

ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΜΕ ΤΗΝ ΤΕΧΝΙΚΗ NSM (Near Surface Mounted) ΡΑΒΔΩΝ ΑΠΟ ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΑ ΠΟΛΥΜΕΡΗ .

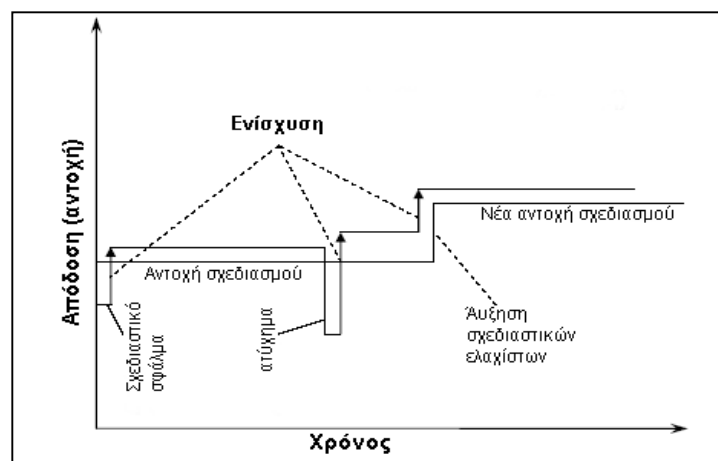
ΤΕΝΤΟΛΟΥΡΗΣ ΕΥΑΓΓΕΛΟΣ – ΣΙΔΗΡΟΠΟΥΛΟΣ ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ

Περίληψη

Τα τελευταία χρόνια έχουμε ραγδαία αύξηση της χρήσης ινοπλισμένων πολυμερών (ΙΟΠ) στις ενισχύσεις κατασκευών. Στην εργασία αυτή παρουσιάζουμε θεωρητικά στοιχεία, πειραματικά αποτελέσματα καθώς και πρωτοποριακές και πολλά υποσχόμενες τεχνικές ενίσχυσης με ράβδους ΙΟΠ NSM (Near Surface Mounted), με σκοπό την ενίσχυση μελών οπλισμένου σκυροδέματος (ΟΣ) σε κάμψη και διάτμηση. Συγκεκριμένα στην εισαγωγή γίνεται αναφορά στη λογική της στρατηγικής των ενισχύσεων, μια σύντομη ιστορική αναφορά καθώς και σύντομη περιγραφή της τεχνικής NSM. Η παρουσίαση γίνεται κυρίως μέσα από τα αποτελέσματα πειραματικών δοκιμών. Ακολουθεί η περίληψη της χρήσης ράβδων ΙΟΠ NSM για ενίσχυση μελών ΟΣ σε κάμψη καθώς και σύντομα πειραματικά αποτελέσματα. Ενίσχυση δοκών ΟΣ μορφής T και τέλος η παρουσίαση της συγκεκριμένης τεχνικής σε πρακτική εφαρμογή ενίσχυσης κατασκευής σιλό και αναφορά στους λόγους για τους οποίους προτιμήθηκε η συγκεκριμένη τεχνική.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Όπως φαίνεται από τη παρακάτω εικόνα κατά τη διάρκεια της ζωής μιας κατασκευής είναι πιθανό να προκύψουν διάφοροι λόγοι για τους οποίους να χρειασθεί να ενισχυθεί η κατασκευή.



Αρχικά παρατηρούμε ότι λόγω ενός κατασκευαστικού ή σχεδιαστικού σφάλματος η αντοχή της κατασκευής είναι μικρότερη από την αντοχή σχεδιασμού (ελάχιστα των ισχυόντων κανονισμών), με αποτέλεσμα να ενισχύσουμε τη κατασκευή ούτως ώστε να ικανοποιούνται οι ισχύοντες κανονισμοί. Μετά από κάποιο χρονικό διάστημα είναι η κατασκευή να χάσει την αντοχή της

λόγω ενός τυχαιακού συμβάντος (σεισμός, φωτιά, πρόσκρουση, μεγάλη αύξηση φορτίου κ.τ.λ.), με αποτέλεσμα να μην ικανοποιούνται και πάλι οι κανονισμοί. Καταφεύγουμε στην ενίσχυση ούτως ώστε η κατασκευή μας να είναι ικανή να ανταποκριθεί σε μία παρόμοια ακραία κατάσταση. Έπειτα προκύπτει η ανάγκη ενίσχυσης λόγω αλλαγής των κανονισμών και ταυτόχρονη αύξηση των ελαχίστων απαιτήσεων.

Η χρήση των NSM ΙΟΠ ράβδων είναι ελπιδοφόρα τεχνολογία για αύξηση καμπτικής και διατμητικής αντοχής ανεπαρκών, εξασθενημένων μελών ΟΣ. Οι ράβδοι NSM ΙΟΠ (ινοπλισμένα πολυμερή) είναι προηγμένα υλικά που αποτελούνται από τον συνδυασμό ινών (άνθρακα, γυαλιού, αραμιδίου) σε μήτρα εποξειδικής ρητίνης υπό τη μορφή ράβδων, οι οποίες εφαρμόζονται σε επιφανειακές εγκοπές του ΟΣ που περιέχουν εποξειδικές ρητίνες.

