

## ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΚΟΜΒΩΝ ΔΟΚΟΥ- ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΟΣ ΣΕ ΔΙΑΤΜΗΣΗ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΙΟΠ

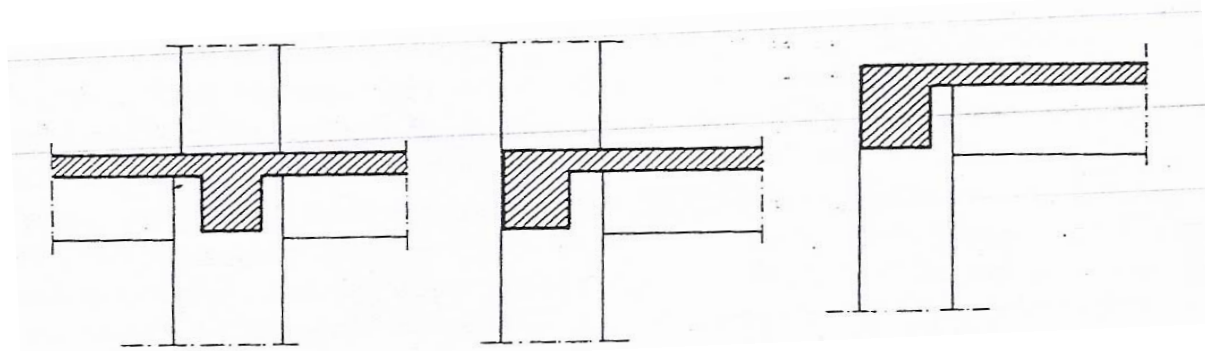
**ΜΑΝΤΖΟΥΚΑ ΛΟΥΚΙΑ  
ΧΑΡΑΤΣΑΡΗΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ**

### Περίληψη

Στην παρούσα εργασία μελετάται, μέσω δύο πειραμάτων, η συμπεριφορά των κόμβων υπό συγκεκριμένου είδους φόρτιση και η αντίστοιχη συμπεριφορά τους όταν αυτοί οι κόμβοι ενισχυθούν με ΙΟΠ. Από τα αποτελέσματα των πειραματικών αυτών δοκιμών εξάγουμε συμπεράσματα που οδηγούν στην ανάγκη ενίσχυσης των κόμβων με ΙΟΠ, ενώ επιπλέον μέσω της σύγκρισης αυτών των αποτελεσμάτων με εκείνα που προκύπτουν από τη χρήση του ΚΑΝΕΠΕ, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι η χρήση των διατάξεων του ΚΑΝΕΠΕ δίνει πιο συντηρητικά και επομένως πιο ασφαλή αποτελέσματα.

### 1.1 ΚΟΜΒΟΙ ΔΟΚΩΝ- ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΩΝ- ΓΕΝΙΚΑ

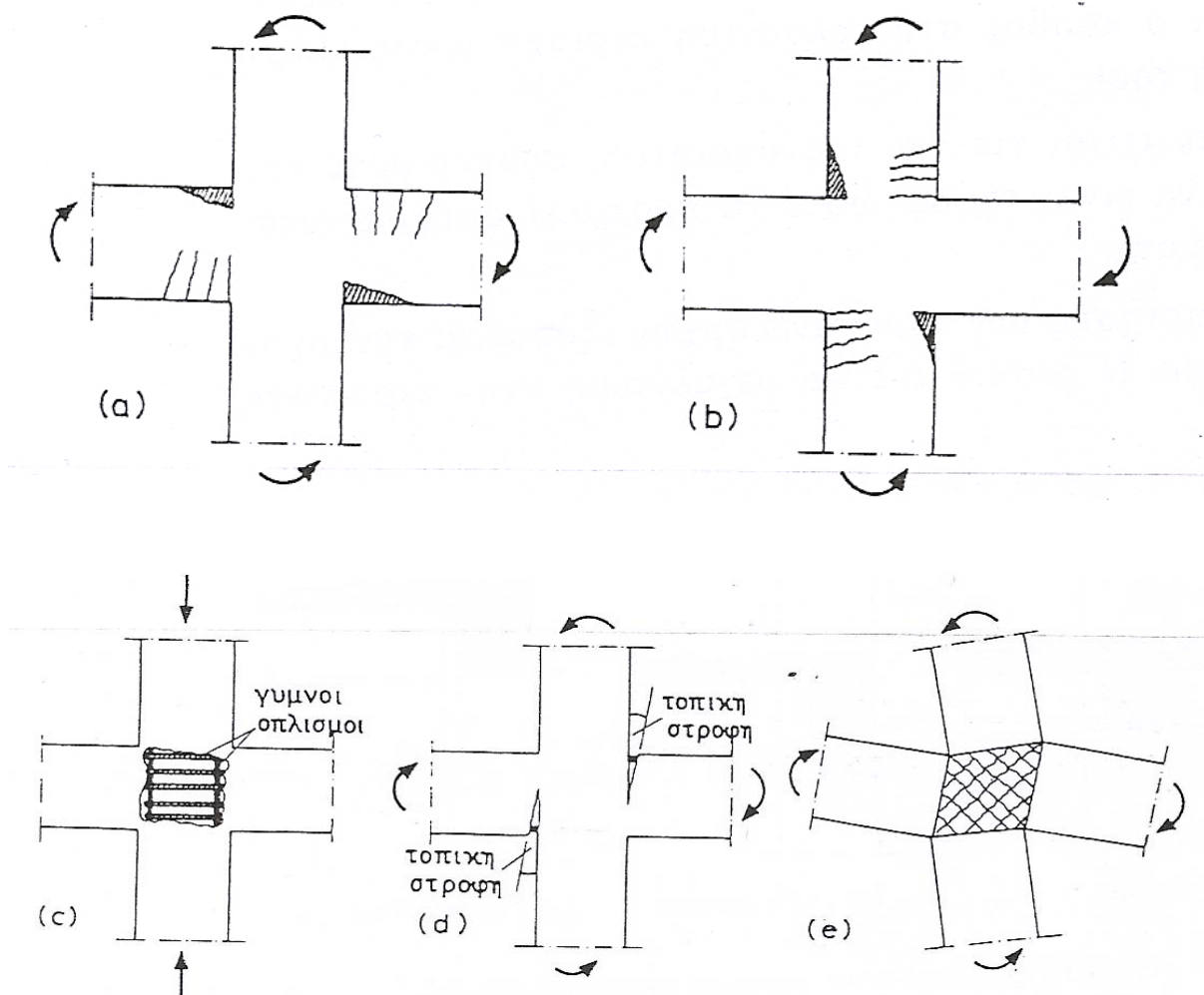
Οι κοινές περιοχές διασταυρούμενων στοιχείων, σε μια ολόσωμη κατασκευή, ονομάζονται κόμβοι. Όταν το εμβαδόν των περιοχών αυτών είναι περιορισμένο, όπως συμβαίνει στην περίπτωση της διασταύρωσης γραμμικών στοιχείων (δοκοί- υποστυλώματα), είναι απαραίτητος ο έλεγχος της διατμητικής αντοχής τους, αλλά και των συνθηκών αγκύρωσης των οπλισμών των διασταυρούμενων στοιχείων μέσα στις περιοχές αυτές. Για να μπορέσουν τα στοιχεία μιας ολόσωμης κατασκευής να αναπτύξουν τις αντοχές τους πρέπει να αποκλειστεί η πρόωγη αστοχία των κόμβων της σύνδεσής τους. Πρέπει εξ αρχής να τονιστεί ότι η αντίληψη πως η εντατική κατάσταση στους κόμβους, που έχουν διαστάσεις ίσες ή μεγαλύτερες από τα στοιχεία που συνδέουν, δεν είναι κρίσιμη και δεν απαιτεί ιδιαίτερους ελέγχους είναι εσφαλμένη, ιδιαίτερα όταν οι κόμβοι καταπονούνται με ένταση σεισμικής προέλευσης. Ωστόσο, η πρακτική της διαστασιολόγησης, τόσο διεθνώς όσο και στη χώρα μας, στηριζόταν μέχρι και τη δεκαετία του '70 στην προηγούμενη εσφαλμένη αντίληψη. Η έρευνα της συμπεριφοράς των κόμβων, με έμφαση στο πρόβλημα της ανακυκλιζόμενης έντασης, που άρχισε στα τέλη της δεκαετίας του '60 έχει φτάσει σήμερα στο επίπεδο της διατύπωσης αξιόπιστων και πειραματικά τεκμηριωμένων κανόνων διαστασιολόγησης και κατασκευαστικής διαμόρφωσης, οι οποίοι ενσωματώθηκαν στους σύγχρονους κανονισμούς. Στην Ελλάδα οι διατάξεις σχετικά με τον έλεγχο κόμβων σε διάτμηση εισάγονται, για πρώτη φορά, με το Σχέδιο του Νέου Κανονισμού για Έργα από σκυρόδεμα. Τα είδη των κόμβων σε ολόσωμες κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα φαίνονται στο παρακάτω σχήμα 1 [1].



(α) (β) (γ)  
Σχήμα 1: Είδη κόμβων: (α) εσωτερικός, (β) εξωτερικός, (γ) γωνιακός [1]

## 1.2. ΤΥΠΟΙ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΣΥΝΔΕΣΕΩΝ ΔΟΚΩΝ- ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΩΝ

Στο σχήμα 2 παρουσιάζονται σχηματικά οι διάφοροι τύποι αστοχίας στην περιοχή ενός εσωτερικού κόμβου. Στόχος του σχεδιασμού είναι να διασφαλιστεί ο τύπος αστοχίας του σχήματος 2.α που χαρακτηρίζεται από τον σχηματισμό πλαστικών αρθρώσεων στις δοκούς που συντρέχουν στον κόμβο. Κατάλληλη κατασκευαστική διαμόρφωση των περιοχών των αρθρώσεων μπορεί να διασφαλίσει υψηλή πλαστιμότητα του συστήματος και να αποτρέψει την πιθανότητα κατάρρευσης στη διάρκεια ενός πολύ ισχυρού σεισμού. Μη επιθυμητός αντίστοιχα είναι ο σχηματισμός πλαστικών αρθρώσεων στα υποστυλώματα. Οι υπόλοιπες τρεις μορφές αστοχίας αναφέρονται σε βλάβες που παρουσιάζονται στο εσωτερικό του κόμβου και είναι: α) αποφλοίωση της επικάλυψης του σκυροδέματος των παρειών του κόμβου, που μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική μείωση της φέρουσας ικανότητας του υποστυλώματος, β) αστοχία της αγκύρωσης διαμήκων ράβδων της δοκού στην περιοχή του κόμβου που οδηγεί σε πτώση της αντοχής και σε σημαντικές τοπικές στροφές στη διεπιφάνεια δοκού- υποστυλώματος, που συνεπάγονται μείωση της δυσκαμψίας του συστήματος και γ) αστοχία του κόμβου από διάτμηση, με συνέπειες στην αντοχή και την δυσκαμψία του συστήματος παρόμοιες με εκείνες της προηγούμενης περίπτωσης [1].



Σχήμα 2: Τύποι αστοχίας συνδέσεων δοκών – υποστυλωμάτων[1]

### 1.3.ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ ΚΟΜΒΩΝ ΔΟΚΩΝ- ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΩΝ

Ανάλογα με το βαθμό βλάβης εφαρμόζονται οι παρακάτω τεχνικές:

- α) Ρητινενώσεις
- β) Χιαστί προεντεταμένα κολλάρα
- γ) Επικολλήσεις ελασμάτων
- δ) Μανδύες οπλισμένου σκυροδέματος

Είναι πρόδηλο ότι η επισκευή ενός κόμβου αποτελεί από πλευράς εφαρμογής το δυσκολότερο εγχείρημα γιατί στο σημείο αυτό συντρέχουν πολλά δομικά στοιχεία [2].

