

Σεισμική επισκευή στοιχείων ΩΣ με ινωπλισμένα πολυμερή, μετά από πρόκληση εκτεταμένης βλάβης Seismic repair of severely damaged reinforced concrete members by FRP sheets

Θεόδωρος Χ. ΡΟΥΣΑΚΗΣ¹, Αθανάσιος Ι. ΚΑΡΑΜΠΙΝΗΣ²

ΠΕΡΙΛΗΨΗ : Διεξάγεται πειραματική διερεύνηση για την επισκευή στοιχείων ωπλισμένου σκυροδέματος τα οποία έχουν υποστεί εκτεταμένη βλάβη, με χρήση υφασμάτων ινωπλισμένου πολυμερούς. Κατασκευάστηκαν τμήματα κόμβων πλαισίων σταυροειδούς μορφής υπό κλίμακα 1/3, με διαφοροποίηση σε σχέση με την λεπτομέρεια και το ογκομετρικό ποσοστό του οπλισμού περίσφιγξης. Τα δοκίμια υποβλήθηκαν σε αυξανόμενους κύκλους μετατόπισης προκαλώντας μεγάλες ανελαστικές παραμορφώσεις και εκτεταμένη βλάβη στις κρίσιμες περιοχές των στοιχείων, προσομοιώνοντας σεισμική φόρτιση. Μετά την επισκευή επαναυποβλήθηκαν στο αρχικό ιστορικό μετατοπίσεων ώστε να αξιολογηθεί η αποτελεσματικότητα διαφόρων τεχνικών επισκευής μέσω εξωτερικά επικολλούμενων σύνθετων υλικών άνθρακα ή γυαλιού σε μορφή υφάσματος. Για κάθε δοκίμιο συγκρίθηκαν οι αποκρίσεις φορτίου-μετατόπισης, η μεταβολή της δυσκαμψίας, καθώς και η ικανότητα απορρόφησης ενέργειας. Η ανάλυση των αποτελεσμάτων πραγματοποιήθηκε με κατάλληλα προσομοιώματα, ευαίσθητα στην αύξηση της παραμορφωσιμότητας του σκυροδέματος σε θλίψη λόγω περίσφιγξης, όσο και στην υποβάθμιση της διατμητικής αντοχής του στοιχείου λόγω κυκλικής φόρτισης.

ABSTRACT : An experimental investigation is made on the use of FRP sheets in effective repair of severely damaged concrete members. BC connections regions of reinforced concrete (RC) frame were constructed in scale 1/3, with a variety of stirrups configuration and volumetric ratio, as well as lap splice of bars. The specimens were subjected to increasing displacement steps causing large inelastic deformation and severe damage in their critical regions to simulate prior earthquake excitations. The same specimens were repaired and tested again for the same displacement reversals to evaluate the potential of different repairing techniques using externally bonded FRP sheets. The performance of rehabilitation of columns by FRP sheet was evaluated in terms of load – displacement response, stiffness degradation as well as their ability to absorb energy. Results were analyzed with models sensitive to enhanced deformability of compressed concrete owed to confinement and to shear capacity degradation owed to cyclic loading

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η πρόβλεψη της συμπεριφοράς επισκευασμένων δομικών στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος προσελκύει το ερευνητικό ενδιαφέρον καθώς είναι κρίσιμη για έναν επιτυχή αντισεισμικό επανασχεδιασμό. Η πειραματική διερεύνηση περιλαμβάνει στοιχεία σκυροδέματος επισκευασμένα με ινωπλισμένα πολυμερή (ΙΩΠ) ως καμπτικό, διατμητικό οπλισμό ή οπλισμό

¹ Δρ. Πολιτικός Μηχανικός, ΕΕΔΙΠ Εργαστηρίου Οπλισμένου Σκυροδέματος, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, email: trousak@civil.duth.gr

² Δρ. Πολιτικός Μηχανικός, Καθηγητής, Εργαστήριο Οπλισμένου Σκυροδέματος, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, email: karabin@civil.duth.gr

περίσφιγξης έναντι σεισμικών δράσεων (Seible κ.α. 1996, Saadatmanesh κ.α. 1996, Xiao & Ma 1997, Sheikh & Yau 2002, Iabucci κ.α. 2003). Επίσης, πειράματα έχουν διεξαχθεί σε υποστυλώματα επισκευασμένα με σύνθετα υλικά μετά από υποβολή σε εναλλασσόμενες μετακινήσεις ώστε να προσομοιωθούν βλάβες από σεισμό (Saadatmanesh κ.α. 1997 και Harajli 2007 μεταξύ άλλων). Η έρευνα έχει επικεντρωθεί επίσης σε διατμητική ενίσχυση κόμβων δοκού – υποστυλώματος τύπου T ή εξωτερικών με σύνθετα υλικά (Gergely κ.α. 2000, Antonopoulos & Triantafyllou 2003 κλπ). Η αναλυτική μελέτη με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων από τους Baglin & Scott (2000) έχει αποκαλύψει μερικές σημαντικές πτυχές της συμπεριφοράς κόμβων οπλισμένου σκυροδέματος. Η αναλυτική μελέτη των Parvin & Granata (2000) διερευνά αριθμητικά παραμέτρους της ενίσχυσης κρίσιμων περιοχών στοιχείων κόμβων με καμπτικό σύνθετο οπλισμό τύπου L ώστε να αυξηθεί η φέρουσα ικανότητά τους. Η αντίστοιχη πειραματική έρευνα καμπτικής ενίσχυσης με σύνθετο οπλισμό αραμιδίου αποκαλύπτει τις δυνατότητες της τεχνικής (Granata & Parvin, 2001) επιβεβαιώνοντας τα αρχικά αποτελέσματα από τους Geng κ.α. (1998). Παράλληλα, εκτεταμένη πειραματική έρευνα της σεισμικής συμπεριφοράς υποστυλωμάτων σκυροδέματος από τον Karabinis (2002) αφορά στην επιρροή των διατάξεων των συνδετήρων και του μήκους υπερκάλυψης διαμήκων οπλισμών. Επεκτείνοντας την παραπάνω έρευνα, η παρούσα εργασία αφορά την πειραματική διερεύνηση της χρήσης υφασμάτων σύνθετων υλικών ως καμπτικού οπλισμού ή οπλισμού περίσφιγξης για την επισκευή στοιχείων σκυροδέματος με εκτεταμένη βλάβη. Τα υποστυλώματα σκυροδέματος υποβλήθηκαν αρχικά σε κύκλους αυξανόμενης μετακίνησης έως την εκτεταμένη βλάβη τους. Στην συνέχεια επισκευάστηκαν και δοκιμάστηκαν στο ίδιο ιστορικό μετακινήσεων.



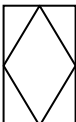
ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ

Το πειραματικό πρόγραμμα περιλαμβάνει στοιχεία ωπλισμένου σκυροδέματος σταυροειδούς μορφής, περιοχής κόμβων δοκού – υποστυλώματος σε κλίμακα 1/3. Τα δοκίμια υποβλήθηκαν σε ιστορικό εναλλασσόμενων μετακινήσεων μεγάλου εύρους εμφανίζοντας εκτεταμένη βλάβη στις κρίσιμες περιοχές τους. Μετά την αρχική φόρτιση (φάση I) τα δοκίμια επισκευάστηκαν και επαναφορτίστηκαν με το αυτό ιστορικό φόρτισης ώστε να αξιολογηθούν διαφορετικές τεχνικές ενίσχυσης με εξωτερικά επικολλούμενα υφάσματα ΙΩΠ οι οποίες αποβλέπουν στην αποφυγή πρόωρης αποκόλλησης του καμπτικού οπλισμού ενίσχυσης (φάση II).

Φάση I – Φόρτιση δοκιμών πριν την επισκευή

Κατασκευάστηκαν έξι δοκίμια με διαστάσεις διατομής 100 x 200 mm. Οι διαστάσεις και η διάταξη του χαλύβδινου οπλισμού παρουσιάζονται στο σχήμα 1 καθώς και στον πίνακα 1. Τα δοκίμια περιλαμβάνουν διαμήκεις ράβδους διαμέτρου 10 mm με σχεδιασμό υπερκάλυψης στους οπλισμούς της κάτω παρειάς με μήκος μισό αυτού που απαιτείται από τον Ευρωκώδικα 2 (EC 2, 2004). Διερευνήθηκαν τρία είδη διατάξεων συνδετήρων: ορθογωνικοί (τύπου R), ορθογωνικοί και τύπου S (τύπου RS) και ορθογωνικοί και ρομβοειδείς (τύπου RR). Επίσης εξετάστηκαν δύο αποστάσεις συνδετήρων για κάθε είδος διάταξης (50 mm και 100 mm).

Πίνακας 1. Χαρακτηριστικά δοκιμών αρχικών και επισκευασμένων δοκιμών.