Αν και η χρήση των ΙΟΠ ράβδων για αυτές τις εφαρμογές είναι πολύ μοντέρνα, NSM χαλύβδινοι ράβδοι έχουν χρησιμοποιηθεί στην Ευρώπη για ενίσχυση ΟΣ στις αρχές του 1950 (Asplund 1949). Ειδικότερα οι πρώτες εφαρμογές έγιναν για ενίσχυση καταστροφμάτων γεφυρών στις περιοχές αρνητικών ροπών, όπου τοποθετούσαν χαλύβδινους ράβδους σε εγκοπές στην επιφάνεια του καταστροφάματος οι οποίες πληρωνόταν με τσιμεντοκονίαμα. Από τη δεκαετία του '60 η ανάπτυξη ισχυρών συγκολλητικών ουσιών (εποξειδικές ρητίνες) είχε ως αποτέλεσμα την εξέλιξη της μεθόδου χρησιμοποιώντας ρητίνες αντί του τσιμεντοκονιάματος. Όμως λόγω της ευαισθησίας σε διάβρωση των μεταλλικών ράβδων ένα επιπλέον στρώμα σκυροδέματος ήταν αναγκαίο. Παρόλα αυτά, χρησιμοποιήθηκαν μόνο εποξειδικές ρητίνες για την επικάλυψη των ράβδων αλλά με τη πάροδο του χρόνου αποδείχθηκε ότι η εποξειδική επικάλυψη δεν παρείχε ικανοποιητική προστασία έναντι διάβρωσης.

Στις μέρες μας η χρήση των ΙΟΠ ράβδων κατάφεραν να υπερνικήσουν τα μειονεκτήματα των μεταλλικών ράβδων. Ο τρόπος εφαρμογής τους περιγράφεται παρακάτω: Κατασκευάζουμε την εγκοπή στην επιθυμητή διεύθυνση στην επιφάνεια του σκυροδέματος. Το μέγεθος της εγκοπής επιλέγεται τέτοιο ώστε να υπάρχει διάκενο γύρω από τη ράβδο επαρκές για συγκόλληση. Ύστερα οι εγκοπές καθαρίζονται σχολαστικά με νερό πολύ υψηλής πίεσης ούτως ώστε να απομακρυνθούν σκόνες και τυχόν χαλαρά κομμάτια. Η εγκοπή γεμίζεται ως τη μέση με εποξειδική ρητίνη υψηλού ιξώδους. Τοποθετούμε τη ράβδο ΙΟΠ στην εγκοπή και πιέζουμε ελαφρά, με αποτέλεσμα η ράβδος να παίρνει την κατάλληλη θέση και να γεμίζονται τα κενά ανάμεσα στη ράβδο και το τοίχωμα της εγκοπής. Έπειτα το υπόλοιπο της εγκοπής γεμίζεται με ρητίνη και την φέρνουμε στην ίδια επιφάνεια με αυτή του σκυροδέματος.

Βασικά πλεονεκτήματα είναι: Η ανθεκτικότητα σε διάβρωση (σε αντίθεση με το χάλυβα. Η ιδιότητα αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική γιατί η θέση των ράβδων είναι πολύ κοντά στην επιφάνεια η οποία είναι εκτεθειμένη στις περιβαλλοντολογικές συνθήκες), το χαμηλό βάρος ($1/4$ έως $1/5$ του χάλυβα), η εξαιρετικά υψηλή (εφελκυστική) αντοχή (πολλαπλάσια από αυτή του χάλυβα), η διαθεσιμότητα των υλικών σε πολύ μεγάλα μήκη και η μεγάλη “ευκαμψία” τους με αποτέλεσμα η αντίστοιχη τεχνική ενίσχυσης να χαρακτηρίζεται από εξαιρετική ευκολία και ταχύτητα εφαρμογής, ακόμα και σε δύσκολα προσβάσιμα τμήματα της κατασκευής. Επιπλέον η τεχνική αυτή είναι ιδιαίτερα ελκυστική για καμπτική ενίσχυση σε περιοχές αρνητικών ροπών, πλακών και καταστροφμάτων, όπου η εξωτερική ενίσχυση είναι εκτεθειμένη σε μηχανικές και βλαβερές περιβαλλοντολογικές επιπτώσεις. Επίσης η αγκύρωση της ράβδου γίνεται μέσα στο ΟΣ με αποτέλεσμα να έχουμε πολύ καλύτερη συνάφεια σε σχέση με τη χρήση ελασμάτων ή υφασμάτων ΙΟΠ. Όμως η χρήση σύνθετων υλικών έχει και κάποια μειονεκτήματα. Το βασικότερο είναι η πτωχή συμπεριφορά σε υψηλές θερμοκρασίες, το σχετικά υψηλό κόστος (το οποίο όμως μειώνεται με το χρόνο), και η έλλειψη πλαστιμότητας (όχι όμως και παραμορφωσιμότητας αποτέλεσμα της οποίας είναι η αύξηση της πλαστιμότητας στοιχείων ΟΣ σε αρκετές περιπτώσεις.

