

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ ΚΟΜΒΩΝ ΔΟΚΟΥ-ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΟΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΙΟΠ ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΚΑΝ.ΕΠΕ 2010

ΣΙΓΑΝΟΥ ΙΣΜΗΝΗ

Περίληψη

Στην παρούσα εργασία μελετάται η χρήση των σύνθετων υλικών (ινοπλισμένα πολυμερή) στην ενίσχυση κόμβων δοκών – υποστυλωμάτων. Παραθέτονται δύο διαφορετικά πειράματα ενίσχυσης κόμβων δοκού-υποστυλώματος με χρήση ΙΟΠ, διαφορετικών τύπων, σύνδεσης και σκοπών. Τα αποτελέσματα τους συγκρίνονται με τα αντίστοιχα που δίνουν οι εξισώσεις του ΚΑΝ.ΕΠΕ. και καταλήγουν στο συμπέρασμα ότι ο κανονισμός αυτός δίνει πιο ασφαλή αποτελέσματα διότι λαμβάνει περισσότερους περιορισμούς ως προς την εφαρμογή των ινών αυτών, την τοποθέτηση τους και την αγκύρωση τους στο υπάρχον δομικό στοιχείο.

1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1.ΚΟΜΒΟΙ ΔΟΚΟΥ – ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΟΣ[1] [2]

Ένα από τα πλέον ευπαθή στοιχεία μιας υφιστάμενης κατασκευής οπλισμένου σκυροδέματος, κυρίως λόγω σεισμού, είναι ο κόμβος δοκού – υποστυλώματος. Αυτό οφείλεται σε διάφορους παράγοντες όπως στο γεγονός ότι η διατμητική ένταση στους κόμβους είναι πολύ μεγάλη, στην κακή σκυροδέτηση τους λόγω μεγάλης πυκνότητας οπλισμών καθώς επίσης στο ότι οι βλάβες τους είναι οι πλέον καθοριστικές για την ασφάλεια του φορέα.

1.2.ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ[1]

Τρεις είναι οι βασικές μορφές ενίσχυσης κόμβων:

- ο μανδύας σκυροδέματος
- τα χιαστί κολλάρα
- τα επικολητά φύλλα από χάλυβα ή από ινοπλισμένα πολυμερή FRP

1.3.ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ[1]

Η χρήση των ινοπλισμένων πολυμερών (ΙΟΠ) – Fiber Reinforced Polymers αποτελεί σήμερα την πλέον σύγχρονη τεχνική στον τομέα των ενισχύσεων. Οι συνήθεις τύποι ινών είναι από γυαλί ή άνθρακα ή αραμίδιο. Τα σημαντικά πλεονεκτήματα τους έναντι στον κοινό χάλυβα δεν είναι άλλα απ'την υψηλή αντοχή, το μικρό βάρος, τη διαθεσιμότητα τους σε μεγάλα μήκη καθώς βέβαια και την αντοχή τους σε διάβρωση. Φυσικά όλα αυτά αντισταθμίζονται με το υψηλό τους κόστος και την έλλειψη πλάστιμης συμπεριφοράς. Επιπλέον, η εφαρμογή τους σε ενισχύσεις κόμβων πλεονεκτεί έναντι άλλων λόγω της μεγάλης ευκολίας τοποθέτησης τους στην δύσκολη περιοχή ενός κόμβου. Μάλιστα τα φύλλα επικολλώνται με εποξειδική ρητίνη όχι μόνο στον κόμβο αλλά και στα συντρέχοντα υποστυλώματα και δοκούς.

2.ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ

2.1.ΠΡΟΣΕΙΣΜΙΚΗ ΚΑΙ ΜΕΤΑΣΕΙΣΜΙΚΗ ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΔΟΜΙΚΩΝ ΥΠΟΣΥΝΟΛΩΝ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ GFRP .[5]

2.1.1.ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

Για τη μελέτη της αποδοτικότητας της ενίσχυσης κόμβων δοκού – υποστυλώματος υφιστάμενων κατασκευών με μανδύα από FRP κατασκευάστηκαν 3 όμοια δοκίμια ως προς

τον οπλισμό, τις διαστάσεις και το χρησιμοποιούμενο σκυρόδεμα, με βάση τις Συστάσεις της Μικτής Επιτροπής ACI-ASCE 352. Έτσι λοιπόν, τα δοκίμια δεν έχουν καθόλου οπλισμό συνδετήρων κόμβου, έχουν λόγο ικανοτικού σχεδιασμού $M_R=1,0 < 1,40$ και οι διατμητικές τάσεις που ασκούνται στην περιοχή του κόμβου είναι πολύ υψηλές $\gamma=2,1 > 1,0$. Συνεπώς όλα εφόσον δεχθούν ισχυρή σεισμική καταπόνηση θα αστοχήσουν αφήνοντας ανέπαφες τις δοκούς.

2.1.2. ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

Το πρώτο δοκίμιο L1 υφίσταται ισχυρή σεισμική καταπόνηση μέχρι αστοχίας. Ακολούθως απομακρύνεται το αποδιοργανωμένο σκυρόδεμα και επισκευάζεται τοπικά με χωρίς να αυξηθεί σε κανένα σημείο η διατομή του και κατόπιν ενισχύεται με μανδύα από FRP. Ως δοκίμιο FRPL1 πλέον υποβάλλεται εκ νέου σε φόρτιση με τον ίδιο σεισμό.

