

## Σκυρόδεμα Οπλισμένο με Ινοπλισμένα Πολυμερή: Ερευνητικές Δραστηριότητες της *fib* Concrete reinforced internally with fibre reinforced polymers: research activities of fib

Κύπρος ΠΗΛΑΚΟΥΤΑΣ<sup>1</sup>, Maurizio GUADAGNINI<sup>2</sup>, Κυριάκος  
ΝΕΟΚΛΕΟΥΣ<sup>3</sup>, Stijn MATTHYS<sup>4</sup>

Λέξεις κλειδιά: οπλισμένο σκυρόδεμα, ινοπλισμένα πολυμερή, οδηγίες & φιλοσοφία σχεδιασμού

**ΠΕΡΙΛΗΨΗ:** Η χρήση των ινοπλισμένων πολυμερών για την ενίσχυση και επισκευή υφισταμένων κτιρίων έχει γίνει θερμά αποδεκτή στην βιομηχανία των κατασκευών. Παρόλα αυτά η υιοθέτησή τους ως εσωτερικός οπλισμός στα νέα κτήρια έχει καθυστερήσει αισθητά. Η περιορισμένη χρήση των ινοπλισμένων πολυμερών σαν εσωτερικός οπλισμός οφείλεται στο αρχικά υψηλό κόστος του υλικού και στις μοναδικές μηχανικές ιδιότητές τους, αντίληψη η οποία γενικά αποτρέπει τη χρήση τους από μηχανικούς και εργολάβους, καθώς αυτοί είναι περισσότερο εξοικειωμένοι με τον συμβατικό οπλισμό από χάλυβα. Επίσης, η έλλειψη ολοκληρωμένων κωδικών σχεδιασμού συμβάλει στην καθυστέρηση της γρηγορότερης υιοθέτησης αυτής της τεχνολογίας. Η παρούσα εργασία βασίζεται στην τρέχουσα έρευνα της Διεθνούς Ομοσπονδίας Σκυροδέματος στο οπλισμένο σκυρόδεμα με ινοπλισμένα πολυμερή. Η εργασία παρουσιάζει όλα τα σημαντικά ζητήματα της κατασκευαστικής συμπεριφοράς και φιλοσοφίας σχεδιασμού εστιάζοντας κυρίως στην αντοχή, την καμπτική ικανότητα, τις παραμορφώσεις, τη ρηγμάτωση, τη διάτμηση και την συνάφεια.

**ABSTRACT:** The use of fibre reinforced polymer (FRP) reinforcement for the strengthening and rehabilitation of existing structures has been well accepted within the construction industry; however, their adoption as internal reinforcement in new buildings has been considerably slower. The reason for the limited use of FRPs as internal reinforcement can be attributed to their initial higher material costs and unique mechanical properties, the perception of which generally

---

<sup>1</sup> Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών και Δομοστατικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο του Sheffield, email: [K.Pilakoutas@sheffield.ac.uk](mailto:K.Pilakoutas@sheffield.ac.uk)

<sup>2</sup> Λέκτορας, Τμήμα Πολιτικών και Δομοστατικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο του Sheffield, email: [m.guadagnini@sheffield.ac.uk](mailto:m.guadagnini@sheffield.ac.uk)

<sup>3</sup> Ανώτερος Ερευνητικός Συνεργάτης, Τμήμα Πολιτικών και Δομοστατικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο του Sheffield, email: [k.neocleous@sheffield.ac.uk](mailto:k.neocleous@sheffield.ac.uk)

<sup>4</sup> Καθηγητής, Magnel Εργαστήριο Έρευνας Σκυροδέματος, Πανεπιστήμιο του Ghent email: [Stijn.Matthys@UGent.be](mailto:Stijn.Matthys@UGent.be)

overwhelms contractors and designers who rather deal with the more familiar steel reinforcement. The lack of a mature set of design rules also contributes to the delay the more widespread adoption of this new technology. This paper will draw on the ongoing work of *fib* on concrete reinforced internally with FRP, and present some of the important aspects of structural behaviour and philosophy focusing primarily on flexural capacity, deflections, cracking, shear and bond.