### 2.ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΜΕ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ

Την τελευταία δεκαετία περίπου έχει αναπτυχθεί διεθνώς, αλλά και στη χώρα μας, μία νέα τεχνική ενίσχυσης κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος, η οποία βασίζεται στην εξωτερική επικόλληση σύνθετων υλικών (ινοπλισμένων πολυμερών- Fibre Reinforced Polymers- FRP) σε στοιχεία (υποστυλώματα, δοκοί, τοιχεία, κόμβοι κ.τ.λ.), τα οποία είτε έχουν υποστεί βλάβες από σεισμό, είτε έχουν ανεπάρκεια αντοχής ή/ και πλαστιμότητας. Τα σύνθετα υλικά αποτελούνται από συνεχείς ίνες (συνήθως άνθρακα ή γυαλιού και σπανιότερα αραμιδίου) σε συνδυασμό με εποξειδική ρητίνη και διατίθενται σε μορφή σχετικά δύσκαμπτων «λωρίδων» (πάχους της τάξης του 1mm) ή εύκαμπτων «υφασμάτων» (πάχους της τάξης των 0,1-0,4 mm) με ίνες σε μία (κατά κανόνα) ή περισσότερες διευθύνσεις.

Βασικά χαρακτηριστικά τους είναι η εξαιρετικά μεγάλη εφελκυστική αντοχή (σε συνδυασμό με μέτρο ελαστικότητας  $E_f$  που μπορεί να είναι από 30-300 GPa, ανάλογα με τις απαιτήσεις της μελέτης), το χαμηλό βάρος (περίπου  $\frac{1}{4}$  του χάλυβα) και η ανθεκτικότητα σε διάρκεια (η τελευταία είναι εξαιρετική για υλικά με ίνες άνθρακα και μέτρια- καλή για υλικά με ίνες γυαλιού, οι οποίες προσβάλλονται από το αλκαλικό περιβάλλον του σκυροδέματος – αν τυχόν είναι σε άμεση επαφή – αλλά και από ορισμένα οξείδια). Η αντίστοιχη τεχνική ενίσχυσης, η οποία συνιστάται στη μέσω εποξειδικών ρητινών επικόλληση των σύνθετων υλικών στις εξωτερικές επιφάνειες δομικών στοιχείων (π.χ. επικόλληση λωρίδων σε εφελκυσόμενα πέλαμα, περιτύλιξη/ περίσφιξη υποστυλωμάτων με υφάσματα), χαρακτηρίζεται από εξαιρετική ευκολία, ευελιξία και ταχύτητα εφαρμογής, και έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της αντοχής και της παραμορφωσιμότητας των στοιχείων χωρίς να μεταβάλλεται η γεωμετρία ή να αυξάνεται η δυσκαμψία τους. Έτσι η τεχνική των σύνθετων υλικών είναι ιδιαίτερα ανταγωνιστική με συμβατικές τεχνικές επεμβάσεων (π.χ. επικόλληση χαλυβοελασμάτων, μεταλλικοί μανδύες) παρά το υψηλότερο κόστος υλικών, γι' αυτό και εφαρμογές της αυξάνονται με ραγδαίους ρυθμούς. Διεθνώς αριθμούν σε περίπου 6000-7000, ενώ στη χώρα μας έχουν ήδη φτάσει πολλές δεκάδες.

Ο τεχνικός κόσμος της χώρας μας έχει στη διάθεσή του μία τουλάχιστον ενδιαφέρουσα τεχνική ενίσχυσης, βασικά χαρακτηριστικά της οποίας είναι η ευκολία εφαρμογής και η αποτελεσματικότητα, υπό την προϋπόθεση βέβαια ότι η εφαρμογή γίνεται άρτια (από την πλευρά της «μηχανικής») και επιμελημένα (από την πλευρά του εργατικού προσωπικού). Τα πιο συνηθισμένα διαθέσιμα σήμερα στην αγορά συστήματα ενίσχυσης βασίζονται στη χρήση εύκαμπτων ανθρακοϋφασμάτων ή υαλοϋφασμάτων (ενώ υπάρχουν και υφάσματα με ίνες αραμιδίου ή ακόμα και «υβριδικά», με διάφορους τύπους ινών) και σχετικά δύσκαμπτων λωρίδων σύνθετων υλικών με ίνες άνθρακα. Ένα ερώτημα που τίθεται συνήθως από τους μηχανικούς- μελετητές είναι η επιλογή του πλέον κατάλληλου για κάθε περίπτωση τύπου ινών, ειδικά εν όψει του γεγονότος ότι οι σχετικές με τα υλικά ενίσχυσης διατάξεις του ΥΠΕΧΩΔΕ έχουν υιοθετήσει μόνο τα υαλοϋφάσματα. Ωστόσο τα σύνθετα υλικά με ίνες άνθρακα όχι μόνο δεν υστερούν έναντι αυτών με ίνες γυαλιού, αλλά στην πλειονότητα των περιπτώσεων αποτελούν τη βέλτιστη λύση. Τούτο οφείλεται αφενός στο μεγάλο μέτρο

ελαστικότητας των ινών άνθρακα (με αποτέλεσμα να απαιτούνται μικρού πάχους μανδύες), αφετέρου στην εξαιρετική ανθεκτικότητά τους έναντι συνήθων διαβρωτικών παραγόντων. Μοναδικό πλεονέκτημα ίσως των ινών γυαλιού είναι : α) το χαμηλότερο κόστος ανά μονάδα αντοχής (κάτι που ενδεχομένως δεν θα ίσχυε σε λίγο καιρό λόγω της δραματικής μείωσης του κόστους των ινών άνθρακα με την αύξηση της χρήσης τους ) και β) η μεγαλύτερη παραμορφωσιμότητα (υπό την προϋπόθεση βέβαια ότι οι ίνες αυτές δεν βρίσκονται υπό συνεχή τάση, η οποία προκαλεί δραματική μείωση της αντοχής τους), την οποία όμως σπανίως «απολαμβάνουμε», λόγω πρόωρων αποκολλήσεων (οι τελευταίες δεν επιτρέπουν στις ίνες να εξαντλήσουν τη μήκυνσή τους). Γενικώς τα υλικά αυτά προσφέρουν εξαιρετικά πλεονεκτήματα, δεν αποτελούν όμως «πανάκεια». Η τεχνική εφαρμογής τους δίνει λύσεις σε αρκετές περιπτώσεις, δεν θα πρέπει όμως να θεωρείται ότι θα αντικαταστήσει ολοκληρωτικά άλλες τεχνικές, αλλά ότι θα τις συμπληρώσει [3].

### **3.ΜΕΛΕΤΗ ΠΡΩΤΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ**

Ο τίτλος του πρώτου πειράματος είναι: «Η αποτελεσματικότητα της ενίσχυσης συνδέσεων οπλισμένου σκυροδέματος δοκού- υποστυλώματος σε διάτμηση με κατακόρυφες λωρίδες FRP»[4].

#### **3.1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Συνδέσεις ενισχυμένου σκυροδέματος σχεδιασμένες πριν από την εφαρμογή των αντισεισμικών κανονισμών, σε όλο τον κόσμο, μπορεί να μην παρουσιάζουν κατάλληλη διατμητική αντοχή για την παραλαβή την σεισμικής δύναμης. Τέτοιες συνδέσεις για αυτόν τον λόγο θα χρειαστούν ενίσχυση. Αυτή η έκθεση αναφέρει τα αποτελέσματα των δοκιμών σε συνδέσεις δύο-διαστάσεων οπλισμένου σκυροδέματος που έχουν ενισχυθεί σε διάτμηση με εξωτερικά επικολλητές σύνθετες λωρίδες ινών ενισχυμένου πολυμερούς (FRP). Η χρήση λωρίδων FRP αποτελεί μία ελκυστική μέθοδο ενίσχυσης, καθώς είναι σχετικά εύκολη στην εφαρμογή. Σε αυτήν την μελέτη οι λωρίδες αυτές έχουν τοποθετηθεί παράλληλα στον διαμήκη άξονα του υποστυλώματος (κάθετες λωρίδες). Οι δοκιμές που αναφέρονται σε αυτήν την έκθεση συντελούν στην εκτίμηση της αποτελεσματικότητας της χρήση των κατακόρυφων λωρίδων FRP για ενίσχυση και για αυτόν ακριβώς τον λόγο τα δείγματα της δοκιμής είναι οργανωμένα με σκοπό να μελετηθεί όχι μόνο το υλικό FRP αλλά και ολόκληρη η σύνδεση. Οι συνδέσεις έχουν τέτοια αντοχή ώστε ακόμα και για αυτές που θα ενισχυθούν με φύλλα FRP να περιμένουμε ενδεχόμενη αστοχία στην περιοχή του κόμβου.

Επιπλέον, εκτός από λωρίδες FRP , επιλέχθηκαν και φύλλα με σκοπό να παρατηρηθεί πιο εύκολα η εξέλιξη της ρηγμάτωσης στην περιοχή του κόμβου και επίσης να παρατηρηθεί η στιγμή της αποκόλλησης των FRP. Πρωταρχικοί στόχοι των δοκιμών ήταν η παρατήρηση της συμπεριφοράς της ενίσχυσης με FRP και η ακριβής αναφορά του τρόπου αστοχίας. Γραμμικά μεταβλητοί μετατροπείς μετακίνησης και μετρητές τάσεις χρησιμοποιήθηκαν εκτεταμένα. Οι συνδέσεις υποβλήθηκαν και σε μονοτονική και σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση, με σκοπό, με βάση την μονοτονική φόρτιση να καταγραφεί η συμπεριφορά των λωρίδων FRP και η εξέλιξη της ρηγμάτωσης στην περιοχή του κόμβου, και με βάση την ανακυκλιζόμενη φόρτιση να καταγραφεί η ικανότητα απορρόφησης ενέργειας της ενισχυμένης σύνδεσης [4].

#### **3.2.ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΛΕΠΤΟΜΕΡΕΙΕΣ**

##### **3.2.α.ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΩΝ ΔΕΙΓΜΑΤΩΝ ΤΗΣ ΔΟΚΙΜΗΣ**

Δύο εξωτερικές συνδέσεις δοκιμάστηκαν σε μονοτονική φόρτιση και δύο σε ανακυκλιζόμενη (Πίνακας 1). Της οι συνδέσεις δεν είχαν εγκάρσιο οπλισμό στην περιοχή του κόμβου με συνέπεια να έχουν ελλιπή διατμητική αντοχή. Της οι συνδέσεις είχαν ίδιο οπλισμό και γεωμετρία (Εικόνα 1). Η αντοχή σχεδιασμού όλων των συνδέσεων έδειξε διατμητική αστοχία στην περιοχή του κόμβου (με και χωρίς ενίσχυση του κόμβου), η οποία

ακολουθήθηκε από καμπτική αστοχία της δοκού και έπειτα από καμπτική αστοχία του υποστυλώματος.

Η πρώτη ομάδα συνδέσεων δοκιμάστηκε υπό μονοτονικά αυξανόμενο φορτίο και η δεύτερη ομάδα συνδέσεων εξετάστηκε υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση. Μία σύνδεση από κάθε ομάδα (UM1, UC1) ήταν πείραμα ελέγχου σύνδεσης χωρίς ενίσχυση, ενώ οι της (SM1, SC1) ήταν ενισχυμένες. Χρησιμοποιήθηκαν FRP με ίνες άνθρακα για την ενίσχυση (CFRP). Ο τρόπος ενίσχυσης FRP (Εικόνα 1d) αποτελείται από δύο στρώσεις, με πλάτος λωρίδων FRP 50mm, τοποθετημένων έτσι ώστε η απόσταση των κέντρων του να είναι 150mm. Αυτές οι λωρίδες εφαρμόστηκαν κεντρικά και της δύο πλευρές της επιφάνειας του κόμβου, και εκτεινόταν μέχρι το υποστυλώμα. Δύο στρώσεις περιτύλιξης του υποστυλώματος εφαρμόστηκαν και στα δύο άκρα των λωρίδων για αγκύρωση έτσι ώστε να μην αποκολληθούν οι κατακόρυφες λωρίδες [4].