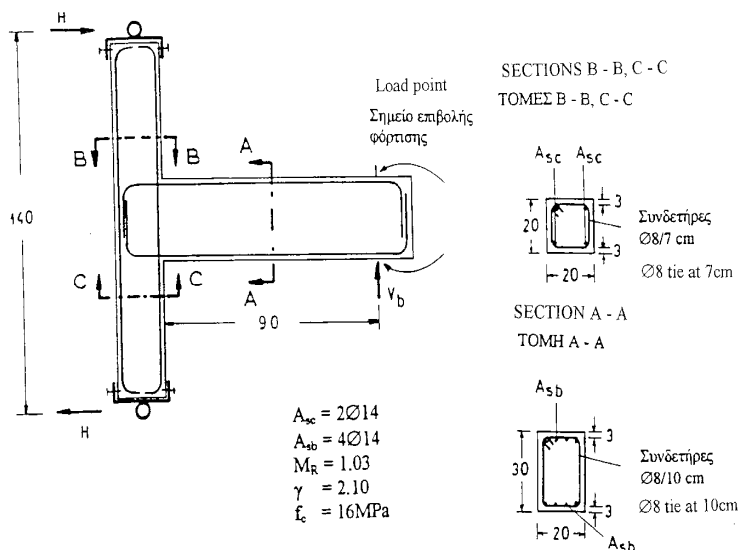
Το δεύτερο δοκίμιο L2 υφίσταται σεισμική καταπόνηση που προκαλεί πλευρική μετατόπιση μέχρι 2% που θεωρείται άνω όριο για κτίρια Ο/Σ με τοιχώματα, την πλειοψηφία δηλαδή των ελληνικών κτιρίων. Στη συνέχεια επισκευάζεται με ενέσεις εποξειδικών ρητινών και ενισχύεται με μανδύα από FRP. Πάλι υπόκειται το FRPL2 στην ίδια σεισμική καταπόνηση.

Το τρίτο δοκίμιο L3 ενισχύεται απ' την αρχή με μανδύα από FRP και για πρώτη φορά φορτίζεται το FRPL3 με ισχυρό σεισμό με μεταβαλλόμενη μετατόπιση μέχρι 6% αντιπροσωπεύοντας κόμβους παλιών κτιρίων χωρίς τοιχώματα που δέχονται προσεισμική ενίσχυση.

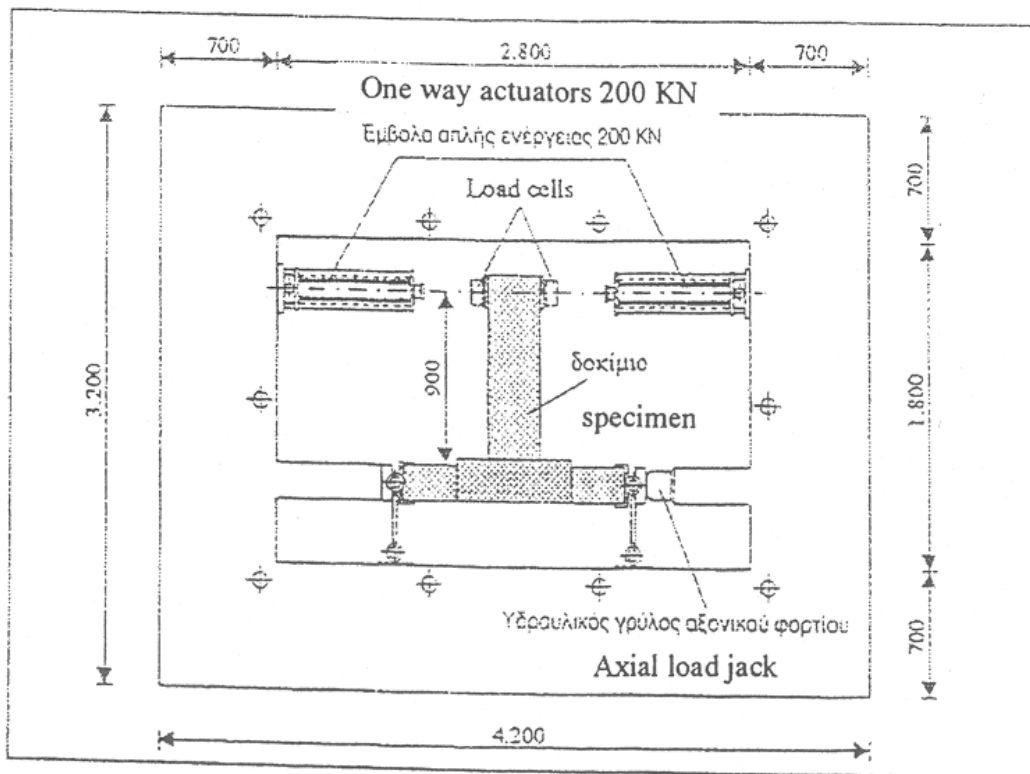
Η αξονική δύναμη που επιβαλλόταν στα υποστυλώματα τόσο των αρχικών όσο και των ενισχυμένων δοκιμίων ήταν σταθερή και ίση με $0,40P_b$ (P_b =αξονικό φορτίο ισορροπίας αστοχίας).

