είναι

$$\frac{x}{d} = \frac{x'}{d} + \frac{x''}{d} = 0.043 + 0.196 = 0.239$$

από όπου για $d = 136 \text{ mm}$, έχουμε

$$x = 0.239 \times 136 = 32.5 \text{ mm}.$$

Η ροπή αντοχής που αντιστοιχεί σε αυτή την τιμή του ποσοστού, σύμφωνα με τη σχέση (2.26), είναι

$$\frac{M_{Rd}}{b d^2} = \frac{x'}{d} 0.85 f_{cd} \left(1 - 0.5 \frac{x'}{d}\right) + \frac{x''}{d} 0.566 f_{cd} \left(1 - \frac{x}{d} + 0.6 \frac{x''}{d}\right)$$

$$= 0.043 \times 0.85 \times 20 \times [1 - (0.5 \times 0.043)] + 0.196 \times 0.566 \times 20 \times [1 - 0.239 + (0.6 \times 0.196)]$$

από όπου για $h = 1000 \text{ mm}$ και $d = 136 \text{ mm}$

$$M_{Rd} = 2.665 b d^2 = 2.665 \times 1000 \times 136^2 = 49.29 \text{ KN m}.$$

Ο σχεδιασμός στην οριακή κατάσταση αντοχής απαιτεί την ικανοποίηση της συνθήκης

$$M_{Rd} \geq M_{Sd}.$$

Πράγματι, η συνθήκη αυτή ικανοποιείται:

$$M_{Rd} = 49.29 \text{ KN m} > M_{Sd} = 24.43 \text{ KN m}$$

για τα ανοίγματα και

$$M_{Rd} = 49.29 \text{ KN m} > M_{Sd} = 38.88 \text{ KN m}$$

για τα στηρίγματα. Ο απαιτούμενος οπλισμός για $\rho_f = 8.48 \text{ ‰}$, είναι

$$A_{f,req} = \rho_f b d = \frac{8.484}{1000} \times 1000 \times 136 = 1153 \text{ mm}^2$$

Ο κύριος οπλισμός που θα επιλεγεί, θα είναι από ράβδους GFRP No19 (= 19.1 mm). Οι ράβδοι θα τοποθετηθούν στο κάτω μέρος της πλάκας σε παράλληλη διάταξη, ανά 25 cm. Το εμβαδόν διατομής των ράβδων No19 είναι

$$A = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{\pi \times (19.1)^2}{4} = 286.3 \text{ mm}^2$$

Ο αριθμός n των ράβδων που θα χρησιμοποιηθούν είναι

$$n = \frac{A_{f,req}}{A} = \frac{1153}{286.3} = 4.02 \cong 4, \text{ δηλαδή } 4 \text{ ράβδοι}$$

Έτσι, το υπάρχον εμβαδόν οπλισμού είναι

$$A_{f,prov} = 4 \times 286.3 = 1145 \text{ mm}^2$$

4.4 Ανάλυση της Οριακής Κατάστασης Λειτουργικότητας του Δομικού Συστήματος

Στη συνέχεια για τους δύο τύπους αστοχίας που προαναφέρθηκαν, θα γίνει υπολογισμός του εύρους των ρωγμών που θα αναπτυχθούν στη πλάκα του καταστρώματος. Η ροπή ρηγμάτωσης για μία διατομή πλάτους 1 m θα βρεθεί από τη σχέση

$$M_{cr} = \frac{f_r I_{mt}}{c_2}.$$

Οι παράμετροι που υπεισέρχονται στη σχέση αυτή είναι

$$I_{mt} = \frac{b h^3}{12} = \frac{1000 \times 170^3}{12} = 409 \times 10^6 \text{ mm}^4,$$

$$f_r = 0.6 \sqrt{f_{ck}} = 0.6 \sqrt{30} = 3.29 \text{ MPa},$$

$$c_2 = h/2 = 170/2 = 85 \text{ mm}$$

οπότε

$$M_{cr} = \frac{3.29 \times 409 \times 10^6}{85} = 15.83 \text{ KN m}.$$

Εκτίμηση του εύρους ρωγμών στην περίπτωση της αστοχίας από θρυμματισμό του σκυροδέματος

Το ποσοστό οπλισμού που έχει τοποθετηθεί στην πλάκα στην περίπτωση αυτή, είναι

$$\rho_f = \frac{A_{f,prov}}{b d} = \frac{2290}{1000 \times 136} = 0.016838 = 16.8\%.$$

Ο λόγος των μέτρων ελαστικότητας ράβδων GFRP και σκυροδέματος είναι:

$$n_f = \frac{E_f}{E_c} = \frac{45000}{24976} = 1.80$$

Συνεπώς, οι συντελεστές k και J είναι:

$$k = \sqrt{(\rho_f n_f)^2 + 2 n_f \rho_f - \rho_f n_f}$$

$$= \sqrt{\left(\frac{16.8}{1000} \times 1.80\right)^2 + 2 \times 1.80 \times \frac{16.8}{1000} - \frac{16.8}{1000} \times 1.80} = 0.218$$

$$J = 1 - \frac{k}{3} = 1 - \frac{0.218}{3} = 0.927.$$

Η ορθή τάση του οπλισμού FRP για τη ροπή M_{cr} , μετά από το σχηματισμό της ζώνης ρηγμάτωσης, δίνεται από τη σχέση

$$f_{fr} = \frac{M_{cr}}{A_f J d} = \frac{15.83 \times 1000 \times 1000}{2290 \times 0.927 \times 136} = 54.83 \text{ MPa}.$$