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η έλλειψη κανονιστικών πλαισίων για την χρήση των ινοπλισμένων πολυμερών (ΙΩΠ) αποτελεί ένα σημαντικό παράγοντα για την μη εκτεταμένη χρήση τους στις κατασκευές οπλισμένου σκυροδέματος. Ο πρώτος κανονισμός δημοσιεύθηκε στην Ιαπωνία (Japan Society of Civil Engineers, 1992; 1993; 1997) ενώ μετά ακολούθησαν οι Ευρωπαϊκές συστάσεις από το πρόγραμμα EUROCRETE (Clarke *et al.*, 1996) στο Καναδά (Canadian Standards Association, 1996) και στις ΗΠΑ από το Αμερικάνικο Ινστιτούτο Σκυροδέματος (ACI), (ACI Committee 440, 1998). Οι συστάσεις του ACI από την επιτροπή ACI 440 έχει αναθεωρηθεί αρκετές φορές και ένα πλήθος από Ευρωπαϊκές χώρες έχουν δημοσιεύσει τους δικούς τους κανονισμούς ή συστάσεις για την χρήση των ΙΩΠ ως κύριους οπλισμούς σε κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα (ΟΣ) καθώς και για εφαρμογές ενίσχυσης.

Η Διεθνές Ομοσπονδία Σκυροδέματος (*fib*) δημιούργησε, το 1996, την ομάδα εργασίας 9.3 υπό την προεδρεία του Καθηγητή Luc Taerwe με σκοπό την δημιουργία οδηγιών για τον σχεδιασμό κατασκευών από σκυρόδεμα, οπλισμένων, προεντεταμένων ή ενισχυμένων με σύνθετα υλικά. Το 2000 η ομάδα εργασίας 9.3 μαζί με το Ευρωπαϊκό Ερευνητικό Δίκτυο ConFibreCrete (1997-2001), δημοσίευσε το τεύχος 14 σχετικά με τον εξωτερικά επικολημένο οπλισμό από ΙΩΠ σε κατασκευές ΟΣ (*fib* Task-group 9.3, 2001). Η ομάδα αυτή συνεργάστηκε και με το ερευνητικό δίκτυο En-Core (2004-08) και το 2007 δημοσίευσαν το τεύχος 40, μια συγκεντρωτική έκθεση σχετικά με τις συστάσεις για σχεδιασμό κατασκευών από σκυρόδεμα με κύριο οπλισμό από ΙΩΠ (*fib* Task-group 9.3, 2007). Η ομάδα αυτή εργάζεται τώρα πάνω στη δημιουργία συστάσεων για χρήση των ΙΩΠ τόσο σαν εσωτερικό αλλά και σαν εξωτερικό οπλισμό.

Σε αυτή την εργασία παρουσιάζονται τα κύρια σημεία του τεύχους 40 της *fib* που διαπραγματεύεται όλα τα σημαντικά ζητήματα της κατασκευαστικής συμπεριφοράς και φιλοσοφίας σχεδιασμού εστιάζοντας κυρίως στην αντοχή, την καμπτική ικανότητα, τις παραμορφώσεις, τη ρηγμάτωση, τη διάτμηση και την συνάφεια.

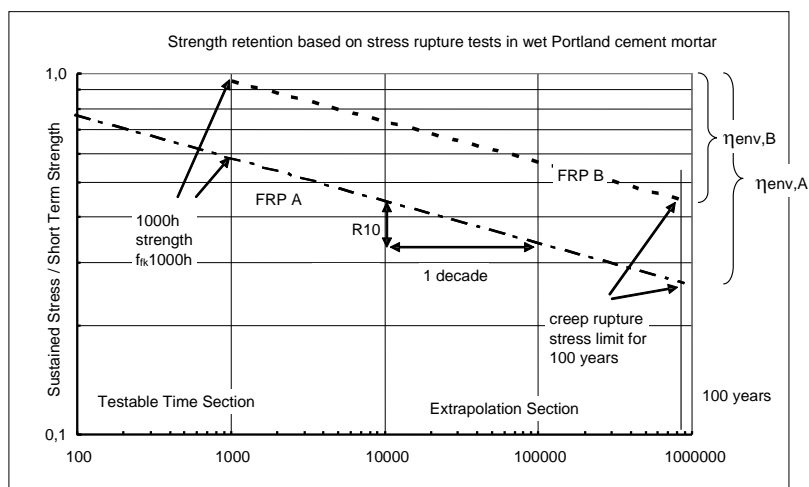
## ΘΕΩΡΗΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ

### Ανθεκτικότητα

Παρά την πρόοδο που έχει γίνει σχετικά με την κατανόηση των μηχανισμών φθοράς των ΙΩΠ στο σκυρόδεμα, περιορισμένα είναι τα δεδομένα ανθεκτικότητας των ΙΩΠ που είναι διαθέσιμα και μπορούν να χρησιμοποιηθούν από τους μηχανικούς για τον σχεδιασμό σκυροδέματος με ΙΩΠ. Η έλλειψη μιας διεθνούς συμφωνίας για τις δοκιμές ανθεκτικότητας στα ΙΩΠ, η πολυπλοκότητα που οφείλεται στις διαφορετικές μεθόδους παραγωγής, στους διαφορετικούς τύπους ινών/πολυμερών, στις διαφορετικές ερευνητικές προσεγγίσεις καθώς και η έλλειψη δεδομένων από πραγματικού χρόνου στοιχεία σχετικά με τα χαρακτηριστικά τους κάνει το ζήτημα αυτό ακόμα πιο περίπλοκο (*fib* Task-group 9.3, 2007).

Για την ανάπτυξη βάσιμων και πρακτικών οδηγιών σχεδιασμού, το τεύχος 40 της *fib* προτείνει, για την αποτίμηση της ανθεκτικότητας, ένα συνδυασμό δεδομένων από πειραματικές δοκιμές ανθεκτικότητας και προτεινόμενων τιμών σχεδιασμού για τις μηχανικές ιδιότητες των ΙΩΠ, ενώ εξετάζονται και δυο προσεγγιστικές διαδικασίες για τον προσδιορισμό της ανθεκτικότητας. Η πρώτη από αυτές, με τον όρο «απλοποιητική διαδικασία υπολογισμού της ανθεκτικότητας», βασίζεται σε επιταχυνόμενες μεταβολές υπό φόρτιση και σε δοκιμές απομένουσας αντοχής και είναι σε συμφωνία με το διεθνές ημι-πιθανοτικό σκεπτικό ασφάλειας (εξίσωση 1). Η δεύτερη προσέγγιση, με τον όρο «ακριβής διαδικασία υπολογισμού της ανθεκτικότητας» προέκυψε από την έρευνα της ομάδας εργασίας 9.3 της *fib* και συνυπολογίζει της φθορές του περιβάλλοντος με τρόπο παρόμοιο με αυτό που χρησιμοποιείται στο σχεδιασμό κατασκευών σκυροδέματος οπλισμένων με χάλυβα. Με αυτή τη προσέγγιση συνυπολογίζεται η φθορά των ΙΩΠ λόγω περιβαλλοντικών συνθηκών με την εισαγωγή μειωτικών συντελεστών για τις τάσεις. Οι συντελεστές αυτοί λαμβάνουν υπόψη την σχετική αντίσταση διαφόρων τύπων ΙΩΠ σε «διαβρωτικό» περιβάλλον καθώς και την επιθυμητή ζωή σχεδιασμού της κατασκευής (Σχήμα 1). Επομένως, η προσέγγιση αυτή θεωρείται λιγότερο συντηρητική από τις υπάρχουσες που προτείνονται σε διεθνείς συστάσεις.

$$f_{fd} = \min (f_{\text{Test}} , f_{\text{fk res}} / \gamma_f) \quad (1)$$



**Σχήμα 1.** Παράδειγμα για δύο υλικά από ΙΩΠ με γυαλί που έχουν διαφορετική ανθεκτικότητα: μειωτικοί συντελεστές για την αντοχή λόγω περιβαλλοντικών επιπτώσεων και αντοχή μετά από 1000 ώρες δοκιμών ανθεκτικότητας.