Σύνδεση	UM1	SM1	UC1	SC1
Περιγραφή δοκιμής	Έλεγχος	Ενίσχυση με FRP	Έλεγχος	Ενίσχυση με FRP
Τύπος φορτίου	Μονοτονική	Μονοτονική	Ανακυκλιζόμενη	Ανακυκλιζόμενη

Πίνακας 1: Συνδέσεις δοκιμής [4]

### 3.2.β.ΕΠΙΛΟΓΗ ΥΛΙΚΩΝ

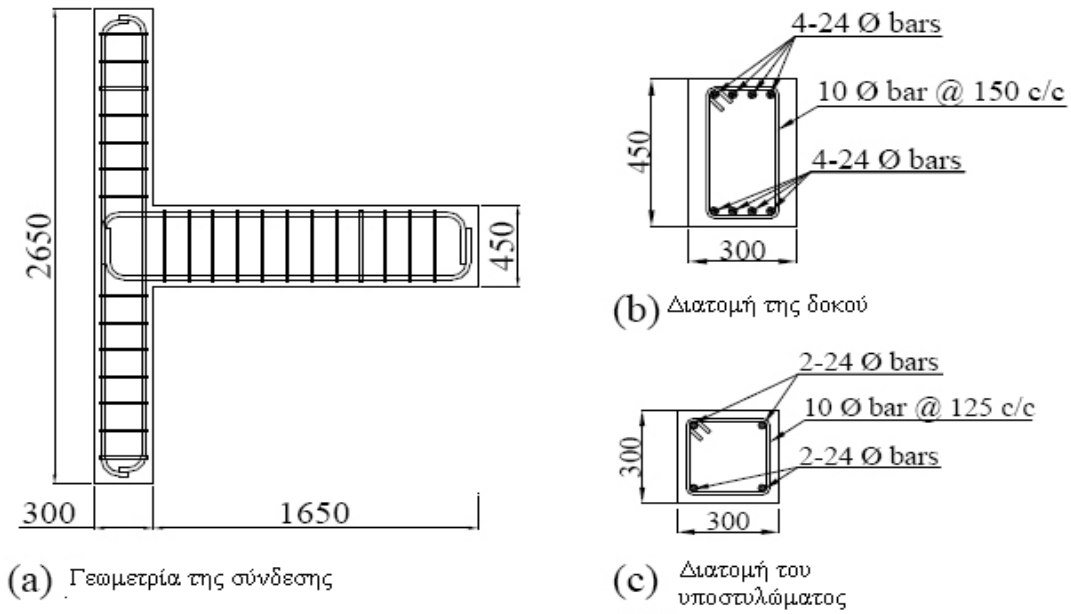
Δοκιμές θλιπτικής αντοχής σε κυλινδρικά δοκίμια σκυροδέματος, που γίνονταν τη μέρα της κάθε δοκιμής σύνδεσης, (έγιναν θλιπτικές δοκιμές σε 3 κυλινδρικά δοκίμια διαμέτρου 150mm για κάθε σύνδεση) συνοψίζονται στον πίνακα 2. Η τάση διαρροής του διαμήκους και του εγκάρσιου οπλισμού ήταν 532 MPa και 332 MPa αντίστοιχα. Η εφελκυστική αντοχή και η παραμόρφωση ρηγμάτωσης ήταν 3120 MPa και 1,1% αντίστοιχα (έγιναν δοκιμές εφελκυσμού σε δύο στρώσεις πλάτους 5-15mm με 0,117mm ονομαστικό πάχος φύλλων ινών άνθρακα) [4].

### 3.2.γ.ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΔΟΚΙΜΩΝ,ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΟΡΓΑΝΩΝ ΕΛΕΓΧΟΥ, ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

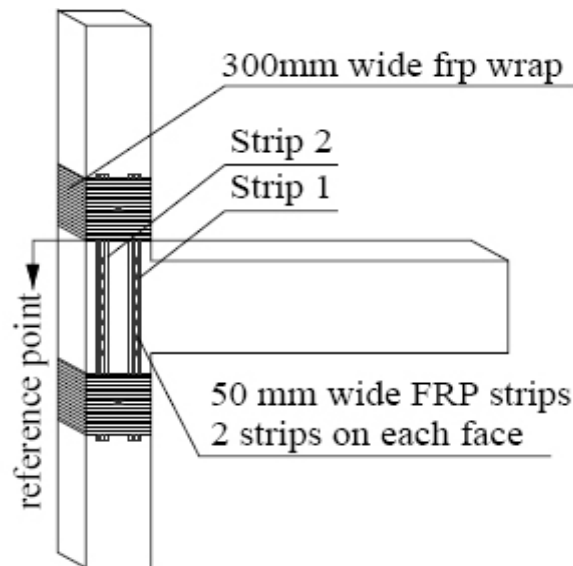
Η εγκατάσταση δοκιμής φαίνεται στην εικόνα 2. Η σύνδεση τοποθετήθηκε σε μία δύσκαμπτη εγκατάσταση δοκιμής με αρθρωτές στηρίξεις και στα δύο άκρα του υποστυλώματος, (το υποστυλώμα τοποθετήθηκε οριζόντιο στο έδαφος), ενώ εφαρμόστηκε φορτίο στο άκρο της δοκού με τη βοήθεια κινητήρα που εδράστηκε σε ένα δύσκαμπτο πλαίσιο αντίδρασης. Ένα αξονικό φορτίο των 180 KN (ίσο με 8%της συνολικής αντοχής αξονικού φορτίου του υποστυλώματος και αντιπροσωπευτικό ενός τυπικού ορόφου φόρτισης), εφαρμόστηκε στο υποστυλώμα με τη χρήση ενός υδραυλικού γρύλλου που ακουμπούσε στο ένα άκρο του υποστυλώματος και μέσα από ένα σύστημα από ράβδους υψηλής αντοχής.

Για την πρώτη ομάδα συνδέσεων (UM1, SM1), που δοκιμάστηκε υπό μονοτονικά αυξανόμενο φορτίο, το φορτίο εφαρμόστηκε με βήματα αύξησης των 10KN, και ρωγμές σημειώθηκαν σε κάθε βήμα του φορτίου μέχρις ότου δεν παρατηρήθηκαν νέες ρωγμές.

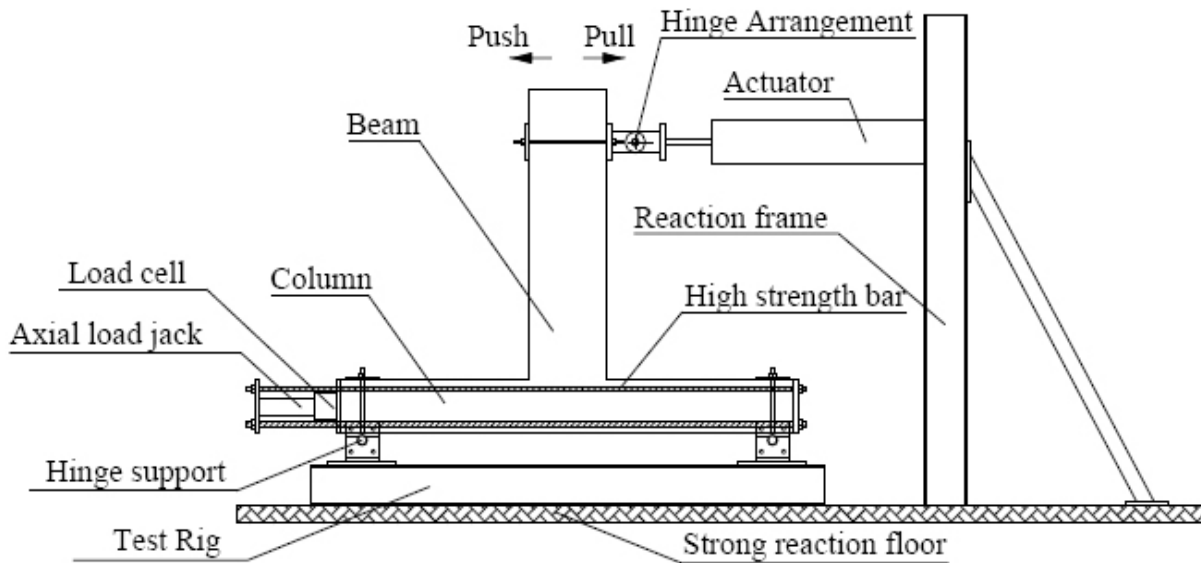
Για την δεύτερη ομάδα συνδέσεων (UC1, SC1), εφαρμόστηκε φορτίο στοάκρο της δοκού με βήματα αύξησης της εκτροπής των 5mm σε κάθε κύκλο και σε κάθε διεύθυνση ώθησης-έλξης. Το βήμα εκτροπής αυξήθηκε σε 10mm μετά τον 8<sup>ο</sup> κύκλο για την σύνδεση SC1 που ενισχύθηκε με FRP, λόγω της μη σημαντικής αλλαγής στο φορτίο. Ρωγμές σημειώθηκαν στο δείγμα της δοκιμής στην αιχμή της εκτροπής σε κάθε κύκλο ώθησης και έλξης μέχρις ότου δεν εμφανίζονταν νέες ρωγμές. Το φορτίο εφαρμόστηκε με την χρήση ενός ελεγχόμενου τρόπου εκτροπής σε όλες τις δοκιμές σε ποσοστό φόρτισης των 0,2mm ανά δευτερόλεπτο.



Εικόνα 1: Σύνδεση δοκιμής- λεπτομέρειες γεωμετρίας και οπλισμού [4]



Εικόνα 1d: Ενίσχυση FRP [4]



Εικόνα 2: Εγκατάσταση δοκιμής [4]

Χρησιμοποιήθηκαν δώδεκα γραμμικά μεταβαλλόμενοι μετατροπείς μετατόπισης, τρεις για να μετρήσουν την εκτροπή κατά μήκος του μήκους της δοκού, ενώ οι υπόλοιποι χρησιμοποιήθηκαν για τις περιοχές ελεγχόμενης διέγερσης, όπως οι στηρίξεις και άλλες κρίσιμες περιοχές της εγκατάστασης της δοκιμής. Επίσης χρησιμοποιήθηκαν εξωτερικοί μετρητές πάνω στο σκυρόδεμα και εσωτερικοί μετρητές πάνω στις ράβδους οπλισμού για τη μέτρηση της παραμόρφωσης. Διαγράμματα ωστόσο των περιοχών αυτών των οργάνων δεν απεικονίζονται. Στις ενισχυμένες με FRP συνδέσεις SM1, SC1 εφαρμόστηκαν επιπρόσθετοι μετρητές στις επιφάνειες των FRP. Εφτά μετρητές παραμόρφωσης τοποθετήθηκαν σε κάθε λωρίδα FRP στην μπροστινή όψη και τρεις μετρητές στην πίσω όψη κάθε σύνδεσης όπως φαίνεται στην εικόνα 1d (για την μπροστινή όψη). Μόνο οι αναγνώσεις των αποτελεσμάτων που θα δώσουν αυτοί οι μετρητές θα αναφερθούν σε αυτήν την έκθεση [4].

### 3.3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΡΗΓΜΑΤΩΣΗΣ ΚΑΙ ΤΡΟΠΟΣ ΑΣΤΟΧΙΑΣ

Οι τελικές μορφές ρωγμών όλων των δοκιμαζόμενων συνδέσεων στην περιοχή του κόμβου φαίνονται στην εικόνα 3 [4].

