

## ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΚΟΜΒΩΝ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΜΕ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ (FRP)

ΤΣΙΠΗΡΑ ΙΩΑΝΝΑ

### Περίληψη

Υπενθυμίζοντας ότι οι βλάβες στους κόμβους δοκών-υποστυλωμάτων είναι από τις πλέον κρίσιμες για την ασφάλεια του φορέα, εξετάζονται κυρίως πειραματικές έρευνες που αφορούν τη χρήση των επικολητών φύλλων από ινοπλισμένα πολυμερή. Οι υφιστάμενες πειραματικές και αναλυτικές έρευνες συγκλίνουν στο γεγονός ότι η ενίσχυση με FRP των εξωτερικών – όχι σωστά διαστασιοποιημένων – κόμβων συνεπάγεται την αύξηση της αντοχής, της διάχυσης ενέργειας και της ακαμψίας τους. Παρατίθενται επιπλέον χρήσιμα συμπεράσματα των παραπάνω εργασιών καθώς και σύντομη περιγραφή των δοκιμών που χρησιμοποιήθηκαν και της φόρτισης που τους εφαρμόστηκε. Με βάση τα τελευταία είναι δυνατή η αξιολόγηση των συμπερασμάτων.

### 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

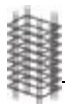
Σήμερα είναι γενικά αποδεκτό ότι οι κόμβοι δοκών-υποστυλωμάτων μπορούν να αποτελούν κρίσιμες περιοχές σε πλαίσια οπλισμένου σκυροδέματος που έχουν σχεδιαστεί για ανελαστική απόκριση σε σφοδρή σεισμική προσβολή. Ως επακόλουθο των σεισμικών ροπών υποστυλωμάτων με αντίθετα πρόσημα αμέσως πάνω και κάτω από τον κόμβο, και παρόμοια αναστροφή ροπών δοκού εκατέρωθεν του κόμβου, η περιοχή του κόμβου υποβάλλεται σε οριζόντιες και κατακόρυφες τέμνουσες, που το μέγεθός τους τυπικά είναι πολλές φορές μεγαλύτερο απ' ό,τι στις γειτονικές δοκούς και υποστυλώματα.. Αν οι κόμβοι δε σχεδιαστούν κατάλληλα, μπορεί να προκύψει διατμητική αστοχία. Η αναστροφή της ροπής εκατέρωθεν του κόμβου σημαίνει επίσης ότι ο οπλισμός δοκού απαιτείται να είναι σε θλίψη από τη μία πλευρά του κόμβου και σε εφελκυστική διαρροή από την άλλη. Οι υψηλές τάσεις συνάφειας που απαιτούνται για να διατηρήσουν αυτή την κλίση μεταβολής της δύναμης μέσα από τον κόμβο μπορεί να προκαλέσουν αστοχία συνάφειας και αντίστοιχη αποδιοργάνωση της ικανοτικής ροπής, ακολουθούμενη από υπερβολική σχετική μετάθεση κόμβων [ 1 ].

Οι τεχνικές επισκευής ή ενίσχυσης κόμβων, που εφαρμόζονται ανάλογα με το βαθμό βλάβης είναι οι εξής:

- α . Επισκευή με ρητινένες
- β . Τοπική ενίσχυση με μερική καθαίρεση και αποκατάσταση [ 2 ]
- γ . Ενίσχυση του κόμβου με μανδύες οπλισμένου σκυροδέματος [ 2 ] [ 8 ]
- δ . Τεχνική των χιαστί κολλάρων [ 8 ]

Οι ανωτέρω τρόποι επισκευής - ενίσχυσης αποτελούν παραδοσιακές μεθόδους επέμβασης. Μία νέα τεχνική ενίσχυσης κατασκευών βασίζεται στην επικόλληση φύλλων από ινοπλισμένα πολυμερή, σύνθετα υλικά με τη βοήθεια εποξειδικών ρητίνων, σε στοιχεία οπλισμένου σκυροδέματος. Τα υλικά αυτά τα οποία αποτελούνται από ίνες άνθρακα, γυαλιού ή αραμιδής σε πολυμερή μήτρα, χαρακτηρίζονται από πολύ υψηλή εφελκυστική αντοχή, μικρό βάρος και εξαιρετική ανθεκτικότητα σε διάρκεια. Παρόλο που η συμπεριφορά τους είναι ουσιαστικά γραμμικά ελαστική μέχρι τη θραύση, τα σύνθετα υλικά χαρακτηρίζονται από μεγάλη ικανότητα παραμόρφωσης, η οποία ανάλογα με τον τύπο των ινών, φθάνει τα 1.5 – 4. % (ACI 44OR – 1996, Τριανταφύλλου 1996).