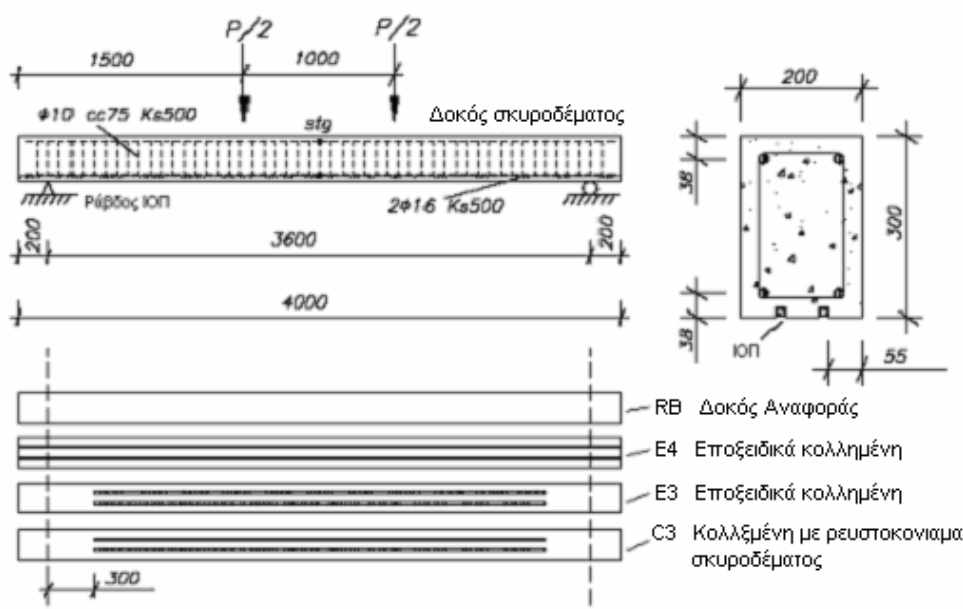
Ιδιαίτερη έμφαση πρέπει να δοθεί σε κάποια σημαντικά στοιχεία της τεχνικής. Το πάχος επικάλυψης εσωτερικών οπλισμών είναι καθοριστικός παράγοντας για την εφαρμογή της τεχνικής. Είναι αναγκαίο να γνωρίζουμε το πραγματικό πάχος επικάλυψης του υπό ενίσχυση μέλους ούτως ώστε να αποκλείσουμε το ενδεχόμενο κατά τη δημιουργία της εγκοπής να κοπεί ο εσωτερικός οπλισμός. Σε κάθε πρακτική εφαρμογή της τεχνικής πρέπει να λαμβάνονται υπ’ όψιν μέτρα προστασίας προσωπικού εφόσον κατά τη δημιουργία εγκοπών έχουμε χρήση τροχών, μεγάλες ποσότητες αιωρούμενης σκόνης τσιμέντου και υλικού τροχού. Κατά τη διάρκεια της χρήσης των εποξειδικών ρητινών έχουμε τοξικό περιβάλλον.

Για τους παραπάνω λόγους κρίνεται αναγκαία η χρήση μάσκας, προστατευτικών γυαλιών και γαντιών.

Στην συνέχεια της εργασίας παρουσιάζονται μια σειρά από εργαστηριακές δοκιμές δοκιμών ΟΣ σε κάμψη και διάτμηση.

ΠΕΙΡΑΜΑ ΚΑΜΨΗΣ

Στο πείραμα αντοχής σε κάμψη χρησιμοποιούμε 4 δοκίμια ΟΣ ορθογωνικής διατομής από τα οποία το ένα χρησιμοποιείται ως δοκίμιο αναφοράς (RB) ενώ τα υπόλοιπα είναι ενισχυμένα. Η γεωμετρία της δοκού, οι θέσεις των φορτίων καθώς και θέση των εγχοπών φαίνεται στο πιο κάτω σχήμα.