Η ισοδύναμη επιφάνεια σε εφελκυσμό είναι:

$$A_{f,eff} = 2.5 d_1 b = 2.5 \times 34.5 \times 1000 = 86250 \text{ mm}^2.$$

Έτσι προκύπτει ο λόγος

$$\rho_r = \frac{A_{f,prov}}{A_{f,eff}} = \frac{2290}{86250} = 26.55\%.$$

Η μέση απόσταση μεταξύ των δημιουργούμενων ρωγμών είναι:

$$s_m = 50 + 0.25 k_1 k_2 \frac{d_b}{\rho_r} = 50 + 0.25 \times 1.6 \times 0.5 \times \frac{19.1 \times 1000}{26.55} = 194 \text{ mm}.$$

Για τα φορτία της πλάκας, έχουμε υπολογίσει τη ροπή για τη λειτουργικότητα, η οποία είναι

$$M_{sd} = 16.94 \text{ KN m}$$

για τα ανοίγματα και

$$M_{sd} = 27.22 \text{ KN m}$$

για τα στηρίγματα. Για τις ροπές αυτές, η μέγιστη τάση στον οπλισμό FRP είναι

$$\sigma_f = \frac{M_{sd}}{A_{c,eff} J d} = \frac{16.94 \times 1000 \times 1000}{2290 \times 0.927 \times 136} = 58.73 \text{ MPa}$$

για τα ανοίγματα και

$$\sigma_f = \frac{27.22 \times 1000 \times 1000}{2290 \times 0.927 \times 136} = 94.28 \text{ MPa}$$

για τα στηρίγματα. Η μέση παραμόρφωση των ράβδων FRP στο διάστημα μεταξύ των δημιουργούμενων ρωγμών είναι

$$\varepsilon_{fm} = \frac{\sigma_f}{E_f} \left[1 - \beta_1 \beta_2 \left(\frac{f_{fr}}{\sigma_f} \right)^2 \right] = \frac{58.73}{45000} \left[1 - 0.5 \times 1 \times \left(\frac{54.83}{58.73} \right)^2 \right] = 0.74 \text{ ‰}.$$

Συνεπώς, το χαρακτηριστικό εύρος ρωγμών προκύπτει ότι είναι

$$w_k = \beta s_m \varepsilon_{fm} = 1.3 \times 194 \times \frac{0.74}{1000} = 0.187 \text{ mm} < 0.5 \text{ mm}$$

Συνεπώς, ο περιορισμός του εύρους των ρωγμών στα ανοίγματα ικανοποιείται. Όμοια, για τα στηρίγματα βρίσκουμε:

$$\varepsilon_{fm} = \frac{94.28}{45000} \left[1 - 0.5 \times 1 \times \left(\frac{54.83}{94.28} \right)^2 \right] = 1.74 \text{ ‰}$$

$$w_k = \beta s_m \varepsilon_{fm} = 1.3 \times 194 \times \frac{1.74}{1000} = 0.44 \text{ mm} < 0.5 \text{ mm}$$

Συνεπώς, ο περιορισμός του εύρους των ρωγμών ικανοποιείται και στα στηρίγματα.

Εκτίμηση του εύρους ρωγμών στη περίπτωση της αστοχίας από διάρρηξη του FRP

Το ποσοστό οπλισμού που έχει τοποθετηθεί στην περίπτωση αυτή είναι

$$\rho_f = \frac{A_{f,prov}}{b d} = \frac{1145}{1000 \times 136} = 8.42 \text{ ‰}.$$

Για το ποσοστό αυτό, ακολουθώντας την ίδια με προηγούμενα υπολογιστική διαδικασία, έχουμε

$$k = \sqrt{(\rho_f n_f)^2 + 2 n_f \rho_f} - \rho_f n_f$$

$$= \sqrt{\left(\frac{9.87}{1000} \cdot 1.8 \right)^2 + 2 \cdot 1.8 \cdot \frac{9.87}{1000}} - \frac{9.87}{1000} \cdot 1.8 = 0.160,$$

$$J = 1 - \frac{k}{3} = 1 - \frac{0.160}{3} = 0.947,$$

$$f_{fr} = \frac{M_{cr}}{A_f J d} = \frac{15.83 \times 1000 \times 1000}{1145 \times 0.943 \times 136} = 107.35 \text{ MPa} .$$

$$A_{f,eff} = 86250 \text{ mm}^2 ,$$

$$\rho_r = \frac{A_{f,prov}}{A_{c,eff}} = \frac{1145}{86250} = 13.27 \text{ ‰} .$$

$$s_m = 50 + 0.25 k_1 k_2 \frac{d_b}{\rho_r} = 50 + 0.25 \cdot 1.6 \cdot 0.5 \frac{19.1 \cdot 1000}{13.28} = 338 \text{ mm} .$$

Υπενθυμίζεται ότι η ροπή για τη λειτουργικότητα είναι

$$M_{sd} = 16.94 \text{ KN m}$$

για τα ανοίγματα και

$$M_{sd} = 27.22 \text{ KN m}$$

για τα στηρίγματα. Για τις ροπές αυτές, η μέγιστη τάση στον οπλισμό FRP έχουμε:

$$\sigma_f = \frac{M_{sd}}{A_{c,eff} J d} = \frac{16.94 \times 1000 \times 1000}{1145 \times 0.927 \times 136} = 114.97 \text{ MPa}$$

για τα ανοίγματα και

$$\sigma_f = \frac{27.22 \times 1000 \times 1000}{1145 \times 0.927 \times 136} = 184.058 \text{ MPa}$$