## Κάμψη

Είναι γενικά αποδεκτό ότι οι βασικές αρχές της ανάλυσης διατομής μπορούν να εφαρμοστούν σε κατασκευές από σκυροδέμα οπλισμένες με ΙΩΠ, και ότι αν αποφευχθούν όλες οι άλλες μορφές αστοχίας, επικρατεί η καμπτική αστοχία είτε λόγω της σύνθλιψης του σκυροδέματος είτε λόγω της αστοχίας του ΙΩΠ σε εφελκυσμό (Σχήμα 2). Το τεύχος 40 της *fib* υιοθέτησε το πλαίσιο του Ευρωκώδικα 2 (CEN, 2004) για την αποτίμηση της ροπής αντοχής ( $M_u$ ) διατομών σκυροδέματος οπλισμένων με ΙΩΠ. Για την περίπτωση της καμπτικής αστοχίας λόγω σύνθλιψης του σκυροδέματος, το τεύχος 40 της *fib* προτείνει εξισώσεις και διαγράμματα σχεδιασμού για την  $M_u$ . Αν η αναμενόμενη καμπτική αστοχία οφείλεται στην αστοχία του οπλισμού από ΙΩΠ, το τεύχος 40 της *fib* προτείνει μια επαναληπτική διαδικασία για την αποτίμηση της θλιπτικής παραμόρφωσης του σκυροδέματος στην ακραία ίνα καθώς και για την αποτίμηση της  $M_u$ . Επιπλέον, προτείνεται ένα ελάχιστο ποσοστό διαμήκους οπλισμού έτσι ώστε να διασφαλιστεί ότι η  $M_u$  είναι υψηλότερη από την ροπή ρηγμάτωσης της διατομής του ΟΣ.



**Σχήμα 2.** Αστοχία σε κάμψη δοκών οπλισμένου σκυροδέματος με ΙΩΠ: (α) σύνθλιψη του σκυροδέματος και (β) εφελκυστική αστοχία του διαμήκους οπλισμού (Al-Sunna, 2006)

### Μετατοπίσεις και ρηγμάτωση

Παρά το γεγονός ότι ο οπλισμός από ΙΩΠ δεν αντιμετωπίζει προβλήματα διάβρωσης (όπως οι οπλισμοί από χάλυβα), το πλάτος των ρηγματώσεων πρέπει να περιορίζεται για να ικανοποιούνται απαιτήσεις αισθητικής αλλά και σε περίπτωση ειδικών εφαρμογών. Μπορεί να θεωρηθεί ότι οι αρχές που υπάρχουν σχετικά με τις μετατοπίσεις αλλά και τη ρηγμάτωση των οπλισμένων με ΙΩΠ μελών από σκυρόδεμα είναι παρόμοιες με αυτές που έχουν καθιερωθεί στους κανονισμούς για μέλη σκυροδέματος οπλισμένα με χάλυβα. Ωστόσο, οι οριακές τιμές θα μπορούσαν να διαφοροποιηθούν έτσι ώστε να λαμβάνεται στους υπολογισμούς η διαφοροποίηση τόσο στις βραχυπρόθεσμες όσο και στις μακροπρόθεσμες μηχανικές ιδιότητες των υλικών όπως το μικρότερο μέτρο Ελαστικότητας των οπλισμών από ΙΩΠ, το οποίο οδηγεί σε μεγαλύτερες μετατοπίσεις από ότι στα μέλη που είναι οπλισμένα με χάλυβα.

Στο τεύχος 40 της *fib* εξετάζονται τα διαφορετικά προσομοιώματα ρηγματώσεως που έχουν παρουσιαστεί στις διεθνείς οδηγίες σχεδιασμού και εξετάζονται οι δύο κυρίαρχες διαδικασίες για τον καθορισμό των μετατοπίσεων σε μέλη σκυροδέματος οπλισμένα με ΙΩΠ. Η πρώτη περιλαμβάνει τις τροποποιημένες εξισώσεις του ACI που βασίζονται στις δευτερεύοντες ροπές της ρηγματωμένης και μη διατομής, όπως αρχικά προτάθηκε από τον Branson. Παρά το γεγονός ότι υπάρχει ένα πλήθος τροποποιήσεων και διορθωτικών συντελεστών για την συνάφεια, αυτές οι εμπειρικές τροποποιήσεις έχουν περιορισμένες εφαρμογές ελλείψει ικανοποιητικής τεκμηρίωσης. Από την άλλη μεριά η προσέγγιση του Ευρωκώδικα 2 (και του Model Code 90) φαίνεται να είναι πιο καλά θεμελιωμένη και να μπορεί να εφαρμοστεί πιο εύκολα σε σκυρόδεμα οπλισμένο με ΙΩΠ.