Οι μανδύες από FRP παρουσιάζουν τα εξής πλεονεκτήματα συγκριτικά με τους παραδοσιακούς μανδύες: εύκολη εφαρμογή, σύντομη ανάπτυξη πλήρων αντοχών [ 2 ], μικρό



βάρος, ανθεκτικότητα στη διάβρωση [ 4 ] και μικρό τελικό πάχος μανδύα το οποίο δε δημιουργεί αντιαισθητικές προσθήκες στο εξωτερικό του κτιρίου [ 2 ].

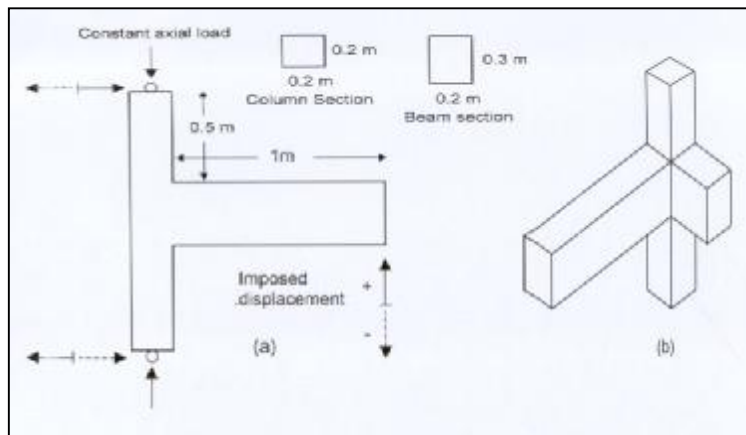
## 2. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ ΚΟΜΒΩΝ ΔΟΚΟΥ-ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΟΣ ΜΕ FRP

### 2.1 ΤΑ ΔΟΚΙΜΙΑ ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΟΝ ΕΠΙΘΥΜΗΤΟ ΤΡΟΠΟ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΤΟΥΣ & ΤΟΥΣ ΕΠΙΔΙΩΚΟΜΕΝΟΥΣ ΣΤΟΧΟΥΣ

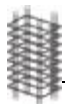
Στην εργασία των Α.Δ. ΤΩΝΟΣ & Κ.Α. ΣΤΥΛΙΑΝΙΔΗΣ κατασκευάστηκαν τρία όμοια δοκίμια-κόμβοι μορφής T- ως προς τις διαστάσεις, τον οπλισμό και το χρησιμοποιούμενο σκυρόδεμα. Για να επικεντρωθεί η αστοχία στην περιοχή του κόμβου τα δοκίμια δεν έχουν καθόλου οπλισμό συνδετήρων κόμβου, έχουν λόγο ικανοτικού σχεδιασμού  $M_r \approx 1.0 < 1.4$  και οι διατμητικές τάσεις που ασκούνται στην περιοχή του κόμβου είναι πολύ υψηλές  $\gamma = 2.1 > 1.0$ . Συνεπώς όλα τα δοκίμια αυτά εφόσον δεχθούν ισχυρή σεισμική καταπόνηση αναμένεται να αστοχήσουν στον κόμβο αφήνοντας ανέπαφες τις δοκούς. Με τα τρία δοκίμια επιδιώκεται εκτός από την κρίση της αποδοτικότητας της ενίσχυσης να δοθεί απάντηση στο πόσο αποδοτικός είναι ο μανδύας (από FRP) για τους κόμβους κατασκευών από Ο/Σ με τοιχώματα καθώς και στο πόσο αποδοτική είναι η προσεισμική ενίσχυση [ 2 ].

Πολλά περισσότερα (18) δοκίμια χρησιμοποιήθηκαν στην πειραματική έρευνα των Costas P. ANTONOPOYLOS & Thanasis C. TRIANTAFILLOU. Όλα τα δοκίμια είχαν ταυτόσημες διαστάσεις και οπλίστηκαν έτσι ώστε να αντιπροσωπεύουν κακά σχεδιασμένους εξωτερικούς κόμβους μορφής T. Δύο μόνο δοκίμια περιείχαν τσέρκια στον κόμβο, ενώ τρία από τα υπόλοιπα κατασκευάστηκαν με εγκάρσια δοκό, με σκοπό να υπολογιστεί η επίδραση του εγκιβωτισμού που προσδίδεται από εγκάρσια στοιχεία [ 3 ].

Ένα κρίσιμο σημείο είναι ότι όλα τα δοκίμια έχουν σχεδιαστεί ώστε να αστοχήσουν σε διάτμηση. Τούτο είναι απαραίτητο ζητούμενο διότι ένα από τα κύρια αντικείμενα της εργασίας είναι να υπολογίσει τη συνεισφορά των FRP στην διατμητική αντοχή των κόμβων από Ο/Σ. Επιπλέον, τα δοκίμια σχεδιάστηκαν έτσι ώστε να ερευνηθεί η επίδραση σειράς παραγόντων στην διατμητική αντοχή των κόμβων. Αυτοί οι παράγοντες εμπεριέχουν τα παρακάτω: αποτελεσματικότητα λωρίδων VS φύλλων, αριθμό λωρίδων ή αριθμό στρώσεων των φύλλων, μηχανικές αγκυρώσεις, τύπο των ινών (άνθρακα VS γυαλιού), επίπεδο του αξονικού φορτίου στο υποστύλωμα, βλάβη στον κόμβο πριν από την ενίσχυση, επίδραση της εγκάρσιας δοκού. Η διαστασιολόγηση έχει βοηθηθεί από αναλυτικό μοντέλο, το οποίο αναπτύχθηκε από τους ίδιους συγγραφείς. Η γεωμετρία των κόμβων φαίνεται στο σχήμα 1 [3].