για τα στηρίγματα. Η μέση παραμόρφωση των ράβδων FRP στο διάστημα μεταξύ των δημιουργούμενων ρωγμών είναι:

$$\varepsilon_{fm} = \frac{\sigma_f}{E_f} \left[1 - \beta_1 \beta_2 \left(\frac{f_{fr}}{\sigma_f} \right)^2 \right] = \frac{114.97}{45000} \left[1 - 0.5 \times 1 \times \left(\frac{107.35}{114.97} \right)^2 \right] = 1.44 \text{ ‰}$$

για τα ανοίγματα. Έτσι το χαρακτηριστικό εύρος ρωγμών προκύπτει ίσο με

$$w_k = \beta s_m \varepsilon_{fm} = 1.3 \times 338 \times \frac{1.44}{1000} = 0.63 \text{ mm} > 0.5 \text{ mm}$$

Για τα στηρίγματα βρίσκουμε ότι

$$\varepsilon_{fm} = \frac{184.58}{45000} \left[1 - 0.5 \times 1 \times \left(\frac{107.35}{184.58} \right)^2 \right] = 3.41 \text{ ‰}$$

$$w_k = \beta s_m \varepsilon_{fm} = 1.3 \times 338 \times \frac{3.41}{1000} = 1.49 \text{ mm} > 0.5 \text{ mm}$$

Παρατηρούμε ότι το εύρος των αναπτυσσόμενων ρωγμών τόσο στα στηρίγματα όσο και στα ανοίγματα ξεπερνάει το επιτρεπόμενο εύρος των 0.5 mm. Συνεπώς, η περίπτωση αυτή δε μπορεί να γίνει αποδεκτή.

Εκτίμηση του βέλους κάμψης των πλακών

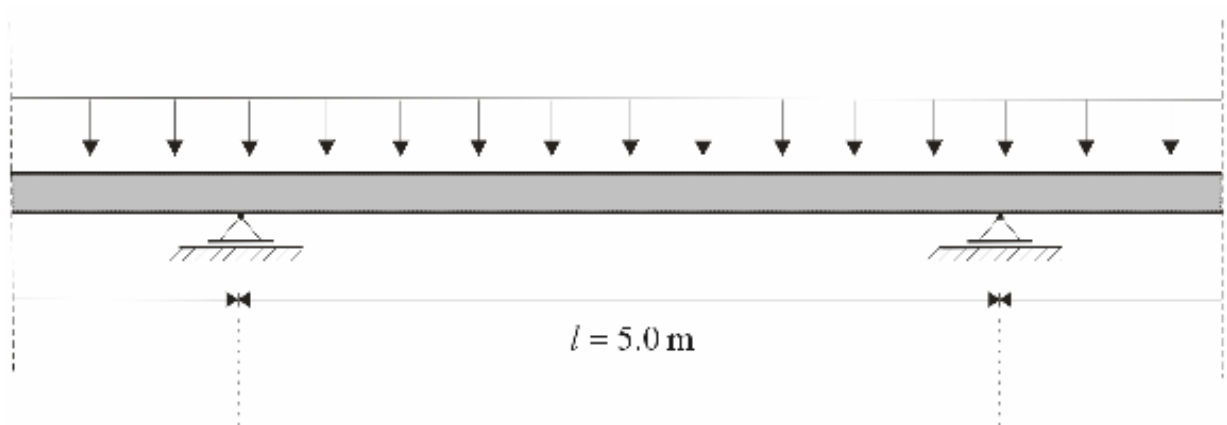
Η βύθιση του καταστρώματος θα εκτιμηθεί για την περίπτωση της στιγμιαίας δράσης των φορτίσεων, δηλαδή όταν στη κατάσταση λειτουργίας της γέφυρας συνυπάρχουν με τον πιο δυσμενή τρόπο τα μόνιμα και τα κινητά φορτία. Για τον δυσμενή συνδυασμό των φορτίσεων αυτών οι συντελεστές φόρτισης θα ληφθούν ίσοι με 1.0. Έτσι, από τα διαγράμματα του Σχήματος 4.5 προκύπτει η μέγιστη ροπή ανοιγμάτων M_{\max} και η μέγιστη ροπή στηριγμάτων M_A, M_B :

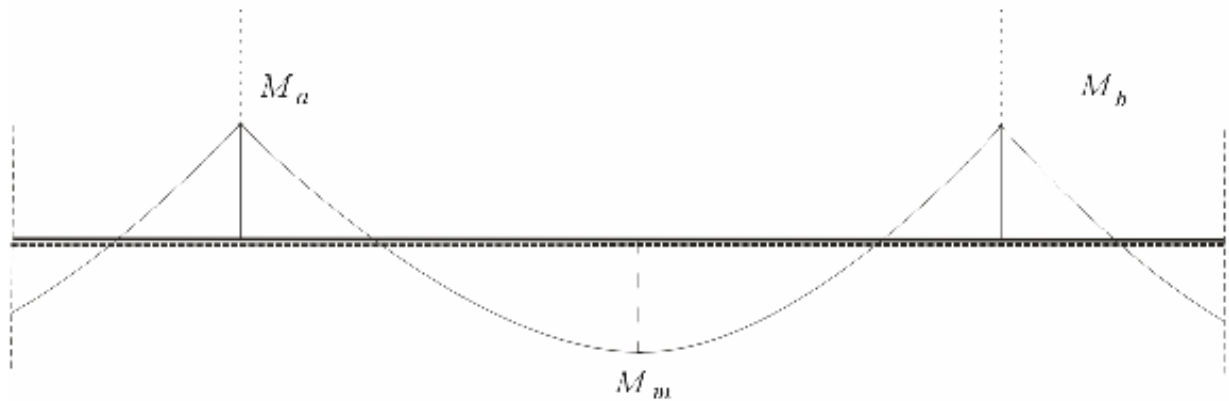
$$M_{\max} = 1.0 \times 6.56 + 1.0 \times 10.38 = 16.94 \text{ KN m} (= M_s)$$