Στόχος του πειράματος των δοκιμίων είναι να απαντηθούν τα ακόλουθα ερωτήματα:

- Είναι αποδοτική η ενίσχυση του δοκιμίου αφού αποκαταστήσω τη βλαμμένη με περιοχή με νέο σκυρόδεμα;
- Πόσο αποδοτικός είναι ο μανδύας για τους κόμβους κατασκευών από Ο/Σ με τοιχώματα;
- Πόσο αποδοτική είναι η προσεισμική ενίσχυση κόμβων παλαιών κατασκευών;



Σχήμα 1: Διαστάσεις και χαρακτηριστικά σχεδιασμού δοκιμίων L₁, L₂, L₃[5]



Σχήμα 2: Γενική διάταξη συστήματος φόρτισης για έλεγχο σεισμικής συμπεριφοράς των κόμβων[5]

2.1.4. ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΗΚΑΝ

Το υλικό που χρησιμοποιήθηκε για τον μανδύα ήταν το SHE 51/Tyfo S Epoxy (Primary Glass Fabric) με τα εξής χαρακτηριστικά: εφελκυστική αντοχή 552 MPa, επιμήκυνση θραύσεως 2,0%, μέτρο ελαστικότητας 27579 MPa και πάχος σχεδιασμού 1,3 mm για κάθε στρώση.

Η τέμνουσα του κόμβου των δοκιμίων όταν σχηματίζεται πλαστική άρθρωση στη δοκό έχει τιμή $V_u = 209,26 \text{ kN}$. Η αναλαμβανόμενη τέμνουσα από τον ενισχυμένο κόμβο θέλουμε να ισούται με την παραπάνω οπότε απ' την εξίσωση :

$$V = k \sqrt{f_c} b d + (A_v f_y d \cot \theta / s) + t_w E_w e p h \cot \theta, \quad (1)$$

βρίσκουμε το απαιτούμενο πάχος. Λαμβάνοντας υπόψη ότι ο πρώτος όρος ισούται με 0,43 kN, ο δεύτερος με 0 αφού δεν υπάρχουν συνδετήρες τα χαρακτηριστικά του υλικού μας τότε $t_w = 6,241 \text{ mm}$. Το πάχος μιας στρώσης είναι 1,3 mm άρα έχουμε αριθμό απαιτούμενων στρώσεων $n = t_w / 1,3 = 6,241 / 1,3 = 4,8$. Τοποθετούνται λοιπόν 6 στρώσεις, 3 σε κάθε παρειά.

2.1.5. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

Η αστοχία του δοκιμίου L1 συγκεντρώθηκε στην περιοχή του κόμβου ενώ η δοκός παρέμεινε άθικτη. Στο L2 εμφανίστηκαν τριχοειδή διατμητικού τύπου ρήγματα στην περιοχή του κόμβου ενώ η δοκός άθικτη. Στα ενισχυμένα δοκίμια FRPL1, FRPL2, FRPL3 εμφανίστηκε διαμπερές καμπτικό ρήγμα στη δοκό στη θέση της ένωσης με το στύλο στους πρώτους 3 κύκλους ενώ στη συνέχεια παρατηρήθηκε αποκόλληση της αγκύρωσης των λωρίδων ενίσχυσης με αποτέλεσμα τη μετατόπιση και τη συγκέντρωση αστοχίας στους κόμβους. Δηλαδή βλάβη τόσο στη δοκό όσο και στον κόμβο. Γενικά τα ενισχυμένα δοκίμια εμφανίζουν ιδιαίτερα βελτιωμένες όλες τις μηχανικές αντισεισμικές ιδιότητες συγκριτικά με

αυτές που παρουσίασαν τα αρχικά, δηλαδή αντοχή, ακαμψία και ικανότητα απορρόφησης ενέργειας.

2.1.6.ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

1. Η σεισμική συμπεριφορά των επισκευασμένων – ενισχυμένων δοκιμίων εμφανίστηκε ιδιαίτερα βελτιωμένη σε σχέση με εκείνη των αρχικών δοκιμίων.
2. Τα ενισχυμένα δοκίμια παρουσίασαν βελτιωμένο τύπο αστοχίας συγκριτικά με τα. Έτσι σ' αυτά ο ενισχυμένος κόμβος επιτρέπει στη συντρέχουσα δοκό το σχηματισμό πλαστικής άρθρωσης ενώ στα αρχικά η αστοχία εμφανίζεται αμιγώς στην περιοχή του κόμβου.
3. Είναι εμφανές ότι οι μανδύες από σύνθετα υλικά είναι αποδοτικοί τόσο για την προσεισμική όσο και για τη μετασεισμική ενίσχυση των κόμβων δοκού – στύλου από Ο/Σ.