Σχήμα 1(α) Η γεωμετρία των δοκιμίων (β) Κόμβοι με εγκάρσια δοκό [ 3 ]



Διατμητική αστοχία αναμένεται και στο δοκίμιο που αναφέρεται στην εργασία των A. GHOBARAH & A. SAID. Και τούτο διότι το τελευταίο, μορφής T (με ύψος υποστυλώματος 3000mm και διαστάσεις διατομών 250x400mm) έχει αρχικά διαστασιολογηθεί με παλαιότερους κανονισμούς, δηλ. χωρίς εγκάρσιο οπλισμό στον κόμβο. Κατά συνέπεια ο κόμβος θα αστοχήσει διατμητικά πριν εμφανιστεί πλαστική άρθρωση στη δοκό. Το ίδιο δοκίμιο ενισχύεται και τέλος προτείνεται μια μεθοδολογία σχεδιασμού ανάληψης τέμνουσας από τους μανδύες από ίνες στον κόμβο [ 4 ].

Σε μια άλλη εργασία [ 5 ] ένα διώροφο με δύο ανοίγματα πλαίσιο εμφανίζει ολίσθηση των οπλισμών των δοκών στην περιοχή του κόμβου. Η κατασκευή ενισχύεται με πολυμερή από ίνες από άνθρακα. Το paper ασχολείται με την ικανότητα των CFRP μεμβρανών ειδικότερα όσον αφορά την ολίσθηση του διαμήκους οπλισμού.

Τέλος οι C.P. PANTALIDES, C. CLYDE, C.P. LAU & L.D. REAVELEY εξετάζουν έναν τυπικό εξωτερικό κόμβο δοκού - υποστυλώματος, μορφής T, ο οποίος επιλέχθηκε από κτίριο -από Ο/Σ- χτισμένο το 1964. Τα τρία δοκίμια, δύο με συνδετήρες στον κόμβο και ένα χωρίς συγκρίνονται με έξι συνολικά δοκίμια αναφοράς (με συνδετήρες και χωρίς). Κατά συνέπεια οι συγκρίσεις των παραπάνω δοκιμών περιλαμβάνουν τη συμπεριφορά υστέρησης, διατμητικές τάσεις στον κόμβο και συντελεστές διατμητικής αντοχής όπως ορίζονται από το ACI-352 [6].

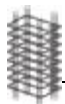
Στα δοκίμια, ο διαμήκης οπλισμός της δοκού έχει αυξηθεί για ν' αποφευχθεί η πρόωρη αποσύνθεση της δοκού, αν και η αγκύρωση αυτού του οπλισμού είναι ανεπαρκής, όπως είναι δηλ. και στον πραγματικό κόμβο του κτιρίου. Η απόφαση της αύξησης του διαμήκη οπλισμού της δοκού βασίζεται στην αντικειμενική διατύπωση παρατήρησης διατμητικής αστοχίας στον κόμβο σε μεγάλες μετακινήσεις. Το 2.47% διαμήκη οπλισμού σήμαινε ότι στον πυρήνα του κόμβου θα αναπτύσσονταν μεγάλες διατμητικές δυνάμεις ενώ τα πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν ότι δεν υπήρξε διατμητική αστοχία του κόμβου [6].