$$M_A = M_B = 1.0 \times (-12.97) + 1.0 \times (-5.25) = -18.22 \text{ KN m}$$

ενώ υπενθυμίζεται ότι έχει βρεθεί

$$M_{cr} = 15.83 \text{ KN m}.$$





Σχήμα 4.7: Μέγιστες ροπές ανοιγμάτων και στηριγμάτων

Η βύθιση f του ανοίγματος της γέφυρας θα υπολογισθεί από την σχέση

$$f = f_I \beta_1 \beta_2 \left(\frac{M_{cr}}{M_{max}} \right)^m + f_{II} \left[1 - \beta_1 \beta_2 \left(\frac{M_{cr}}{M_{max}} \right)^m \right]$$

Στη σχέση αυτή, τα f_I και f_{II} είναι οι βυθίσεις του ανοίγματος για τη ρηγματωμένη και την αρηγμάτωτη κατάσταση και παρέχονται από τις σχέσεις

$$f_I = k l^2 \left(\frac{1}{r} \right)_I, \quad f_{II} = k l^2 \left(\frac{1}{r} \right)_{II}.$$

Στις σχέσεις αυτές $l = 5000$ mm και το k είναι ένας συντελεστής που θα βρεθεί από τη σχέση

$$k = \frac{5}{48} (1 - 0.1 \beta)$$

Στη σχέση αυτή

$$\beta = \frac{|M_A + M_B|}{M_s} = \frac{2 \times 18.22}{16.94} = 2.15$$

οπότε

$$k = \frac{5}{48} (1 - 0.1 \times 2.15) = 0.082$$

Οι καμπυλότητες

$$\left(\frac{1}{r} \right)_i = \frac{M_s}{E_c I_i} \quad (i = I, II)$$

Στη σχέση αυτή E_c είναι το μέτρο ελαστικότητας του σκυροδέματος που λαμβάνεται ίσο με $E_c = 24976$ και I_I η ροπή της αδράνειας της αρηγμάτωτης διατομής. Οι ροπές αδράνειας I_i υπολογίζονται με βάση τον Πίνακα Α.1 του Παραρτήματος Α, που είναι ο Πίνακας 8.6 του EC2. Ο υπολογισμός θα γίνει για δύο περιπτώσεις. Για την περίπτωση που ο τελικός συντελεστής ερπυσμού είναι μηδέν και για συνθήκες περιβάλλοντος που αντιστοιχούν σε $\Phi_\infty = 2.5$. Για την αρηγμάτωση περίπτωση οι παράμετροι που απαιτούνται για τον προσδιορισμό της ροπής αδράνειας I_I είναι:

$$E_{c,eff} = \frac{E_c}{1 + \Phi_\infty} = \frac{24976}{1 + 0} = 24976 \text{ MPa}$$

$$a_e = \frac{E_f}{E_{c,eff}} = \frac{45000}{24976} = 1.80$$

$$\rho_{II} = \frac{A_{f,prov}}{b h} = \frac{2290}{1000 \times 170} = 0.0135$$

$$A_I = a_e \rho_{II} \frac{d}{h} = 1.8 \times 0.0135 \times \frac{136}{170} = 0.019$$

$$B_I = a_e \rho_{II} = 1.8 \times 0.0135 = 0.024$$

$$k_{xl} = \frac{0.5 + A_I}{1 + B_I} = \frac{0.5 + 0.019}{1 + 0.024} = 0.507$$

$$k_I = 1 + 12 (0.5 - k_{xl})^2 + 12 a_e \rho_{II} \left(\frac{d}{h} - k_{xl} \right)^2$$

$$= 1 + 12 (0.5 - 0.507)^2 + 12 \times 1.8 \times 0.0135 \left(\frac{136}{170} - 0.507 \right)^2 = 1.026.$$

Έτσι η ροπή αδράνειας I_I και η καμπυλότητα $(1/r)_I$ είναι

$$I_I = k_I \frac{b h^3}{12} = 1.026 \frac{1000 \times 170^3}{12} = 4.2 \times 10^8 \text{ mm}^4$$

$$\left(\frac{1}{r} \right)_I = \frac{M_s}{E_c I_I} = \frac{16.94 \times 10^6}{24976 \times 4.2 \times 10^8} = 1.615 \times 10^{-6},$$

οπότε

$$f_I = k l^2 \left(\frac{1}{r} \right)_I = 0.082 \times 5000^2 \times 1.615 \times 10^{-6} = 3.31 \text{ mm}.$$

Για την ρηγματωμένη περίπτωση , οι σχετικές παράμετροι για τον υπολογισμό της ροπής αδράνειας I_{II} είναι:

$$E_{c,eff} = \frac{E_c}{1 + \Phi_\infty} = \frac{24976}{1 + 0} = 24976 \text{ MPa}$$

$$a_e = \frac{E_f}{E_{c,eff}} = \frac{45000}{24976} = 1.80$$

$$\rho_{III} = \rho_{II} = 0.0135, \text{ διότι έχουμε μόνο κάτω σπλισμό}$$

$$A_{II} = a_e \rho_{III} = B_{II} = 1.8 \times 0.0135 = 0.024$$

$$k_{xII} = -B_{II} + \sqrt{B_{II}^2 + 2A_{II}} = -0.024 + \sqrt{0.024^2 + 2 \times 0.024} = 0.196$$

$$\begin{aligned} k_{II} &= 4k_{xII}^3 + 12a_e\rho_{III}(1 - k_{xII})^2 \\ &= 4 \times 0.196^3 + 12 \times 1.8 \times 0.0135(1 - 0.196)^2 = 0.219. \end{aligned}$$