2.1.7.ΕΠΙΛΥΣΗ ΤΟΥ ΚΟΜΒΟΥ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΚΑΝ.ΕΠΕ[4]

Με βάση την παράγραφο §8.3.2.3, για την ενίσχυση με υφάσματα από ινοπλισμένα πολυμερή, το πάχος του υφάσματος με ίνες παράλληλες προς τον άξονα της δοκού δίνεται απ' τη σχέση

$$t_{jh} = \frac{V_{jh}}{k_b \sigma_j d} \quad (2)$$

ενώ αυτό με ίνες παράλληλες προς τον άξονα του υποστυλώματος από την σχέση

$$t_{jv} = \frac{V_{jv}}{k_c \sigma_j d} \quad (3)$$

Συνίσταται η χρήση υφασμάτων με ίνες προς τις δύο κύριες διευθύνσεις που να καλύπτουν τις απαιτήσεις του πάχους. (Σ.8.3.2.3. , ΚΑΝ.ΕΠΕ)

Η τιμή σχεδιασμού της ενεργού τάσης του οπλισμού ενίσχυσης προσδιορίζεται σύμφωνα με την παράγραφο §8.2.2.2(iv). Εκτιμάται με βάση μία κρίσιμη τιμή της τάσης $\sigma_{jd, crit}$ η οποία εξαρτάται από τη μορφή αστοχίας, αστοχία του ίδιου του υλικού η πρόωρη αποκόλληση του. Ως τιμή σχεδιασμού θεωρείται αυτή που αντιστοιχεί στη δυσμενέστερη. Η αστοχία πρόωρης αποκόλλησης του υλικού ενίσχυσης αφορά μόνο τις ανοιχτές ενισχύσεις διότι στις κλειστές αποφεύγεται λόγω της περιμετρικής συνέχειας του στοιχείου ενίσχυσης. Άρα η μορφή αστοχίας είναι η αστοχία του υλικού ενίσχυσης (8.14, ΚΑΝ.ΕΠΕ)

$$\sigma_{jd} \leq \frac{f_{jk}}{\gamma_m} \quad (4)$$

όπου f_{jk} είναι η χαρακτηριστική τιμή αντοχής του υλικού ενίσχυσης και γ_m είναι ο συντελεστής ασφαλείας για το υλικό ενίσχυσης (1,2 για ΙΟΠ).

$$\sigma_{jd, crit} = f_{jk} = E_j \varepsilon_{j, crit} = E_j \varepsilon_{j, max} \quad k_v = 27579 \text{ MPa} \quad 0,5 \quad 1,5\% = 206,843 \text{ MPa}$$

με $k_v=0,5$ και $\varepsilon_{j, max} = \min(\varepsilon_{ju}, 1,5\%) = \min(2\%, 1,5\%)$. Επομένως,

$$\sigma_{jd} = 206,843/1,2 = 172,369 \text{ MPa.}$$

Απ' το σχήμα έχουμε ύψος δοκού $h_b = 300\text{mm}$, ύψος διατομής υποστυλώματος $h_c = 200\text{mm}$, θεωρητικό μήκος δοκού $L_b = 900+200=1100\text{mm}$, καθαρό μήκος δοκού $L_{bn}=900\text{mm}$, ύψος ορόφου $h_{st}=1400\text{mm}$, μοχλοβραχίονας εσωτερικών δυνάμεων στη δοκό $z_b=300-30-8-14/2=255\text{mm}$. Η ροπή στη δοκό θα είναι

$$\Sigma M_{yb} = 2 z_b A_s(2\Phi 14) f_{yd} = 0,255m (400 \text{ MPa}/1,15) 314\text{mm}^2 = 55,7 \text{ kNm. (5)}$$

Επειδή δημιουργείται πλαστική άρθρωση στη δοκό ισχύει $\Sigma M_{yb} \leq \Sigma M_{yc}$ επομένως απ' την παράγραφο §Σ.7.2.5 υπολογίζουμε:

$$\text{Οριζόντια τέμνουσα δύναμη } V_{jh} = \Sigma M_{yb} [1/z_b - L_b/(h_{st} L_{bn})] = 169,82 \text{ kN. (6)}$$

$$\text{Κατακόρυφη τέμνουσα δύναμη } V_{jv} = V_{jh} h_b/h_c = 254,74 \text{ kN. (7)}$$

Οπότε οι εξισώσεις (2) και (3) δίνουν πάχη: $t_{jh} = 3,3 \text{ mm}$, $t_{jv} = 7,4 \text{ mm}$ και αφού πάχος 1 στρώσης του συγκεκριμένου υλικού είναι 1,3 mm έχουμε

$n_h = 3,3/1,3 = 2,5 = 3$ στρώσεις // στον άξονα της δοκού και

$n_c = 7,4/1,3 = 5,7 = 6$ στρώσεις // στον άξονα του υποστυλώματος.

2.1.8.ΣΥΓΚΡΙΣΗ

Με τη χρήση του ΚΑΝ.ΕΠΕ οι απαιτούμενες στρώσεις υπολογίστηκαν περισσότερες απ' ότι αυτές του πειράματος. Στην περίπτωση για $k = 7 > 4$ έχουμε $\psi = 1,045$ και τότε η τιμή της παραμόρφωσης γίνεται 1,045 2% = 2,09% και πάλι δηλαδή μεγαλύτερη του 1,5%. Οπότε οι παραπάνω στρώσεις δεν μεταβάλλουν την τιμή σχεδιασμού της ενεργού τάσεως. Επίσης, δεν είναι ίδιος ο αριθμός των στρώσεων σε κάθε διεύθυνση επειδή δεν θεωρήσαμε ίσες τις τέμνουσες, οριζόντια και κάθετη, που δρουν στον κόμβο.