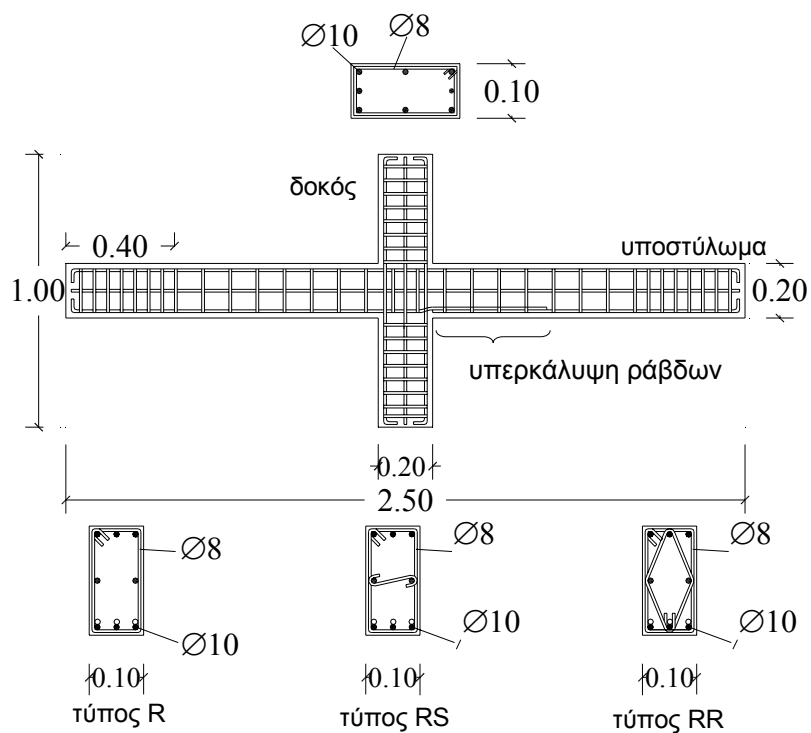
Όνομασία	Αρχικά δοκίμια		Επισκευή					
			Επισκευή πυρήνα σκυροδέματος			Οπλισμός		
	Κύριος χαλύβδινος οπλισμός	Συνδετήρες (ποιότητα S220)	Αριστερή παρειά κόμβου	Δεξιά παρειά κόμβου	Υλικό	Διαμήκης	Εγκάρσιος	
Διάμετρος (mm)	Τύπος (S500 quality)	Οπλισμός			Εμβαδό διατομής (mm ²)	Τύπος	Στρώσεις	
R100B2c		Ø8/100	1	1	Ύφασμα άνθρακα ΙΩΠ	35.1	B	2
R50B2g		Ø8/50	2	1	Ύφασμα γυαλιού ΙΩΠ	76.9	B	2
RS100C3c	10 	Ø8/100	2	1	Ύφασμα άνθρακα ΙΩΠ	35.1	C	3
RS50C3g		Ø8/50	2	1	Ύφασμα γυαλιού ΙΩΠ	76.9	C	3
RR100B1C3c		Ø8/100	1	2	Ύφασμα άνθρακα ΙΩΠ	35.1	BC	1+3
RR50B1C3g		Ø8/50	1	2	Ύφασμα γυαλιού ΙΩΠ	76.9	BC	1+3

1: αποδιοργάνωση σκυροδέματος – χρήση υψηλής αντοχής κονιάματος

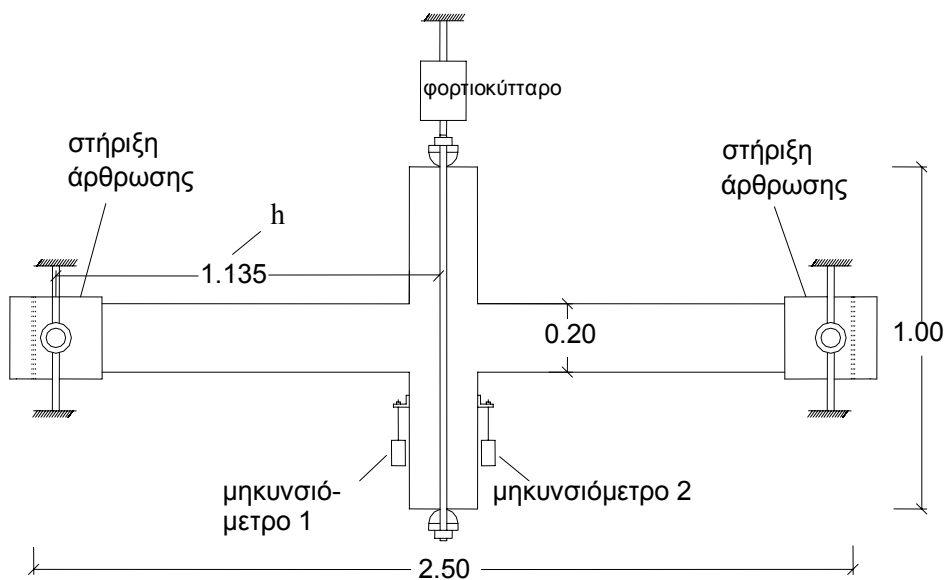
2: περιορισμένη ρηγμάτωση – χρήση ενέσιμων ρητινών

Τα αρχικά δοκίμια υποβλήθηκαν σε κύκλους επιβαλλόμενων μετακινήσεων με αυξανόμενο βήμα, επιβάλλοντας αξονικό φορτίο στις δοκούς του κόμβου (σχήμα 2). Εκατέρωθεν του κόμβου τοποθετήθηκαν δύο μηκυσιόμετρα για την μέτρηση των κατακόρυφων μετατοπίσεων (σχήμα 2). Εφαρμόστηκαν τα ακόλουθα βήματα σταδιακά αυξανόμενης μετατόπισης: ± 2 mm, ± 5 mm, ± 10 mm, ± 20 mm, ± 40 mm και έως ± 60 mm, σύμφωνα με το σχήμα 3, τα οποία αντιστοιχούσαν σε σχετική μετακίνηση άκρων (δ/h) από 0.18% έως 5.3%.

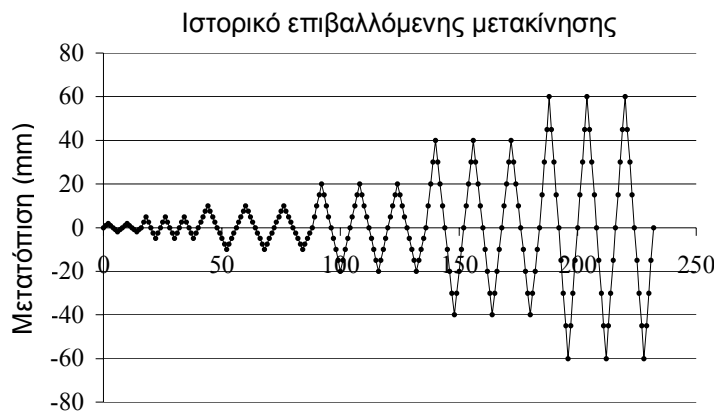
Από την παρθενική φόρτιση προκλήθηκε εκτεταμένη βλάβη των κρίσιμων ζωνών εκατέρωθεν του κόμβου στα περισσότερα δοκίμια (σχήμα 4). Στο δοκίμιο R50B2 (με ορθογωνικούς κλειστούς συνδετήρες -σύμβολο R- σε απόσταση 50 mm, επισκευασμένο σύμφωνα με τον τύπο B όπως θα συζητηθεί στη συνέχεια), η ρηγμάτωση του περισφιγμένου σκυροδέματος (πυρήνα) οδήγησε σε πλήρη αποδιοργάνωση και στις δύο κρίσιμες περιοχές εκατέρωθεν του κόμβου (σχήμα 4β). Μικρότερη βλάβη προκλήθηκε στην παρειά που περιελάμβανε την υπερκάλυψη των οπλισμών.



Σχήμα 1. Χαρακτηριστικά αρχικών δοκιμών και λεπτομέρειες τοποθέτησης χαλύβδινου οπλισμού.



Σχήμα 2. Διάταξη φόρτισης.



Σχήμα 3. Βήματα μετακίνησης.

Τα δοκίμια RS100C3, RS50C3, RR100B1C3 και RR50B1C3 εμφάνισαν αποδιοργάνωση του περισφιγμένου σκυροδέματος σε μία από τις δύο παρειές του φορτιζόμενου κόμβου, ενώ στην άλλη μικρού εύρους ή τριχοειδείς ρωγμές (σχήμα 4γ-στ).

Από τα παραπάνω δοκίμια, μόνο το δοκίμιο RS50C3 εμφάνισε μεγαλύτερη βλάβη στην παρειά όπου σχεδιάστηκε η υπερκάλυψη οπλισμών. Το δοκίμιο R100B2 εμφάνισε απώλεια επικάλυψης σκυροδέματος και ρηγμάτωση από την πλευρά σχεδιασμού της υπερκάλυψης των οπλισμών. Στην άλλη παρειά παρουσιάστηκαν μικρού εύρους ρηγματώσεις. Σε όλα τα δοκίμια παρουσιάστηκε διαρροή διαμήκων οπλισμών, ενώ τοπικός λυγισμός του κύριου οπλισμού συνέβηκε σε δοκίμια με απόσταση ράβδων του εγκάρσιου οπλισμού (συνδετήρες) 100 mm, κατά τη διάρκεια του τελευταίου κύκλου φόρτισης. Η έκταση της βλάβης όπως παρουσιάστηκε δεν σχετίζεται με την παρειά σχεδιασμού υπερκάλυψης των ράβδων. Η συμπεριφορά φορτίου – μετακινήσεων των αρχικών δοκιμίων παρουσιάζεται παρακάτω σε σχέση με τα επισκευασμένα δοκίμια.

