

ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΜΕ ΦΥΛΛΑ ΚΑΙ ΡΑΒΔΟΥΣ (NSM) ΑΠΟ ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΑ ΠΟΛΥΜΕΡΗ .

**ΑΣΗΜΑΚΟΠΟΥΛΟΣ ΣΠΥΡΙΔΩΝ
ΦΟΥΝΤΟΠΟΥΛΟΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ**

Περίληψη

Τα ινοπλισμένα πολυμερή (ΙΟΠ) υπό μορφή φύλλων και ράβδων προσφέρουν νέες δυνατότητες στην ενίσχυση δομικών στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος (Ο/Σ). Αυτή η εργασία παρουσιάζει μια μελλοντικά υποσχόμενη τεχνική βασισμένη στην τοποθέτηση επικολλητών φύλλων και NSM ράβδων ΙΟΠ με σκοπό την αύξηση της καμπτικής και διατμητικής αντοχής υποστλωμάτων, δοκών και κόμβων. Ειδικότερα, θα γίνει αναφορά σε τρεις πειραματικές μελέτες στις οποίες εξετάζεται η αποτελεσματικότητα της εν λόγω τεχνικής. Θα παρουσιασθούν κατασκευαστικές λεπτομέρειες της μεθόδου ,θα γίνει σχολιασμός των αποτελεσμάτων και τέλος θα εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Κατασκευές Ο/Σ οι οποίες σχεδιάστηκαν με παλαιότερους κανονισμούς χρειάζονται ενίσχυση έτσι ώστε να καλύπτουν τις ελάχιστες απαιτήσεις των νέων αντισεισμικών προδιαγραφών. Συνήθως τα δομικά στοιχεία των παραπάνω κατασκευών είτε έχουν μικρές διαστάσεις διατομής, είτε οι οπλισμοί τους είναι ανεπαρκείς να ικανοποιήσουν την καμπτική και διατμητική ένταση που δημιουργούν τα σεισμικά φορτία. Επιπλέον, ως αποτέλεσμα της μη τήρησης του ικανοτικού σχεδιασμού που υπόκεινται οι νεώτεροι κανονισμοί, τα υποστυλώματα αστοχούν πριν από τις δοκούς γεγονός που εγκυμονεί κινδύνους κατάρρευσης των κατασκευών.

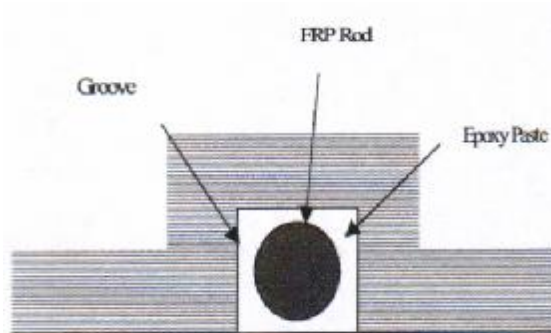
Η τεχνική αυτή ενίσχυσης πλεονεκτεί έναντι των μέχρι σήμερα γνωστών τεχνικών στο ότι δεν προσθέτει ίδιο βάρος στην κατασκευή, τα υλικά αυτά δεν διαβρώνονται και επιπλέον η χρήση NSM ράβδων ΙΟΠ εξαλείφει τα προβλήματα αγκύρωσης που παρουσιάζονταν σε περιοχές αρνητικών ροπών με την χρήση επικολλητών φύλλων ΙΟΠ. Επιπλέον, η τοποθέτηση των ράβδων δεν απαιτεί ιδιαίτερη προετοιμασία της επιφάνειας εργασίας.

Η πρώτη πειραματική μελέτη εφαρμογής της μεθόδου εξετάζει την αντοχή και την πλαστιμότητα εσωτερικών κόμβων δοκού – υποστυλώματος ενισχυμένων τόσο με φύλλα ΙΟΠ όσο και με συνδυασμό φύλλων και NSM ράβδων ΙΟΠ, πραγματοποιήθηκε από τους A. Prota, G. Manfredi, A. Nanni, E. Cosenza και παρουσιάστηκε στο «Seventh U.S. National Conference on Earthquake Engineering, Boston, Massachusetts, July 21 –25,2002». Η δεύτερη παρουσιάζει τα αποτελέσματα πειραμάτων αντοχής βάθρων, με την ίδια ενισχυτική διαδικασία, σε υπάρχουσα γέφυρα στο Missouri των Η.Π.Α. που επρόκειτο να κατεδαφιστεί και παρουσιάστηκε από τους G. Chen, A. Nanni, T. Alkhrdaji στο πανεπιστήμιο του Missouri, Rolla. Στο τέλος της μελέτης αυτής, γίνεται μια προσέγγιση του θεωρητικού υπόβαθρου υπολογισμού της ροπής αντοχής μέλους Ο/Σ υπό αξονικό φορτίο ενισχυμένου με NSM ράβδους ΙΟΠ . Η τρίτη πειραματική μελέτη εξετάζει την αύξηση της διατμητικής αντοχής δοκών με χρήση NSM ράβδων ΙΟΠ σε σύγκριση με τη μέχρι τώρα χρήση επικολλητών φύλλων ΙΟΠ και η οποία παρουσιάστηκε στο «3rd Inter. Conf. on Advanced Composite Materials in Bridges and Structures, Ottawa, Canada, 15-18 Aug. 2000» από τους A. Khalifa, L. De Lorenzis, A. Nanni.

Πρέπει να σημειωθεί ότι για την παρουσιαζόμενη τεχνική δεν υπάρχει κάποιο θεωρητικό υπόβαθρο, συνεπώς τέτοιες πειραματικές μελέτες και τα αποτελέσματά τους βοηθούν στην εκτίμηση της απόκρισης των ενισχυμένων στοιχείων στην πράξη και στην περαιτέρω αποσαφήνιση κρίσιμων θεμάτων ενισχύσεως και επισκευών.