#### 3.3.α. ΕΛΕΓΧΟΣ ΣΥΝΔΕΣΗΣ UM1- ΜΟΝΟΤΟΝΙΚΗ ΦΟΡΤΙΣΗ

Η σύνδεση αστόχησε λόγω διατμητικής αστοχίας στον κόμβο. Μικρές ρωγμές κάμψης παρατηρήθηκαν στη δοκό, οι οποίες ακολουθήθηκαν από ρωγμές στη γωνία δοκού-υποστυλώματος, στο αρχικό στάδιο της δοκιμής. Μια σημαντική διαγώνια ρωγμή παρατηρήθηκε στην περιοχή του κόμβου σε φορτίο των 70KN (13,2mm εκτροπή). Στην αιχμή του φορτίου των 96,4KN (27,7mm εκτροπή), η σύνδεση έχασε την ικανότητα μεταφοράς φορτίου που οφειλόταν σε σοβαρή διατμητική ρωγμή στην περιοχή του κόμβου. Η δοκιμή σταμάτησε λίγο μετά από το φορτίο έφτασε στην αιχμή του. Η σύνδεση τότε επισκευάστηκε και ελέγχθηκε ξανά, ωστόσο αυτά τα αποτελέσματα δεν παρουσιάζονται σε αυτήν την έκθεση. Η τελευταία μορφή της ρωγμής φαίνεται στην εικόνα 3 α. [4]

#### 3.3.β. ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΗ ΜΕ FRP ΣΥΝΔΕΣΗ SM1- ΜΟΝΟΤΟΝΙΚΗ ΦΟΡΤΙΣΗ

Μερικές μικρές καμπτικές ρωγμές παρατηρήθηκαν στη δοκό, οι οποίες ακολουθήθηκαν από ρωγμές στη γωνία δοκού-υποστυλώματος, καθώς η σύνδεση φορτίστηκε με 10KN. Μια διαγώνια ρωγμή στην περιοχή του κόμβου παρατηρήθηκε καθώς το φορτίο αυξήθηκε από 70KN σε 80KN (19mm εκτροπή) και ακούστηκε ένας θόρυβος ρηγμάτωσης, υποδεικνύοντας

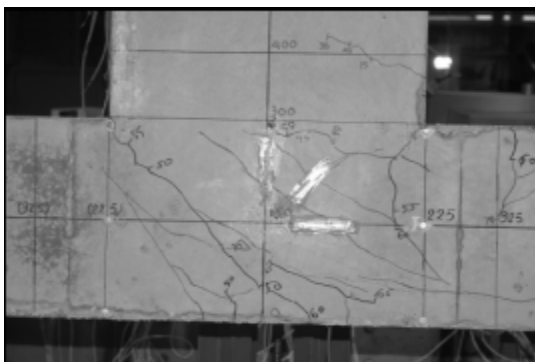
την εντοπισμένη αποκόλληση του FRP και τη ρηγματώση της εποξειδικής ρητίνης. Το φορτίο αιχμής των 103KN επετεύχθει σε εκτροπή 32mm όταν η FRP λωρίδα 1(αφορά την εικόνα 1d και εικόνα 3b για την περιοχή της λωρίδας) αποκολλήθηκε κατά μήκος όλου του μήκους, ακολουθούμενη από απώλεια της ικανότητας της σύνδεσης για μεταφορά φορτίου. Η σύνδεση τελικά αστόχησε λόγω διατμητικής αστοχίας του κόμβου. Οι περιτυλίξεις του υποστυλώματος που στερέωναν τα άκρα των λωρίδων FRP εμπόδισαν τις λωρίδες να αποκολληθούν πλήρως, ωστόσο η αποτελεσματικότητα του FRP χάθηκε πάνω στην τοπική αποκόλληση. Η λωρίδα 2 αποκολλήθηκε όταν το φορτίο έφτασε την αιχμή του. Η ακριβής περιοχή αποκόλλησης του FRP ήταν δύσκολο να καθοριστεί με οπτική επιθεώρηση. Τα αποτελέσματα των οργάνων μέτρησης της παραμόρφωσης των FRP που δίνονται παρακάτω συντελούν στο «να ριχθεί λίγο φως» στην περιοχή της αποκόλλησης. Η τελική μορφή της ρωγμής στην περιοχή του κόμβου φαίνεται στην εικόνα 3b. [4]

### 3.3.γ.ΕΛΕΓΧΟΣ ΣΥΝΔΕΣΗΣ UC1- ΑΝΑΚΥΚΛΙΖΟΜΕΝΗ ΦΟΡΤΙΣΗ

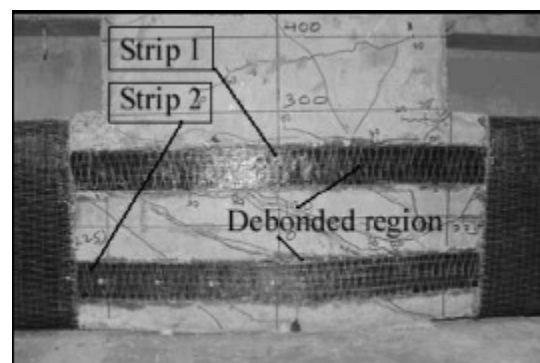
Σχηματίστηκαν διαγώνιες διατμητικές ρωγμές στην περιοχή του κόμβου και καμπτικές ρωγμές στη δοκό, καθώς εφαρμόστηκαν οι πρώτοι κύκλοι φόρτισης. Επόμενοι κύκλοι φόρτισης συνετέλεσαν στο σχηματισμό διαγώνιων διατμητικών ρωγμών με αυξανόμενο άνοιγμα. Ένα φορτίο αιχμής των 83,2KN (σε 29,8mm εκτροπής στον 6° κύκλο) παρατηρήθηκε στην διεύθυνση της ώθησης. Η σύνδεση αστόχησε λόγω διατμητικής αστοχίας και η τελική μορφή αστοχίας στην περιοχή του κόμβου φαίνεται στην εικόνα 3c. [4]

### 3.3.δ.ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΗ ΜΕ FRP ΣΥΝΔΕΣΗ SC1- ΑΝΑΚΥΚΛΙΖΟΜΕΝΗ ΦΟΡΤΙΣΗ

Αντίθετα με τη σύνδεση ελέγχου, μόνο μικρές διαγώνιες ρωγμές παρατηρήθηκαν στην περιοχή του κόμβου και καμπτικές ρωγμές στην δοκό στον πρώτο κύκλο. Μόνο στον δεύτερο κύκλο άρχισε να εμφανίζεται μία σημαντική διαγώνια ρωγμή και παρατηρήθηκε η πρώτη αποκόλληση FRP (στο φορτίο των 72KN και 8,25mm εκτροπής στην διεύθυνση ώθησης). Η ενίσχυση με FRP ήταν αποτελεσματική στον περιορισμό της οξύτητας της ρωγμής στην περιοχή του κόμβου και η μείωση της αντοχής στους επόμενους κύκλους φόρτισης ήταν πιο βαθμιαία σε σύγκριση με τη σύνδεση ελέγχου UC1. Ένα φορτίο αιχμής των 97,8KN (σε 24,4mm εκτροπής στον 5° κύκλο) παρατηρήθηκε στην διεύθυνση ώθησης όταν η FRP λωρίδα 1 αποκολλήθηκε (αναφέρεται στην εικόνα 1d και 3d για την περιοχή της λωρίδας 1). Η τελική αστοχία ήταν εξαιτίας σοβαρής διατμητικής ρωγμής του κόμβου που ακολουθήθηκε από τοπική αποκόλληση των λωρίδων FRP. Οι περιτυλίξεις του υποστυλώματος στα άκρα των λωρίδων FRP εμπόδισαν τις λωρίδες από την ολοκληρωτική αποκόλληση, ωστόσο η αποτελεσματικότητα του FRP χάθηκε ακολουθούμενη από τοπική αποκόλληση. Η εικόνα 3d δείχνει την τελική μορφή της ρωγμής στον κόμβο. [4]

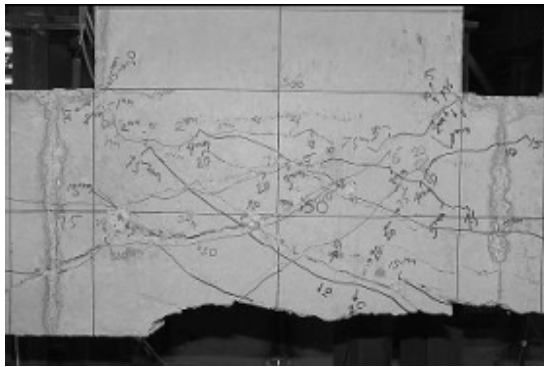


(α) UM1-MONOTONΙΚΗ ΦΟΡΤΙΣΗ

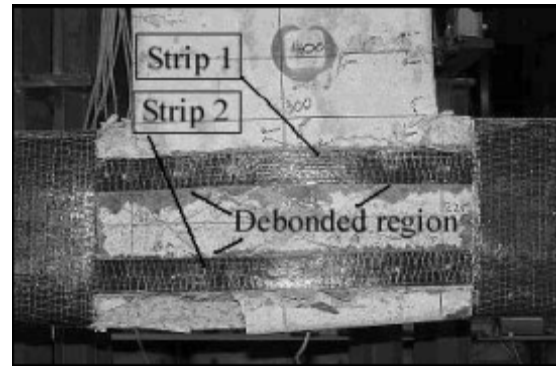


(b) SM1- MONOTONΙΚΗ ΦΟΡΤΙΣΗ





(c) UC1- ΑΝΑΚΥΚΛΙΖΟΜΕΝΗ ΦΟΡΤΙΣΗ

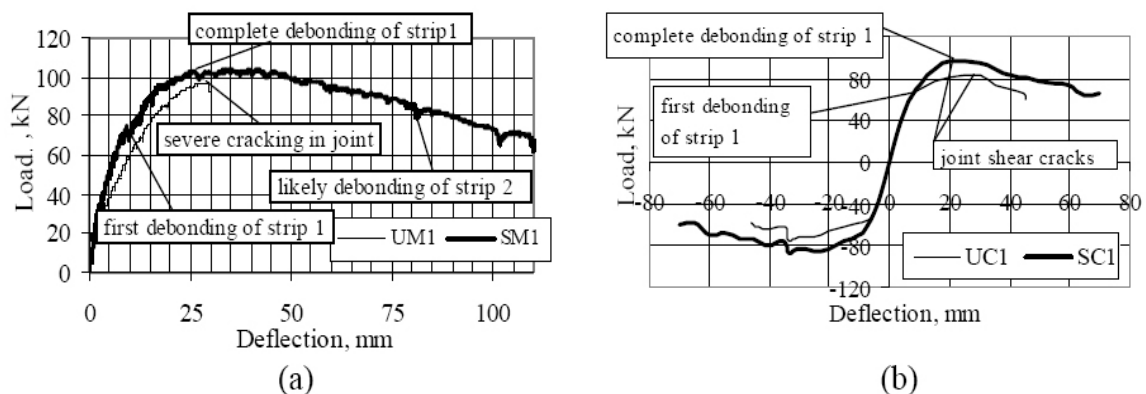


(d) SC1- ΑΝΑΚΥΚΛΙΖΟΜΕΝΗ ΦΟΡΤΙΣΗ

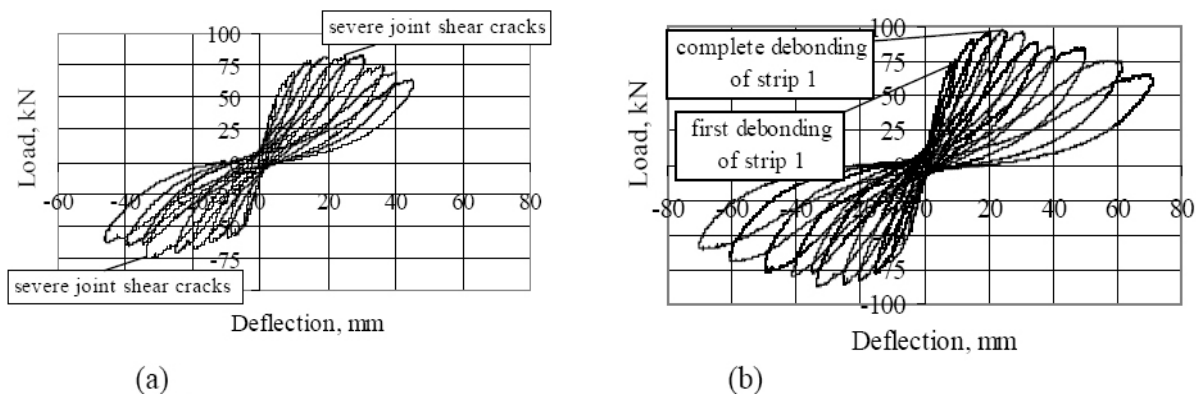
Εικόνα 3: Τελικές μορφές ρωγμής για τις εξεταζόμενες συνδέσεις [4]