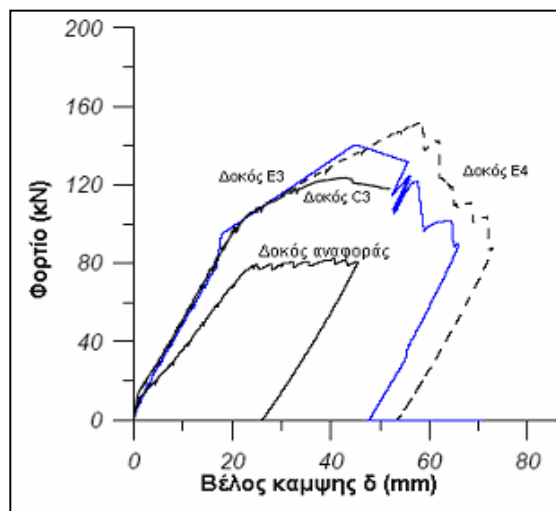


Η δοκός C3 είναι ενισχυμένη με NSM ΙΟΠ ράβδους αλλά ως υλικό πλήρωσης έχει ρευστοκονίαμα σκυροδέματος (οι επιφάνειες της εγχοπής έχουν εκτραχυνθεί με αμμοβολή), ενώ αντίθετως οι E3,E4 έχουν υλικό πλήρωσης εποξειδικές ρητίνες με τη διαφορά ότι στην E4 η ράβδος εκτείνεται σε όλο το μήκος της δοκού. Το μέγεθος των εγχοπών είναι 15x15mm για τις E3 και E4 ενώ είναι 20x20mm για τη C3 (χρήση ρευστοκονιάματος σκυροδέματος). Οι εγχοπές απέχουν 55mm από την πλευρά της δοκού και είναι συμμετρικά τοποθετημένες. Οι ράβδοι ΙΟΠ είναι τετραγωνικής διατομής 10x10mm σε όλα τα ενισχυμένα δοκίμια. Στον πιο κάτω πίνακα δίδονται στοιχεία για το σκυρόδεμα, τον χάλυβα και τα ΙΟΠ που εφαρμόσαμε στο πείραμα.

	f_{cc} [MPa]	f_{ct} [MPa]	f_{st} [MPa]	E_s [GPa]	f_{cu} [MPa]	E_f [GPa]	ϵ_{fu} [%]
Σκυρόδεμα	60.7	3.6					
Χάλυβας			490	200			
ΙΟΠ					4140	230	18.0

Τα δοκίμια θα φορτιστούν σε μηχανικό γρύλο ελέγχου βύθισης με ρυθμό μεταβολής 0.6mm/min. Οι μετρήσεις που πάρθηκαν είναι για το φορτίο, στο μέσο του ανοίγματος, στις

στηρίζεις και η παραμόρφωση των ελασμάτων. Η κατανομή του φορτίου και τα πάχη (ρωγμών) καταγράφονται κάθε 10 kN.



Όπως παρατηρούμε και στο διπλανό διάγραμμα (φορτίου – βέλους κάμψης) το δοκίμιο E4 έχει την καλύτερη περιβάλλουσα αστοχίας(όπως ήταν αναμενόμενο). Η αστοχία της E4 οφείλεται στη θραύση της ράβδου, ενώ οι δοκοί E3 και C3 άντεξαν την καταπόνηση έως ότου άρχισε η αστοχία της αγκύρωσης. Συγκεκριμένα στη δοκός C3 εμφανίστηκαν ρωγμές παράλληλα στη ράβδο ΙΟΠ και με την αύξηση του φορτίου το ρευστοκονίαμα άρχισε να αποκολλάται από τη ράβδο ΙΟΠ. Η δοκός E3 έδειξε πιο πλάσιμη συμπεριφορά αλλά αστόχησε και αυτή λόγω απώλειας της συνάφειας στην αγκύρωση.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζουμε τα πειραματικά αποτελέσματα καθώς επίσης και θεωρητικούς υπολογισμούς της φέρουσας ικανότητας των δοκιμίων. Για τον υπολογισμό της θεωρητικής τιμής του μέγιστου φορτίου μετρήθηκε η παραμόρφωση των ράβδων την στιγμή της αστοχίας.

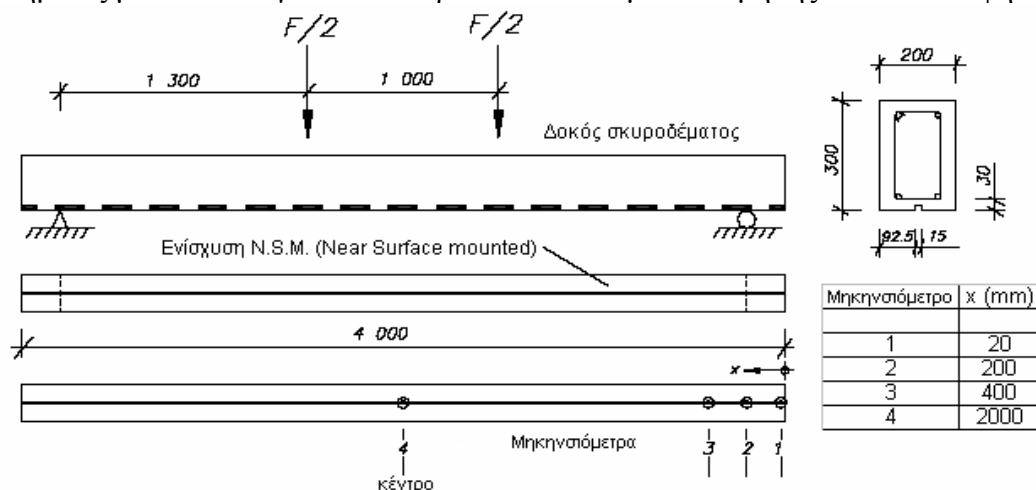
Ράβδος	Μέγιστο Φορτίο [kN]	Θεωρητικό Φορτίο [kN]	Μέγιστο / Θεωρητικό	Μορφή αστοχίας
C3	123.5	149.3	0.83	Αγκύρωση
E3	140	167.7	0.83	Αγκύρωση
E4	152	176.3	0.86	Στη ράβδο
Αναφοράς	79	—	—	Διαρροή χάλυβα