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ ΜΕ NSM ΡΑΒΔΟΥΣ ΙΟΠ.

Η χρήση NSM (Near Surface Mounted) ράβδων ΙΟΠ είναι μια ελκυστική μέθοδος για την αύξηση της καμπτικής και διατμητικής αντοχής δομικών στοιχείων. Η τοποθέτηση των ράβδων επιτυγχάνεται δημιουργώντας «αυλάκια» στην επιφάνεια του σκυροδέματος. Συνήθως ο οπλισμός αυτός μπαίνει παράλληλα με τον υπάρχοντα χαλύβδινο οπλισμό. Τα «αυλάκια» έχουν τετραγωνική διατομή διαστάσεων μεγαλύτερων της διαμέτρου των ράβδων και δημιουργούνται κάνοντας δύο παράλληλες εγκοπές με κατάλληλο κοπτικό εξοπλισμό. Οι δύο εγκοπές έχουν προκαθορισμένο βάθος και η μεταξύ τους απόσταση ισούται με το απαιτούμενο βάθος του «αυλακιού». Το σκυροδέμα ανάμεσα στις δύο εγκοπές αφαιρείται και το σχηματιζόμενο «αυλάκι» καθαρίζεται. Το μισό γεμίζεται με εποξειδική ρητίνη υψηλού ιξώδους έτσι ώστε να διευκολυνθεί η διαδικασία τοποθέτησης των ράβδων οι οποίες και πιέζονται ελαφρώς για την καλύτερη εφαρμογή τους. Με αυτό τον τρόπο η ρητίνη αναγκάζεται να «αγκαλιάσει» την ράβδο και να καλύψει τα πλαϊνά τοιχώματα του «αυλακιού». Η ράβδος συγκρατείται στη θέση της με σφήνες οι οποίες μπαίνουν σε σταθερές αποστάσεις. Τέλος, το «αυλάκι» συμπληρώνεται με ρητίνη και η τελική επιφάνεια λειαίνεται. Η παραπάνω διαδικασία παρίσταται σχηματικά στα παρακάτω σχήματα .



1^η ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ (A. Prota, G. Manfredi, A. Nanni, E. Cosenza)

Το πειραματικό αυτό πρόγραμμα αποτελείται από 11 δοκίμια σταυροειδών πλαισίων υποστυλώματος – δοκού Ο/Σ. Οι εξεταζόμενες παράμετροι του πειράματος είναι το αξονικό φορτίο P του υποστυλώματος, ο τύπος ενίσχυσης ΙΟΠ (φύλλα ή NSM ράβδοι) και η ποσότητα αυτών. Στα άκρα του υποστυλώματος τοποθετούνται τεχνητές αρθρώσεις και στο άνω μέρος του ασκείται σταθερό θλιπτικό φορτίο P μέσω υδραυλικού εμβόλου. Ομοίως, στα

άκρα της δοκού ασκούνται δύο αντίρροπα φορτία κάθετα στον άξονά της τα οποία εναλλάσσονται σε φορά για να προσομοιώσουν την σεισμική δύναμη. Τα παραπάνω φορτία καταγράφονται με κατάλληλους αισθητήρες. Το πείραμα πραγματοποιήθηκε με τρεις τιμές του αξονικού φορτίου P (124.5, 249, 373.5kN), συγκεκριμένα για ν_d 0.1, 0.2 και 0.3 που αντιστοιχούν σε μέσες θλιπτικές τάσεις 3, 6 και 9 MPa και ο σχετικός κωδικός για τα δοκίμια είναι L, H και M αντίστοιχα. Τα δοκίμια αναλύθηκαν και διαστασιολογήθηκαν χωρίς αντισεισμικές προδιαγραφές με τον κανονισμό ACI 318-63 για GLD (Gravity Load Designed) πλαίσια έτσι ώστε η αστοχία των υποστυλωμάτων να προηγηθεί των δοκών.

Σε κάθε δοκίμιο οι διαστάσεις διατομής των υποστυλωμάτων είναι 20x20cm και το ύψος 2.64m και των δοκών 20x35.5cm με μήκος 3.05m. Στα υποστυλώματα τοποθετήθηκε διαμήκης οπλισμός 4Φ16 (1.92%) και συνδετήρες Φ10/200 με τον πρώτο σε απόσταση 10cm από την παρειά του κόμβου. Στις δοκούς τοποθετήθηκε διαμήκης οπλισμός 2Φ18 άνω και 3Φ22 κάτω και ανοιχτοί συνδετήρες Φ10/100. Η επικάλυψη των οπλισμών ήταν 38mm. Η ποιότητα του σκυροδέματος ήταν $f_{cd} \cong 30\text{MPa}$ και οι μέσες τιμές διαρροής του χάλυβα ήταν 448, 559, 511MPa για δείγματα από Φ16, Φ18 και Φ22 αντίστοιχα .