### 3.4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ FRP

Αποτελέσματα φορτίου- εκτροπής για μονοτονική και ανακυκλιζόμενη φόρτιση των εξεταζόμενων συνδέσεων που δίνονται στις εικόνες 4 και 5 αντίστοιχα και το φορτίο αιχμής για όλες τις συνδέσεις συνοψίζονται στον Πίνακα 2. Οι ικανότητες μεταφοράς φορτίου για τις εξεταζόμενες συνδέσεις σε μονοτονική φόρτιση ήταν υψηλότερες από ότι οι αντίστοιχες φορτιζόμενες υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση λόγω της τελικής μείωσης της αντοχής από την αντιστροφή των φορτίων στις τελευταίες. Η ενίσχυση με FRP ήταν πρακτικά αποτελεσματική στις δοκιμές ανακυκλιζόμενης φόρτισης, όπου το FRP οδήγησε στην αύξηση της ικανότητας μεταφοράς φορτίου της σύνδεσης περίπου στο 17%. Σύγκριση αιχμής με αιχμή ακαμψίας (Εικόνα 6α) δείχνει μείωση της ακαμψίας για να είναι περισσότερο βαθμιαία στην ενισχυμένη με FRP σύνδεση, ενώ η σύνδεση είχε ακόμα σημαντική ακαμψία σε ένα υψηλό επίπεδο εκτροπής. Η ενισχυμένη με FRP σύνδεση έδειξε επίσης καλύτερη ικανότητα διασκορπισμού ενέργειας σε σύγκριση με εκείνη του ελέγχου σε ένα υψηλότερο επίπεδο εκτροπής (Εικόνα 6b). Η ενίσχυση με FRP ήταν επίσης αποτελεσματική στον περιορισμό της οξύτητας των διατμητικών ρωγμών του κόμβου που βασίζονται στην οπτική επιθεώρηση. Σύγκριση του διαγράμματος αιχμής φορτίου- εκτροπής για την ελεγχόμενη σύνδεση και εκείνη που ήταν ενισχυμένη με FRP φαίνεται στην εικόνα 5α. Στην περίπτωση που οι συνδέσεις δοκιμάστηκαν υπό μονοτονική φόρτιση, η ενίσχυση με FRP οδήγησε σε μικρή αύξηση της ικανότητας μεταφοράς φορτίων εκτός από την αύξηση σε ακαμψία. Η ενίσχυση με FRP ήταν πιο αποτελεσματική στις δοκιμές με ανακυκλιζόμενη φόρτιση, καθώς η ενίσχυση ήταν αποτελεσματική στον περιορισμό των διατμητικών ρωγμών στον κόμβο, που είναι κρίσιμος στη μείωση της αντοχής σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση.



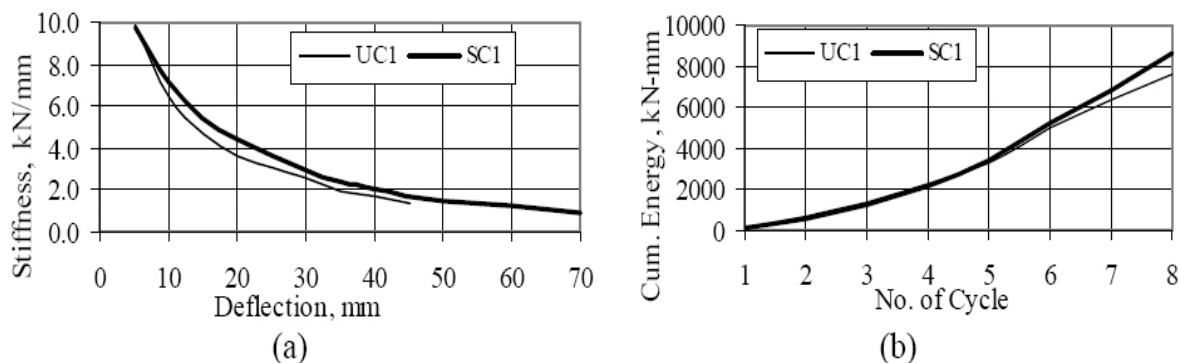
Εικόνα 4: (α) Διάγραμμα φορτίου- εκτροπής, (β) Διάγραμμα φορτίου- εκτροπής για ανακυκλιζόμενη φόρτιση [4]



Εικόνα 5: Διάγραμμα φορτίου- εκτροπής άκρου δοκού, (α) δείγμα ελέγχου UC1, (β) ενισχυμένο δείγμα SC1 [4]

Σύνδεση	f <sub>c</sub> (MPa)	Φορτίο αιχμής (KN)	Φορτίο αιχμής (KN)	Έκτροπή στο φορτίο αιχμής (mm)	Έκτροπή στο φορτίο αιχμής (mm)	Αύξηση (KN)	Αύξηση (KN)	Αύξηση (%)	Αύξηση (%)
		Ωθηση	Έλξη	Ωθηση	Έλξη	Ωθηση	Έλξη	Ωθηση	Έλξη
UM1	25,4	96,4		26,7					
SM1	25,6	103,0		32,0		6,6		6,8	
UC1	25,6	83,2	75	29,8	33,5	-	-	-	-
SC1	25,8	97,8	87,5	24,4	33,4	14,6	12,5	17,5	16,6

Πίνακας 2: Φορτία και εκτροπές για όλες τις συνδέσεις [4]



Εικόνα 6: Σύγκριση αποτελεσμάτων: (α) αιχμής με αιχμή ακαμψίας, (β) συσσωρευμένη διασκορπισμένη ενέργεια [4]

### 3.5.ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Ερευνήθηκε η αποτελεσματικότητα των κατακόρυφων λωρίδων FRP για την ενίσχυση εξωτερικών συνδέσεων σε διάτμηση. Η ενίσχυση με FRP ήταν αποτελεσματική στην εμπόδιση εκτεταμένης ρηγμάτωσης στην περιοχή του κόμβου σε σύγκριση με απλές συνδέσεις οπλισμένου σκυροδέματος, ειδικά για δείγματα υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση. Ωστόσο η ικανότητα της ενισχυμένης σύνδεσης περιορίστηκε από πρόωρη τοπική αποκόλληση του FRP. Η αποκόλληση του FRP πρέπει να εμποδίζεται ή να καθυστερείται για την ενίσχυση της αποτελεσματικότητάς τους.

### 3.6.ΕΠΙΛΥΣΗ ΤΟΥ ΚΟΜΒΟΥ ΤΟΥ ΠΡΩΤΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΟΝ ΚΑΝΕΠΕ

Βρίσκουμε αρχικά τη ροπή αντοχής της δοκού:

$$M_{Rb} = A_s(4\Phi 24) \cdot f_{yd} \cdot z = 1809mm^2 \cdot \frac{532N}{1,15mm^2} \cdot 0,381m \cdot 10^{-3} = 319KN \quad (1)$$

Βρίσκουμε τη ροπή αντοχής του υποστυλώματος:

$$v_d = \frac{N_{sd}}{b \cdot h \cdot f_{cd}} = \frac{180 \cdot 1,5}{300 \cdot 300 \cdot 25,6} = 0,117 \quad (2)$$

$$\omega_{tot} = \frac{A_s(4\Phi 24) \cdot f_{yd}}{b \cdot h \cdot f_{cd}} = \frac{1809}{300 \cdot 300} \cdot \frac{532 \cdot 1,5}{25,6 \cdot 1,15} = 0,54 \quad (3)$$

$$\frac{d_1}{h} = \frac{47}{300} = 0,16 \quad (4)$$

$$d_1 = c + \Phi_h + \frac{\Phi_L}{2} = 25 + 10 + 12 = 47mm \quad (5)$$

Από το σχήμα 4.12 σελίδας 202 του βιβλίου «Μαθήματα οπλισμένου σκυροδέματος, Μέρος 1» προκύπτει ότι

$$\mu_{Rd} = 0,24 \quad (6)$$

Άρα η ροπή αντοχής του υποστυλώματος

$$M_{Rd} = \mu_{Rd} \cdot b \cdot h^2 \cdot f_{cd} = 0,24 \cdot 0,300 \cdot 0,300^2 \cdot \frac{25600}{1,5} = 111KNm \quad (7)$$

Το άθροισμα των ροπών αντοχής του υποστυλώματος είναι:

$$\Sigma M_{c,Rd} = 2 \cdot M_{Rd} = 2 \cdot 111 = 222KNm \quad (8)$$

Τελικά προκύπτει ότι:

$$\Sigma M_{Rb} > \Sigma M_{Rc} \quad (9)$$

Από παράγραφο 7.2.5.α.ii. του ΚΑΝΕΠΕ και με την υπόθεση ότι

$$g + \psi \cdot q = 20KN / m \quad (10) \quad \text{στην δοκό, έχουμε ότι:}$$

$$V(x) = (g + \psi q) \cdot \left(\frac{L_{bn}}{2} - x\right) \quad (11)$$

$V_{g+\psi q} = 20 \cdot 1,65 = 33KN \quad (12)$  , τέμνουσα λόγω κατακορύφων φορτίων στην παρειά της δοκού στον κόμβο

$$L_{bn} = 1,65 \cdot 2 = 3,3m \quad (13) \quad , \text{καθαρό μήκος της δοκού}$$

$$L_b = 3,3 + 0,3 = 3,6m \quad (14) \quad , \text{θεωρητικό μήκος δοκού}$$

Η κατακόρυφη τέμνουσα στον κόμβο που εισάγεται από το υποστυλώμα δίνεται από τον τύπο (σχέση 10 ΚΑΝΕΠΕ):

$$V_{jv} = \Sigma M_{yc} \left( \frac{1}{z_c} - \frac{1}{L_b} \cdot \frac{h_{st}}{h_{st,n}} \right) + \frac{1}{2} \left[ [V_{g+\psi q,b}]_l - [V_{g+\psi q,b}]_r \right] \Leftrightarrow (15)$$

$$V_{jv} = 222 \cdot \left( \frac{1}{0,231} - \frac{1}{3,6} \cdot \frac{2,65}{2,20} \right) + \frac{1}{2} \cdot 33 = 904KN$$

$$\frac{h_{st}}{2} = \frac{2,65}{2} \Leftrightarrow h_{st} = 2,20m \quad (16) \quad , \text{το θεωρητικό ύψος ορόφου}$$

$$h_{st,n} = 2,65 - 0,45 = 2,20m \quad (17) \quad , \text{το καθαρό ύψος ορόφου}$$

Από την παράγραφο 8.3.2. του ΚΑΝΕΠΕ (σχέση 8.13) έχουμε ότι η οριζόντια τέμνουσα που εισάγει η δοκός στον κόμβο είναι:

$$V_{jh} = V_{jv} \cdot \frac{h_c}{h_b} = 904 \text{KN} \cdot \frac{300 \text{mm}}{450 \text{mm}} = 603 \text{KN} \quad (18)$$

Για την ενίσχυση του κόμβου με υφάσματα από ΙΟΠ, το πάχος του απαιτούμενου υφάσματος με ίνες παράλληλες προς τον άξονα της δοκού προσδιορίζεται από τη σχέση 8.24 της παραγράφου 8.3.2.3. του ΚΑΝΕΠΕ

$$t_{jh} = \frac{V_{jh}}{h_b \cdot \sigma_{jd}} = \frac{603}{450 \cdot 2,6} = 0,52 \text{mm} \quad (19)$$

Επομένως οι στρώσεις υφάσματος που απαιτούνται είναι:

$$\frac{0,52}{0,117} = 4,5 \quad (20)$$

Για την ενίσχυση του κόμβου με ΙΟΠ, το πάχος του απαιτούμενου υφάσματος με ίνες παράλληλες προς τον άξονα του υποστυλώματος δίνεται από τη σχέση 8.24 της παραγράφου 8.3.2.3. του ΚΑΝΕΠΕ

$$t_{jv} = \frac{V_{jv}}{h_c \sigma_{jd}} = \frac{904}{300 \cdot 2,6} = 1,16 \text{mm} \quad (21)$$

Επομένως οι στρώσεις υφάσματος που απαιτούνται είναι:

$$\frac{1,16}{0,117} = 10 \quad (22)$$

Όπου από παράγραφο 8.2.2.2.(iv) και σχέση 8.14 του ΚΑΝΕΠΕ βρίσκουμε:

$$\sigma_{jd} = \frac{1}{\gamma_m} \cdot f_{jk} = \frac{1}{1,2} \cdot 3120 = 2600 \text{MPa} \quad (23) \quad , \text{ θεωρώντας ότι έχουμε αστοχία του ίδιου του}$$

υλικού ενίσχυσης [6].