Παρατηρούμε ότι οι θεωρητικοί υπολογισμοί υπερεκτιμούν το φορτίο αστοχίας. Υπάρχουν πολλοί λόγοι γι' αυτό. Για την περιπτώσεις αστοχίας των δοκιμίων C3, E3 όπου έχουμε αστοχία της αγκύρωσης, η θεωρία δεν καλύπτει σε βάθος το θέμα αυτό. Παρ' όλα αυτά για το δοκίμιο E4 περιμέναμε μεγαλύτερο φορτίο αστοχίας, αλλά πιθανά σφάλματα κατά την μέτρηση της παραμόρφωσης της ράβδου να αλλοίωσαν τα αποτελέσματα.

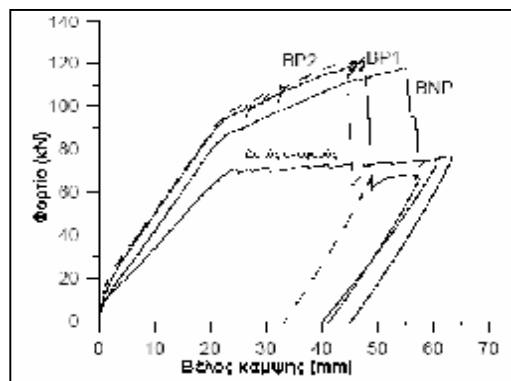
ΠΕΙΡΑΜΑ ΚΑΜΨΗΣ (ΣΕ ΠΡΟΕΝΤΕΤΑΜΕΝΟΥΣ ΙΟΠ NSM ΡΑΒΔΟΥΣ)

Το παρακάτω πείραμα περιλαμβάνει δοκούς οι οποίες έχουν ενισχυθεί με προεντεταμένους ΙΟΠ NSM ράβδους τετραγωνικής διατομής. Κατά τη διάρκεια της προέντασης γεννήθηκαν αρκετά ερωτήματα όπως: Πως και έως πιο σημείο να προενταθούν οι ράβδοι ΙΟΠ; Πως θα εξασφαλισθεί ικανοποιητικό μήκος αγκύρωσης; Πόση χαλάρωση θα προκύψει όταν αφαιρεθεί η δύναμη προέντασης; Αποφασίστηκε η προένταση να μην υπερβαίνει το 20% της μέγιστης παραμόρφωσης και υπάρχουν 2 κύριοι λόγοι γι' αυτό. Στις εργασίες πεδίου θα είναι σχεδόν ακατόρθωτο να αγκυρώσουμε τις ράβδους ΙΟΠ για πολύ υψηλές τάσεις και οι διατμητικές δυνάμεις στην επιφάνεια του σκυροδέματος πιθανότατα θα είναι αρκετά μεγάλες. Για την επίτευξη της προέντασης η δοκός τοποθετήθηκε στο έδαφος και η εγκοπή έγινε στη πάνω επιφάνεια της. Έπειτα οι εγκοπές καθαρίστηκαν προσεκτικά για να απομακρυνθούν σκόνες και σαθρά κομμάτια και ακολουθήθηκε η διαδικασία της τοποθέτησης των NSM ΙΟΠ ράβδων όπως αναφέραμε στην εισαγωγή. Σε κάθε ράβδο είναι

τοποθετημένα 5 μηχανισιόμετρα, ένα ακριβώς στο άκρο της δοκού, 3 σε ένα τμήμα 400mm από το άκρο της δοκού και ένα στο μέσον της. Οι θέσεις των μηχανισιομέτρων καθώς και η πειραματική διάταξη απεικονίζονται στην παρακάτω εικόνα. Τα δοκίμια έχουν ελεύθερο άνοιγμα 3600mm, συνολικό μήκος 4m και διατομή 200x300mm. Ελέγχθηκαν 4 δοκίμια από τα οποία: 1 ήταν το δοκίμιο αναφοράς, 1 δοκίμιο ενισχυμένο μεν, αλλά χωρίς προένταση και 2 δοκίμια με ΙΟΠ NSM ράβδους υπό προένταση (BP1, BP2). Η διάσταση των εγκοπών είναι 15x15mm. Τα δοκίμια είχαν οπλισμό διάτμησης $\Phi 10/75$ κύριο οπλισμό 4 $\Phi 16$ οι οποίες ήταν τοποθετημένες μια σε κάθε γωνία εσωτερικά του οπλισμού διάτμησης και επικάλυψη 30mm.