### Διάτμηση

Η διατμητική συμπεριφορά μελών από ΟΣ (π.χ. Σχήμα 3) είναι ένα περίπλοκο φαινόμενο το οποίο βασίζεται στην ανάπτυξη εσωτερικών μηχανισμών ανάληψης φορτίων, το μέγεθος και ο συνδυασμός των οποίων είναι ακόμα υπό εξέταση. Παρόλα αυτά έχει αναγνωριστεί ότι η διατμητική αντίσταση στοιχείων από ΟΣ καθορίζεται κυρίως από την συνεισφορά της αρηγμάτωτης θλιβόμενης ζώνης, την αλληλοσύνδεση των αδρανών, την δράση βλήτρου και τον οπλισμό διάτμησης, όταν αυτός υπάρχει. Η ανάπτυξη όλων αυτών των βασικών μηχανισμών δεν εξαρτάται αποκλειστικά από τα χαρακτηριστικά του σκυροδέματος αλλά και από τις μηχανικές ιδιότητες του υλικού που χρησιμοποιείται για τον οπλισμό καθώς και στην αλληλεπίδραση μεταξύ σκυροδέματος και οπλισμού.



Σχήμα 3. Δοκός ΟΣ με κύριο οπλισμό από ΙΩΠ: αστοχία σε διάτμηση

Το κεφάλαιο για την διάτμηση που υπάρχει στο τεύχος 40 της *fib* εξετάζει πως η χρήση του οπλισμού από ΙΩΠ επηρεάζει τους μηχανισμούς διατμητικής αντίστασης και πως μπορεί η συνολική συμπεριφορά να συνυπολογιστεί στην ανάπτυξη συστάσεων για την χρήση αυτού του τύπου των οπλισμών. Επιπλέον, οι

Βασικές σχεδιαστικές αρχές παρουσιάζονται και οι συστάσεις για σχεδιασμό των εθνικών και διεθνών επιτροπών συζητούνται σύμφωνα με αυτά που προτάθηκαν από τα μέλη της ομάδας εργασίας 9.3 της *fib* (Guadagnini *et al.*, 2003).

### **Συνάφεια**

Η συνάφεια μεταξύ σκυροδέματος και ράβδων ΙΩΠ είναι καθοριστική για την λειτουργία των οπλισμένων μελών ως σύνθετων. Για να διασφαλιστεί η σύνθετη δράση, πρέπει να υπάρχει επαρκής συνάφεια μεταξύ του οπλισμού και του σκυροδέματος έτσι ώστε να μεταφερθούν επιτυχώς οι δυνάμεις από το ένα στο άλλο.

Η αλληλεπίδραση που υπάρχει στην περίπτωση των χαλύβδινων ράβδων είναι διαφορετική από αυτή που υπάρχει στην περίπτωση των ράβδων από ΙΩΠ για πολλούς λόγους. Στην περίπτωση των ράβδων με νευρώσεις από χάλυβα, η αλληλεπίδραση οφείλεται αρχικά στην μηχανική δράση των ράβδων του οπλισμού στο σκυρόδεμα. Όταν η εφελκυστική τάση του σκυροδέματος υπερβαίνει την μηχανική δράση λόγω συνάφειας αυτό οδηγεί σε ρηγματώση η οποία επεκτείνεται μέχρι την επιφάνεια. Επιπλέον, πολλαπλές δευτερεύουσες ρηγματώσεις μπορούν να αναπτυχθούν από τις ραβδώσεις κατά μήκος της ράβδου μεταξύ των κύριων ρωγμών. Αυτές οι δευτερεύουσες ρηγματώσεις είναι σε κλίση σε σχέση με τις κύριες και παραμένουν μέσα στο σκυρόδεμα χωρίς να εμφανίζονται στην επιφάνεια. Στην περίπτωση των ράβδων από ΙΩΠ, με χαμηλότερο μέτρο Ελαστικότητας και λιγότερες πτυχές στην επιφάνεια, η συνάφεια λειτουργεί περισσότερο σαν τριβή. Η αστοχία της συνάφειας στις χαλύβδινες ράβδους οφείλεται στην θραύση του σκυροδέματος στην περιοχή των ραβδώσεων ενώ στην περίπτωση των ράβδων από ΙΩΠ αυτό οφείλεται κατά ένα μεγάλο μέρος στην αστοχία του σκυροδέματος και σε ορισμένες περιπτώσεις στην φθορά της επιφανείας του ΙΩΠ.