### 3.7.ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΚΑΝΕΠΕ ΜΕ ΕΚΕΙΝΑ ΤΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ

Παρατηρούμε ότι ο ΚΑΝΕΠΕ προτείνει την ενίσχυση του κόμβου με περισσότερες στρώσεις ΙΟΠ και κατά τη διεύθυνση της δοκού και κατά τη διεύθυνση του υποστυλώματος, γεγονός που μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η χρήση του ΚΑΝΕΠΕ δίνει πιο συντηρητικά και επομένως πιο ασφαλή αποτελέσματα.

## 4.ΜΕΛΕΤΗ ΔΕΥΤΕΡΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ

Ο τίτλος του δεύτερου πειράματος είναι: «Μία καινοτόμος μέθοδος για σεισμική ενίσχυση συνδέσεων οπλισμένου σκυροδέματος δοκού- υποστυλώματος με CFRP» [5].

### 4.1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Βλάβες που προκλήθηκαν από σεισμό τα προηγούμενα έτη, έδειξαν ότι μερικά παλιότερα κτίσματα οπλισμένου σκυροδέματος βρέθηκαν να έχουν σοβαρές κατασκευαστικές ελλείψεις. Αυτές οι ελλείψεις είναι κυρίως μια συνέπεια της έλλειψης κατάλληλου ικανοτικού σχεδιασμού και/ή της έλλειψης επαρκούς οπλισμού. Οι κόμβοι δοκού- υποστυλώματος είναι ένα από τα κύρια συστατικά για τη μεταφορά φορτίου σε πλαισιωτές κατασκευές οπλισμένου σκυροδέματος. Η εύθραυστη διατμητική αστοχία των κόμβων δοκού- υποστυλώματος θα μπορούσε να οδηγήσει στην ολική κατάρρευση των κατασκευών. Πρόσφατα έχουν γίνει πολλές μελέτες πάνω στην σεισμική αξιολόγηση και τον ανασχεδιασμό των υφιστάμενων ελατωματικών συνδέσεων. Οι περισσότεροι από τους προτεινόμενους τρόπους ενίσχυσης έχουν πολύ περιορισμένη εφαρμογή, είτε εξαιτίας της έλλειψης των στοιχείων του δαπέδου ή των αρχιτεκτονικών περιορισμών.

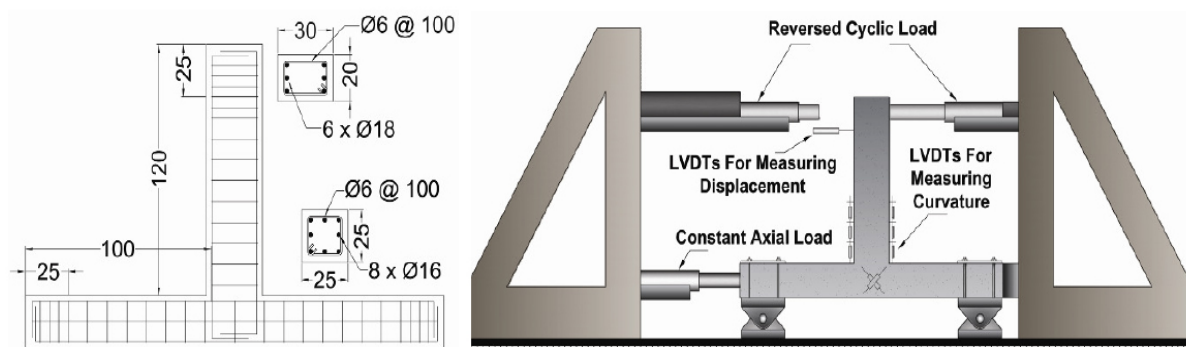
Σε αυτήν την συμβολή θα μελετηθεί η πειραματική επίδραση του CFRP στην ενίσχυση των δύο διαστάσεων σύνδεσης δοκού- υποστυλώματος μορφής T οπλισμένου σκυροδέματος.

Οι μέθοδοι ενίσχυσης που χρησιμοποιούνται σε αυτήν την έκθεση είναι εφικτές και αποτελεσματικές επίσης, για τριών διαστάσεων εσωτερικές και εξωτερικές συνδέσεις [5].

## 4.2. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΉ ΜΕΛΕΤΗ

### 4.2.1. ΛΕΠΤΟΜΕΡΕΙΕΣ ΔΕΙΓΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΟΡΓΑΝΩΝ ΕΛΕΓΧΟΥ

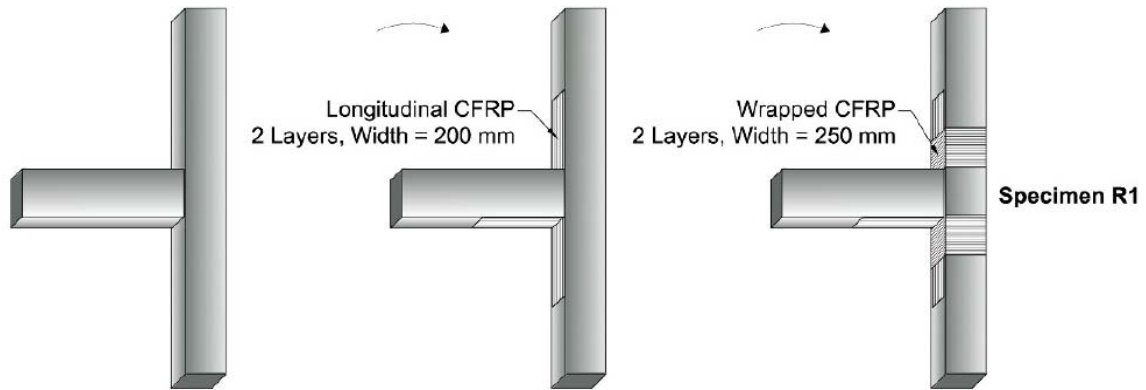
Κατασκευάστηκαν τέσσερα όμοια δείγματα δοκιμών, με τη χρήση σκυροδέματος συνήθους βάρους και παραμορφωμένου οπλισμού. Επιλέχθηκαν κυλινδρικά δοκίμια σκυροδέματος και για τα τέσσερα δείγματα των οποίων η θλιπτική αντοχή 28 ημερών βρέθηκε ότι είναι 25MPa. Τάσεις διαρροής του διαμήκους και του εγκάρσιου οπλισμού καθορίστηκαν από μονοαξονική δοκιμή ότι είναι 400 και 300 MPa αντίστοιχα. Το μέτρο ελαστικότητας των χαλύβδινων ράβδων ( $E_s$ ) είναι 210GPa. Το CFRP που χρησιμοποιήθηκε στην πειραματική έρευνα είχε πάχος ίνας 0,176 mm με 240GPa μέτρο ελαστικότητας. Η εγκατάσταση των δοκιμών και οι λεπτομέρειες των δειγμάτων παρουσιάζονται στην εικόνα 1.



Εικόνα 1: Εγκατάσταση της δοκιμής και λεπτομέρειες των δειγμάτων [5]

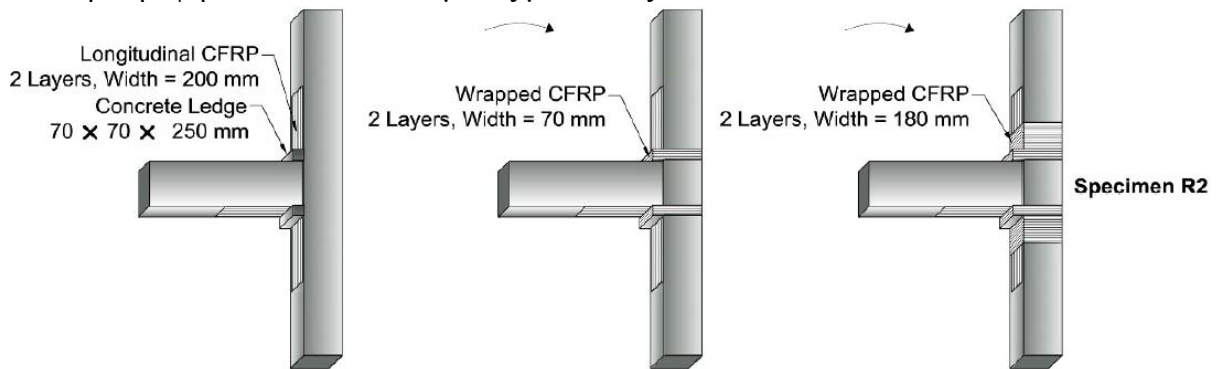
Όπως φαίνεται στην εικόνα 1 όλα τα δείγματα είχαν λιγότερο εγκάρσιο οπλισμό υποστυλώματος από ότι απαιτείται από τους αντισεισμικούς κανονισμούς για να παρουσιάσουν έτσι τους παλιότερους κατασκευασμένους μη πλάστιμους κόμβους. Όλες οι συνδέσεις δοκιμάστηκαν σε θέσεις με γωνία 90 μοίρες από τις αρχικές τους θέσεις. Εφαρμόστηκε σταθερό αξονικό φορτίο στη οριζόντια διεύθυνση της κορυφής του υποστυλώματος. Το αξονικό φορτίο επιλέχθηκε να είναι  $0,2 A_g f_c$  που είναι ίσο με 312,5 KN. Εφαρμόστηκε ανακυκλιζόμενη φόρτιση στο άκρο των δοκών από δύο υδραυλικούς γρύλλους και μετά έγινε έλεγχος της μετατόπισης. Η αύξηση του φορτίου επιλέχθηκε 1 mm πριν τη μετατόπιση διαρροής. Μετά τη διαρροή το βήμα αύξησης ήταν 2 mm. Τρεις κύκλοι φόρτισης εφαρμόστηκαν σε κάθε βήμα φόρτισης. Τα βήματα φόρτισης συνεχίστηκαν μέχρις ότου δεν λάμβανε χώρα καμία άλλη αστοχία. Το δείγμα C ήταν δείγμα ελέγχου. Οι άλλες συνδέσεις ενισχύθηκαν με διαφορετικές μεθόδους, όπως περιγράφονται παρακάτω, και παρουσιάζονται στην εικόνα 1.