Έτσι η ροπή αδράνειας I_{II} και η καμπυλότητα $(1/r)_{II}$ είναι

$$I_{II} = k_{II} \frac{b h^3}{12} = 0.219 \frac{1000 \times 170^3}{12} = 0.90 \times 10^8 \text{ mm}^4$$

$$\left(\frac{1}{r}\right)_{II} = \frac{M_s}{E_c I_{II}} = \frac{16.94 \times 10^6}{24976 \times 0.90 \times 10^8} = 7.536 \times 10^{-6},$$

οπότε

$$f_{II} = k l^2 \left(\frac{1}{r}\right)_{II} = 0.082 \times 5000^2 \times 7.536 \times 10^{-6} = 15.45 \text{ mm}.$$

Άρα για την περίπτωση που αγνοήσουμε την επιρροή του ερπυσμού, είναι $\beta_1 = 0.5$, $\beta_2 = 1$, $m = 2$ και τελικά η βύθιση είναι

$$\begin{aligned} f &= f_I \beta_1 \beta_2 \left(\frac{M_{cr}}{M_{max}}\right)^m + f_{II} \left[1 - \beta_1 \beta_2 \left(\frac{M_{cr}}{M_{max}}\right)^m\right] \\ &= 3.31 \times 0.5 \times 1 \left(\frac{15.83}{16.94}\right)^2 + 15.45 \left[1 - 0.5 \times 1 \left(\frac{15.83}{16.94}\right)^2\right] = 10.15 \text{ mm}. \end{aligned}$$

Στην περίπτωση που λάβουμε υπόψη τον ερπυσμό, όπως προαναφέρθηκε, είναι $\Phi_\infty = 2.5$. Όμοια με προηγούμενα, για την αρηγμάτωση περίπτωση, οι παράμετροι που απαιτούνται για τον προσδιορισμό της ροπής αδράνειας I_I είναι:

$$E_{c,eff} = \frac{E_c}{1 + \Phi_\infty} = \frac{24976}{1 + 2.5} = 7136 \text{ MPa και}$$

$$a_e = \frac{E_f}{E_{c,eff}} = \frac{45000}{7136} = 6.31.$$

$$\rho_{II} = \frac{A_{f,prov}}{b h} = \frac{2290}{1000 \times 170} = 0.0135$$

$$A_I = a_e \rho_{II} \frac{d}{h} = 6.31 \times 0.0135 \times \frac{136}{170} = 0.068$$

$$B_I = a_e \rho_{II} = 6.31 \times 0.0135 = 0.085$$

$$k_{xI} = \frac{0.5 + A_I}{1 + B_I} = \frac{0.5 + 0.068}{1 + 0.085} = 0.524$$

$$k_I = 1 + 12 (0.5 - k_{xI})^2 + 12 a_e \rho_{II} \left(\frac{d}{h} - k k_{xI} \right)^2$$

$$= 1 + 12 (0.5 - 0.524)^2 + 12 \times 6.31 \times 0.0135 \left(\frac{136}{170} - 0.524 \right)^2 = 1.085.$$

Έτσι η ροπή αδράνειας I_I και η καμπυλότητα $(1/r)_I$ είναι

$$I_I = k_I \frac{b h^3}{12} = 1.085 \frac{1000 \times 170^3}{12} = 4.4 \times 10^8 \text{ mm}^4$$

$$\left(\frac{1}{r} \right)_I = \frac{M_s}{E_c I_I} = \frac{16.94 \times 10^6}{24976 \times 4.4 \times 10^8} = 1.541 \times 10^{-6}.$$

ΟΠότε

$$f_I = k l^2 \left(\frac{1}{r} \right)_I = 0.082 \times 5000^2 \times 1.541 \times 10^{-6} = 3.16 \text{ mm}$$

Για την ρηγματωμένη περίπτωση, οι σχετικές παράμετροι για τον υπολογισμό της ροπής αδράνειας I_{II} είναι:

$$E_{c,eff} = \frac{E_c}{1 + \Phi_\infty} = \frac{24976}{1 + 2.5} = 7136 \text{ MPa και}$$

$$a_e = \frac{E_f}{E_{c,eff}} = \frac{45000}{7136} = 6.31.$$

$\rho_{III} = \rho_{II} = 0.0135$, διότι έχουμε μόνο κάτω σπλισμό

$$A_{II} = a_e \rho_{III} = B_{II} = 6.31 \times 0.0135 = 0.085$$

$$k_{xII} = -B_{II} + \sqrt{B_{II}^2 + 2A_{II}} = -0.085 + \sqrt{0.085^2 + 2 \times 0.085} = 0.336$$

$$\begin{aligned} k_{II} &= 4 k_{xII}^3 + 12 a_e \rho_{III} (1 - k_{xII})^2 \\ &= 4 \times 0.336^3 + 12 \times 6.31 \times 0.0135 (1 - 0.336)^2 = 0.602. \end{aligned}$$

Έτσι η ροπή αδράνειας I_{II} και η καμπυλότητα $(1/r)_{II}$ είναι

$$I_{II} = k_{II} \frac{b h^3}{12} = 0.602 \frac{1000 \times 170^3}{12} = 2.46 \times 10^8 \text{ mm}^4$$

$$\left(\frac{1}{r}\right)_{II} = \frac{M_s}{E_c I_{II}} = \frac{16.94 \times 10^6}{24976 \times 2.46 \times 10^8} = 2.757 \times 10^{-6}.$$