Οι περισσότερες στρώσεις δεν είναι πάντα υπέρ της ασφαλείας καθώς με την αύξηση των στρώσεων μειώνεται η παραμόρφωση ϵ_{ju} διότι πολλαπλασιάζεται με τον μειωτικό συντελεστή πολλών στρώσεων $\psi = k^{-0,25}$. Αυτό έχει σαν συνέπεια να μειώνεται κ η ενεργός τάση και ακολούθως ν' αυξάνει το απαιτούμενο πάχος που με τη σειρά του μειώνει την παραμόρφωση και ούτω κάθε εξής. Βέβαια, ισχύει στην περίπτωση όπου $\epsilon_{ju} \psi < 1,5\%$ αλλιώς παίρνουμε τη μέγιστη και που δεν έχουμε κλειστή ενίσχυση ώστε να αποφεύγεται η αποκόλληση του υλικού. Η μέγιστη τιμή του 1,5% στοχεύει στον περιορισμό του ανοίγματος μιας κρίσιμης λοξής ρωγμής ανοίγματος πέραν απ' την οποία μειώνεται η συμβολή του σκυροδέματος στην διατμητική αντοχή του μέλους, η οποία συμβαίνει πριν την εξάντλησης του υλικού ενίσχυσης.

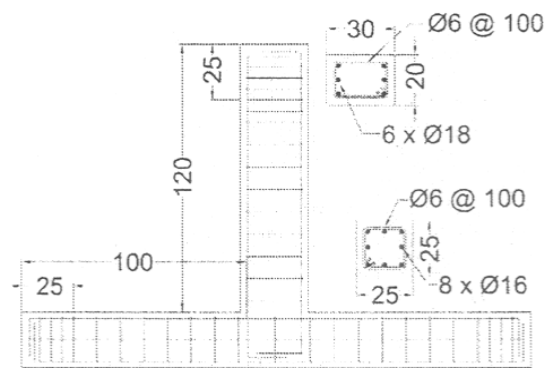
2.2.ΜΙΑ ΠΡΩΤΟΠΟΡΙΑΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ ΓΙΑ ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΚΟΜΒΩΝ ΔΟΚΟΥ – ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΟΣ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΜΕ CFRP.[6]

2.2.1.ΛΕΠΤΟΜΕΡΙΕΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ

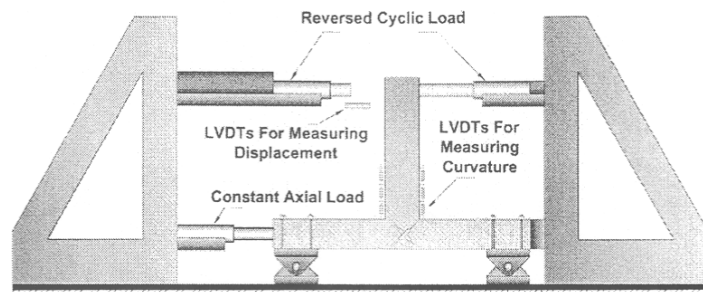
Τέσσερα όμοια δείγματα κατασκευάστηκαν με χρήση κανονικού σε βάρος σκυροδέματος και παραμορφωμένου οπλισμού. Για όλα τα δοκίμια επιλέχθηκε θλιπτική αντοχή 28 ημερών ότι είναι 25 MPa. Η τάση διαρροής του διαμήκη και του εγκάρσιου οπλισμού καθορίστηκε πειραματικά σε 400 και 300 MPa αντίστοιχα. Το μέτρο ελαστικότητας του χάλυβα οπλισμού είναι $E_s = 210 \text{ GPa}$. Οι ίνες άνθρακα που χρησιμοποιήθηκαν είχαν πάχος στρώσης 0,176 mm με μέτρο ελαστικότητας $E = 240 \text{ GPa}$. Οι λεπτομέρειες της διατομής των δειγμάτων καθώς και η εγκατάστασή τους φαίνονται στο σχήμα. Όπως φαίνεται λοιπόν, ο εγκάρσιος οπλισμός είναι λιγότερος στο υποστυλώμα απ' αυτόν που απαιτείται απ' τους νέους σεισμικούς κανονισμούς και αυτό για να παρουσιαστούν ως παλιοί και μη πλάστιμοι κόμβοι. Όλες οι συνδέσεις δοκιμάστηκαν σε θέση 90 μοιρών απ' την πραγματική τους. Σταθερό αξονικό φορτίο εφαρμόστηκε στην οριζόντια διεύθυνση στην κορυφή του υποστυλώματος και ήταν ίσο με 312,5 kN. Μέσω δύο μεταλλικών γρύλων επιβλήθηκε στα άκρα των δοκών ανακυκλιζόμενη φόρτιση και εξετάστηκαν οι μετακινήσεις. Η αύξηση του φορτίου επιλέχθηκε 1 mm πριν την

μετατόπιση λόγω διαρροής. Μετά τη διαρροή προσανυξήθηκε το φορτίο σε 2 mm και σε κάθε προσανύξηση του εφαρμόστηκαν τρεις κύκλοι φορτίσεων έως ότου επήλθε αστοχία.