Φάση II – Διαδικασία επισκευής

Μετά την αρχική φόρτιση των δοκιμίων ακολούθησε ειδική διαδικασία επισκευής. Απομακρύνθηκε η αποδιοργανωμένη μάζα του σκυροδέματος και ευθυγραμμίστηκαν οι λυγισμένοι διαμήκεις οπλισμοί. Στην περίπτωση μεγάλου βαθμού αποδιοργάνωσης του σκυροδέματος (αριστερή παρειά R50B2, RS100C3 και RS50C3, δεξιά παρειά RR100B1C3 και RR50B1C3), έγινε αποκατάστασή με υψηλής αντοχής κονίαμα (HSC) τύπου EMACO S55 (περίπτωση 1 στο μέσο του πίνακα 1). Στην περίπτωση μικρού εύρους ρηγμάτωσης ή τριχοειδών ρωγμών ή και ρηγμάτωσης μόνο της επικάλυψης χρησιμοποιήθηκε εποξειδική πάστα τύπου P103 S&P ενώ οι ρωγμές πληρώθηκαν με ενέσιμη ρητίνη τύπου J12 S&P (περίπτωση 2 στο μέσο του πίνακα 1). Τα δοκίμια μετά την επισκευή του ρηγματωμένου σκυροδέματος παρουσιάζονται στο σχήμα 5. Οι ορθογωνικές ακμές των διατομών των στοιχείων στρογγυλεύτηκαν έτσι ώστε να αποφευχθεί η θραύση του εξωτερικού οπλισμού περίσφιγξης ΙΩΠ. Η επιτευχθείσα ακτίνα καμπυλότητας των ακμών περιορίστηκε στα 10 mm.



(α) Δοκίμιο R100B2



(β) Δοκίμιο R50B2



(γ) Δοκίμιο RS100C3



(δ) Δοκίμιο RS50C3



(ε) Δοκίμιο RR100B1C3



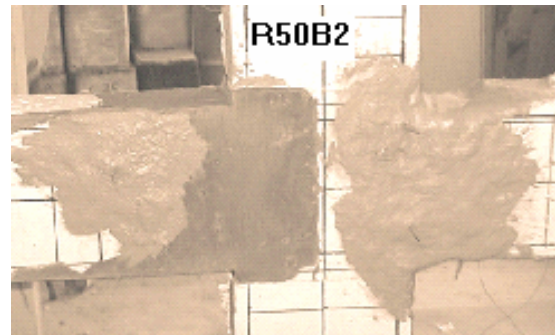
(στ) Δοκίμιο RR50B1C3

Σχήμα 4. Τελική εικόνα των δοκιμών μετά την παρθενική φόρτιση και την απομάκρυνση του αποδιοργανωμένου σκυροδέματος..

Για την επιλεχθείσα τεχνική της επισκευής των δοκιμών λήφθηκε υπόψη η διαρροή, ο λυγισμός και η ολίσθηση των διαμήκων οπλισμών (κυρίως στα δοκίμια τα οποία παρουσίασαν μεγάλο βαθμό βλάβη κατά την αρχική φόρτιση). Επικολλήθηκαν υφάσματα ΙΩΠ άνθρακα ή γυαλιού τόσο στην πάνω όσο και στην κάτω εξωτερική επιφάνεια των δοκιμών παρέχοντας ισοδύναμο οπλισμό κάμψης με αυτόν που παρείχαν οι αρχικοί συμβατικοί οπλισμοί (3 ράβδοι διαμέτρου 10 mm ανά παρειά). Οι οπλισμοί με ΙΩΠ ήταν μορφής L και κάλυπταν το υποστύλωμα, την περιοχή του κόμβου και την δοκό σε κάθε επιφάνεια εφαρμογής. Ο ισοδύναμος οπλισμός ήταν 3 στρώσεις ΙΩΠ άνθρακα ή 5 στρώσεις ΙΩΠ γυαλιού, πλάτους 100 mm. Τα μηχανικά χαρακτηριστικά των σύνθετων υλικών επισκευής παρουσιάζονται στον πίνακα 2.



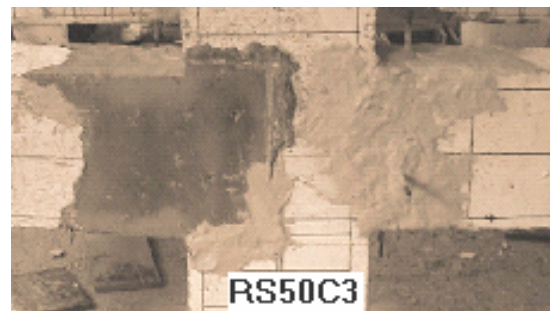
(α) Δοκίμιο R100B2



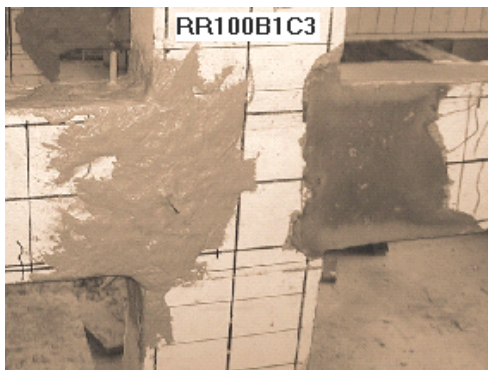
(β) Δοκίμιο R50B2



(γ) Δοκίμιο RS100C3



(δ) Δοκίμιο RS50C3



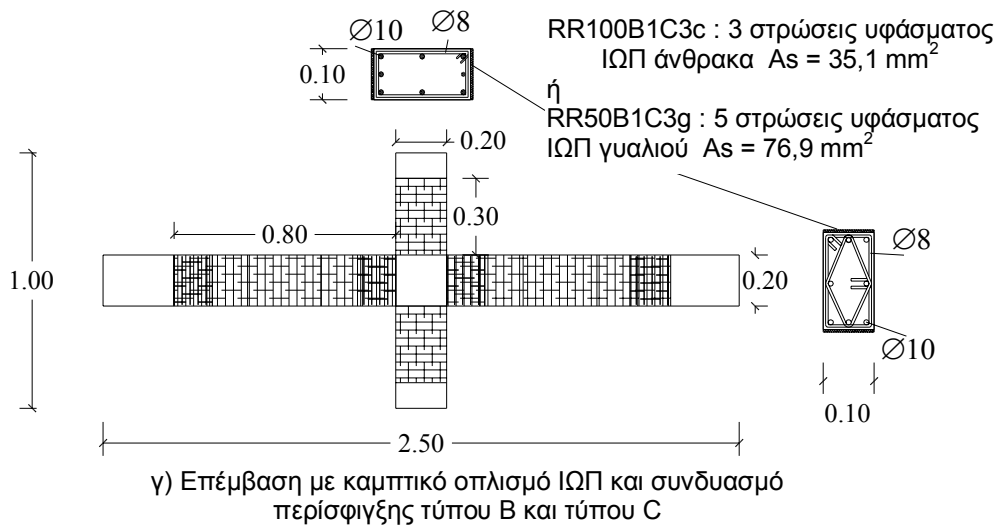
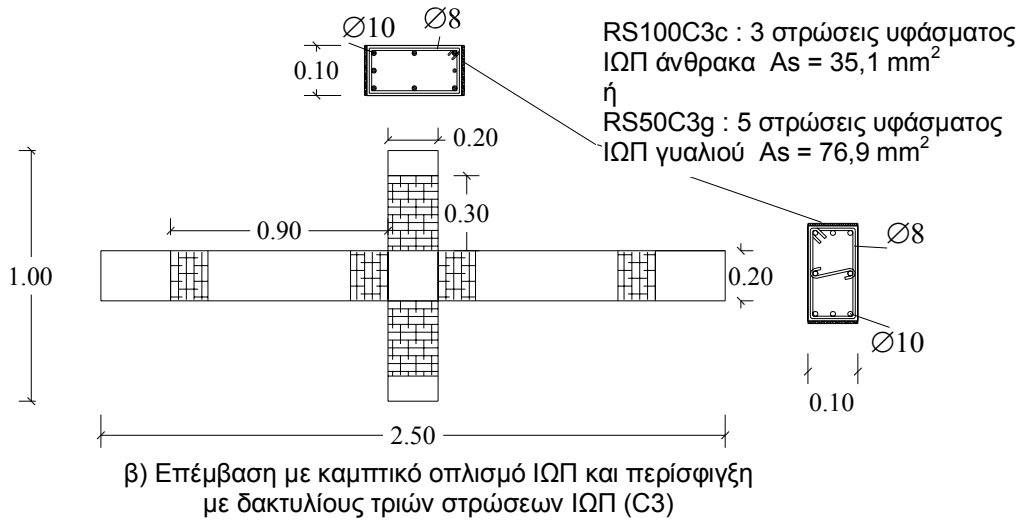
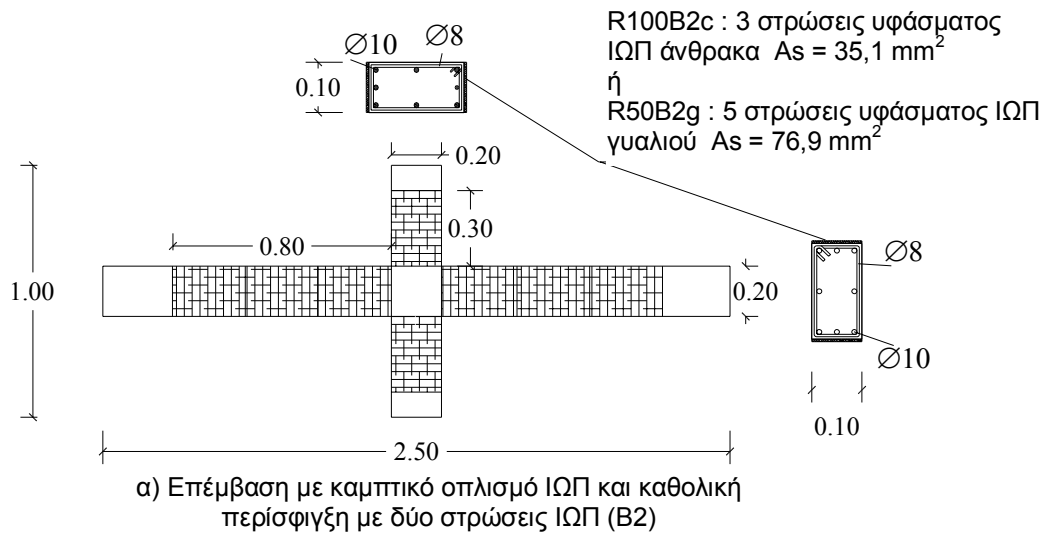
(ε) Δοκίμιο RR100B1C3



(στ) RR50B1C3

Σχήμα 5. Δοκίμια μετά την επισκευή τους.