οπότε

$$f_{II} = k l^2 \left(\frac{1}{r}\right)_{II} = 0.082 \times 5000^2 \times 2.757 \times 10^{-6} = 5.65 \text{ mm}$$

Άρα για την περίπτωση που συμπεριλάβουμε την επιρροή του ερπυσμού, είναι $\beta_1 = 0.5$, $\beta_2 = 0.5$, $m = 2$ και τελικά η βύθιση είναι

$$\begin{aligned} f &= f_I \beta_1 \beta_2 \left(\frac{M_{cr}}{M_{max}}\right)^m + f_{II} \left[1 - \beta_1 \beta_2 \left(\frac{M_{cr}}{M_{max}}\right)^m\right] \\ &= 3.16 \times 0.5 \times 0.5 \left(\frac{15.83}{16.94}\right)^2 + 5.65 \left[1 - 0.5 \times 0.5 \left(\frac{15.83}{16.94}\right)^2\right] = 5.11 \text{ mm}. \end{aligned}$$

Παρατηρούμε ότι οι βυθίσεις αυτές είναι πολύ μικρές σε σχέση με τις απαιτήσεις που θέτουν οι σχετικοί κώδικες για τον χάλυβα. Για τον Ευρωκώδικα, μια τέτοια απαίτηση θέτει τον περιορισμό

$$\frac{l}{250} = \frac{500}{250} = 2.0 \text{ cm}$$

για μακροχρόνια βύθιση. Παρατηρούμε ότι η βύθιση αυτή είναι πολύ μεγαλύτερη από αυτή που θα αναπτυχθεί τόσο στιγμιαία όσο και μακροπρόθεσμα.

5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην εργασία αυτή έγινε ο σχεδιασμός της πλάκας μίας καλωδιωτής πεζογέφυρας που θα προταθεί να κατασκευαστεί σε Δήμο της Αττικής. Η πεζογέφυρα αυτή θα είναι κατασκευή μικτού τύπου, της οποίας το βασικό δομικό σύστημα θα είναι μεταλλικό πλαίσιο με λειτουργία δοκού-πυλώνα, με εσωτερικούς τένοντες FRP. Το κατάστρωμα της γέφυρας θα αποτελεί ένα δευτερεύον δομικό σύστημα, θα κατασκευαστεί από οπλισμένο σκυρόδεμα με οπλισμό FRP και θα μεταβιβάζει τα φορτία του στο βασικό σύστημα, μέσω κατάλληλων μεταλλικών υποστηρίξεων. Σε αυτή τη διπλωματική εργασία έγινε ο σχεδιασμός της πλάκας του καταστρώματος με εφαρμογή της μεθόδου των Οριακών Καταστάσεων, όπως έχει κωδικοποιηθεί στο προσχέδιο οδηγιών του EC2, στο Εργαστήριο Δομικής Μηχανικής της ΣΑΤΜ του ΕΜΠ.

Από την ανάλυση – σχεδιασμό που έγινε προέκυψε ότι, κατά κανόνα, οι βασικές παράμετροι που ελέγχουν τον σχεδιασμό είναι οι παράμετροι λειτουργικότητας και όχι οι παράμετροι αντοχής, όπως συμβαίνει στην περίπτωση του οπλισμού από χάλυβα. Συγκεκριμένα, η κρίσιμη παράμετρος που ελέγχει τελικά τον σχεδιασμό είναι το εύρος ρωγμών. Η ικανοποίηση της λειτουργικής απαίτησης του περιορισμού του εύρους των ρωγμών οδηγεί σε ένα πλεόνασμα καμπτικής αντοχής, που τελικά μένει ανεκμετάλλευτο.

Σε αντίθεση με ό, τι συμβαίνει στα δομικά στοιχεία σκυροδέματος με οπλισμό από χάλυβα, στα δομικά στοιχεία σκυροδέματος με οπλισμό FRP υπάρχουν δύο τύποι αστοχίας, η διάρρηξη του οπλισμού FRP και ο θρυμματισμός σκυροδέματος. Τελικά, ενώ οι οικονομικές απαιτήσεις δείχνουν προτίμηση στον πρώτο τύπο αστοχίας, δηλαδή στη διάρρηξη του οπλισμού, οι απαιτήσεις λειτουργικότητας και πλαστιμότητας του δομικού στοιχείου ακυρώνουν μία τέτοια επιλογή.