Δύο διαφορετικοί τύποι ράβδων ΙΟΠ από ανθρακονήματα χρησιμοποιήθηκαν. Ο πρώτος τύπος (Type 1) διαμέτρου 9.5mm έδωσε μέση εφελκυστική αντοχή 2155MPa, μέτρο ελαστικότητας 113900MPa και παραμόρφωση θραύσης 1.89% . Ο δεύτερος τύπος (Type 2) διαμέτρου 8mm έδωσε μέση εφελκυστική αντοχή 2014MPa, μέτρο ελαστικότητας 108270MPa και παραμόρφωση θραύσης 1.86% . Τα φύλλα ΙΟΠ με ανθρακονήματα είχαν εφελκυστική αντοχή 3800 MPa, μέτρο ελαστικότητας 230000 MPa και πάχος 0.165mm. Συγκεντρωτικά, τα δοκίμια και η ιδιότητές τους φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Sp.	Axial Load (kN)	Type of NSMR	Column		Joint		
			Lam. Wrap.	NSM Bars	Lam. parallel to the beam axis	Lam. perpend. to the beam axis	NSM Bars parallel to the beam axis
L1	124.5						
L2	124.5		x				
L3	124.5	Type 1	x	x			
L4	124.5	Type 2	x	x		x	x
H1	249						
H2	249		x				
H2	249		x				
H3	249	Type 1	x	x			
H4	249	Type 2	x	x		x	x
H5	249	Type 1	x	x	X	x	
M3	373.5	Type 2	x	x			

Στα δοκίμια H1 και L1 δεν έγινε καμία ενίσχυση, τα H2,L2 και H2U (με κατασκευαστικά λιγότερους συνδετήρες) περισφίχθηκαν στα άκρα με δύο στρώσεις φύλλων ΙΟΠ σε μήκος 380mm. Στα δοκίμια H3, L3 και M3 τοποθετήθηκαν NSM ράβδοι στα υποστυλώματα οι οποίες αγκυρώθηκαν στον κόμβο ανοίγοντας οπές, και περισφίχθηκαν με 2 στρώσεις φύλλων ΙΟΠ όπως και πριν. Τα δοκίμια L4,H4 ενισχύθηκαν με ράβδους NSM μήκους 1.52m στις δοκούς οι οποίες διαπέρασαν τον κόμβο. Παράλληλα όμως ο κόμβος ενισχύθηκε με φύλλα ΙΟΠ στην κάθετη διεύθυνση, παράλληλα στον άξονα του υποστυλώματος. Για την αγκύρωση των NSM ράβδων χρησιμοποιήθηκαν φύλλα ΙΟΠ μορφής U που κάλυπταν το κάτω πέλμα της δοκού κατά μήκος 51cm εκατέρωθεν του κόμβου. Τέλος, στο δοκίμιο H ο κόμβος

ενισχύθηκε όπως και προηγουμένως πλην όμως με την χρήση μόνο φύλλων ΙΟΠ. Τα αποτελέσματα των δοκιμών έχουν συγκεντρωθεί στον παρακάτω πίνακα.

Sp.	f_c' (MPa)	Failure Mode	Ultimate Column Shear (kN)	Story Drift Angle at First Cracking of the Joint (%)	Story Drift Angle at Ultimate (%)
L1	38.9	Compression failure of columns	41.18	0.3	3.11
L2	39.8	Tension failure of columns	44.21	0.27	2.76
L3	38.9	Shear failure of the joint	57.24	0.56	3.30
L4	36.5	Column-panel interface failure	56.60	-----	5.38
H1	31.7	Compression failure of columns	38.45	0.30	2.82
H2	36.5	Combined column-joint failure	49.70	0.35	3.50
H2U	36.5	Combined column-joint failure	51.19	0.35	3.53
H3	31.7	Shear failure of the joint	62.35	0.36	2.42
H4	39.8	Column-joint interface failure	70.42	-----	4.27
M3	39.8	Shear failure of the joint	56.17	0.62	3.27

Από τον πίνακα παρατηρούμε ότι για τιμές του αξονικού φορτίου $v_d=0.1$ τα δοκίμια με δείκτη 3 και 4 (ομάδα 3 και 4) έδωσαν περίπου τις ίδιες αντοχές αυξημένες κατά 39% από τα μη ενισχυμένα δοκίμια με δείκτη 1. Για την ομάδα 2 επιτεύχθηκε μία αύξηση της αντοχής κατά 7% με περίσφιξη των υποστυλωμάτων. Για $v_d=0.2$, η ομάδα 2 (ακόμα και το δοκίμιο H2U) παρουσίασε αύξηση της αντοχής κατά 30%. Το δοκίμιο H3 παρουσίασε αύξηση αντοχής 70% και το H4 83% σε σχέση με το H1. Η ομάδα 3 έδωσε αποτελέσματα ανεξάρτητα από το εφαρμοζόμενο θλιπτικό φορτίο.

Για χαμηλές τιμές του αξονικού φορτίου περισφίγγοντας μόνο τα υποστυλώματα προκαλείται απώλεια πλαστιμότητας περίπου ίση με 11%, ενώ ενισχύοντας τα υποστυλώματα επιπλέον με NSM ράβδους (δοκίμιο L3) και τον κόμβο (δοκίμιο L4) βελτιώνεται η ικανότητα απορρόφησης ενέργειας κατά 6% και 73% αντίστοιχα. Για τιμές του αξονικού φορτίου 0.2 η περίσφιξη του υποστυλώματος αύξησε την πλαστιμότητα 24% (δοκίμιο H2), στο δοκίμιο H3 υποβιβάστηκε κατά 14% και στο δοκίμιο H4 αυξήθηκε κατά 51%. Τα παραπάνω ποσοστά σύγκρισης έχουν εξαχθεί με όρους γωνιακής παραμόρφωσης θραύσης του κόμβου όπως φαίνεται στον πίνακα αποτελεσμάτων. Οι τιμές παραμόρφωσης όπου εμφανίζονται οι πρώτες ρωγμές λείπουν από τα δοκίμια με δείκτη 4 λόγω κάλυψης του κόμβου τους με φύλλα ΙΟΠ.

Συμπερασματικά μπορούμε να πούμε ότι η τεχνική των NSM ράβδων ΙΟΠ προσφέρει έναν ικανοποιητικό βαθμό ενίσχυσης ιδίως όταν χρησιμοποιείται και για την ενίσχυση των κόμβων δομικών στοιχείων Ο/Σ. Η αύξηση της αντοχής κατά 44-75% και της γωνιακής παραμόρφωσης 50-75% είναι σημαντικές ενδείξεις της αποτελεσματικότητας της νέας αυτής μεθόδου.