## 2.2 ΙΝΕΣ ΑΝΘΡΑΚΑ VS ΙΝΕΣ ΓΥΑΛΙΟΥ

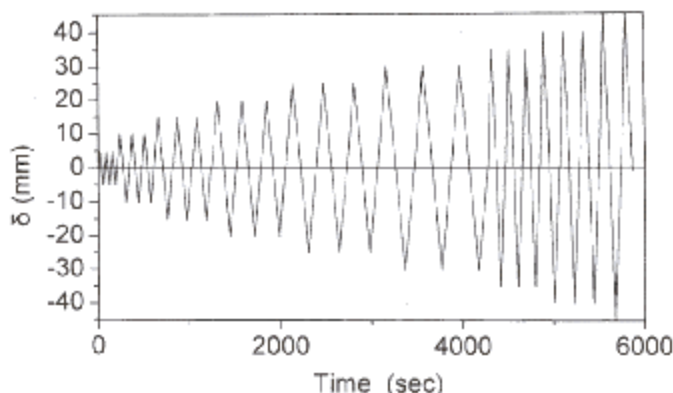
Τα ινοπλισμένα πολυμερή από άνθρακα έχουν μέτρο ελαστικότητας μόνο οριακά μικρότερο από τον χάλυβα. Λαμβάνοντας υπόψιν τα παραμορφωμένα σίδερα, ίσως να προσφέρουν πολύ καλύτερη συνάφεια κάτω από κυκλική φόρτιση [ 5 ]. Οι ίνες από άνθρακα έχουν μεγάλη αντοχή και μεγάλο μέτρο ελαστικότητας (27.579MPa). Αυτά τις κάνουν πιο κατάλληλες για την ενίσχυση κόμβου σε διάτμηση. Όμως για μικρή αύξηση της αντοχής απαιτούνται περισσότερες στρώσεις από GFRP. Επιπλέον, υπάρχουν προϊόντα από ίνες γυαλιού, τα οποία χρησιμοποιούν ίνες και στις δύο ορθογώνιες διευθύνσεις [ 4 ]. Μετά από την εφαρμογή της πειραματικής διαδικασίας σε δοκίμια, που περιείχαν ίνες από άνθρακα και γυαλί έχουμε τις ίνες από γυαλί αμυδρά πιο αποτελεσματικές σε σχέση με αυτές από άνθρακα όσον αφορά την αντοχή, αλλά πιο αποτελεσματικές όσον αφορά την απορρόφηση ενέργειας. Πιο συγκεκριμένα υπήρξε περίπου 30% αύξηση της ενέργειας στο δοκίμιο που αντιστοιχεί στον άνθρακα, ενώ σε αυτό με τις ίνες γυαλιού το παραπάνω ποσοστό είναι 40%. Πάντως, αυτά είναι τα αποτελέσματα από ένα μόλις πείραμα, οπότε είναι αναγκαία εκτενέστερη έρευνα σε αυτό το θέμα [ 3 ].

## 2.3 ΑΞΟΝΙΚΗ ΚΑΙ ΠΛΕΥΡΙΚΗ ΦΟΡΤΙΣΗ

Το αξονικό φορτίο που υποβάλλεται στο υποστύλωμα του δοκιμίου που αναφέρεται στην εργασία των GHOBARAH & SAID έχει τιμή 600 kN και αντιπροσωπεύει την



παράσταση  $0.2A_g f_c'$ , όπου  $A_g$  είναι η συνολική επιφάνεια της διατομής του υποστρώματος [ 4 ]. Πιο μικρές τιμές αξονικού φορτίου εφαρμόζονται στα δοκίμια των ANTONOPOYLOS & TRIANTAFILLOU. Σε αυτά τα πειράματα, το αξονικό φορτίο είναι σταθερό στην τιμή των 46kN για όλα τα δοκίμια πλην ενός, το οποίο παραλαμβάνει δύναμη των 115kN [ 3 ]. Σε όλες τις περιπτώσεις η αξονική φόρτιση προηγείται της πλευρικής. Το ίδιο συμβαίνει και στην πειραματική διαδικασία των PANTALIDES, CLYDE, LAU & REAVELEY. Τα αξονικά θλιπτικά φορτία είναι ίσα με  $0.1A_g f_c'$  και  $0.25A_g f_c'$  [ 6 ].



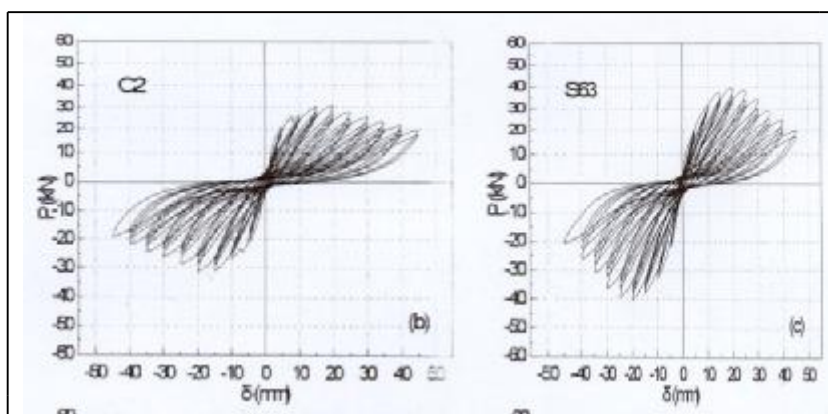
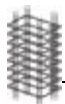
Σχήμα 2 Το ιστορικό των μετατοπίσεων (δηλ. της πλευρικής φόρτισης) [ 3 ]

Μόλις έχει εφαρμοστεί όλο το αξονικό φορτίο, τα σεισμικά πλευρικά φορτία προσομοιώνονται με την εφαρμογή εναλλασσόμενης δύναμης στο άκρο της δοκού μέσω άρθρωσης. Αυτή η δύναμη εφαρμόζεται με ψευδοστατικό κυκλικό μοντέλο, όπως φαίνεται στο σχήμα 2, χρησιμοποιώντας κινητήρα [ 3 ]. Με το ίδιο σκεπτικό οι πλευρικές σχετικές μετατοπίσεις μπορούν να φθάνουν τις τιμές 2% και 6% [ 2 ] ή τις αντίστοιχες για επιτάχυνση εδάφους 0.3g [ 5 ]. Σε άλλες περιπτώσεις το επιλεγμένο φορτίο που προσομοιώνει ψηλά επίπεδα ανελαστικών παραμορφώσεων περιλαμβάνει δύο φάσεις: force-control και displacement-control [ 4 ].