Η πλαστιμότητα, με τη συμβατική έννοια του όρου, φαίνεται να είναι απύσχα στα δομικά στοιχεία σκυροδέματος με οπλισμό FRP και αυτό γιατί και τα δύο υλικά είναι ψαθυρά. Από ό, τι φαίνεται όμως, η ακύρωση της επιλογής του πρώτου τύπου αστοχίας οδηγεί στον υπεροπλισμό του δομικού στοιχείου με ράβδους FRP, που δίνουν στο δομικό στοιχείο μία αδιάθετη αντοχή. Η αδιάθετη αυτή αντοχή, μαζί με το μικρό μέτρο ελαστικότητας, δίνουν μία δυνατότητα μεγάλης παραμόρφωσης στο δομικό στοιχείο πριν την αστοχία του. Έτσι, η έλλειψη πλαστιμότητας αντισταθμίζεται με την εμφάνιση μεγάλης παραμορφωσιμότητας στο στοιχείο, που είναι επιθυμητή στις κατασκευές και αντικαθιστά την πλαστιμότητα.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] ACI Committee 440 XR, 2006, "Report on Fiber-reinforced Polymer (FRP) Reinforcement for Concrete Structures", pp. 8-15, ACI 440.XR (to replace 440R), American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich.
- [2] Yunovich M., and Thompson N., 2003, "Corrosion of Highway Bridges: Economic Impact and Control methodologies", *ACI Concrete Int.*, 25(1), pp. 52-57.
- [3] ENV , 1992, Eurocode 2, "Design of Concrete Structures".
- [4] Litzner H-U, 1994, "Design of Concrete Structures to ENV 1992-Eurocode2" in *Concrete Structures Euro-Design Handbook*, Ertl J., Ernst & Sohn Karlsruhe.
- [5] National Research Council, 2007, "Guide for the Design and Construction of Concrete Structures Reinforced with Fiber- Reinforced Polymer Bars", NRC Rome.
- [6] Bradberry T.E., 2001, "Concrete Bridge Decks Reinforced with Fiber Reinforced Polymer Bars", *Transportation Research Record 1770, Transportation Research Board, National Research Council*, Washington, DC, pp. 94-104.
- [7] Si-Hwan Park, Robertson N. I., Riggs H. R., September 2002, "A Primer for FRP Strengthening of Structurally Deficient Bridges", Prepared in Cooperation with: State of Hawaii, Department of Transportation, Highways Division and U.S. Department of Transportation.
- [8] 02-003 New York State Department of Transportation Structures Division, "Structures Design Advisory Subject: FRP Decks & Superstructures".
- [9] VTRC 05-CR24, Virginia Transportation Research Council, "Performance of a Bridge Deck with Glass Fiber Reinforced Polymer Bars as the Top Mat of Reinforcement".
- [10] C. E. Bakis¹, L. C. Bank, V. L. Brown, E. Cosenza, J. F. Davalos, J. J. Lesko, A. Machida, S. H. Rizkalla, and T. C. Triantafillou, May/2002, "Fiber-Reinforced Polymer Composites for Construction-State-of-the-Art Review" , *Journal of composites for construction*, pp.1-85.
- [11] Khalifa A., Gold W. J, Nanni A., and Aziz A., 1998, "Contribution of Externally Bonded FRP to Shear Capacity of RC Flexural Members", *Journal of composites for construction* V.2, No.4, pp.195-202.
- [12] Saadamanesh H., Malek A. M, 1998, "Design Guidelines for Flexural Strengthening of RC Beams with FRP Plates", *Journal of composites for construction*, V.2, No.4, pp.154-164.

- [13] Saadamanesh H., 1994, "Fiber Composites for New and Existing Structures", *ACI Structural Journal*, V.91, No.3, May-June, pp. 346-354.
- [14] Brown, Vicki L. and Charles L. Bartholomew, 1993, "FRP Reinforcing Bars in Reinforced Concrete Members", *ACI Materials Journal (American Concrete Industry)*, V.90, No.1, pp. 34-39.
- [15] Benmokrane B., El-Salakawy E., El-Ragaby A., and Lackey T., March-April 2006, "Designing and Testing of Concrete Bridge Decks Reinforced with Glass FRP Bars", *Journal of Bridge Engineering ASCE*, pp. 217-229.
- [16] Benmokrane B., El-Salakawy E., El-Gamal S., and Goulet S., September-October 2007, "Construction and Testing of an Innovative Concrete Bridge Deck Totally Reinforced with Glass FRP Bars: Val-Alan Bridge on Highway 20 East", *Journal of Bridge Engineering ASCE*, pp. 632-645.
- [17] Davalos, J. F., Qiao, P. Z., Xu, X. F., Robinson, J., and Barth, K. E., 2001, "Modeling and characterization of fiber-reinforced plastic honeycomb sandwich panels for highway bridge applications", *J. Compos. Constr.*, 52 (3-4), pp. 441-452.
- [18] El-Gamal S., El-Salakawy E., Benmokrane B., September- October 2007, "Influence of Reinforcement on the Behavior of Concrete Bridge Deck Slabs Reinforced with FRP Bars", *Journal of Composites for Construction ASCE*, pp. 449- 458.
- [19] Berg C. A., Bank C. L., Oliva G. M., Russell S. J., February 2005, "Construction and cost analysis of an FRP reinforced concrete bridge deck", *Science Direct*, pp. 512- 528.
- [20] Bai Y., Keller T., December 2006, "Modal Parameter Identification for a GFRP Pedestrian Bridge", *Science Direct*, pp. 90-100.
- [21] Ueda T., "FRP for Construction in Japan".
- [22] Shoichi S., Yamashiro K., Kitayama N., Chou I., Yamamoto N., et al., "First GFRP Pedestrian Bridge in Japan".
- [23] Nanni A., and Faza S., 2002, "Design and Construction of Concrete Reinforced with FRP Bars: An Emerging Technology", *Concrete international* V. 24, No. 11, American Concrete Institute.
- [24] Mirmiran A., Naguib W., and Shahawy M., 2000, "Principles and analysis of concrete-filled composite tubes", *J. Adv. Mater.*, 32(4) pp. 16-23.
- [25] Karbhari V. M., Seible F., Burgueno R., Davol A., Wernli M., and Zhao L., 2000, "Structural characterization of fiber-reinforced composite short and medium-span bridge systems", *Appl. Compos. Mater.*, 7(2) pp. 151-182.

[26] Bedard, Claude, 1992, "Composite Reinforcing Bars: Assessing their use in Construction", *Concrete International: Design and Construction*, V.14, No.1, pp. 55-59.

[27] Brown V. L., 1997, "Sustained Load Deflections in GFRP-Reinforced Concrete Beams", *Proceedings of the Third International Symposium on Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures V.2*, Japan Concrete Institute, Sapporo, Japan, pp. 495-470.