Επίσης επικολλήθηκαν υφάσματα ΙΩΠ ως εγκάρσιος οπλισμός περίσφιγξης σε διάφορες διατάξεις. Ο εγκάρσιος οπλισμός τοποθετήθηκε κυρίως για την υποστήριξη της αγκύρωσης των διαμήκων οπλισμών ΙΩΠ ώστε να αντέξουν τις δυνάμεις εκτροπής στην γωνία και γενικότερα για την αποτροπή αποκόλλησης των υφασμάτων. Επιπλέον εξετάστηκε η επιρροή της εξωτερικής περίσφιγξης με υφάσματα ΙΩΠ στην συμπεριφορά των υποστυλωμάτων εφαρμόζοντας 3 τύπους περίσφιγξης (σχήμα 6). Ο πρώτος τύπος περιελάμβανε περίσφιγξη με υφάσματα ΙΩΠ πλάτους 300 mm, κάθετα στον άξονα των στοιχείων, σε δύο στρώσεις, με υπερκάλυψη 200 mm (τύπος περίσφιγξης με μορφή δακτυλίων, B2). Η υπερκάλυψη μεταξύ παρακείμενων στρώσεων δακτυλίων ήταν 50 mm. Το συνολικό μήκος περισφιγμένων στοιχείων ήταν 800 mm, εκατέρωθεν του κόμβου. Ο δεύτερος τύπος (C3) περιελάμβανε περίσφιγξη με δύο δακτυλίους υφασμάτων ΙΩΠ με πλάτος 150 mm, κάθετα στον άξονα των στοιχείων, σε 3 στρώσεις με υπερκάλυψη 200 mm. Ο τρίτος τύπος (B1C3) ήταν ένας συνδυασμός του πρώτου και δεύτερου τύπου. Συγκεκριμένα



Σχήμα 6. Εφαρμογή της ενίσχυσης με υφάσματα ΙΩΠ.

αρχικά εφαρμόστηκε περίσφιγξη μιας στρώσης. Στην συνέχεια εφαρμόστηκε περίσφιγξη δεύτερου τύπου από 3 στρώσεις υφάσματος. Επιπλέον εφαρμόστηκε περίσφιγξη 3 στρώσεων τύπου Β στις δοκούς όλων των δοκιμών ώστε να αποφευχθεί ολίσθηση και αστοχία αγκύρωσης. Οι διατάξεις εξωτερικής περίσφιγξης παρατίθενται στον πίνακα 1.

Πίνακας 2. Ιδιότητες υλικών ΙΩΠ.

Όνομασία	Εφελκυστικό μέτρο ελαστικότητας, GPa	Αηγμένη παραμόρφωση, %	Είδος	Πάχος, mm
c	240	15.5	Ύφασμα άνθρακα μονής κατεύθυνσης τύπου S&P C-Sheet 240	0.117
g	65	28	Ύφασμα γυαλιού μονής κατεύθυνσης τύπου S&P G-Sheet 90/10	0.1384

Δεδομένα από τον κατασκευαστή (Scherer, 1999).

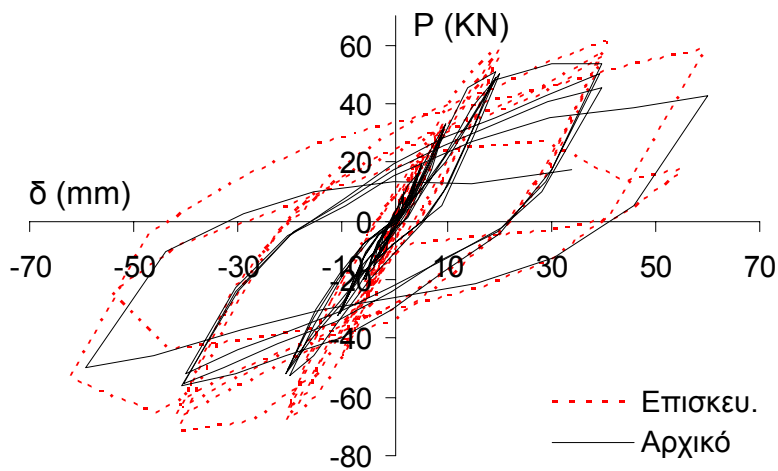
Η αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας των προτεινόμενων τεχνικών επισκευής πραγματοποιήθηκε συγκρίνοντας τη μηχανική συμπεριφορά τους με αυτή κατά τη παρθενική επιβολή του φορτίου.

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

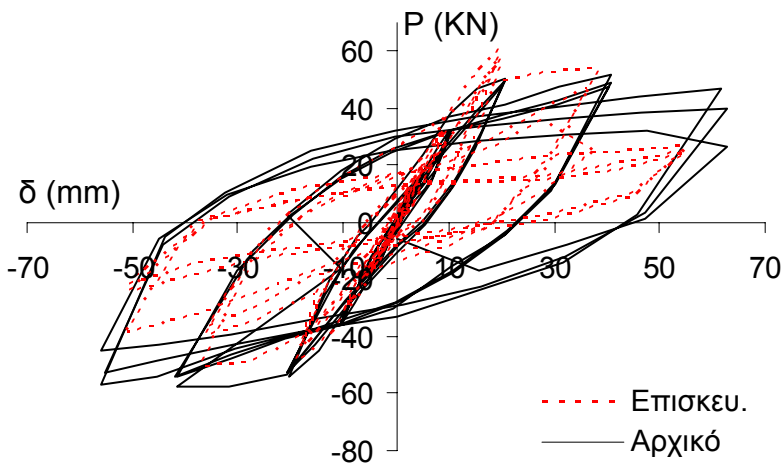
Στη συνέχεια παρουσιάζεται η μηχανική συμπεριφορά κάθε δοκιμίου και η αξιολόγηση της μέσα από διαγράμματα απόκρισης (διαγράμματα φορτίου – μετατόπισης σχήμα 7) ενώ σχολιάζεται η αποτελεσματικότητα των διαφόρων τεχνικών επισκευής λαμβάνοντας υπόψη και τη εμφανιζόμενη μορφή αστοχίας.

Δοκίμιο R100B2c

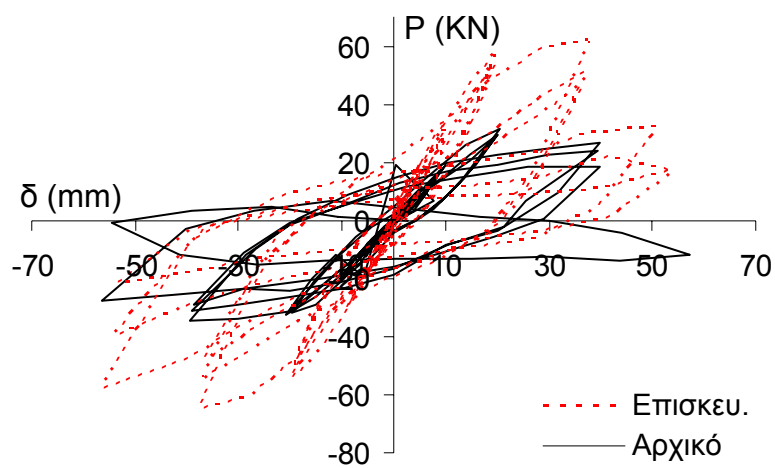
Ρηγματώσεις δημιουργήθηκαν και στις δύο παρειές του κόμβου, στην διεπιφάνεια μεταξύ ε-ποξειδικής πάστας και πυρήνα σκυροδέματος (σχήμα 8). Ο καμπτικός οπλισμός υφάσματος ΙΩΠ άνθρακα σχήματος L της κάτω παρειάς, αστόχησε (θραύση) στην γωνία (παρειά κόμβου) κατά τον κύκλο των 60 mm, μετά από ανάπτυξη ισχυρών δυνάμεων εκτροπής και αποκόλληση του. Όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 7α, οι κύκλοι υστέρησης του επισκευασμένου δοκιμίου περιβάλλουν αυτούς του αρχικού δοκιμίου επιδεικνύοντας βελτιωμένη συμπεριφορά. Το αναλαμβανόμενο φορτίο, η δυσκαμψία καθώς και η απορροφούμενη ενέργεια ήταν σχετικά υψηλότερες ανά κύκλο μετατόπισης (πίνακας 3). Το φορτίο ανά κύκλο παρουσίασε σταθερή αύξηση από 22% έως 26% της αντίστοιχης ικανότητας του αρχικού δοκιμίου (μέγιστο φορτίο 70.98 KN). Η δυσκαμψία ανά κύκλο παρουσίασε αντίστοιχα αύξηση από 44% (5^{ος} κύκλος) έως 17% (14^{ος} κύκλος). Η συνολικά απορροφηθείσα ενέργεια αυξήθηκε κατά 52%.