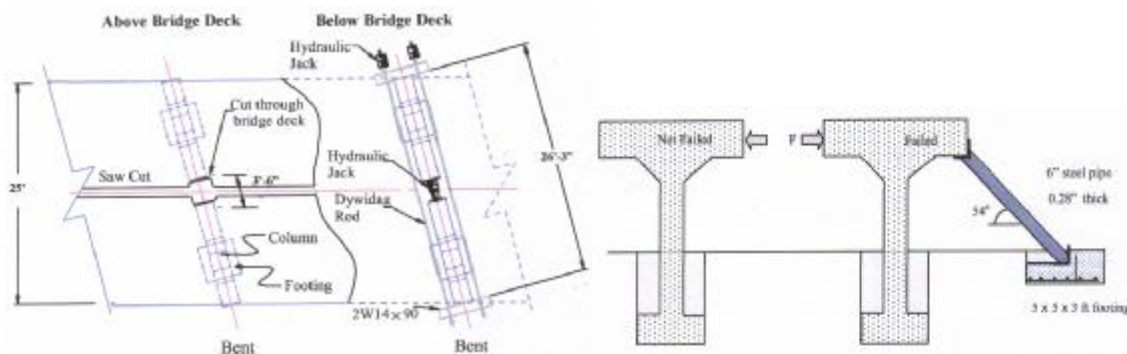
2^η ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ (G. Chen, A. Nanni, T. Alkhrdaji)

Το ερευνητικό αυτό πρόγραμμα πραγματοποιήθηκε με σκοπό να παρουσιάσει την δυνατότητα εφαρμογής και την αποτελεσματικότητα των NSM ράβδων ΙΟΠ για την αύξηση της καμπτικής αντοχής υποστυλωμάτων σε γέφυρες Ο/Σ και να ερευνήσει τους πιθανούς τρόπους αστοχίας τους. Η γέφυρα J857 (έτος κατασκευής 1932) στο Phelps County, Missouri

που επρόκειτο να κατεδαφιστεί την άνοιξη του 1999 επιλέχθηκε για την πραγματοποίηση του πειράματος.

Η γέφυρα στηρίζεται σε δύο μεσόβαθρα (3 αμφιέριστα καταστρώματα) που το καθένα αποτελείται από δύο υποστυλώματα συνδεδεμένα στο άνω άκρο τους με δοκό. Η διατομή των υποστυλωμάτων είναι τετραγωνική 0.6x0.6m με διαμήκη οπλισμό 4Φ19 στις γωνίες. Στην κεφαλή κάθε υποστυλώματος υπάρχουν 4Φ16 τα οποία συνεχίζονταν μέσα στο υποστυλώμα κατά 0.9m. Ο εγκάρσιος οπλισμός αποτελείται από συνδεδητές Φ6/457, ενώ η επικάλυψη των οπλισμών είναι 5cm. Κάθε υποστυλώμα εδράζεται σε τετραγωνικό πέδιλο διαστάσεων 1.2x1.2x0.75m. Το αξονικό φορτίο κάθε υποστυλώματος εκτιμήθηκε στα 444kN, η καμπτική αντοχή 190kNm και η διατμητική 253kN. Μετά από λήψη δοκιμών οι ιδιότητες των υλικών εκτιμήθηκαν σε: $f_c=17.2\text{MPa}$, $E_c=19.5\text{GPa}$, $f_y=227\text{MPa}$, $E_s=200\text{GPa}$.

Για την πραγματοποίηση του πειράματος, τα δύο υποστυλώματα κάθε βάθρου απομονώθηκαν με κατάλληλο κοπτικό εξοπλισμό (τομή καταστρώματος κατά μήκος της γέφυρας) και στον δημιουργούμενο αρμό τοποθετήθηκε υδραυλικό πιστόνι. Υδραυλικό πιστόνι τοποθετήθηκε και στη μία άκρη των βάθρων, έτσι ώστε εργαζόμενα εναλλάξ να προσομοιωθεί η σεισμική δύναμη. Πιο συγκεκριμένα, η πειραματική διάταξη φαίνεται στα παρακάτω σχήματα.



Αφού ενισχύθηκαν τα υποστυλώματα, υποβλήθηκαν σε έλεγχο σεισμικής τρωτότητας. Σύμφωνα με τους Αμερικάνικους Κανονισμούς η σεισμική επιτάχυνση που θα αναπτυχθεί με πιθανότητα υπέρβασης 90% στα 50 χρόνια για την συγκεκριμένη περιοχή είναι 0.1g. Για την επιτάχυνση αυτή, πρόβλημα διατμητικής αστοχίας στη βάση των υποστυλωμάτων δεν υπάρχει, σε αντίθεση με την περίπτωση της κάμψης η οποία υπερβαίνει την καμπτική αντοχή των υποστυλωμάτων. Για το μεσόβαθρο B2 οι αναπτυσσόμενες ροπές είναι 650 και 530kNm για τα υποστυλώματα P1 και P2 αντίστοιχα. Για το μεσόβαθρο B3 οι αναπτυσσόμενες ροπές είναι 560 και 350kNm για τα υποστυλώματα P1 και P2 αντίστοιχα. Η δύναμη που προκαλεί τα μεγέθη αυτά είναι 178kN και ασκείται στην κεφαλή κάθε υποστυλώματος.