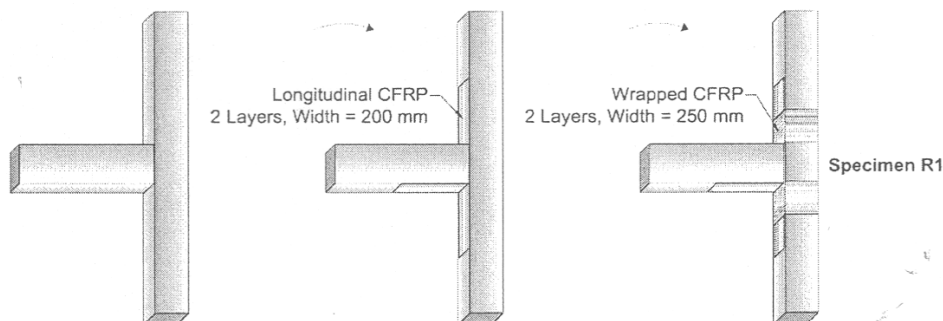
Υπήρχε ένα δείμα ελέγχου C χωρίς ενίσχυση. Το δείγμα R₁ ενισχύθηκε με δύο στρώσεις CFRP που εκτεινόταν απ' τη δοκό μέχρι το υποστύλωμα και στις δύο πλευρές και δύο στρώσεις CFRP τυλιγμένες και στις δύο βάσεις των υποστυλωμάτων με πλάτος 250mm. Το δείγμα R₂ είναι παρόμοιο του R₁ μόνο που έχει παραπάνω μία εξοχή σκυροδέματος στο σημείο σύνδεσης δοκού-υποστύλωματος με πλάτος 70 mm. Το R₃ επιλέχθηκε με εξοχή σκυροδέματος και με τρεις διαγώνιες στρώσεις υφάσματος CFRP από τη δοκό μέχρι το υποστύλωμα και τυλιγμένες με δύο στρώσεις CFRP από πάνω τους. Σε όλα τα δείγματα μετρήθηκαν η παραμόρφωση στον χαλύβδινο οπλισμό, το σκυρόδεμα και το υλικό ενίσχυσης, καθώς επίσης και η μετατόπισης και η κυρτότητα της σύνδεσης και η διατμητική παραμόρφωση.



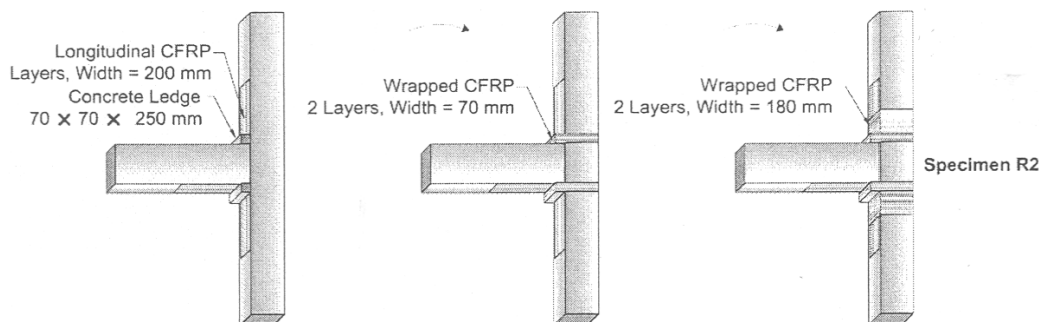
Σχήμα 3 : Διαστάσεις και χαρακτηριστικά δοκιμίων[6]



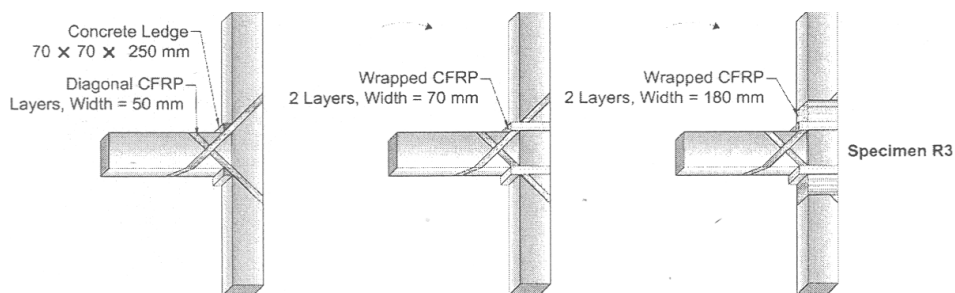
Σχήμα 4 : Διάταξη συστήματος φόρτισης [6]



Σχήμα 5 : Λεπτομέρειες δείγματος R₁[6]



Σχήμα 6 : Λεπτομέρειες δείγματος R₂[6]



Σχήμα 7 : Λεπτομέρειες δείγματος R₃[6]

2.2.2.ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ

Το δείγμα R₁ έφτασε σε μέγιστο πλευρικό φορτίο 72 kN σε μετατόπιση 16 mm. Ο δείκτης πλαστιμότητας του ήταν 3,91. Είχε μέγιστο πλευρικό φορτίο και δείκτη πλαστιμότητας σχεδόν 12 και 22 % μεγαλύτερα από αυτά του δείγματος ελέγχου. Αστόχησε σε κάμψη διότι οι διαμήκεις ίνες δεν μπόρεσαν ν' αυξήσουν την καμπτική αντοχή καθώς οι ίνες περιτύλιξης δεν μπόρεσαν να τις αγκυρώσουν καλά και σε μετατόπιση 5 mm αποκολλήθηκαν.

Στο δείγμα R₂ η προεξοχή του σκυροδέματος δούλεψε σαν αγκύρωση. Το μέγιστο πλευρικό φορτίο έφτασε τα 97 kN και ο δείκτης πλαστιμότητας ήταν 4,96, 1,5 φορές πάνω απ' του δείγματος ελέγχου. Αστόχησε σε διάτμηση στην περιοχή της σύνδεσης χωρίς να επέλθει αστοχία ή αποκόλληση του υλικού ενίσχυσης.