α) Σύγκριση συμπεριφοράς δοκιμών R100 και R100B2c

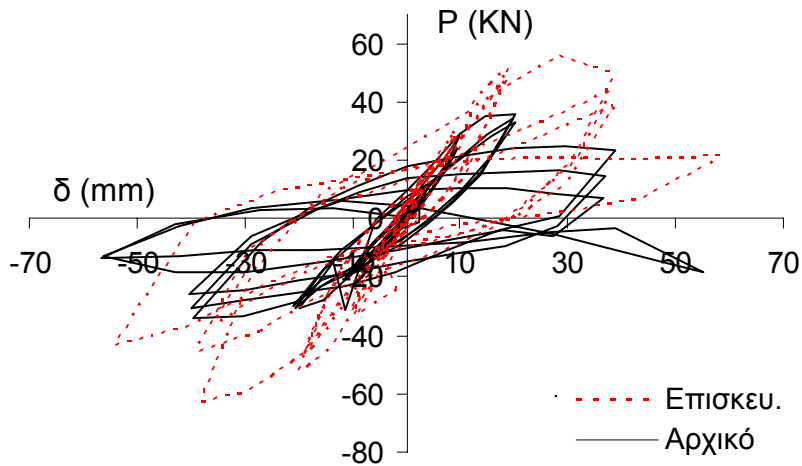


β) Σύγκριση συμπεριφοράς δοκιμών R50 και R50B2g

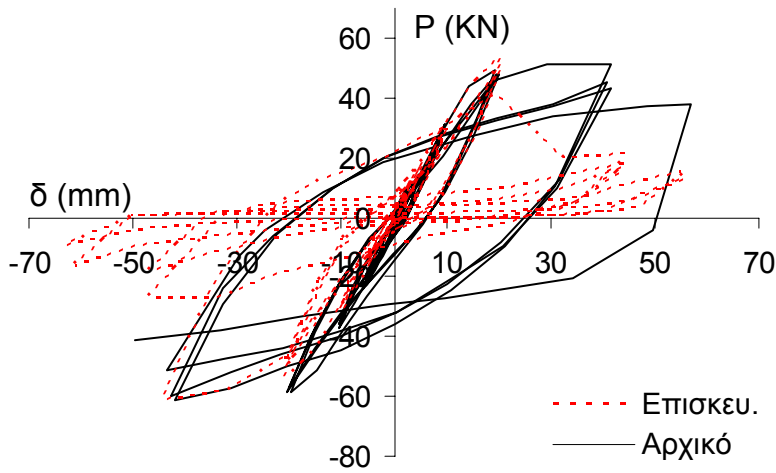


γ) Σύγκριση συμπεριφοράς δοκιμών RS100 και RS100C3c

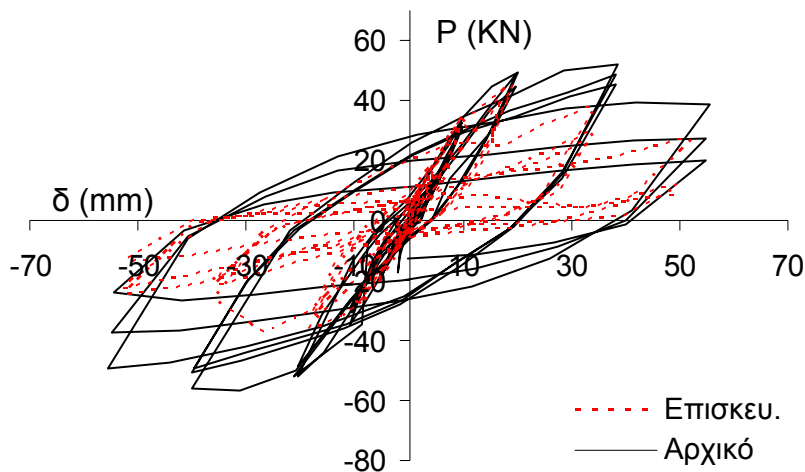
Σχήμα 7. Διαγράμματα φορτίου – μετακίνησης δοκιμών αρχικά και μετά την επισκευή



δ) Σύγκριση συμπεριφοράς δοκιμών RS50 και RS50C3g



ε) Σύγκριση συμπεριφοράς δοκιμών RR100 και RR100B1C3c

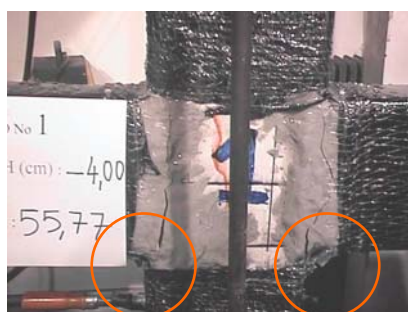


στ) Σύγκριση συμπεριφοράς δοκιμών RR100 και RR50B1C3g

Σχήμα 7 (συνέχεια). Διαγράμματα φορτίου – μετακίνησης δοκιμών αρχικά και μετά την επισκευή

Δοκίμιο R50B2g

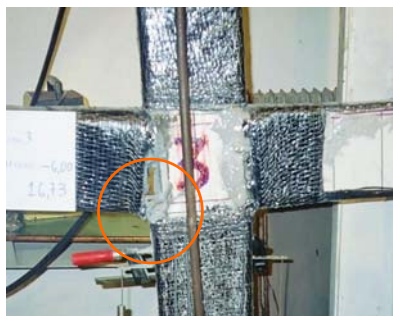
Οι ρηγματώσεις δημιουργήθηκαν αποκλειστικά στην παρειά του κόμβου η οποία επισκευάστηκε, μεταξύ της διεπιφάνειας του υφισταμένου σκυροδέματος και της περιοχής του κόμβου η οποία επισκευάστηκε με κονίαμα υψηλής αντοχής. Αντίθετα η παρειά η οποία αρχικά είχε εμφανίσει μικρές βλάβες και είχε αποκατασταθεί με εποξειδική πάστα παρέμεινε πρακτικά χωρίς βλάβες (σχήμα 8). Σε μετατοπίσεις μεγαλύτερες των 40 mm ο κύριος οπλισμός ΙΩΠ γυαλιού αστόχησε και παρατηρήθηκε στένωση των κύκλων υστέρησης (σχήμα 7β). Στην συνέχεια η υστερητική συμπεριφορά του επισκευασμένου δοκιμίου υποβαθμίστηκε σε σχέση με αυτήν του αρχικού. Το μέγιστο αναλαμβανόμενο φορτίο αυξήθηκε κατά 6% (μέγιστο φορτίο 60.84 KN). Αντίστοιχη ήταν η αύξηση της δυσκαμψίας κατά τους αρχικούς κύκλους. Η συνολική απορροφούμενη ενέργεια του επισκευασμένου δοκιμίου ήταν λιγότερη από το 48% αυτής του αρχικού δοκιμίου (πίνακας 3).



R100B2c



R50B2g



RS100C3c



RS50C3g

Σχήμα 8. Χαρακτηριστικές μορφές αστοχίας δοκιμίων με θραύση του καμπτικού οπλισμού ΙΩΠ και ρηγμάτωση του πυρήνα σκυροδέματος.

Δοκίμια RS100C3c και RS50C3g

Στα δοκίμια αυτά η αστοχία εμφανίστηκε στην παρειά του κόμβου όπου είχε χρησιμοποιηθεί το υψηλής αντοχής κονίαμα (παρειά με τις αρχικά σημαντικές βλάβες), ενώ η παρειά που αποκαταστάθηκε με εποξειδική πάστα παρέμεινε άθικτη (σχήμα 8). Ο κύριος καμπτικός οπλισμός ΙΩΠ άνθρακα (κάτω παρειά) αστόχησε κατά τον 16^ο κύκλο, ενώ η περιοχή που αποκαταστάθηκε με υψηλής αντοχής κονίαμα αποδιοργανώθηκε πλήρως. Η αστοχία του οπλισμού ΙΩΠ γυαλιού συνέβη αντίστοιχα κατά τον 15^ο κύκλο. Στους αρχικούς κύκλους η υστερητική συμπεριφορά των επισκευασμένων δοκιμίων ήταν βελτιωμένη και για τα δύο δοκίμια με σύνθετα υλικά επισκευής (7γ,δ). Το αναλαμβανόμενο φορτίο του επισκευασμένου δοκιμίου

RS100C3c αυξήθηκε έως 87% αυτού του αρχικού δοκιμίου (μέγιστο φορτίο 64.39 KN). Η αύξηση της δυσκαμψίας κυμάνθηκε μεταξύ 64-70%, με χαμηλότερη αύξηση κατά τους κύκλους των 60 mm. Η συνολική απορροφούμενη ενέργεια του επισκευασμένου δοκιμίου αυξήθηκε κατά 66% (πίνακας 3). Το φορτίο αστοχίας του δοκιμίου RS50C3g αυξήθηκε έως 84% αυτού του αρχικού δοκιμίου (μέγιστο φορτίο 62.36 KN). Η αύξηση της δυσκαμψίας ήταν 83% στον 5^ο κύκλο ενώ ακόμη και κατά τον κύκλο των 60 mm εμφανίστηκε αυξημένη (2%). Η συνολικά απορροφούμενη ενέργεια του επισκευασμένου δοκιμίου αυξήθηκε κατά 17% (πίνακας 3).