## 2.4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ

Από τη σύγκριση της συμπεριφοράς ενισχυμένων δοκιμίων εξωτερικών κόμβων δοκού-στύλου με σύνθετα υλικά με τη συμπεριφορά των αρχικών δοκιμίων ή των δοκιμίων ελέγχου, παρατηρήθηκαν τα εξής:

- ü Οι μανδύες από σύνθετα υλικά είναι αποδοτικοί τόσο για προσεισμική όσο και για μετασεισμική ενίσχυση των κόμβων δοκού-στύλου από Ο/Σ [ 2 ].
- ü Τα σύνθετα υλικά είναι ικανά για την αύξηση της διατμητικής αντίστασης του κόμβου και βελτιώνουν την απόδοση της σύνδεσης από την πλευρά της πλαστιμότητας. Τα FRP μπορούν να διαστασιολογηθούν ώστε να αποτρέψουν την ψαθυρή αστοχία του κόμβου λόγω τέμνουσας και να επιτρέψουν την ανάπτυξη πλαστικής άρθρωσης στη δοκό [ 4 ] [ 2 ] [ 6 ]
- ü Η αντοχή και η απορροφόμενη ενέργεια αυξάνουν παράλληλα σε σχέση, αλλά όχι αναλογικά, με τον αριθμό των στρώσεων των FRP (σχήμα 3) [ 3 ].



Σχήμα 3 Διάγραμμα πλευρικών φορτίσεων – οριζόντιων μετακινήσεων στο δοκίμιο ελέγχου (C2) και σε ενισχυμένο (S63) δοκίμιο [ 3 ]

- ü Όσον αφορά την αντοχή, η αύξηση της επιφάνειας των FRP στη δοκό είναι σχεδόν τόσο αποτελεσματική όσο είναι και στην αντίστοιχη αύξηση της επιφάνειάς τους ταυτόχρονα στη δοκό και στο υποστύλωμα. Τούτο υποδηλώνει ότι η αποτελεσματικότητα των FRP του υποστυλώματος είναι μάλλον ελαττωμένη.
- ü Καθώς ο εγκάρσιος οπλισμός ενίσχυσης του κόμβου αυξάνει, τα σύνθετα υλικά γίνονται λιγότερο αποτελεσματικά [ 6 ] [ 3 ].
- ü Οι μηχανικές αγκυρώσεις αύξησαν την αποτελεσματικότητα των φύλλων από FRP, από τη σκοπιά της αντοχής και της ενέργειας περίπου 30% και 40% αντίστοιχα. Για τις λωρίδες, η αποτελεσματικότητα των αγκυρώσεων ήταν καλύτερη.
- ü Η ευνοϊκή επίδραση των μεγάλων αξονικών φορτίων στην διατμητική ικανότητα των με FRP-ενισχυμένων κόμβων επιβεβαιώνεται [ 3 ].
- ü Οι αρχικές βλάβες επέδρασαν δυσμενώς στην απόκριση των ενισχυμένων κόμβων [ 3 ].
- ü Προτιμούνται τα εύκαμπτα φύλλα έναντι των λωρίδων (αν και είναι πιο ακριβά). Το τελευταίο συμπέρασμα είναι αναμενόμενο αφού η επίτευξη καταλλήλων αγκυρώσεων με τις λωρίδες είναι πολύ πιο δύσκολη από ότι είναι με τα φύλλα. Και τούτο διότι τα φύλλα συνεπάγονται περισσότερη μεταφορά δυνάμεων στην περιοχή του κόμβου [ 3 ].
- ü Σε σύγκριση με τα επίπεδα δοκίμια, η αποδοτικότητα των φύλλων από FRP στους κόμβους με εγκάρσια δοκό είναι μειωμένη (όχι τόσο σε ενέργεια όσο σε αντοχή) [ 3 ].
- ü Σε σύγκριση με τα δοκίμια ελέγχου, οι περισσότερες ενισχύσεις κατέληξαν σε αύξηση της ακαμψίας [ 3 ].

Ο συντριπτικός αριθμός των παραπάνω συμπερασμάτων πηγάζει από τη διατμητική μορφή αστοχίας. Για αυτό το λόγο η μελλοντική έρευνα στον τομέα των ενισχύσεων των κόμβων με FRP θα πρέπει να κατευθυνθεί προς την κατανόηση της θεμελιώδους απόκρισης τους με κυρίαρχη μορφή αστοχίας την ολίσθηση των ράβδων μέσα στον κόμβο [ 3 ].