Έπειτα οι ράβδοι τοποθετήθηκαν στην συσκευή προέντασης έως ότου να επιτευχθεί παραμόρφωση περίπου 2000 micro, η οποία αντιπροσωπεύει περίπου 320 Mpa τάση στη ράβδο. Όμως ένα ποσοστό της τάξης του 5% της δύναμης προέντασης χάθηκε λόγω μικροπροβλημάτων με το εξοπλισμό. Η δύναμη προέντασης αφαιρέθηκε μετά από 5 ημέρες ούτως ώστε η ρητίνη να έχει στεγνώσει πλήρως. Εδώ παρατηρήθηκε μια πρόσθετη απώλεια παραμόρφωσης περίπου 2% στο μέσο των ράβδων BP1 και BP2. Το μηχανισιόμετρο που ήταν τοποθετημένο στο άκρο της ράβδου έδειξε απώλειες της τάξης του 70% και στα 2 δοκίμια, ενώ τα υπόλοιπα μηχανισιόμετρα έδειξαν απώλεια παραμόρφωσης περίπου 5%, το οποίο αποδεικνύει ότι το μεγαλύτερο τμήμα της προέντασης μεταφέρθηκε στη δοκό (όπως ήταν αναμενόμενο). Η συμπληρωματική απώλεια οφείλεται πιθανότατα σε ένα συνδυασμό απωλειών στον υδραυλικό κύλινδρο, στην διατμητική παραμόρφωση της εποξειδικής ρητίνης στη σύνδεση των ράβδων ΙΟΠ με το σκυρόδεμα και την απώλεια παραμόρφωσης της ράβδου ΙΟΠ. Κατά την διάρκεια του πειράματος δεν υπήρχε μηχανική προένταση με αποτέλεσμα η ρητίνη να είναι αναγκασμένη να αναλάβει όλες τις διατμητικές δυνάμεις μετά την σύσφιξη της.



Οι περιβάλλουσες του διαγράμματος φορτίου – παραμόρφωσης απεικονίζονται στο διπλανό σχήμα. Μελετώντας την εικόνα παρατηρούμε ότι η ακαμψία του δοκιμίου είναι περίπου ίση για δοκό με ή χωρίς προένταση, αλλά η προένταση βοηθά στην καθυστέρηση της θραύσης του σκυροδέματος και της διαρροής του οπλισμού.

Τα δοκίμια με ενίσχυση είχαν ως μορφή αστοχίας την θραύση των ράβδων ΙΟΠ.

Από το πείραμα εξάγονται πολλά και χρήσιμα συμπεράσματα:

Δοκός	Πρώτη ρωγμή [kN]	Διαρροή χάλυβα [kN]	Μέγιστο φορτίο [kN]	Μέγιστη παραμόρφωση [mm]
Αναφοράς	10	71	75	60
BNP	16	84	118	55
BP1	19	96	121	46
BP2	21	99	121	44

Η ενίσχυση αύξησε το φορτίο κατά περίπου 70% συγκρινόμενο με τη δοκό αναφοράς. Τα δοκίμια BP1,BP2 (με τις ΙΟΠ ράβδους υπό προένταση) είχαν αύξηση του φορτίου μέχρι την διαρροή του οπλισμού κατά 37% σε σύγκριση με το δοκίμιο BNP (με ενίσχυση αλλά χωρίς προένταση) και μια αύξηση του φορτίου αστοχίας κατά 100% συγκρινόμενο με τη ράβδο αναφοράς, αλλά το ίδιο φορτίο αστοχίας σε σύγκριση με την BNP όπως φαίνεται στον παραπάνω πίνακα. Η αύξηση του φορτίου μέχρι την διαρροή του οπλισμού είναι πολύ σημαντική παράμετρος για την διάρκεια ζωής μιας κατασκευής καθώς βελτιώνει τη συμπεριφορά σε κόπωση με αποτέλεσμα να αυξάνεται η διάρκεια στο χρόνο.