Το μέγιστο πλευρικό φορτίο στο ήταν 106 kN, δηλαδή 65% μεγαλύτερο από του δείγματος ελέγχου. Ο δείκτης πλαστιμότητας είναι 9,1, 2,85 φορές μεγαλύτερος από αυτόν του C. Μέσω των διαγώνιων στρώσεων επιτεύχθηκε μείωση της διατμητικής παραμόρφωσης

που σημαίνει ότι έγινε μεταφορά του φορτίου από δοκό σε υποστυλώμα και αντίστροφα. Αστόχησαν στο τέλος οι διαγώνιες CFRP.

2.2.3.ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

1. Η τελική ροπή και πλαστιμότητα των ενισχυμένων συνδέσεων δοκού-υποστυλώματος με είναι υψηλότερες σε σύγκριση με αυτές του δείγματος ελέγχου.
2. Η ενισχυτική μέθοδος του R1 αποδείχθηκε λιγότερο αποτελεσματική καθώς δεν μπόρεσαν να αγκυρωθούν οι διαμήκεις FRP από αυτές που τυλίχθηκαν γύρω τους.
3. Το επιπρόσθετο σκυρόδεμα στο λειτούργησε ευεργετικά αγκυρώνοντας τις διαμήκεις FRP και βελτιώνοντας την ροπή αντοχής.
4. Με τη χρήση των διαγώνιων FRP μεγάλα φορτία μπορούν να μεταφερθούν κατευθείαν απ'τη δοκό στο υποστυλώμα και αντίστροφα. Το πείραμα έδειξε πως αυτός είναι ο πιο αποτελεσματικός τρόπος ενίσχυσης κόμβων με σύνθετα υλικά έναντι κάμψης και διάτμησης, ακόμα και για εσωτερικούς κόμβους τριών διαστάσεων.

2.2.4.ΕΠΙΛΥΣΗ ΤΟΥ ΚΟΜΒΟΥ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΚΑΝ.ΕΠΕ[4]

Με τα βήματα που ακολουθήθηκαν και προηγουμένως από την παράγραφο §8.3.2.3, για την ενίσχυση με υφάσματα από ινοπλισμένα πολυμερή, το πάχος του υφάσματος με ίνες παράλληλες προς τον άξονα της δοκού δίνεται απ'τη σχέση (2) ενώ αυτό με ίνες παράλληλες προς τον άξονα του υποστυλώματος από την σχέση (3).

Συνίσταται η χρήση υφασμάτων με ίνες προς τις δύο κύριες διευθύνσεις που να καλύπτουν τις απαιτήσεις του πάχους. (Σ.8.3.2.3)

Η τιμή σχεδιασμού της ενεργού τάσης του οπλισμού ενίσχυση προσδιορίζεται σύμφωνα με την παράγραφο §8.2.2.2(iv). Εκτιμάται με βάση μία κρίσιμη τιμή της τάσης $\sigma_{jd, crit}$ η οποία εξαρτάται από τη μορφή αστοχίας, αστοχία του ίδιου του υλικού η πρόωρη αποκόλληση του..Ως τιμή σχεδιασμού θεωρείται αυτή που αντιστοιχεί στη δυσμενέστερη. Η αστοχία πρόωρης αποκόλλησης του υλικού ενίσχυσης αφορά μόνο τις ανοιχτές ενισχύσεις διότι στις κλειστές αποφεύγεται λόγω της περιμετρικής συνέχειας του στοιχείου ενίσχυσης. Άρα η μορφή αστοχίας είναι η αστοχία του υλικού ενίσχυσης (8.14, ΚΑΝ.ΕΠΕ) [4]

$$\sigma_{jd} \leq \frac{f_{jk}}{\gamma_m} \quad (4)$$

όπου f_{jk} είναι η χαρακτηριστική τιμή αντοχής του υλικού ενίσχυσης και γ_m είναι ο συντελεστής ασφαλείας για το υλικό ενίσχυσης (1,2 για ΙΟΠ).

$$\sigma_{jd, crit} = f_{jk} = E_j \varepsilon_{j, crit} = E_j \varepsilon_{j, max} k_v = 27579 \text{ MPa} \cdot 0,5 \cdot 1,5\% = 206,843 \text{ MPa}$$

με $k_v=0,5$ και $\varepsilon_{j, max} = \min(\varepsilon_{ju}, 1,5\%) = 1,5\%$, αφού δεν γνωρίζουμε την ε_{ju} και άρα

$$\sigma_{jd} = 206,843/1,2 = 172,369 \text{ MPa.}$$

Απ'το σχήμα 3 έχουμε ύψος δοκού $h_b = 300\text{mm}$, ύψος διατομής υποστυλώματος $h_c = 250\text{mm}$, θεωρητικό μήκος δοκού $L_b=1200+250=1450\text{mm}$, καθαρό μήκος δοκού $L_{bn}=1200\text{mm}$, ύψος ορόφου $h_{st}=1000 \cdot 2+300=2300\text{mm}$, μοχλοβραχίονας εσωτερικών δυνάμεων στη δοκό $z_b=300-25-6-18/2=210 \text{ mm}$.