Το υποστυλώμα B2P1 ύψους 3.66m χρησιμοποιήθηκε σαν δοκίμιο ελέγχου και δεν ενισχύθηκε. Το υποστυλώμα B2P2 ύψους 2.97m ενισχύθηκε με 14 NSM ράβδους IOΠ, 7 σε κάθε πλευρά στο επίπεδο που λειτουργεί η κάμψη και με 4 στρώσεις φύλλων CFRP καθ' όλο το ύψος του. Το υποστυλώμα B3P2 ύψους 1.96m ενισχύθηκε με 6 NSM ράβδους IOΠ, 3 σε κάθε πλευρά στο επίπεδο που λειτουργεί η κάμψη και με 4 στρώσεις φύλλων CFRP καθ' όλο το ύψος του. Και στις δύο τελευταίες περιπτώσεις οι NSM ράβδοι αγκυρώθηκαν στα πέδιλα θεμελίωσης. Τέλος, το υποστυλώμα B3P1 ύψους 3.15m περισιφίχθηκε με 6 στρώσεις φύλλων

GFRP σε όλο το ύψος του. Οι ιδιότητες των υλικών ενίσχυσης φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

FRP Type	Dimension [†] in. (mm)	Design Strength ksi (MPa)	Design Strain in./in. or mm/mm	Tensile Modulus ksi (GPa)
Glass sheets*	0.0139 (0.353)	220 (1520)	0.0210	10,500 (72)
Carbon sheets*	0.0065 (0.165)	550 (3800)	0.0170	33,000 (228)
Carbon rods**	⁷ / ₁₆ (11)	144 (993)	0.0084	17,200 (119)

[†] Sheet thickness or bar diameter * Fiber properties ** Composite rod properties

Τα υποστυλώματα του βάρθρου Β2 υποβλήθηκαν σε 9 κύκλους ανακυκλιζόμενης φόρτισης. Στη βάση, στο μέσο του ύψους και στο άνω άκρο του υποστυλώματος τοποθετήθηκαν μυκηνησιόμετρα τα οποία κατέγραφαν τη μετατόπιση και τη στροφή στα εν λόγω σημεία. Το μη ενισχυμένο υποστυλώμα Ρ1 αστόχησε με τιμή οριζόντιου φορτίου 267kN στη βάση του, ενώ το ενισχυμένο υποστυλώμα Ρ2 με τις 14 NSM ράβδους αστόχησε στα 360kN εξαιτίας αστοχίας του εδάφους θεμελίωσης. Όσον αφορά το βάρθρο Β3, το υποστυλώμα Ρ1 με τις 6 στρώσεις φύλλων ΙΟΠ από γυαλί δεν ανέπτυξε την πλήρη καμπτική του αντοχή καθώς το έδαφος αστόχησε στα 191kN. Τέλος, στο υποστυλώμα Β3Ρ2 με τις 6 NSM ράβδους και τις 4 στρώσεις φύλλων ΙΟΠ η αστοχία ξεκίνησε στα 389kN λόγω θραύσης των NSM ράβδων στη βάση του υποστυλώματος. Η τιμή αυτή είναι 100% μεγαλύτερη από την τιμή που αναμέναμε για το μη ενισχυμένο στοιχείο.

Συμπερασματικά μπορούμε να πούμε ότι η ενίσχυση των υποστυλωμάτων των βάρθρων με NSM ράβδους ΙΟΠ είχε σαν αποτέλεσμα σε 3 από τα 4 δοκίμια το πρόβλημα κάμψης να μετατραπεί σε πρόβλημα θεμελίωσης, γεγονός που αποδεικνύει την αποτελεσματικότητα της μεθόδου για την καμπτική ενίσχυση δομικών στοιχείων Ο/Σ. Ακόμα και το δοκίμιο Β3Ρ2 που αστόχησε σε κάμψη παρουσίασε αξιοσημείωτη αντοχή σε σχέση με την μη ενισχυμένη διατομή. Ιδιαίτερα θα πρέπει να λαμβάνονται για την εφαρμογή της μεθόδου πρόσθετα μέτρα στη θεμελίωση και στους κόμβους κτιρίων Ο/Σ για την αποφυγή ανεπιθύμητων τρόπων αστοχίας. Η συνεισφορά των σύνθετων μανδύων στην περίσφιξη της ενισχυόμενης διατομής είναι μικρή όταν η θλιπτικές τάσεις που ενεργούν στην παραπάνω είναι μικρές. Παρόλα αυτά, η χρήση των φύλλων ΙΟΠ μαζί με NSM ράβδους βοηθούν στην αγκύρωση των τελευταίων και στην αποφυγή αποκόλλησης τους.

Παρακάτω θα παρουσιασθεί μια θεωρητική προσέγγιση υπολογισμού της ροπής αντοχής μελών Ο/Σ υπό αξονικό φορτίο, ενισχυμένων με NSM ράβδους ΙΟΠ. Αφού καθοριστεί η παραμόρφωση αστοχίας του σκυροδέματος, ο ουδέτερος άξονας της διατομής υπολογίζεται με κατάλληλες δοκιμές. Θεωρούμε την παραμόρφωση του σκυροδέματος κατά την αστοχία της διατομής ϵ_c , και ϵ'_c την παραμόρφωση όταν το σκυρόδεμα φτάσει την μέγιστη αντοχή του f'_c η οποία προκύπτει από την σχέση :

$$e'_c = \frac{1.71 f'_c}{E_c} \quad (\text{Todeschini et al., 1982})$$

Οι παράμετροι a_1 και b_1 που καθορίζουν το ορθογωνικό μπλοκ των θλιπτικών τάσεων στο σκυρόδεμα, θεωρώντας αρχική παραβολική κατανομή, είναι:

$$a_1 = \frac{3e'_c \epsilon_c - \epsilon_c^2}{3b_1 e_c'^2}, \quad b_1 = \frac{4e'_c - \epsilon_c}{6e'_c - 2\epsilon_c}$$

Η παραμόρφωση του οπλισμού χάλυβα και ΙΟΠ απο το διάγραμμα παραμορφώσεων δίνονται:

$$e_s = e_c \frac{d-c}{c}, \quad e'_s = e_c \frac{c-d'}{c}, \quad e_f = e_c \frac{d_n-c}{c}, \quad e'_f = e_c \frac{c-d'_n}{c}$$

όπου c η απόσταση του ουδέτερου άξονα από την ακραία θλιβόμενη ίνα και e_c η αρχικά υποτιθέμενη παραμόρφωση του σκυροδέματος κατά τη θραύση της διατομής.