ΠΕΙΡΑΜΑ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ

Σε αυτή τη πειραματική μελέτη εξετάστηκε διατμητική επάρκεια και οι μορφές αστοχίας δοκών Ο.Σ. διατομής T ενισχυμένων με ράβδους NSM ΙΟΠ. Δοκιμάστηκαν 8 δοκοί πλήρους κλίμακας (δύο δοκοί ελέγχου και έξι δοκοί ενισχυμένοι διατμητικά με NSM ΙΟΠ ράβδους). Οι παράμετροι που εξετάστηκαν ήταν : αποστάσεις μεταξύ των ράβδων , τρόποι ενίσχυσης , αγκύρωση των ράβδων και ύπαρξη εσωτερικών χαλύβδινων συνδετήρων. Οι διαστάσεις των δοκών διατομής T ήταν οι εξής: πλάτος του πέλματος 380 mm, πάχος του πέλματος 100 mm, ύψος του κορμού 310 mm και πάχος του κορμού 150 mm. Η ποσότητα του οπλισμού κάμψης Φ28 ήταν ίδια για όλους τους δοκούς , επιπλέον οι δοκοί με συνδετήρες είχαν και 2Φ13 στο πέλμα και συνδετήρες Φ10/35. Υπολογισμοί έχουν γίνει έτσι ώστε να προηγηθεί οι διατμητική αστοχία , ώστε να εξεταστεί η συμβολή των ράβδων NSM ΙΟΠ στην διατμητική αντοχή των δοκών. Η ποιότητα του σκυροδέματος ήταν $f_{cd} \sim 31$ MPa , όριο διαρροής του διαμήκη οπλισμού και των συνδετήρων μετρήθηκε 414 και 345 MPa αντίστοιχα . Οι ράβδοι ΙΟΠ Φ9,5 έδωσαν μέση εφελκυστική αντοχή 1875 MPa και μέτρο ελαστικότητας $E=105$ GPa . Εποξειδική ρητίνη είχε μέση θλιπτική αντοχή 55 MPa , μέση εφελκυστική αντοχή 13,8 MPa , και παραμόρφωση θραύσης 4%. Μετά από την ενίσχυση τα δοκίμια διατηρήθηκαν σε θερμοκρασία δωματίου για 15 ημέρες . Οι δοκοί είχαν αμφιέρειστη στήριξη , και λόγω διατμητικού ανοίγματος ως προς το βάθος διαμήκης οπλισμού $a/d=3$. Δύο κατακόρυφα φορτία ασκήθηκαν με υδραυλικό έμβολο 200 ton . Χρησιμοποιήθηκαν κατάλληλες διατάξεις LVDT για μέτρηση μετατοπίσεων στα μέσα διατμητικών ανοιγμάτων , και οι διατάξεις για μέτρηση παραμορφώσεων τοποθετημένες σε μερικές από τους ράβδους ΙΟΠ.



Προετοιμασία πειράματος .

Δοκοί χωρίς συνδετήρες . Κατά την διάρκεια φόρτισης της δοκού BV (χωρίς ενίσχυση) , πρώτες διαγώνιες διατμητικές ρωγμές σχηματίστηκαν υπό φορτίο 110 KN , οι οποίες ξεκίνησαν ταυτόχρονα στο κέντρο και των δύο διατμητικών ανοιγμάτων .Στο φορτίο 181 KN μία ρωγμή διευρύνθηκε και διαδόθηκε μέχρι αστοχίας .

Δοκός B90-7 , ενισχύθηκε με ΙΟΠ NSM ράβδους σε απόσταση ανά 178 mm ,και η αστοχία συνέβη στο φορτίο 230 KN .Αυτό αντιστοιχεί στην αύξηση διατμητικής ικανότητας 27,6% έναντι δοκού BV . Ωστόσο διαγώνιες διατμητικές ρωγμές σχηματίστηκαν και σε αυτή την δοκό , οποίες διευρύνθηκαν και διαδόθηκαν καθώς το φορτίο αυξανόταν. Η αστοχία τελικά επήλθε με αποκόλληση και απώλεια εποξειδικής επικάλυψης μίας από τους ράβδους ΙΟΠ NSM τεμνόμενης από την μέγιστη διατμητική ρωγμή .

Σε δοκό B90-5 ,οποία διέφερε από την B90-7, μόνο σε πιο πυκνή διάταξη ράβδων ΙΟΠ NSM ανά 127 mm . Μέγιστο φορτίο ήταν 255 KN , με αντίστοιχη αύξηση αντοχής 41,4% από την δοκό ελέγχου και κατά 10,8 % από την δοκό B90-7 . Ο τρόπος αστοχίας ήταν παρόμοιος με της δοκού B90-7 .

Δείγμα B90-5A ήταν το ίδιο με το B90-5 εκτός του ότι οι ράβδοι ΙΟΠ , αγκυρώθηκαν σε οπές στο πέλμα της δοκού οι οποίες αποτέλεσαν συνέχεια των εγχοπών του κορμού , και επίσης γέμισαν με εποξειδική ρητίνη . Η λεπτομέρεια αυτή οδήγησε σε αλλαγή τρόπου αστοχίας και σε ουσιαστική αύξηση αντοχής της δοκού . Πρώτη διαγώνια διατμητική ρωγμή σχηματίστηκε στο φορτίο 178 KN . Το μέγιστο φορτίο ήταν 371 KN , που αυξήθηκε κατά 106 % , 61 % και 45,5 % συγκρίνοντας με ράβδους BV , B90-7 και B90-5, αντίστοιχα . Σε μέγιστο επίπεδο φόρτισης , δημιουργήθηκαν δευτερεύουσες ρωγμές στο σκυρόδεμα στο επίπεδο διαμήκους χαλύβδινου οπλισμού ως αποτέλεσμα δυνάμεων που αναπτύχθηκαν από τους παραμορφωμένους χαλύβδινους ράβδους και συνδυασμού άλλων δράσεων . Αστοχία τελικά έγινε αμέσως με την απώλεια επικάλυψης του διαμήκους χαλύβδινου οπλισμού .