Η αστοχία της συνάφειας των ράβδων από ΙΩΠ με το σκυρόδεμα αναμένεται να διαφέρει από αυτή με χαλύβδινες ράβδους λόγω του χαμηλότερου μέτρου Ελαστικότητας, της χαμηλότερης διατμητικής αντοχής και δυσκαμψίας στην διαμήκη και στην εγκάρσια διεύθυνση και των υψηλών εγκάρσιων παραμορφώσεων που αναμένονται πριν από την αστοχία. Ωστόσο, παρά το γεγονός ότι αναμένεται χαμηλότερη αντοχή σε συνάφεια από τις ράβδους ΙΩΠ, η πιο όλκιμη συμπεριφορά της συνάφειας μπορεί να οδηγήσει σε καλύτερη κατανομή των τάσεων συνάφειας και επομένως σε μειωμένα μήκη αγκύρωσης.

Το κεφάλαιο του τεύχους 40 αρχικά αναφέρεται στην προσομοίωση της συνάφειας σε τρία επίπεδα (μικρό, μέσο και μακροσκοπικά) και παρουσιάζει τις εξισώσεις που προτείνονται από τις υπάρχουσες οδηγίες σχεδιασμού για τον υπολογισμό των βασικών μήκων αγκύρωσης. Σημειώνεται ότι υπάρχει ακόμα διαφωνία μεταξύ των ερευνητών σχετικά με την ακρίβεια αυτών των προσεγγίσεων. Το τεύχος 40 της *fib* δεν έχει προτείνει συστάσεις πάνω στο θέμα αυτό για σχεδιασμό.

## ΦΙΛΟΣΟΦΙΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ

Οι συμβατικοί κανονισμοί σχεδιασμού για ΟΣ θεωρούν ότι η κυρίαρχη μορφή αστοχίας διαθέτει πάντα μια πλάστιμότητα λόγω της διαρροής του καμπτόμενου οπλισμού. Αυτό δεν ισχύει στις συστάσεις για οπλισμένα στοιχεία με ΙΩΠ στις οποίες θεωρείται ψαθυρή καμπτική αστοχία είτε λόγω της σύνθλιψης του σκυροδέματος είτε λόγω της εφελκυστικής αστοχίας της ράβδου από ΙΩΠ. Επιπλέον, οι ήδη υπάρχοντες κανονισμοί διαθέτουν βασικές αβεβαιότητες ως προς την ασφάλεια, οι οποίες σε συνδυασμό με την αλλαγή στην μορφή της αστοχίας και με άλλα θέματα σχεδιασμού σχετικά με τα οπλισμένα στοιχεία με ΙΩΠ, έχουν σημαντική επίπτωση στον σχεδιασμό και την ασφάλεια στοιχείων σκυροδέματος οπλισμένων με ΙΩΠ (Neocleous *et al.*, 2005).

Στην εργασία των Neocleous *et al.* (2005) φαίνεται ότι η εφαρμογή των υπάρχοντων προσεγγίσεων για την ασφάλεια (σχεδιασμός οριακής κατάστασης) δεν οδηγεί σε ενιαία επίπεδα ασφαλείας και έχει σαν αποτέλεσμα στοιχεία από ΟΣ με μεγαλύτερο ποσοστό οπλισμού ή μεγαλύτερους λόγους μόνιμων προς κινητών φορτίων να είναι ασφαλέστερα. Επιπλέον τα όρια αντοχής μεταξύ της καμπτικής μορφής αστοχίας και των άλλων μορφών διαφέρουν σημαντικά και ο μηχανικός δεν διαθέτει αξιόπιστα μέσα για την αξιολόγησή τους. Για το λόγο αυτό, στην περίπτωση που υπάρχει καμπτική υπερ-αντοχή, οι κανονισμοί δεν δίνουν πληροφορίες για την μορφή αστοχίας που θα συμβεί αρχικά και σε ποιο φορτίο.