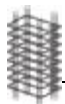
### 3. ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΩΝ ΜΕ FRP ΚΟΜΒΩΝ ΔΟΚΟΥ-ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΟΣ

#### 3.1 ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΩΝ FRP

Οι ίνες σχεδιάζονται για ν' αντικαταστήσουν τον ελλειπή εγκάρσιο οπλισμό στον κόμβο. Σύμφωνα με τους Park & Paulay [1974], η τέμνουσα του κόμβου  $V_j$  υπολογίζεται ως η διαφορά της μέγιστης δύναμης του κάτω οπλισμού, επιτρέποντας 25% υπεραντοχή στα σίδερα, με την τέμνουσα δύναμη στο υποστύλωμα,  $V_{col}$ .

$$V_j = 1.25 A_s f_y - V_{col}$$





όπου  $A_s$  είναι η επιφάνεια του διαμήκη εφελκόμενου οπλισμού της δοκού και  $f_y$  είναι το όριο διαρροής του χάλυβα.

Η συνολική τέμνουσα αντίστασης του ενισχυμένου κόμβου αναλαμβάνεται από τη συνισταμένη της τέμνουσας αντίστασης του σκυροδέματος,  $V_c$ , της συνεισφοράς του εγκάρσιου οπλισμού,  $V_s$ , και της αντίστασης που προέρχεται από τις ίνες,  $V_f$ .

$$V_j = V_c + V_s + V_f$$

Η δύναμη που μεταφέρουν οι συνδετήρες  $V_s$  είναι μηδέν, εάν δεν υπάρχει εγκάρσιος οπλισμός στον κόμβο δοκού-υποστυλώματος. Η τέμνουσα αντίσταση του σκυροδέματος, λαμβάνοντας τις εφαρμοζόμενες αξονικές τάσεις, είναι:

$$V_c = 0.2 f_c \sqrt{f_c'} (1 + 3f_{co1}/f_c') b d_j$$

όπου  $f_{co1}$  είναι οι κανονικές τάσεις στο υποστυλώμα λόγω του αξονικού φορτίου,  $b$  το πλάτος του κόμβου και  $d_j$  το ενεργό ύψος του κόμβου.

Το απαιτούμενο εμβαδό των ινών κατά το ύψος του κόμβου, υπολογίζεται ως:

$$A_f = \frac{V_f s}{\phi_f d_j f_u}$$

όπου  $A_f$  είναι το εμβαδό της απαιτούμενης ενίσχυσης από ίνες στην περιοχή του κόμβου διαστασιολογημένο για να αντικαταστήσει τον εγκάρσιο οπλισμό,  $f_u$  είναι η εφελκυστική αντοχή των ινών,  $s$  είναι το ύψος του κόμβου και  $\phi_f$  είναι ένας συντελεστής αντίστασης που για το GFRP υλικό υποθέτεται να είναι 0.8. Αν οι ίνες των χρησιμοποιούμενων υφασμάτων είναι καταναμημένες σε δύο διευθύνσεις, η τέμνουσα δύναμη του κόμβου αναλύεται σε δύο κάθετες συνιστώσες, οι οποίες απέχουν  $45^\circ$  από τον κατακόρυφο άξονα του υποστυλώματος [ 4 ].

Ένας άλλος τρόπος σχεδιασμού μανδύα σύνθετων υλικών (FRP) απαιτεί τη γνώση της τέμνουσας του κόμβου των δοκιμών  $V_u$ , όταν σχηματίζεται πλαστική άρθρωση στη δοκό [ 2 ].

Η αναλαμβανόμενη τέμνουσα από τον ενισχυμένο κόμβο με FRP δίδεται από τη σχέση:

$$V_i = k \sqrt{f_c' b d} + \cot \theta \frac{A_y f_y d}{s} + t_w E_w \epsilon_p h \cot \theta$$

1<sup>ος</sup> όρος: Αντοχή σκυροδέματος σε διάτμηση

2<sup>ος</sup> όρος: Αντοχή υπάρχοντος οπλισμού (συνδετήρων)

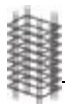
3<sup>ος</sup> όρος: Ενίσχυση με μανδύες FRP

Απαιτούμενη αντοχή:  $V_i \geq V_u$ . Από την τελευταία σχέση υπολογίζεται το απαιτούμενο πάχος του μανδύα από FRP,  $t_w$ , και επομένως ο αριθμός των απαιτούμενων στρώσεων. Σημειώνεται δε ότι  $k = 0.1$  ως περιοχή πλαστικής άρθρωσης,  $\theta = 30^\circ$  (γωνία μεταξύ του άξονα του υποστυλώματος και της διεύθυνσης των αναμενόμενων λοξών ρωγμών),  $E_w$  το μέτρο ελαστικότητας του υλικού που χρησιμοποιείται για το μανδύα [ 2 ].