Η ροπή στη δοκό θα είναι

$$\Sigma M_{yb} = 2 z_b A_s (3\Phi 18) f_{yd} = 2 \cdot 0,21\text{m} \cdot (400 \text{ MPa}/1,15) \cdot 762\text{mm}^2 = 111,32 \text{ kNm.} \quad (5)$$

Για να βρούμε τώρα τη συνισταμένη των ροπών στα υποστυλώματα έχουμε

$$v_d = N_d / (b_c h_c f_{cd}) = 312,5 \cdot 10^3 / (250^2 \cdot 25) = 0,2 \quad (8)$$

$$\omega_{tot} = [A_s (8\Phi 16) / (b_c h_c)] f_{yd} / f_{cd} = 1608 \cdot 400 \cdot 1,5 / (250^2 \cdot 1,15 \cdot 25) = 0,4 \quad (9)$$

$$d_1 = 250 + 6 + 16/2 = 390 \text{ mm} \quad (10)$$

οπότε $d_1/h_c = 390/250 = 1,56$ και από πίνακα 4.11 ΕΚΩΣ 2000[3] βρίσκω

$$\mu_{sd} = 0,221 \rightarrow M_{sd} = \mu_{sd} b_c h_c^2 f_{cd} = 0,221 \cdot 0,250 \cdot 0,250^2 \cdot 25000 / 1,5 = 57,55 \text{ kNm} = \Sigma M_{yc} \quad (11)$$

Απ' την παράγραφο §Σ.7.2.5 υπολογίζουμε για $\Sigma M_{yb} < \Sigma M_{yc}$

$$\text{Οριζόντια τέμνουσα δύναμη } V_{jh} = \Sigma M_{yb} [1/z_b - L_b / (h_{st} L_{bn})] = 237 \text{ kN} \quad (6)$$

$$\text{Κατακόρυφη τέμνουσα δύναμη } V_{jv} = V_{jh} h_b / h_c = 285 \text{ kN} \quad (7)$$

Οπότε οι εξισώσεις (2) και (3) δίνουν πάχη: $t_{jh} = 0,44 \text{ mm}$, $t_{jv} = 0,63 \text{ mm}$ και αφού πάχος 1 στρώσης του συγκεκριμένου υλικού είναι $0,176 \text{ mm}$ έχουμε

$$n_h = 0,44 / 0,176 = 2,5 = 3 \text{ στρώσεις} // \text{ στον άξονα της δοκού και}$$

$$n_c = 0,63 / 0,176 = 3,6 = 4 \text{ στρώσεις} // \text{ στον άξονα του υποστυλώματος.}$$

2.2.5.ΣΥΓΚΡΙΣΗ

Ξανά ο ΚΑΝ.ΕΠΕ μας δίνει σαν αποτέλεσμα παραπάνω στρώσεις απ' ό,τι το πείραμα. Βέβαια δεν λάβαμε υπόψη το δείγμα με τις χιαστί ίνες αλλά τα υπόλοιπα δύο όπου είχαν διαμήκη και εγκάρσια φορά στις ίνες, με τις δεύτερες να τυλίγουν τις πρώτες. Στην πρώτη περίπτωση όπου δεν υπάρχουν πρόσθετα στοιχεία αγκύρωσης η ύπαρξη παραπάνω στρώσεων είναι δυσμενής καθώς θα αστοχήσει με πρόωρη αποκόλληση του υλικού ενίσχυσης {8.2.2.2.(iv)(B) ΚΑΝ.ΕΠΕ}, όπως και στο πείραμα άλλωστε. Στην δεύτερη τα κομμάτια πρόσθετου σκυροδέματος αγκυρώνουν τις ίνες καλύτερα και άρα οι περισσότερες στρώσεις είναι υπέρ της ασφάλειας.

3.ΤΕΛΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

- Γενικά η χρήση ΙΟΠ στην ενίσχυση του κόμβου δοκού-υποστυλώματος οδήγησε σε αύξηση της αντοχής του έναντι τέμνουσας.
- Στην περίπτωση κλειστής ενίσχυσης και πρόσθετων στοιχείων αγκύρωσης οι παραπάνω στρώσεις δεν αστοχούν με πρόωρη αποκόλληση τους.
- Στην περίπτωση ανοιχτής και χωρίς πρόσθετα στοιχεία αγκύρωσης περισσότερες στρώσεις αποκολλώνται πριν το υλικό ενίσχυσης να φτάσει την αντοχή του.

Συνεπώς, κύριο μέλημα του μηχανικού όταν χρησιμοποιεί ΙΟΠ σε κόμβους στοιχείων είναι η σωστή αγκύρωση τους και όχι ο αριθμός των στρώσεων.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Στέφανος Η.Δρίτσος, “Ενισχύσεις - Επισκευές Κατασκευών Οπλισμένου Σκυροδέματος”
- [2] Μιχαήλ Ν.Φαρδής, “Μαθήματα Οπλισμένου Σκυροδέματος ΙΙΙ”
- [3] ΕΚΩΣ 2000
- [4] ΚΑΝ.ΕΠΕ.2010
- [5] Αλέξανδρος Δημήτριος Γ.Τσώνος, Κοσμάς Αθανάσιος Χ.Στυλιανίδης, “Προσεισμική και μετασεισμική ενίσχυση δομικών υποσυνόλων Οπλισμένου Σκυροδέματος με χρήση GFRP”
- [6] 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”