Η σύνδεση R1 ενισχύθηκε με δύο στρώσεις CFRP που εκτεινόταν από τη δοκό στο υποστυλώμα και στις δύο πλευρές και με δύο στρώσεις CFRP και στα δύο κάτω τμήματα του υποστυλώματος με πλάτος 250 mm [5].



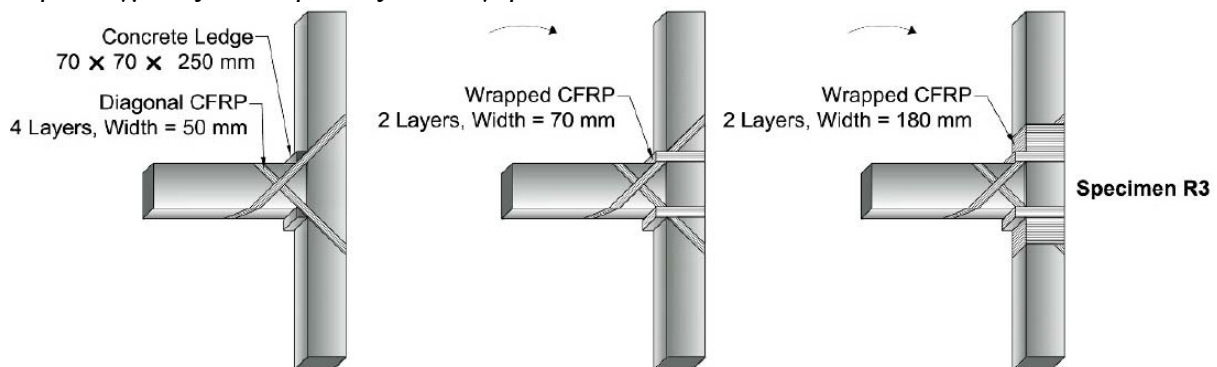
Εικόνα 2α: Λεπτομέρειες ενίσχυσης για την σύνδεση R1 [5]

Η σύνδεση R2 είναι παρόμοια με την R1 με επιπρόσθετη προεξοχή σκυροδέματος στην εσωτερική όψη δοκού- υποστύλωματος με πλάτος 70 mm.



Εικόνα 2β: Λεπτομέρειες ενίσχυσης για την σύνδεση R2 [5]

Το δείγμα R3 επιλέχθηκε με προεξοχή σκυροδέματος και τρεις στρώσεις διαγώνιων υφασμάτων CFRP με 50mm πλάτος, που εκτείνονταν από τη δοκό στο υποστύλωμα με περιτυλιγμένες δύο στρώσεις CFRP γύρω από αυτά.



Εικόνα 2γ: Λεπτομέρειες ενίσχυσης για την σύνδεση R3 [5]

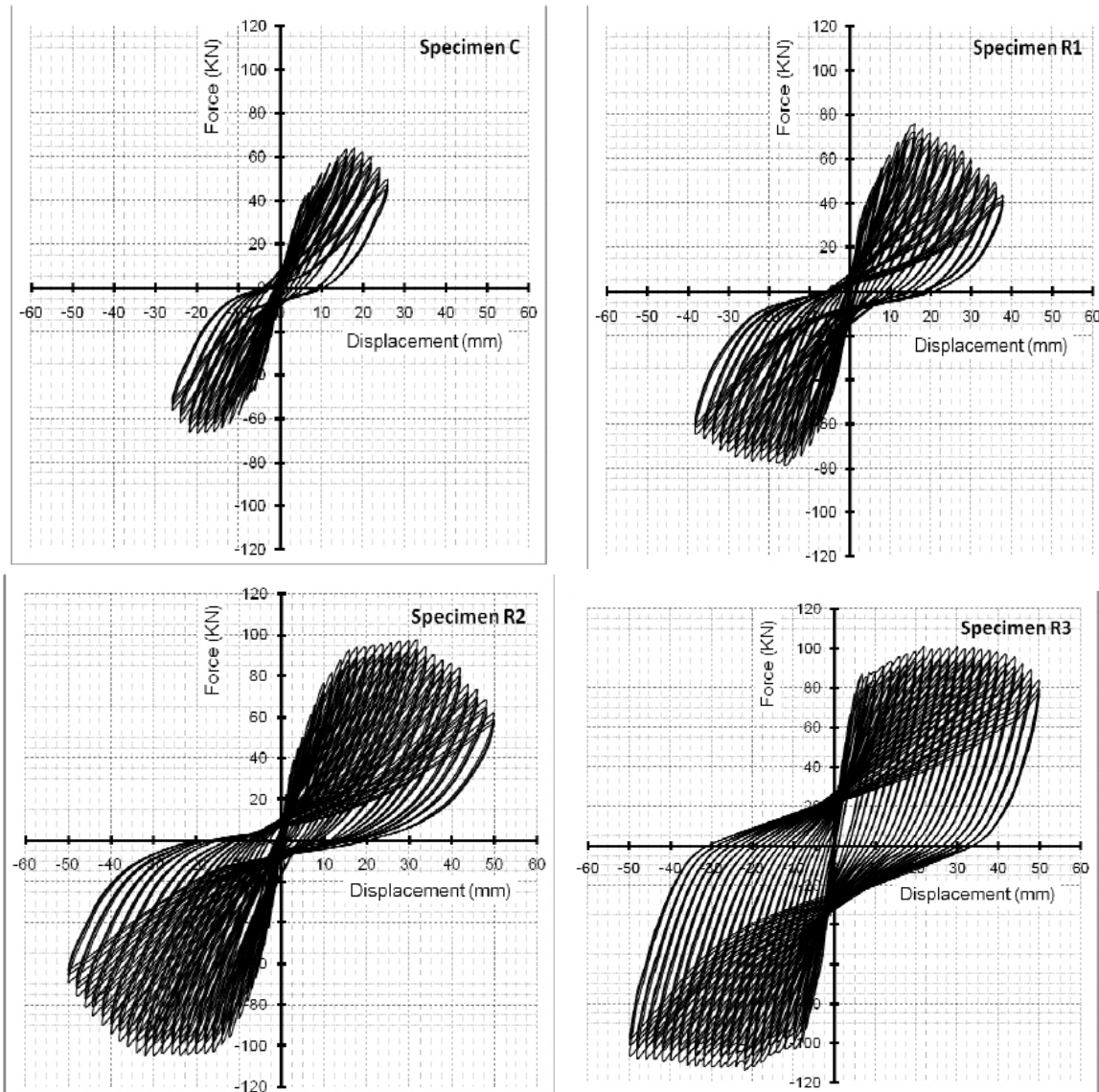
Όλα τα δείγματα είχαν μετρητές παραμόρφωσης και στον χαλύβδινο οπλισμό, και στο σκυρόδεμα, και στο FRP. Η μετατόπιση στην κορυφή της δοκού και η κυρτότητα στην περιοχή της σύνδεσης μετρήθηκαν με τη χρήση γραμμικά μεταβλητών μετρητών μετατόπισης. Δύο ακόμα διαγώνιοι μετρητές χρησιμοποιήθηκαν στην περιοχή της σύνδεσης για να μετρήσουν τη διατμητική παραμόρφωση κατά τη διάρκεια της δοκιμής [5].

#### 4.2.2. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΔΟΚΙΜΗΣ

Η εικόνα 3 παρουσιάζει τις υστερητικές καμπύλες δύναμης- μετατόπισης των εξεταζόμενων συνδέσεων. Από την εικόνα 3 το αποτέλεσμα της συμπληρωματικής ενίσχυσης με υλικά CFRP είναι ξεκάθαρα εμφανές, όταν τα ενισχυμένα δείγματα συγκρίνονται με τα αντίστοιχα του ελέγχου. Φαίνεται εμφανής αύξηση της τελικής αντοχής και της πλαστιμότητας των ενισχυμένων συνδέσεων. Ο διαμήκης οπλισμός του δείγματος ελέγχου διέρρευσε σε 6,5mm της κατακόρυφης εκτροπής. Μετά το άνοιγμα καμπτικών ρωγμών στα περαιτέρω βήματα, στο άκρο της δοκού οι ρωγμές αυτές μεταδόθηκαν σε διαγώνια διεύθυνση και έπειτα μετά από μία μείωση της διάτμησης, ο τρόπος αστοχίας ήταν διάτμηση- κάμψη σε 26mm εκτροπή. Η μέγιστη πλευρική δύναμη της σύνδεσης ήταν 64KN που αντιστοιχούσαν σε 17mm μετατόπισης. Στις υστερητικές καμπύλες η μεταβολή της πλαστιμότητας καθορίζεται ως ο λόγος της μετατόπισης που αφορά το 80% της πλευρικής δύναμης προς τη μετατόπιση διαρροής (μδ). Αυτός ο δείκτης πλαστιμότητας για το δείγμα ελέγχου ήταν 3,19 σύμφωνα με την υστερητική καμπύλη.

Το μέγιστο πλευρικό φορτίο της σύνδεσης R1 ήταν 72KN σε μετατόπιση ίση με 16mm. Ο δείκτης πλαστιμότητας της R1 ήταν 3,91. Το μέγιστο πλευρικό φορτίο και η πλαστιμότητα της σύνδεσης R1 είναι σχεδόν 12 και 22% αντίστοιχα υψηλότερα από εκείνα του δείγματος ελέγχου. Ο τρόπος αστοχίας αυτού του δείγματος ήταν καμπτικός. Παρά το γεγονός ότι η σύνδεση δοκού –υποστυλώματος με αυτήν την μέθοδο ενίσχυσης εμποδίζει το σχηματισμό διαγώνιων ρωγμών που οδήγησαν στην καμπτική αστοχία της R1, το διαμήκες CFRP δεν μπορούσε να αυξήσει την καμπτική ικανότητα της σύνδεσης σημαντικά. Ενώ το διαμήκες CFRP άρχισε να δουλεύει ως οπλισμός, μόνο οι τελευταίες ίνες της περιτύλιξης FRP μπόρεσαν να αγκυρώσουν το διαμήκες CFRP, γεγονός που προκάλεσε τη ρηγμάτωση της περιτύλιξης CFRP κατά 5mm στο κάτω μέρος. Επιπλέον, το διαμήκες CFRP αποκολλήθηκε στην εσωτερική όψη δοκού- υποστυλώματος. Αν και αυτή είναι μία από τις πιο γνωστές μεθόδους ενίσχυσης, φαίνεται ότι δεν είναι αποδοτική.

Στο δείγμα R2 η προεξοχή του σκυροδέματος προκαλεί την ανάγκη χρησιμοποίησης FRP μεγαλύτερου πλάτους, που χρησιμοποιείται για την αγκύρωση του CFRP. Η τελική ικανότητα φορτίου και ο δείκτης πλαστιμότητας της R2 είναι 97KN και 4,96 που είναι 1,5 φορές μεγαλύτερα από τα αντίστοιχα μεγέθη του δείγματος ελέγχου. Το φαινόμενο που παρατηρήθηκε στο τέλος της δοκιμής ήταν διατμητική αστοχία μέσα στην περιοχή της σύνδεσης. Δεν παρατηρήθηκε ρηγμάτωση του FRP ή αποκόλληση στο τέλος της δοκιμής. [5]



Εικόνα 3: Υστερητικές καμπύλες φορτίου- μετατόπισης[5]

Έτσι η προεξοχή του σκυροδέματος φαίνεται να είναι περισσότερο ωφέλιμη σε σύγκριση με τον χαλύβδινο κλωβό ως αγκύρωση. Ο τρόπος αγκύρωσης με χαλύβδινο κλωβό μερικές φορές οδηγεί στην συγκέντρωση τάσεων και στην ρηγμάτωση του FRP κοντά στην αγκύρωση. Η πιθανότητα διατμητικής αστοχίας στην περιοχή της σύνδεσης μεγαλώνει με την αύξηση του ζεύγους δυνάμεων του διαμήκους οπλισμού της δοκού. Συνεπώς καμπτική ενίσχυση των συνδέσεων ίσως επιταχύνει τη διατμητική αστοχία της σύνδεσης. Λαμβάνοντας υπόψη τα στοιχεία δαπέδου και τους αρχιτεκτονικούς περιορισμούς, δεν είναι εφικτή η περιτύλιξη της περιοχής της σύνδεσης για να αποφευχθεί η διατμητική αστοχία σε αυτήν.