[28] Harik, I., et al.1999, "Static testing on FRP bridge deck panels", *Proc., 44th Int. SAMPE Symposium and Exhibition, Society for the Advancement of Material and Process Engineering, Covina, Calif.*, Vol. 2, pp. 1643–1654.

[29] Tang B., P.E. and Podolny W., Jr., Ph. D., P.E, 11/1998, "A Successful Beginning for Fiber Reinforced Polymer (FRP) Composite Materials in Bridge Applications", *The FHWA Proceedings, International Conference on Corrosion and Rehabilitation of Reinforced Concrete Structures*, Orlando, FL.

[30] Adam C. Berg, Lawrence C. Bank, Michael G. Oliva, Jeffrey S. Russell, February 2005, "Construction and Cost Analysis of an FRP Reinforced Concrete Bridge Deck", *Department of Civil and Environmental Engineering*, University of Wisconsin–Madison.


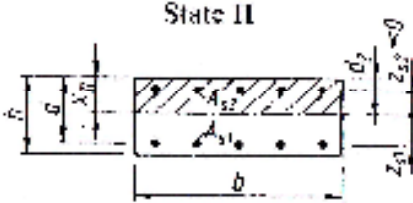
[31] Curtis B. B., May 1997, "A Load-Deflection Study of Fiber Reinforced Plastics as Reinforcement in Concrete Bridge Decks", *Master of Science in Civil Engineering*, Blacksburg, Virginia.

[32] Πανταζοπούλου Σ., 2001, "Εισαγωγή στον Σχεδιασμό Στοιχείων από Οπλισμένο Σκυρόδεμα έναντι Οριακών Καταστάσεων", *Πανεπιστημιακές Σημειώσεις*, Ξάνθη.

[33] American Composites Manufacturers Association (ACMA), 2005, Composites Industry Statistics, Arlington, V.a, pp.35, <http://www.acmanet.org/professionals/2005-Composites-Industry-Statistics.pdf> (πρόσβαση Ιούλιος 2006).

[34] American Composites Manufacturers Association Market Development Alliance (ACMA MDA), 2006, <http://www.mdacomposites.org> (πρόσβαση Ιούλιος 2006).

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

Line	Value	State I	State II
			
	1	2	3
1	x	$x_I = k_{xI} \cdot h; \rho_{II} = A_{sI}/(b \cdot h)$ $k_{xI} = (0.5 + A_1)/(1 + B_1)$ $A_1 = \alpha_e \cdot \rho_{II} \cdot d/h \cdot (1 + A_{s2} \cdot d_2/(A_{s1} \cdot d))$ $B_1 = \alpha_e \cdot \rho_{II} \cdot (1 + A_{s2}/A_{s1})$	$x_{II} = k_{xII} \cdot d; \rho_{III} = A_{sII}/(b \cdot d)$ $k_{xII} = -B_{II} + \sqrt{B_{II}^2 + 2A_{II}}$ $A_{II} = \alpha_e \cdot \rho_{III} \cdot (1 + A_{s2} \cdot d_2/(A_{s1} \cdot d))$ $B_{II} = \alpha_e \cdot \rho_{III} \cdot (1 + A_{s2}/A_{s1})$
2	I	$I_I = k_I \cdot b \cdot h^3/12$ $k_I = 1 + 12 \cdot (0.5 - k_{xI})^2 + 12 \cdot \alpha_e \cdot \rho_{II} \cdot (d/h - k_{xI})^2$ $+ 12 \cdot \alpha_e \cdot \rho_{II} \cdot \frac{A_{s2}}{A_{s1}} \cdot (k_{xI} - d_2/h)^2$	$I_{II} = k_{II} \cdot b \cdot d^3/12$ $k_{II} = 4 \cdot k_{xII}^3 + 12 \cdot \alpha_e \cdot \rho_{III} \cdot (1 - k_{xII})^2$ $+ 12 \cdot \alpha_e \cdot \rho_{III} \cdot \frac{A_{s2}}{A_{s1}} \cdot (k_{xII} - d_2/d)^2$
3	S	$S_I = A_{s1} \cdot z_{s1} + A_{s2} \cdot z_{s2}; z_{s2} < 0$	$S_{II} = A_{sII} \cdot z_{s1} + A_{s2} \cdot z_{s2}; z_{s2} < 0$

Πίνακας Α.1: Συντελεστές βύθισης του Ευρωκώδικα, Πίνακας 8.6, "Design of Concrete Structures to ENV,1992-Eurocode 2"

Συμβολισμός ράβδου		Ονομαστική διάμετρος, in. (mm)	Εμβαδόν in. ² (mm ²)
inch.	mm		
No. 2	No. 6	0.25 (6.4)	0.05 (31.6)
No. 3	No. 10	0.375 (9.5)	0.11 (71)
No. 4	No. 13	0.500 (12.7)	0.20 (129)
No. 5	No. 16	0.625 (15.9)	0.31 (199)
No. 6	No. 19	0.750 (19.1)	0.44 (284)
No. 7	No. 22	0.875 (22.2)	0.60 (387)
No. 8	No. 25	1.000 (25.4)	0.79 (510)
No. 9	No. 29	1.128 (28.7)	1.00 (645)
No. 10	No. 32	1.270 (32.3)	1.27 (819)
No. 11	No. 36	1.410 (35.8)	1.56 (1006)
No. 14	No. 43	1.693 (43.0)	2.25 (1452)
No. 18	No. 57	2.257 (57.3)	4.00 (2581)

Πίνακας Α.2: Τύποι ράβδων FRP σύμφωνα με το ASTM

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β