### 3.2 ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΤΟΥ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΟΥ ΚΟΜΒΟΥ ΜΕ ΛΩΡΙΔΕΣ ΑΠΟ FRP [ 7 ]

Τη στιγμή της ενίσχυσης ο κόμβος είναι φορτισμένος. Κατά συνέπεια υπάρχουν αρχικές ορθές παραμορφώσεις,  $\epsilon_{ot}$  και  $\epsilon_{ol}$  κατά την εγκάρσια (δοκός) και την διαμήκη (στύλος) διεύθυνση, αντίστοιχα, και μια αρχική διατμητική παραμόρφωση  $\gamma_o$ . Μια υπόθεση-κλειδί είναι ότι η ενίσχυση του κόμβου μεταφέρεται μέσω της χρήσης λωρίδων, τοποθετημένων σε δύο ορθογώνιες διευθύνσεις (κάθετα και οριζόντια). Η οριζόντια ισορροπία δυνάμεων απαιτεί ότι η  $\sigma_t$  ικανοποιεί την σχέση που ακολουθεί:

$$\sigma_t = -(\rho_s + \beta_t \rho_b) f_t - \rho_{ft} f_{ft} - \frac{N_h}{bh}$$



όπου  $\sigma_l$  είναι η μέση θλιπτική τάση στο σκυροδέμα στην εγκάρσια διεύθυνση,  $f_t$  = η μέση τάση στους οριζόντιους συνδετήρες (στο μέσο του κόμβου),  $\rho_s$  = το ποσοστό οπλισμού των συνδετήρων,  $\beta_l$  = συντελεστής με τιμές μεταξύ 0-1,  $f_{ft}$  = οι μέσες ορθές τάσεις στα FRP στην εγκάρσια διεύθυνση,  $\rho_{ft}$  = το ποσοστό οπλισμού των FRP στην εγκάρσια διεύθυνση, και  $N_h$  = η αξονική θλιπτική δύναμη στη δοκό. Όμοια, η ισορροπία δυνάμεων κάθετα δίνει την μέση διαμήκη θλιπτική τάση του σκυροδέματος,  $\sigma_l$ :

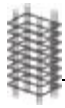
$$\sigma_l = - (\rho_{c,in} + \beta_l \rho_c) f_l - \rho_{ft} f_{ft} - \frac{N_v}{bd}$$

όπου  $f_l$  = η μέση τάση του διαμήκη οπλισμού του υποστυλώματος μέσα στον κόμβο, στο μέσο του,  $\rho_c$  = το ολικό ποσοστό οπλισμού στο υποστυλώμα (στα όρια του πυρήνα του κόμβου),  $\rho_{c,in}$  = το ποσοστό οπλισμού στον πυρήνα του κόμβου,  $\beta_l$  = συντελεστής που σχετίζεται με τις συνθήκες δεσμού του κύριου οπλισμού του υποστυλώματος (στα όρια του πυρήνα του κόμβου),  $f_{ft}$  = οι μέσες ορθές τάσεις στα FRP στην διαμήκη διεύθυνση,  $\rho_{ft}$  = το ποσοστό οπλισμού των FRP στην διαμήκη διεύθυνση, και  $N_v$  = η αξονική θλιπτική δύναμη στο υποστυλώμα.

Στη συνέχεια διατυπώνονται όλες οι πιθανές φάσεις της συμπεριφοράς του κόμβου: α) πριν τη διαρροή του οπλισμού, β) μετά τη διαρροή του οριζόντιου ενεργού οπλισμού, πριν τη διαρροή του κατακόρυφου ενεργού οπλισμού, γ) μετά τη διαρροή των οριζόντιου και κατακόρυφου οπλισμού, δ) μετά τη διαρροή του κατακόρυφου ενεργού οπλισμού, πριν τη διαρροή του οριζόντιου ενεργού οπλισμού, ε) θραύση του σκυροδέματος. Τούτο ορίζει την αστοχία του κόμβου και θα συμβεί κατά τη διάρκεια των προηγούμενων φάσεων. Η θραύση θα εμφανιστεί όταν η κύρια θλιπτική τάση,  $\sigma_2$ , φτάσει την αντοχή του σκυροδέματος,  $f_c^{\max}$ , στ) αστοχία του FRP, λόγω αποκόλλησής του ή εφελκυστικής θραύσης, τα οποία μπορεί να συμβούν πριν τη θραύση του σκυροδέματος. Τα παραπάνω είναι εργαλεία για τον προγραμματισμό της ανάλυσης των ενισχυμένων με λωρίδες FRP κόμβων δοκών-υποστυλωμάτων από Ο/Σ. Ο χρήστης του προγράμματος, που φτιάχτηκε [ 7 ], θέτει μια σειρά δεδομένων, που αφορούν τα υλικά και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά. Το πρόγραμμα ανιχνεύει την εντατική και παραμορφωσιακή κατάσταση του κόμβου πριν την αστοχία, ενώ στο τέλος κάθε βήματος ελέγχει δύο συνθήκες: (1) θραύση σκυροδέματος, που συνεπάγεται τον τερματισμό της ανάλυσης και ορίζει την διατμητική αντοχή του κόμβου:  $v_{max}$ , (2) αστοχία του FRP [ 7 ].