Μια καινοτόμος μέθοδος ενίσχυσης που χρησιμοποιήθηκε για το σκοπό αυτό, κρατάει μακριά τις δυνάμεις στην περιοχή του κόμβου δοκού- υποστυλώματος και τις μεταφέρει κατευθείαν από τη δοκό στο υποστύλωμα και αντίστροφα. Αυτή η τεχνική εφαρμόστηκε σε αυτήν την έκθεση στο δείγμα R3. Η σύνδεση R3 ενισχύθηκε με προεξοχές σκυροδέματος και διαγώνιες λωρίδες FRP που εκτείνονταν από τη δοκό στο υποστύλωμα. Ο μέσος όρος του μέγιστου φορτίου αυτής της σύνδεσης και για τις δύο διευθύνσεις φόρτισης ήταν 106kN που είναι 65% υψηλότερο από εκείνο του δείγματος ελέγχου. Ο δείκτης πλαστιμότητας του R3 είναι 9,1, δηλαδή σχεδόν 2,85 φορές μεγαλύτερος από εκείνο του δείγματος ελέγχου.



Μείωση της διατμητικής παραμόρφωσης που μετρήθηκε από γραμμικά μεταβλητούς μετρητές παραμόρφωσης στην περιοχή του κόμβου αυτού του δείγματος σε σύγκριση με το προηγούμενο, αποδεικνύει επιτυχή μεταβολή στην πορεία μεταφοράς φορτίου από τη δοκό στο υποστύλωμα. Ο τρόπος αστοχίας αυτού του δείγματος ήταν ρηγμάτωση των διαγωνίων CFRP [5].

#### 4.3.ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

α) Η ροπή αντοχής και η πλαστιμότητα των συνδέσεων δοκού- υποστυλώματος, που ενισχύθηκαν με ίνες CFRP, είναι υψηλότερα σε σύγκριση με εκείνα των δειγμάτων ελέγχου.

β) Η μέθοδος ενίσχυσης που χρησιμοποιήθηκε για την R1 φαίνεται ότι είναι λιγότερο αποτελεσματική εξαιτίας της ανικανότητας του περιτυλιγμένου FRP να αγκυρώσει τη διαμήκη στρώση CFRP αποτελεσματικά.

γ) Η προεξοχή του σκυροδέματος στην εσωτερική όψη δοκού- υποστυλώματος είναι αποτελεσματική στο να αγκυρώσει το διαμήκες CFRP και στο να αυξήσει τις διαστάσεις του κόμβου οδηγώντας σε ύξηση της ροπής αντοχής.

δ) Με τη χρήση διαγώνιων λωρίδων CFRP, πολύ μεγάλα φορτία μπορούσαν να μεταφερθούν από τη δοκό στο υποστύλωμα και αντίστροφα. Τα αποτελέσματα του πειράματος δείχνουν ότι αυτή είναι μία πολύ αποτελεσματική μέθοδος για την ενίσχυση συνδέσεων έναντι κάμψης και διάτμησης ακόμα και για τρισδιάστατες εσωτερικές συνδέσεις.

#### 4.4.ΕΠΙΛΥΣΗ ΤΟΥ ΚΟΜΒΟΥ ΤΟΥ ΔΕΥΤΕΡΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΟΝ ΚΑΝΕΠΕ

Η ροπή αντοχής της δοκού είναι:

$$M_{Rb} = A_s (3\Phi 18) \cdot f_{yd} \cdot z = 763 \text{mm}^2 \cdot \frac{400 \text{ N}}{1,15 \text{ mm}^2} \cdot 0,220 \text{m} \cdot 10^{-3} = 58,4 \text{KN} \quad (24)$$

Όπου ο μοχλοβραχίονας είναι:

$$z = h - 2c - \Phi_L - 2\Phi_h = 300 - 2 \cdot 25 - 18 - 2 \cdot 6 = 220 \text{mm} \quad (25)$$

Η ροπή αντοχής του υποστυλώματος υπολογίζεται όπως παρακάτω:

$$v_d = \frac{N_{sd}}{b \cdot h \cdot f_{cd}} = \frac{312,5}{250 \cdot 250 \cdot 25} \cdot 10^3 = 0,2 \quad (26)$$

$$\omega_{tot} = \frac{A_s (6\Phi 16)}{b \cdot h} \cdot \frac{f_{yd}}{f_{cd}} = \frac{1206}{250 \cdot 250} \cdot \frac{400 \cdot 1,5}{1,15 \cdot 25} = 0,4 \quad (27)$$

$$d_1 = c + \Phi_h + \frac{\Phi_L}{2} = 25 + 6 + \frac{16}{2} = 39 \quad (28)$$

$$\frac{d_1}{h} = \frac{39}{250} = 0,156 \quad (29)$$

Από το σχήμα 4.11 σελίδας 198 του βιβλίου «Μαθήματα οπλισμένου σκυροδέματος, Μέρος 1» βρίσκουμε:

$$\mu_d = 0,22 \quad (30)$$

$$M_d = \mu_d \cdot b \cdot h^2 \cdot f_{cd} = 0,22 \cdot 0,250 \cdot 0,250^2 \cdot \frac{25000}{1,5} = 57,3 \text{KNm} \quad (31)$$

$$\Sigma M_{Rc} = 2 \cdot 57,3 = 114,6 \text{KNm} \quad (32)$$

$$\Sigma M_{Rc} > \Sigma M_{Rb} \quad (33)$$

Από την παράγραφο 7.2.5.α.ι του ΚΑΝΕΠΕ (σχέση 10) έχουμε ότι η οριζόντια τέμνουσα που εισάγει η δοκός στον κόμβο είναι:

$$V_{jh} = \Sigma M_{yb} \left( \frac{1}{z_b} - \frac{1}{h_{st}} \cdot \frac{L_b}{L_{bn}} \right) = 58,4 \cdot \left( \frac{1}{0,220} - \frac{1}{2,3} \cdot \frac{2,65}{2,40} \right) = 237 \text{KN} \quad (34)$$

$$\frac{L_{bn}}{2} = 1,20 \Leftrightarrow L_{bn} = 2,40 \text{m} \quad (35) \quad , \text{ το καθαρό μήκος της δοκού}$$

$$L_b = 2,40 + 0,25 = 2,65 \text{m} \quad (36), \text{ το θεωρητικό μήκος της δοκού}$$

$$\frac{h_{st}}{2} = 1,15 \Leftrightarrow h_{st} = 2,30 \text{m} \quad (37), \text{ το θεωρητικό ύψος του ορόφου}$$

Η τέμνουσα που εισάγει το υποστύλωμα στον κόμβο δίνεται στην παράγραφο 8.3.2. από τη σχέση 8.12 και είναι:

$$V_{jv} = V_{jh} \cdot \frac{h_b}{h_c} = 237 \cdot \frac{300}{250} = 285 \text{KN} \quad (38)$$

Για την ενίσχυση του κόμβου με υφάσματα από ΙΟΠ, το πάχος του απαιτούμενου υφάσματος με ίνες παράλληλες προς τον άξονα της δοκού προσδιορίζεται από τη σχέση 8.24 της παραγράφου 8.3.2.3. του ΚΑΝΕΠΕ

$$t_{jh} = \frac{V_{jh}}{h_b \cdot \sigma_{jd}} = \frac{237}{300 \cdot 1313} = 0,6 \text{mm} \quad (39)$$

Επομένως οι στρώσεις υφάσματος που απαιτούνται είναι:

$$\frac{0,6}{0,176} = 3,5 \quad (40)$$

Για την ενίσχυση του κόμβου με ΙΟΠ, το πάχος του απαιτούμενου υφάσματος με ίνες παράλληλες προς τον άξονα του υποστυλώματος δίνεται από τη σχέση 8.24 της παραγράφου 8.3.2.3. του ΚΑΝΕΠΕ

$$t_{jv} = \frac{V_{jv}}{h_c \cdot \sigma_{jd}} = \frac{285}{250 \cdot 1313} = 0,87 \text{mm} \quad (41)$$

Επομένως οι στρώσεις υφάσματος που απαιτούνται είναι:

$$\frac{0,87}{0,176} = 5 \quad (42)$$

Όπου από παράγραφο 8.2.2.2.(iv) και σχέση 8.14 του ΚΑΝΕΠΕ βρίσκουμε

$$\sigma_{jd} = \frac{1}{\gamma_m} \cdot f_{jk} = \frac{1}{1,2} \cdot 1575 = 1313 \text{MPa} \quad (43)$$

$$f_{jk} = E_j \cdot \varepsilon_{j,crit} = 210 \cdot 10^3 \cdot 0,0075 = 1575 \text{MPa} \quad (44)$$

$$\varepsilon_{j,crit} = k_v \cdot \varepsilon_{j,max} = \frac{1}{2} \cdot 1,5\% = 0,0075 \quad (45) \quad [6]$$

#### **4.5.ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΚΑΝΕΠΕ ΜΕ ΕΚΕΙΝΑ ΤΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ**

Παρατηρούμε ότι ο ΚΑΝΕΠΕ προτείνει την ενίσχυση του κόμβου με περισσότερες στρώσεις ΙΟΠ και κατά τη διεύθυνση της δοκού και κατά τη διεύθυνση του υποστυλώματος, γεγονός που μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η χρήση του ΚΑΝΕΠΕ δίνει πιο συντηρητικά και επομένως πιο ασφαλή αποτελέσματα. Ωστόσο, αν αναλογιστεί κανείς τα πολύ αξιόλογα αποτελέσματα του παραπάνω πειράματος όπου οι κόμβοι ενισχύθηκαν με αισθητά λιγότερο υλικό από τα αναφερόμενα του ΚΑΝΕΠΕ, θα μπορούσε να καταλήξει στο συμπέρασμα ότι ίσως είναι υπερβολικά συντηρητικός.

#### **5.ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

[1] Πενέλης Γ.Γ., Κάππος Α.Ι., « Αντισεισμικές Κατασκευές Από Οπλισμένο Σκυρόδεμα», Εκδόσεις Ζήτη 1990.

[2] Στέφανος Η. Δρίτσος, «Ενισχύσεις- Επισκευές Κατασκευών Οπλισμένου Σκυροδέματος».

[3] Θ.Χ.Τριανταφύλλου, «Ενισχύσεις κατασκευών με σύνθετα υλικά», Ημερίδα ΤΕΕ «Ενίσχυση κατασκευών με σύνθετα υλικά», 18 Μαΐου 2000.

[4] R. Shrestha<sup>1</sup>, S.T. Smith<sup>2</sup> & B. Samali<sup>1</sup>, Fourth International Conference on FRP Composites in Civil Engineering (CICE2008) 22-24 July 2008, Zurich, Switzerland, “Effectiveness of strengthening RC beam-column connections in shear with vertical FRP strips”, 1 Centre for Built Infrastructure Research, University of Technology Sydney, NSW, Australia, 2 Department of Civil Engineering, The University of Hong Kong, Pokfulam Road, Hong Kong, China.

[5] Shahab MEHDIZAD TALEIE, Ata GOLKARI , Gholamreza GHODRATI AMIRI FRPRCS-9 Sydney, Australia, Monday 13 – Wednesday 15 July 2009, “ AN INOVATIVE METHOD FOR SEISMIC STRENGTHENING OF RC BEAM-COLUMN CONNECTIONS WITH CFRP”, 1 Payon Rehabilitation Group, Tehran, Iran , 2 Department of Civil Engineering, IUST, Tehran, Iran.

[6]www.oasp.gr, Τελικό Σχέδιο ΚΑΝΕΠΕ.