Δοκίμιο RR100B1C3c και RR50B1C3g

Η μορφή αστοχίας ήταν παρόμοια για τα δοκίμια, με ρηγμάτωση αποκλειστικά στην παρειά όπου εφαρμόστηκε το κονίαμα υψηλής αντοχής. Ο κύριος καμπτικός οπλισμός ΙΩΠ άνθρακα αστόχησε κατά τον 13^ο κύκλο ενώ η περιοχή που επισκευάστηκε με υψηλής αντοχής κονίαμα είχε αποδιοργανωθεί πλήρως. Η αστοχία του οπλισμού ΙΩΠ γυαλιού συνέβη κατά τον 15^ο κύκλο. Η υστερητική συμπεριφορά των δύο επισκευασμένων δοκιμίων υπολείπταν αυτής των αρχικών (σχήμα 7ε,στ). Το αναλαμβανόμενο φορτίο από το επισκευασμένο δοκίμιο RR100B1C3c έως τους κύκλους των 40 mm κυμάνθηκε μεταξύ 74 και 98% (μέγιστο φορτίο 60.33 KN). Η δυσκαμψία ήταν σταθερή μεταξύ 84-82% του αρχικού και μειώθηκε στους κύκλους των 60 mm. Η συνολικά απορροφούμενη ενέργεια του παραπάνω δοκιμίου ήταν 43% αυτής του αρχικού (πίνακας 3). Το αναλαμβανόμενο φορτίο του δοκιμίου RR50B1C3g έφθασε το 84% αυτού του αρχικού (μέγιστο φορτίο 45.38 KN). Η δυσκαμψία ήταν σταθερή μεταξύ 96-101% του αρχικού ενώ μειώθηκε κατά τους κύκλους των 60 mm. Η συνολικά απορροφούμενη ενέργεια του επισκευασμένου δοκιμίου ήταν 39% της αρχικής (πίνακας 3).

Πίνακας 3. Πειραματικά αποτελέσματα επισκευασμένων δοκιμίων.

Όνομασία	Φορτίο, KN				Μετακίνηση, mm Στο P _{max} , δ _{max}	Δυσκαμψία, KN/mm			Απορροφούμενη ενέργεια, KNmm			
	5 ^{ος} κύκλος	11 ^{ος} κύκλος	14 ^{ος} κύκλος	Μέγιστο φορτίο, P _{max}		5 ^{ος} κύκλος	11 ^{ος} κύκλος	14 ^{ος} κύκλος	5 ^{ος} κύκλος	11 ^{ος} κύκλος	14 ^{ος} κύκλος	14 ^{ος} κύκλος
R100B2c	24.84 (1.26)	63.88 (1.26)	62.87 (1.22)	70.98 (1.26)	41.24 (1.01)	4.67 (1.44)	3.41 (1.40)	1.77 (1.17)	100 (0.77)	2025 (1.38)	11522 (1.27)	20981 (1.52)
R50B2g	20.03 (0.60)	57.29 (1.06)	36 (0.68)	60.84 (1.06)	19.40 (0.47)	4.05 (1.09)	2.82 (1.07)	1.08 (0.61)	100 (0.51)	1741 (0.22)	7506 (0.34)	12521 (0.48)
RS100C3c	20.03 (0.94)	52.73 (1.82)	47.66 (N/A)	64.39 (1.87)	37.59 (0.95)	3.63 (1.68)	2.72 (1.70)	1.33 (1.64)	86 (0.69)	1504 (0.30)	7758 (0.92)	13903 (1.66)
RS50C3g	17.75 (0.78)	47.66 (1.84)	38.53 (N/A)	62.36 (1.76)	38.21 (1.90)	4.04 (1.83)	2.55 (1.37)	1.1 (1.02)	103 (0.41)	1542 (0.26)	7477 (0.89)	9751 (1.17)
RR100B1C 3c	16.48 (0.74)	49.18 (0.86)	18 (0.35)	60.33 (0.98)	44.37 (1.06)	3.48 (0.84)	2.37 (0.82)	0.35 (0.13)	80 (0.59)	1606 (0.88)	6154 (0.54)	6909 (0.43)
RR50B1C3 g	20.28 (0.65)	41.07 (0.84)	26.62 (0.97)	45.38 (0.80)	18.97 (0.61)	3.68 (0.96)	2.42 (1.01)	0.78 (0.41)	82 (0.25)	1646 (0.21)	4712 (0.25)	7690 (0.39)

(Στις παρενθέσεις τα αποτελέσματα είναι ανηγμένα ως προς τα αντίστοιχα των αρχικών δοκιμίων.

N/A: Μη διαθέσιμη μέτρηση λόγω αστοχίας των αρχικών δοκιμίων.)

ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΔΟΚΙΜΙΟΥ R100B2c

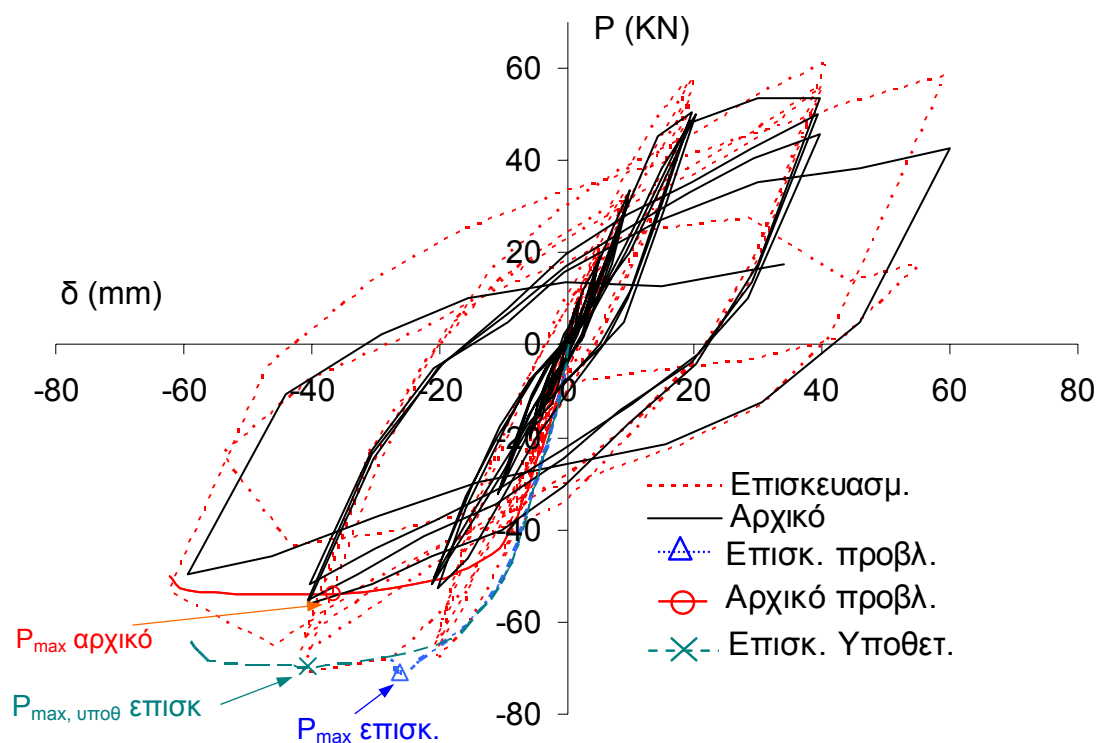
Πραγματοποιείται αναλυτική διερεύνηση της μηχανικής συμπεριφοράς του δοκιμίου R100B2c. Η αρχική βλάβη ήταν μικρού βαθμού και ομοιόμορφα κατανεμημένη στον πυρήνα σκυροδέματος (επισκευή των ρηγματώσεων με ρητίνη). Το επισκευασμένο δοκίμιο εμφάνισε σημαντική αύξηση του αναλαμβανόμενου φορτίου, της πλαστιμότητας μετατοπίσεων, της δυσκαμψίας καθώς και της απορροφούμενης ενέργειας σε σχέση με την αρχική φόρτιση. Για την ανάλυση φορτίου – μετατόπισης του αρχικού και επισκευασμένου δομικού στοιχείου έγιναν οι ακόλουθες θεωρήσεις:

- πλήρης συνάφεια μεταξύ σκυροδέματος και οπλισμού από χάλυβα ή ΙΩΠ (απουσία αποκόλλησης του σύνθετου οπλισμού),
- βελτιωμένη συμπεριφορά του σκυροδέματος σε θλίψη λόγω του οπλισμού περίσφιγξης (χαλύβδινου ή ΙΩΠ), συνδυάζοντας (Ρουσάκης, 2005) την προσέγγιση των Wang & Restrepo (2001) για διατομές οπλισμένου σκυροδέματος, η οποία βασίζεται στο προσομοίωμα περίσφιγξης του Mander. Αντί του σταθερού μέτρου εγκάρσιας διαστολής με τιμή 0.5, εκτιμάται μέσω επαναληπτικής διαδικασίας (Spoelstra & Monti, 1999) η σχέση πλευρικών – αξονικών ανηγμένων παραμορφώσεων (ευαισθησία σε πλευρικό περιορισμό) βάσει της εργασίας των Pantazopoulou & Mills (1995),
- αποτίμηση της διατμητικής ικανότητας των στοιχείων λόγω της ύπαρξης χαλύβδινου οπλισμού και περίσφιγξης με ΙΩΠ, σύμφωνα με την τροποποιημένη θεωρία του θλιπτικού πεδίου (ΤΘΠ, MCFT) των Vecchio & Collins (1986),
- υποβάθμιση της διατμητικής ικανότητας των στοιχείων λόγω της κυκλικής φόρτισης ανάλογα με την επιτευχθείσα πλαστιμότητα μετατοπίσεων (μ_Δ), μέσω της παραμέτρου $k=1.15-0.075\mu_\Delta \leq 1$ (Lynn κ.α., 1996),
- πλήρης συνεισφορά των διαμήκων χαλύβδινων οπλισμών στα επισκευασμένα δοκίμια και θεώρηση ασήμαντης επιρροής της ολίσθησης των οπλισμών στην περιοχή αγκύρωσης ή του λυγισμού των ράβδων σε θλίψη στην αρχική φόρτιση δοκιμίων με 100 mm απόσταση συνδετήρων.