### 3.3 ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΤΟΥ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΟΥ ΚΟΜΒΟΥ ΜΕ ΕΥΚΑΜΠΤΑ ΦΥΛΛΑ Ή ΥΦΑΣΜΑΤΑ ΑΠΟ FRP [ 7 ]

Τα υλικά FRP που συνίστανται από φύλλα ή υφάσματα έχουν τις ίνες τους κατανομημένες σε διευθύνσεις, οι οποίες δε συμπίπτουν απαραίτητα με την οριζόντια και την κατακόρυφη διεύθυνση. Γι' αυτό το λόγο οι τάσεις συνδέονται με τις παραμορφώσεις μέσω ενός μητρώου ακαμψίας, το οποίο εξαρτάται από τις ιδιότητες (ελαστικές σταθερές και πάχος) των διάφορων στρώσεων που σχηματίζουν τον εξωτερικό οπλισμό του κόμβου. Πάντως κι εδώ, η ανάλυση περιλαμβάνει τις ίδιες τέσσερις φάσεις, που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο: α) πριν τη διαρροή του οπλισμού, β) μετά τη διαρροή του οριζόντιου ενεργού οπλισμού, πριν τη διαρροή του κατακόρυφου ενεργού οπλισμού, γ) μετά τη διαρροή του οριζόντιου και κατακόρυφου οπλισμού, δ) μετά τη διαρροή του κατακόρυφου ενεργού οπλισμού, πριν τη διαρροή του οριζόντιου ενεργού οπλισμού. Στο αντίστοιχο πρόγραμμα, στο τέλος του κάθε βήματος ελέγχεται η αστοχία του FRP ή η θραύση του σκυροδέματος. Τα τελευταία ορίζουν τη διατμητική αντοχή,  $v_{max}$  [ 7 ].



#### 4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Αν και η πειραματική έρευνα βρίσκεται ακόμα σε εξέλιξη, τα μέχρι σήμερα αποτελέσματα είναι ιδιαίτερα ενθαρρυντικά [ 9 ]. Ιδιαίτερα λόγω της συμφωνίας πειραματικών κι αναλυτικών αποτελεσμάτων [ 3 ] [ 7 ]. Παρόλ' αυτά οι τεχνικές δυσκολίες εφαρμογής της τεχνικής στην πράξη λόγω της παρουσίας πλακών και εγκάρσιων δοκών, σε συνδυασμό με την έλλειψη επαρκούς επιστημονικής τεκμηρίωσης, ιδίως για ένταση από σεισμικές δράσεις, δεν ενθαρρύνουν προς το παρόν την εφαρμογή της τεχνικής [ 9 ].

#### ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Αντισεισμικός Σχεδιασμός Κατασκευών από Οπλισμένο Σκυρόδεμα και Τοιχοποιία, T. Paulay, M.J.N Priestley, σελ. 309, 1999.
2. Προσεισμική Και Μετασεισμική Ενίσχυση Δομικών Υποσυνόλων Οπλισμένου Σκυροδέματος με Χρήση Σύνθετων Υλικών (FRP), Α. Δ. Τσώνος, Κ. Α. Στυλιανίδης, 13<sup>ο</sup> Ελληνικό Συνέδριο Σκυροδέματος, σελ. 455 – 466.
3. Experimental Investigation of FRP – Strengthened RC Beam – Column Joints, Costas P. Antonopoulos, Thanasis C. Triantafillou, Univ. of Patras, Greece.
4. Seismic Rehabilitation of Beam – Column Joints Using FRP Laminates, A. Ghobarah, A. Said, McMaster University, Hamilton, Ontario, Canada.
5. Experimental Response of a Non-Ductile R/C Building Rehabilitated by Means of Fibre Reinforced Polymers, Alberto Castellani, Paolo Negro, Antonella Colombo, Muriel Castellani, 12WCEE 2000, 1605.
6. Seismic Rehabilitation of Concrete Building Corner Joints, C.P. Pantelides, C. Clyde, C.P. Lau, L.D. Reaveley, FRPRCS-5, Thomas Telford, London, 2001.
7. Analysis of FRP- Strengthened RC Beam – Column Joints, Costas P. Antonopoulos, Thanasis C. Triantafillou, Univ. of Patras, Greece.
8. Επισκευές και Ενισχύσεις Κατασκευών από Οπλισμένο Σκυρόδεμα, Σ.Η. Δρίτσος, σελ. 143, Πάτρα 2000.
9. « Ενημερωτικό Δελτίο » Τ.Ε.Ε., τεύχος 2169, σελ. 117.