Οι τάσεις χάλυβα και ΙΟΠ δίνονται απο τους νόμους των υλικών ως ακολούθως:

$$f_s = E_s \varepsilon_s [f_y, \quad f'_s = E_s \varepsilon'_s [f_y, \quad f_f = E_f \varepsilon_f [f_{fy}, \quad f'_f = E_f \varepsilon'_f [f_{fy}$$

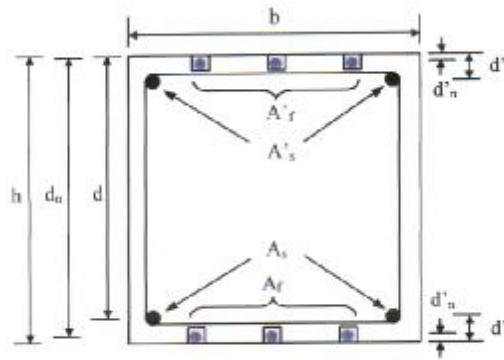
Με ισορροπία των δυνάμεων στην διατομή ο ουδέτερος άξονας c προκύπτει:

$$c = \frac{P + A_s f_s - A'_s f'_s + A_f f_f - A'_f f'_f}{a_1 b_1 f_c' b}$$

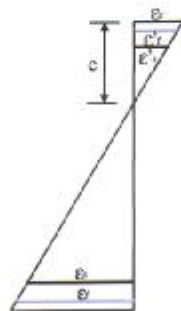
ενώ για συμμετρικό οπλισμό:

$$c = \frac{P + A_s (f_s - f'_s) + A_f (f_f - f'_f)}{a_1 b_1 f_c' b}$$

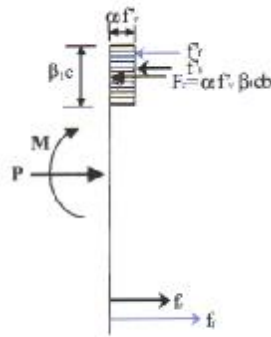
Παρακάτω δίνονται σχηματικά η διατομή του στοιχείου και τα διαγράμματα παραμορφώσεων, τάσεων και δυνάμεων.



(a) details of cross-section



(b) strain compatibility



(c) force equilibrium

Αν η αρχικά υποτιθέμενη τιμή c δεν συμπίπτει με την υπολογιζόμενη, επιλέγουμε νέα τιμή και επαναλαμβάνουμε τους υπολογισμούς. Η ροπή αντοχής του μέλους προκύπτει:

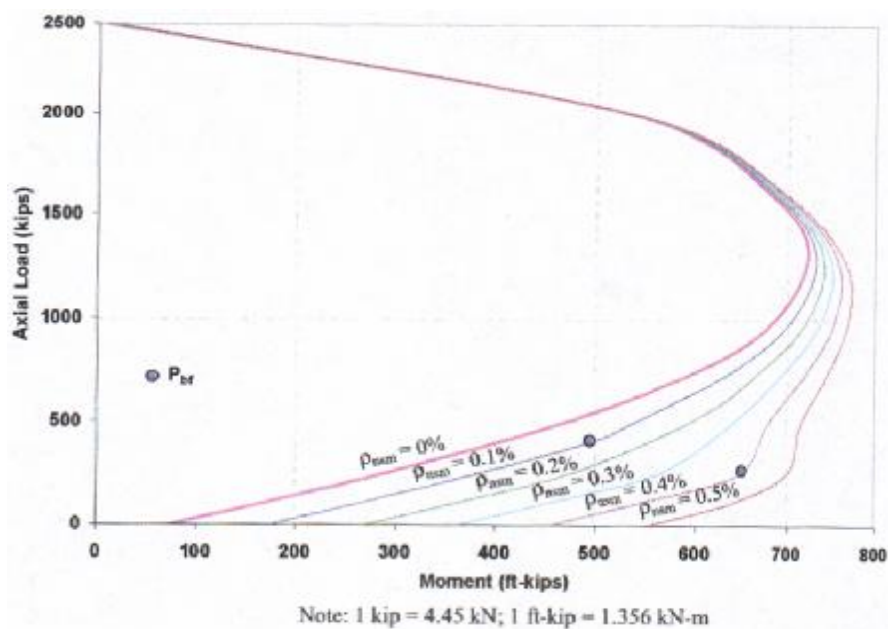
$$M = a_1 f_c' b_1 c b \left(\frac{h}{2} - \frac{b_1 c}{2} \right) + A_s' f_s' \left(\frac{h}{2} - d' \right) + A_s f_s \left(d - \frac{h}{2} \right) + A_f' f_f' \left(\frac{h}{2} - d_n' \right) + A_f f_f \left(\frac{h}{2} - d_n \right)$$

Για την επαλήθευση της ισορροπίας των δυνάμεων, χρησιμοποιείται η παρακάτω σχέση:

$$P = a_1 f_c' b_1 c b + A_s' f_s' + A_s f_s + A_f' f_f' + A_f f_f$$

Με βάση τις παραπάνω σχέσεις εκτιμήθηκαν οι αντοχές των υποστυλωμάτων B2P2 και B3P2. Για την περίπτωση του B3P2 με τις 6 NSM ράβδους προκύπτει ροπή αντοχής 344kNm και για το B2P2 με τις 14 NSM ράβδους 533kNm. Η ασκούμενη ροπή (από το πιστόνι) κατά την αστοχία του B3P2 (αστοχία σπλισμού) ήταν $389/2 \cdot 1.96 = 381$ kNm, τιμή η που είναι πολύ κοντά στην αναμενόμενη θεωρητική και απέχει απ' αυτή 10% που είναι υπέρ της ασφάλειας. Ακόμη, παρατηρούμε ότι η προσθήκη 8 επιπλέον NSM ράβδων αύξησε τη ροπή αντοχής κατά 55% γεγονός που δείχνει την αποτελεσματικότητα της νέας αυτής τεχνικής.