Η ανάλυση πραγματοποιήθηκε με το πρόγραμμα RESPONSE 2000 (Bentz, 2000) θεωρώντας επίσης διείσδυση των ανηγμένων παραμορφώσεων των χαλύβδινων ράβδων μέσα στον κόμβο λόγω διαρροής. Επομένως η ανάλυση περιελάμβανε επιπρόσθετα καμπτικό στοιχείο με μήκος $0.022 \varnothing_L f_{syL}$ (Priestley κ.α., 1996), όπου f_{syL} είναι η μέγιστη εφελκυστική τάση διατομής με διάμετρο \varnothing_L .

Η αναλυτική πρόβλεψη του μέγιστου φορτίου στο αρχικό δοκίμιο είχε την τιμή 54 KN σε μετατόπιση 36.6 mm (βύθιση) συγκρινόμενη με τις πειραματικές μετρήσεις των 55.26 KN σε βύθιση 40.4 mm. Στο επισκευασμένο δομικό στοιχείο η πρόβλεψη του μέγιστου φορτίου ήταν 71 KN σε μετατόπιση 26.2 mm, έναντι των πειραματικών τιμών φορτίου 70.98 KN σε 41.2 mm βύθιση (σχήμα 9, σύμβολο τριγώνου). Η παρουσία του καμπτικού οπλισμού ΙΩΠ αναμένεται να περιορίζει την βύθιση στο μέγιστο φορτίο, όπως προκύπτει από την ανάλυση. Ωστόσο το προβλεπόμενο επίπεδο μετατόπισης είναι συντηρητικό καθώς σημαντικοί παράγοντες οι οποίοι σχετίζονται με την μερική αποκόλληση στην γωνία του καμπτικού οπλισμού ΙΩΠ, καθώς και η ενδεχόμενη περαιτέρω διείσδυση της διαρροής των διαμήκων ράβδων μέσα στον κόμβο μετά την επισκευή έχει αγνοηθεί. Εάν θεωρηθεί μηδαμινή η συνεισφορά του καμπτικού οπλισμού ΙΩΠ, τότε προκύπτει αναλαμβανόμενο φορτίο στα επίπεδα της αρχικής φόρτισης σε πολύ υψηλότερο επίπεδο μετατόπισης. Επανεξετάζοντας τα πειραματικά αποτελέσματα, διαπιστώνεται ότι στα επισκευασμένα δοκίμια υπήρξε σταδιακή μείωση της συνεισφοράς του καμπτικού οπλισμού ΙΩΠ για αύξηση των μετατοπίσεων λόγω μερικής απο-

κόλλησης στην παρειά του κόμβου, καθώς και μείωση της διατμητικής αντοχής λόγω της κυκλικής φόρτισης οδηγώντας σε φθίνουσα συμπεριφορά αντίστοιχη της αρχικής φόρτισης. Εφαρμόζοντας τις παραπάνω υποθέσεις στην ανάλυση, προκύπτει πρόβλεψη η οποία περιγράφει με ικανοποιητική ακρίβεια την πειραματική συμπεριφορά (σχήμα 9, σύμβολο Χ). Ωστόσο η υποθετική απόκριση του καμπτικού οπλισμού ΙΩΠ με μερική αποκόλληση, προϋποθέτει μια σταθεροποιημένη τάση του ΙΩΠ μετά την αποκόλληση του στην περιοχή του κόμβου. Ο διαμήκης χαλύβδινος οπλισμός ενεργοποιείται πλήρως μετά την επισκευή ενώ ο οπλισμός περίσφιγξης από ΙΩΠ βελτιώνει την πλαστιμότητα μετατοπίσεων του στοιχείου και ενισχύει την συνεισφορά του καμπτικού οπλισμού ΙΩΠ παρά τα τοπικά φαινόμενα αποκόλλησης.



Σχήμα 9. Σύγκριση αναλυτικής πρόβλεψης και πειραματικών τιμών φορτίου – μετατόπισης του δοκίμιου R100B2c πριν και μετά την επισκευή.

Οι παραπάνω παρατηρήσεις ισχύουν και για τα υπόλοιπα δοκίμια από ποιοτική άποψη. Ωστόσο η εκτεταμένη ρηγμάτωση του πυρήνα σκυροδέματος κατά την αρχική φόρτιση και η αποκατάσταση με σκυρόδεμα υψηλής αντοχής αυξάνει την πολυπλοκότητα της απόκρισης του στοιχείου. Η 'ομοιογένεια' του αρχικού πυρήνα σκυροδέματος διαταράσσεται ενώ μετά την επισκευή η αντοχή και η συνοχή του στοιχείου διαφοροποιείται κατά μήκος. Η βλάβη εντοπίζεται – όπως ήταν αναμενόμενο – μεταξύ της διεπιφάνειας του αρχικού πυρήνα σκυροδέματος και του τμήματος που αποκαταστάθηκε με υψηλής αντοχής κονίαμα.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στοιχεία ωπλισμένου σκυροδέματος τα οποία έχουν υποστεί σημαντικές βλάβες στον πυρήνα σκυροδέματος στην κρίσιμη περιοχή και διαρροή του κύριου χαλύβδινου οπλισμού, μπορούν να επισκευαστούν αποτελεσματικά με εφαρμογή υφασμάτων ΙΩΠ ως κύριου αλλά και ως οπλισμού περίσφιγξης. Η αστοχία των καμπτικών οπλισμών ΙΩΠ άνθρακα ή γυαλιού συνέβηκε σε κύκλους υψηλών μετατοπίσεων (60 mm). Σε παρόμοια επίπεδα μετατοπίσεων είχε διαπιστωθεί μη συνεισφορά του χαλύβδινου οπλισμού κάμψης κατά την αρχική φόρτιση.

Το δοκίμιο το οποίο περισφίχθηκε με δύο στρώσεις υφάσματος ΙΩΠ άνθρακα (R100B2c) και παρουσίασε μικρού εύρους ρηγματώσεις κατά την αρχική φόρτιση, είχε εξαιρετικά σταθερή και βελτιωμένη συμπεριφορά και εμφάνισε κατανεμημένη βλάβη και στις δύο παρειές του κόμβου μετά την επισκευή. Παρά την χαμηλή περίσφιξη την οποία παρείχαν οι συνδετήρες (σε σχέση με άλλα δοκίμια), τόσο το αναλαμβανόμενο φορτίο, όσο και η δυσκαμψία και η απορροφούμενη ενέργεια αναβαθμίστηκαν με την τεχνική επισκευής του σκυροδέματος με ρητίνες και την χρήση διαμήκους και εγκάρσιου σύνθετου οπλισμού.

Σε δοκίμια με σημαντική βλάβη του πυρήνα σκυροδέματος συγκεντρωμένη σε μία από τις παρειές του κόμβου κατά την αρχική φόρτιση, ξαναεμφανίστηκε σημαντική ρηγμάτωση στην ίδια παρειά κατά την επαναφόρτιση μετά την επισκευή. Η βλάβη κατά την δεύτερη φόρτιση επικεντρώθηκε στην διεπιφάνεια μεταξύ του υψηλής αντοχής κονιάματος αποκατάστασης και του παρακείμενου υγιούς υφιστάμενου σκυροδέματος του κόμβου σε αντίθεση με την αρχική βλάβη η οποία ήταν κατανεμημένη σε σημαντικό εύρος της κρίσιμης περιοχής. Η διαφοροποίηση στην αστοχία του επισκευασμένου στοιχείου οφείλεται στο γεγονός ότι η αποκατάσταση με υψηλής αντοχής σκυρόδεμα καθιστά τις δύο διεπιφάνειες αυτού με το υφιστάμενο σκυρόδεμα, υποψήφιας για συγκέντρωση της ρηγμάτωσης που αντιστοιχεί στην περιοχή αποκατάστασης. Επομένως η ρηγμάτωση συγκεντρώνεται περισσότερο στην παρειά με τον κόμβο όπου επιπλέον εμφανίζονται ασθενείς ζώνες του οπλισμού ενίσχυσης (μειωμένη αποτελεσματικότητα λόγω του σχήματος L και της περιορισμένης αποκόλλησης στην γωνία καθώς και διακοπή της περίσφιγξης με ΙΩΠ πριν τον κόμβο) και τα μεγαλύτερα εντατικά μεγέθη.