Θεωρώντας ότι τα θέματα αυτά είναι σχετικά και για μέλη σκυροδέματος οπλισμένα με ΙΩΠ, έχει βρεθεί ότι η σύνθλιψη του σκυροδέματος είναι η πιθανότερη μορφή καμπτικής αστοχίας, καθώς η οριακή τιμή της εφελκυστικής αντοχής του ΙΩΠ σπάνια επιτυγχάνεται σε τυπικές διατομές από σκυροδέμα. Επιπλέον, η χρήση συντελεστών ασφαλείας για τον διαμήκη οπλισμό ( $\gamma_{FRP-L}$ ) μπορεί να μην είναι απαραίτητη για τον σχεδιασμό οπλισμένου σκυροδέματος με ΙΩΠ, εφόσον η καμπτική αστοχία (σχεδιασμού) οφείλεται στην σύνθλιψη του σκυροδέματος.

Ένα άλλο θέμα που προκύπτει είναι από την παραδοχή ότι η εφαρμογή του συντελεστή  $\gamma_{FRP-L}$  θα οδηγεί πάντα στην επιθυμητή μορφή της καμπτικής αστοχίας. Αυτό δεν ισχύει πάντα ειδικά για μεγάλες τιμές του  $\gamma_{FRP-L}$ , που θεωρητικά αναμένονται να οδηγήσουν σε καμπτική αστοχία λόγω αστοχίας του ΙΩΠ. Ωστόσο, σημειώνεται ότι η εφαρμογή υψηλών συντελεστών ασφαλείας θα μπορούσε να οδηγήσει ακόμα και σε σύνθλιψη του σκυροδέματος χωρίς αυτό να σημαίνει ότι βελτιώνεται η ασφάλεια των στοιχείων.

Πρόσθετα θέματα που απαιτούν περαιτέρω διερεύνηση προκύπτουν από την μακροπρόθεσμη συμπεριφορά των στοιχείων από σκυροδέμα οπλισμένων με ΙΩΠ. Η εφαρμογή πολλαπλών συντελεστών μείωσης της αντοχής, με την πρόθεση να συνυπολογίζει την επίδραση του χρόνου στην συμπεριφορά του οπλισμού από ΙΩΠ, ίσως να μην οδηγεί στην επιθυμητή μορφή αστοχίας που ήταν ο σκοπός στον βραχυπρόθεσμο σχεδιασμό και πιθανών να οδηγεί σε



αντιοικονομικό σχεδιασμό. Είναι απαραίτητο να αναπτυχθούν κατάλληλες διατάξεις για τον σχεδιασμό που να λαμβάνουν στους υπολογισμούς την μακροπρόθεσμη συμπεριφορά των οπλισμών από ΙΩΠ. Μια πιθανή λύση είναι η χρήση των βραχυπρόθεσμων ιδιοτήτων για τον σχεδιασμό για την οριακή κατάσταση, και επομένως να επιβεβαιωθεί (σε διάφορα χρονικά διαστήματα), ότι η εφαρμοζόμενη τάση είναι μικρότερη από την διαθέσιμη, σε κάθε χρονικό διάστημα, αντοχή του ΙΩΠ.

Από τα ευρήματα που παρουσιάστηκαν παραπάνω, αναπτύχθηκε μια νέα φιλοσοφία για τον σχεδιασμό και την ασφάλεια που παρουσιάζεται στο τεύχος 40 της *fib*. Η βάση για τον σχεδιασμό αυτό παραμένει ο σχεδιασμός για την οριακή κατάσταση, με την διαφορά όμως ότι ο κύριος στόχος είναι τώρα η επίτευξη μιας ιεράρχησης ως προς την μορφή της αστοχίας καθώς και η ικανοποίηση των στόχων για τα επίπεδα ασφαλείας. Η προτεινόμενη φιλοσοφία μπορεί να υλοποιηθεί μέσω ενός πλαισίου που θα ενισχύει τον καθορισμό κατάλληλων συντελεστών ασφαλείας το οποίο θα αποτελεί μέρος μιας συνολικής διαδικασίας εξέλιξης του κανονισμού (Neocleous *et al.*, 2005). Η προσέγγιση αυτή υιοθετήθηκε καθώς θα μπορούσε να ενθαρρύνει την χρήση νέων υλικών χωρίς να υπάρχει η ανάγκη κάθε φορά για ανασύνταξη του κανονισμού. Σαν αποτέλεσμα αυτού, οι μηχανικοί ή οι επιτροπές των κανονισμών θα επιλέγουν αν η σύνθλιψη του σκυροδέματος, η αστοχία της συνάφειας ή η διατμητική αστοχία θα είναι η κυρίαρχη μορφή αστοχίας, για λόγους σχεδιασμού αλλά επιπλέον θα επιτρέπει και τον καθορισμό της δευτερεύουσας μορφής αστοχίας. Η προσέγγιση αυτή θα διασφαλίζει σε κάθε περίπτωση το σωστό επίπεδο ασφαλείας της κατασκευής χωρίς αδικαιολόγητο συντηρητισμό, όσον αφορά την δευτερεύουσα μορφή αστοχίας.