Τέλος, παρατίθεται το διάγραμμα αξονικού φορτίου – ροπής αντοχής της διατομής των υποστυλωμάτων της γέφυρας σε συνάρτηση με το ποσοστό των NSM ράβδων ΙΟΠ.



3^η ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ (A. Nanni, A. Khalifa, L. De Lorenzis)

Η παρούσα πειραματική εργασία μελετά την συμπεριφορά και τους τρόπους αστοχίας δοκών διατομής-T Ο/Σ ενισχυμένων με φύλλα και με NSM ράβδους ΙΟΠ. Συγκεκριμένα για την πραγματοποίηση του πειράματος χρησιμοποιήθηκαν 7 δοκίμια τα οποία χωρίστηκαν σε

δύο ομάδες ως εξής: Η πρώτη ομάδα (Α) ενισχύθηκε με φύλλα ΙΟΠ ενώ η δεύτερη (Β) με NSM ράβδους ΙΟΠ.

Όλα τα δοκίμια είχαν μήκος 3.05m ,ύψος κορμού 405mm, πάχος κορμού 150mm, πλάτος πέλματος 380mm και πάχος πέλματος 100mm. Ο διαμήκης οπλισμός αποτελείτο από 2Φ13 άνω και 2Φ28 κάτω. Επίσης, χρησιμοποιήθηκαν συνδετήρες Φ10/90 κοντά στα άκρα των δοκιμίων για ένα μήκος της τάξης των 355mm για κάθε άκρο. Η στήριξη των δοκιμίων ήταν αμφιέριστη και δύο κατακόρυφα φορτία ασκήθηκαν με υδραυλικό έμβολο ικανότητας 1000kN στο κέντρο των ανοιγμάτων τους. Ο λόγος διατμητικού ανοίγματος προς το ύψος της δοκού προσδιορίστηκε ίσος με 3. Κατάλληλες διατάξεις LVDTs χρησιμοποιήθηκαν για την μέτρηση μετατοπίσεων στο μέσο των διατμητικών ανοιγμάτων.

Η ομάδα Α αριθμούσε 5 δοκιμαστικές δοκούς. Το δοκίμιο Α1 δεν ενισχύθηκε και χρησιμοποιήθηκε σαν δοκίμιο ελέγχου. Στο δοκίμιο Α2 έγινε υδροβολή και τοποθετήθηκε μία συνεχής στρώση φύλλου ΙΟΠ από άνθρακα τύπου CF-130 μορφής U με τις ίνες προσανατολισμένες κάθετα στον άξονα της δοκού. Στο δοκίμιο Α3, η επεξεργασία της επιφάνειας του σκυροδέματος έγινε με τέτοιο τρόπο ώστε να επιτευχθεί υψηλότερος βαθμός τραχύτητας και τοποθετήθηκε παρόμοια ενίσχυση. Μικρές τρύπες δημιουργήθηκαν καθ' όλο το διατμητικό άνοιγμα του δοκιμίου Α4 με σκοπό την αύξηση της τραχύτητας της επιφάνειας. Οι τρύπες αυτές ανοίχθηκαν σε αποστάσεις 25mm και είχαν διάμετρο 10mm και βάθος 4mm. Ακολούθησε υδροβολή και το δοκίμιο ενισχύθηκε όπως και τα προηγούμενα. Τέλος, μετά από υδροβολή, το δοκίμιο Α5 ενισχύθηκε με μία συνεχή στρώση φύλλου ΙΟΠ από άνθρακα τύπου CF-530 μορφής U με τις ίνες προσανατολισμένες κάθετα στον άξονα της δοκού.

Στην ομάδα Β ενισχύθηκαν δύο δοκίμια με NSM ράβδους ΙΟΠ από άνθρακα, μορφής ανοιχτών συνδετήρων και εξετάστηκε η συμπεριφορά τους και οι τρόποι αστοχίας τους σε διάτμηση. Στα δοκίμια αυτά, Β1 και Β2, τοποθετήθηκαν εξωτερικά οι ράβδοι σε σταθερή απόσταση 175mm και 125mm αντίστοιχα. Μετά από τη συμπλήρωση των «αυλακιών» με εποξειδική ρητίνη, τα δοκίμια αφέθηκαν σε θερμοκρασία δωματίου για 15 μέρες πριν χρησιμοποιηθούν. Παρακάτω, φαίνονται τα εγκάρσια στον άξονα «αυλάκια» πριν την τοποθέτηση των NSM ράβδων σε μία από τις δοκούς της ομάδας Β.



Ακολουθεί πίνακας με τις διαστάσεις και τις μηχανικές ιδιότητες των υλικών των δοκών.