Στο δοκίμιο το οποίο περισφίχθηκε με δύο στρώσεις υφάσματος ΙΩΠ γυαλιού (R50B2g) και εμφανίστηκε σημαντική βλάβη του πυρήνα σκυροδέματος και στις δύο κρίσιμες περιοχές, παρατηρείται ότι η επιλεγθείσα τεχνική επισκευής και η επιλογή καθολικής εξωτερικής περίσφιγξης με σύνθετα υλικά αποκαθιστά την φέρουσα ικανότητα ενώ επιτυγχάνονται χαμηλότερα επίπεδα πλαστιμότητας μετατοπίσεων. Στα δοκίμια με σημαντική αρχική βλάβη του σκυροδέματος όπου επιλέχθηκε περίσφιξη με απλούς δακτυλίους ΙΩΠ (τύπος C), η συμπεριφορά των επισκευασμένων δοκιμίων ήταν σημαντικά βελτιωμένη. Η μηχανική συμπεριφορά των παραπάνω επισκευασμένων δοκιμίων τόσο με φύλλα άνθρακα όσο και με φύλλα γυαλιού ΙΩΠ επιδεικνύει την υψηλότερη αύξηση τόσο της αντοχής όσο και την δυσκαμψίας σε σχέση με τα αρχικά δοκίμια. Η συνάφεια μεταξύ του διαμήκους οπλισμού υφασμάτων ΙΩΠ και των αντίστοιχων υφασμάτων ΙΩΠ ως οπλισμού περίσφιγξης ήταν πλήρης - καθώς ήταν κολλημένα μεταξύ τους με ρητίνη - ενώ δεν εμφάνισαν αποκόλληση ακόμη και σε προχωρημένες βυθίσεις.

Αξιολογώντας τα αποτελέσματα όλων των επισκευασμένων δοκιμίων, μπορεί να συναχθεί ότι οι επιλεχθείσες τεχνικές περίσφιγξης περιόρισαν αποτελεσματικά τις αναπτυσσόμενες δυνάμεις εκτροπής και αποκόλλησης στις δύο παρειές των εξεταζόμενων κόμβων.

Για κάθε μια από τις τρεις χρησιμοποιούμενες λεπτομέρειες εξωτερικής περίσφιγξης με ΙΩΠ, μπορεί να συναχθεί ότι ο πιο δύσκαμπτος οπλισμός από ΙΩΠ άνθρακα αποκατέστησε την φέρουσα ικανότητα, την δυσκαμψία και την απορροφούμενη ενέργεια των αρχικών δοκιμίων πιο αποτελεσματικά από τον οπλισμό επισκευής από γυαλί (λαμβάνοντας ακόμη υπόψη και την ισχυρότερη περίσφιγξη μέσω χαλύβδινων συνδετήρων που αυτά είχαν αρχικά).

Η σημαντική αναβάθμιση της φέρουσας ικανότητας κάποιων δοκιμίων αποκαλύπτει την σε μεγάλο βαθμό συνεισφορά των διαμήκων χαλύβδινων οπλισμών οι οποίοι διέρρευσαν και λύγισαν κατά την αρχική φόρτιση.

Από την αναλυτική διερεύνηση της μηχανικής συμπεριφοράς του δοκιμίου R100B2c προκύπτει ότι η συνεισφορά του διαμήκους οπλισμού ΙΩΠ περιορίζεται όσο αυξάνει η μετατόπιση λόγω τοπικών φαινομένων αποκόλλησης ενώ μειώνεται η διατμητική αντοχή λόγω της κυκλικής φόρτισης, οδηγώντας σε μείωση του αναλαμβανόμενου φορτίου παρόμοια με αυτήν πριν την επισκευή. Ο διαμήκης χαλύβδινος οπλισμός ενεργοποιείται πλήρως μετά την επισκευή ενώ η περίσφιγξη με ΙΩΠ αναβαθμίζει την πλαστικότητα μετατοπίσεων και περιορίζει την τοπική αποκόλληση του καμπτικού οπλισμού ΙΩΠ.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Ευχαριστίες οφείλονται στην Sintecno Hellas AE για την διάθεση των σύνθετων υλικών καθώς και στην Σκαρλάτος AE για την διάθεση του σκυροδέματος.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- Seible F., Priestley M.J.N., Hegemier G.A., Innamorato D., (1997), "Seismic retrofit of RC columns with continuous carbon fiber jackets", *ASCE Journal of Composites for Construction*, V. 1, No. 2, 1997. pp. 52–62.
- Saadatmanesh H., Ehsani M.R., Jin L., (1996), "Seismic strengthening of circular bridge pier models with fiber composites", *ACI Structural Journal*, V. 93, No. 6, 1996. pp. 639–47.
- Xiao Y., Ma R., (1997), "Seismic retrofit of RC circular columns using prefabricated composite jacketing", *ASCE Journal of Structural Engineering*. V. 123, No. 10, 1997. pp. 1357–64.
- Sheikh S.A., Yau G., (2002) Seismic behavior of concrete columns confined with steel and fiber-reinforced polymers", *ACI Structural Journal*. V. 99, No. 1, 2002. pp. 72–80.
- Iabucci R.D., Sheikh S.A., Bayrak O., (2003) Retrofit of square concrete columns with carbon fiber-reinforced polymer for seismic resistance", *ACI Structural Journal*. V. 100, No. 6, 2003. pp. 785–94.
- Saadatmanesh H., Ehsani M., Jin L., (1997) Repair of earthquake-damaged RC columns with FRP wraps", *ACI Structural Journal*. V. 94, No. 2, 1997. pp. 206–15.
- Harajli M.H., (2007), Cyclic response of concrete members with bond-damaged zones repaired using concrete confinement", Elsevier, *Construction and Building Materials*, 21, 2007. pp. 937–951.

- Gergely J., Pantelides C.P., Reavely L.D., (2000), "Shear Strengthening of RCT-Joints Using CFRP Composites", *ASCE Journal of Composites for Construction*, V. 4, No. 2, 2000. pp. 56-64.
- Antonopoulos C.P., Triantafillou T.C., (2003), "Experimental Investigation of FRP-Strengthened RC Beam-Column Joints", *ASCE Journal of Composites for Construction*, V. 7, No 1, 2003. pp. 39-49.
- Baglin P.S., Scott R.H., (2000), "Finite Element Modeling of Reinforced Concrete Beam-Column Connections", *ACI Structural Journal*, V. 97, No.6, 2000. pp. 886-894.
- Parvin A., Granata P., (2000), "Investigation on the effects of fiber composites at concrete joints", *Elsevier, Composites Part B: Engineering*. 31, 2000. pp. 499-509.
- Granata P., Parvin A., (2001), "An experimental study on Kevlar strengthening of beam-column connections. *Elsevier, Composite Structures*, 53, 2001. pp. 163-171.
- Geng Z., Chajes M.J., Chouc T., Pan D., (1998), "The Retrofitting of Reinforced Concrete Column-to-Beam Connections", *Elsevier, Composites Science and Technology*, 58, 1998. pp. 1297-1305.
- Karabinis A. I., (2002), "Reinforced concrete beam-column joints with lap splices under cyclic loading", *Structural Engineering and Mechanics*, 14 (6), 2002. pp. 649-660.
- Comité Européen de Normalisation, (2004), "EN 1992, Eurocode 2: Design of concrete structures. Part 1-1: General rules and rules for buildings", Brussels, 2004
- Master Builders Technology, "Characteristics and instructions for application of EMACO S66" (In Greek).
- Scherer J., (1999), "S&P – Sintecno, FRP – Polymer fibers in strengthening", User guide. 1999. Brunnen.
- Ρουσάκης Θ., (2005), "Μηχανική συμπεριφορά σκυροδέματος περισφιγμένου με σύνθετα υλικά", Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών ΔΠΘ, 2005.
- Wang Y.C. & Restrepo J.I., (2001), "Investigation of Concentrically Loaded Reinforced Concrete Columns Confined with Glass Fiber-Reinforced Polymer Jackets", *ACI Structural Journal*, V. 98, No. 3, 2001: pp. 377-385.
- Spoelstra M. R., Monti G., (1999), "FRP-Confined Concrete Model", *ASCE Journal of Composites for Construction*, V. 3, No. 3, August 1999. pp. 143-150.
- Pantazopoulou S.J., Mills R.H., (1995), "Microstructural aspects of the mechanical response of plain concrete", *ACI Material Journal*, V. 92, No. 6, 1995. pp. 605-616.
- Vecchio, F.J. and Collins, M.P., (1986), "The Modified Compression Field Theory for Reinforced Concrete Elements Subjected to Shear", *ACI Journal, Proceedings* V. 83 No. 2, March-April 1986, pp. 219-231.
- Lynn A., Moehle J.P., Mahin S., and Holmes W., (1996), "Seismic Evaluation of Existing R.C. Building Columns", *Earthquake Spectra, EERI*, 12(4), 1996. pp. 715-739.
- Bentz E.C., (2000), "Sectional Analysis of Reinforced Concrete", *PhD Thesis, Department of Civil Engineering, University of Toronto*, 2000.
- Priestley M.J.N., Seible F., Calvi M., (1996), "Seismic design and retrofit of bridges", *John Wiley & Sons, Inc.*, New York, 1996.