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα ακόλουθα συμπεράσματα μπορούν να εξαχθούν:

- Παρά το γεγονός ότι η χρήση των ΙΩΠ έχουν θεμελιώδεις διαφορές ως προς τα μηχανικά χαρακτηριστικά τους σε σχέση με τον χάλυβα, ο σχεδιασμός στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος με ΙΩΠ βασίζεται στις ίδιες θεμελιώδεις αρχές όσον αφορά το σχεδιασμό σε κάμψη, σε διάτμηση καθώς και τις ρηγματώσεις και μετατοπίσεις.
- Ωστόσο, μια διαφορετική φιλοσοφία σχεδιασμού χρειάζεται που να καταστήσει το θέμα της ασφαλείας ως θεμελιώδες ζήτημα.

## ΑΝΑΦΟΡΕΣ

ACI Committee 440: Provisional design recommendations for concrete reinforced with FRP bars, American Concrete Institute ACI 440-98 (1998)

Al-Sunna R.A.S., “Deflection behaviour of FRP reinforced concrete flexural members”, Διδακτορική Διατριβή (υπό την επίβλεψη του Καθ. Κ. Πηλακούτα), Department of Civil and Structural Engineering, University of Sheffield (2006)

Canadian Standards Association: Canadian highway bridge design code, section 16: Fibre reinforced structures, CSA (1996)

CEN: Eurocode 2 - Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings, European Committee for Standardisation BS EN 1992-1-1 (2004)

Clarke, J.L., O'Regan, D.P. and Thirugnanendran, C., “EUROCRETE project, modification of design rules to incorporate non-ferrous reinforcement”, EUROCRETE Project, Technical Report (1996)

ConfibreCrete: European Union TMR research network, Network contract N° ERBFMRXCT970135 (1998-2001)

EN-Core: European Union Marie Curie research training network, “European network for composite reinforcement”, contract MRTN-CT-2004-512397 (2004-08), Website: <http://encore.shef.ac.uk/index.htm>

fib Task-group 9.3: Externally bonded FRP reinforcement for RC structures, International Federation for Structural Concrete, fib Bulletin 14 (2001) <http://fib.epfl.ch/publications/fib/14/>

fib Task-group 9.3: FRP reinforcement in RC structures, International Federation for Structural Concrete, fib Bulletin 40 (2007) <http://fib.epfl.ch/publications/fib/40/>

Guadagnini, M., Pilakoutas, K. and Waldron, P., “Shear performance of FRP reinforced concrete beams”, Journal of Reinforced Plastics and Composites, Vol. 22, No 15 (2003) 1389-1408.

Japan Society of Civil Engineers, “Application of continuous fiber reinforcing materials to concrete structures”, Concrete Library, No. 72 (1992)

Japan Society of Civil Engineers, “State-of-the-Art report on continuous fiber reinforcing materials”, Concrete Engineering Series 3, 1993.

Japan Society of Civil Engineers, Recommendation for Design and Construction of Concrete Structures using Continuous Fiber Reinforcing Materials, Concrete Engineering Series 23 (1997)

Neocleous, K., Pilakoutas, K. and Guadagnini, M., “Failure-mode-hierarchy based design for reinforced concrete structures”, Structural Concrete, Vol. 6, No. 1 (2005) 23-32