Material	Dimensions (mm)	Yield point (MPa)	Compressive strength (MPa)	Ultimate tensile strength (MPa)	Modulus of elasticity (GPa)
Concrete	---	---	32	---	28
Steel bars	D = 28	430	---	730	200
Steel bars	D = 13	350	---	530	200
Steel bars	D = 10	350	---	530	200
CFRP rods	D = 10	---	---	1900	105
CFRP sheets* (CF-530)	$t_f = 0.165$	---	---	3520	372
CFRP sheets* (CF-130)	$t_f = 0.165$	---	---	3790	228

* Fiber only

Το δοκίμιο A1 εμφάνισε ρωγμές στα μέσα των διατμητικών ανοιγμάτων σχεδόν ταυτόχρονα στην τιμή των 115kN. Όταν το φορτίο του εμβόλου έφτασε τα 177kN οι ρωγμές αυτές επεκτάθηκαν και το δοκίμιο αστόχησε. Στο δοκίμιο A2 η αστοχία πραγματοποιήθηκε στα 308kN, ήταν ψαθυρή και οφειλόταν στην αποκόλληση του φύλλου ΙΟΠ. Η διατμητική αντοχή που αναπτύχθηκε ήταν 74% μεγαλύτερη από αυτή του A1. Ομοίως, το δοκίμιο A3 αστόχησε σε τιμή 323kN από αποκόλληση της στρώσης φύλλων ΙΟΠ. Αν και η αύξηση της αντοχής ήταν μόνο 5% το δοκίμιο συμπεριφέρθηκε λιγότερο ψαθυρά, πάντα σε σχέση με το A2. Η αστοχία του δοκιμίου A4 ήταν παρόμοια με αυτή του A3 και συνέβη σε φορτίο 305kN. Πρέπει να σημειωθεί ότι όπως φάνηκε από τα πειραματικά αποτελέσματα των A2, A3 και A4, η αύξηση της τραχύτητας της επιφάνειας των δοκιμίων δεν επηρέασε καθόλου την διατμητική τους αντοχή. Όσον αφορά το δοκίμιο A5 (CF-530) το φορτίο αστοχίας του έφτασε τα 372kN που σημαίνει 110% μεγαλύτερη αντοχή από το δοκίμιο ελέγχου και 21% περισσότερο από το δοκίμιο A2 (CF-130). Η αστοχία του A5 ήταν ξαφνική και όμοια με αυτή του A2. Στο δοκίμιο B1 η αστοχία συνέβη στα 230kN. Αυτό αναλογεί σε 30% περισσότερη διατμητική αντοχή από το δοκίμιο ελέγχου. Το δοκίμιο B2 αστόχησε στα 255kN που σημαίνει 44% μεγαλύτερη αντοχή από το δοκίμιο ελέγχου και 11% περισσότερο από το δοκίμιο B1. Και στα δύο δοκίμια η αστοχία επήλθε όταν η κύρια διατμητική ρωγμή συνάντησε μία από τις NSM ράβδους με αποτέλεσμα την αποκόλληση της ρητίνης από το «αυλάκι».

Από τα παραπάνω συμπεραίνουμε ότι η χρήση NSM ράβδων ΙΟΠ αποτελεί μια εξίσου αποτελεσματική μέθοδο ενίσχυσης σε διάτμηση σε σχέση με τα φύλλα ΙΟΠ. Λαμβάνοντας υπόψη ότι με μισή αντοχή και με λιγότερη ποσότητα υλικού ανέπτυξαν μια αρκετά καλή διατμητική συμπεριφορά.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα αποτελέσματα των παραπάνω 3 πειραματικών μελετών έδειξαν ότι η ενίσχυση των δομικών στοιχείων Ο/Σ (κόμβων, υποστυλωμάτων και δοκών) ήταν αποτελεσματικότερη για την αύξηση της αντοχής των διατομών τους. Σε περιπτώσεις όπου τα φύλλα ΙΟΠ κατασκευαστικά δεν μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν, η νέα τεχνική των NSM ράβδων ΙΟΠ αποτέλεσε ικανό εργαλείο ενίσχυσης των δομικών στοιχείων Ο/Σ. Η έρευνα στο συγκεκριμένο πεδίο ενίσχυσης συνεχίζει να βελτιώνει το θεωρητικό υπόβαθρο, τις κατασκευαστικές διαδικασίες και την ποιότητα των πειραματικών δοκιμών για να τροφοδοτήσει τον κατασκευαστικό κλάδο με επιστημονικά τεκμηριωμένες και εμπειρισταωμένες γνώσεις. Εν τω μεταξύ, μια προσεκτική χρήση των σύνθετων υλικών σε συνδυασμό πάντα με την κρίση του μηχανικού μπορεί να προσφέρει ουσιώδη πλεονεκτήματα.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- 1. Selective seismic strengthening of R/C frames with composites.** A. Nanni, A. Prota, G. Manfredi, E. Cosenza. Seventh U.S. National Conference on Earthquake Engineering, Boston, Massachusetts, July 21-25, 2002
- 2. FRP composites for shear strengthening of RC beams.** A. Khalifa, L. De Lorenzis, A. Nanni. Proc., 3rd Inter. Conf. On advanced composite materials in bridges and structures, Ottawa, Canada, J. Humar and A. G. Razaqpur, Editors, 15-18 Aug. 2000, pp. 137-144
- 3. Carbon Fibers in Civil Structures: Rehabilitation and New Construction.** A. Nanni. Proc., The Global Outlook for carbon fiber 2000, Intertech, San Antonio, Texas, December 4-6, 2000, 6pp.
- 4. FRP Reinforcement for Bridge Structures.** A. Nanni. Proceedings, Structural Engineering Conference, The University of Kansas, Lawrence, KS, March 16, 2000 , 5 pp.
- 5. Destructive and non-destructive testing of bridge J857 Phelps County, Missouri.** T. Alkhrdaji, A. Nanni, G. Chen. Center for infrastructure engineering studies, university of Missouri-Rolla, Volume 3, strengthening and testing to failure of bridge piers.