Δοκός B45-7 είχε NSM ράβδους σε απόσταση 178 mm υπό γωνία 45° (με το διαμήκη άξονα της δοκού . Η αστοχία συνέβη στο φορτίο 331 KN , που αντιστοιχεί σε αύξηση αντοχής κατά 83,3 % σε σχέση με την δοκό ελέγχου ,όπως αναμενόταν οι ράβδοι υπό γωνία 45° δείχνουν καλύτερα αποτελέσματα από τους κατακόρυφους με τις ίδιες αποστάσεις μεταξύ ράβδων .Έτσι αντοχή αυξήθηκε κατά 43,6 % σε σχέση με δοκό B90-7 .Αστοχία όπως και στο B90-7 έγινε με απώλεια εποξειδικής επικάλυψης ταυτόχρονα σε δύο NSM ΙΟΠ ράβδους ,η κάθε μια στο αντίστοιχο διατμητικό άνοιγμα , τους οποίους διαπερνούσε μέγιστη διατμητική ρωγμή .

Δοκίμιο B45-5 διαφέρει από το B45-7 μόνο με πυκνότερη τοποθέτηση ράβδων ανά 127 mm . Η αστοχία συνέβη σε φορτίο της τάξης 355KN , δείχνοντας αύξηση της αντοχής 97 % , 39.4 % , 7.5 % πάνω από BV , B90-5 , B45-7 αντίστοιχα . Ο τρόπος αστοχίας ήταν ίδιος με

αυτόν που περιγράφηκε προηγουμένως για την δοκό B90-5A , με σχηματισμό ρωγμών κατά μήκος οπλισμού κάμψης και τελικά απώλεια της επικάλυψης σκυροδέματος .



Τρόπος αστοχίας δοκού B90-7 .

Beam code (1)	Steel stirrups		NSM FRP rods			
	Quantity (2)	Spacing, in. (3)	Quantity (4)	Spacing, in. (5)	Angle, degrees (6)	Anchorage in flange (7)
BV	—	—	—	—	—	—
B90-7	—	—	2 No. 3	7	90	No
B90-5	—	—	2 No. 3	5	90	No
B90-5A	—	—	2 No. 3	5	90	Yes
B45-7	—	—	2 No. 3	7	45	No
B45-5	—	—	2 No. 3	5	45	No
BSV	2 no. 3	14	—	—	—	—
BS90-7A	2 no. 3	14	2 No. 3	7	90	Yes

Note: 1 in. = 25.4 mm.

Λεπτομέρειες των δοκιμών .



Τρόπος αστοχίας δοκού B45-7.



Τρόπος αστοχίας δοκού B90-5A.

Δοκοί με ύπαρξη εσωτερικών χαλύβδινων συνδετήρων . Σε δοκό BSV , με απόσταση συνδετήρων ανά 350 mm και χωρίς καμία ενίσχυση ,όταν το φορτίο αυξήθηκε διατμητικές ρωγμές διευρύνθηκαν και διαδόθηκαν πάνω στο πέλμα . Αστοχία έγινε όταν το φορτίο πήρε τιμή ~ 306 KN.

Δοκός BS90-7A είχε το ίδιο χαλύβδινο οπλισμό διάτμησης , όπως BSV και επιπλέον ενισχύθηκε εξωτερικά με κατακόρυφους ράβδους NSM ΙΟΠ ανά 178 mm αγκυρωμένες στο πέλμα . Το μέγιστο φορτίο ήταν 414 KN , το οποίο είναι 35 % μεγαλύτερο από το φορτίο της δοκού BSV .Τελικά ο τρόπος αστοχίας ήταν αποκόλληση επικάλυψης σκυροδέματος όπως περιγράφηκε για B90-5A . Σε αυτή την περίπτωση ωστόσο αυτό συνέβη κατά την πρόοδο της καμπτικής αστοχίας ,γεγονός που έγινε φανερό από την σύνθλιψη της ακραίας πάνω ίνας σκυροδέματος . Η άλλη διαφορά σε σχέση με την αστοχία των δοκών B90-5A και B45-5 είναι ότι το σκυρόδεμα επικάλυψης δεν σπάει τελείως , που οφείλεται στην δράση περισφίξεις των χαλύβδινων συνδετήρων .

Beam code (1)	Ultimate load, kips (2)	Failure mode (3)
BV	40.6	SC
B90-7	51.8	BF
B90-5	57.4	BF
B90-5A	83.5	SP
B45-7	74.4	BF
B45-5	80.0	SP
BSV	68.9	SC
BS90-7A	93.0	SP + FF

Note: 1 kip = 4.448 kN; SC = shear compression; BF = bond failure of NSM rods; SP = splitting of concrete cover; and FF = flexural failure.

Συνοπτικά αποτελέσματα δοκιμών .

Συζήτηση αποτελεσμάτων της πειραματικής δοκιμής .

Τα αποτελέσματα της πειραματικής δοκιμής έδειξαν ότι η χρήση των NSM ΙΟΠ ράβδων είναι μία αποτελεσματική τεχνική για αύξηση διατμητικής αντοχής των δοκών Ο.Σ. .Σε περίπτωση απουσίας των χαλύβδινων συνδετήρων , αυξάνει την αντοχή μέχρι και 105.7 % , με αποτέλεσμα να ελέγχεται η διατμητική αστοχία στην δοκό . Για δοκίμια που περιείχαν συνδετήρες η διατμητική ικανότητα της ενισχυμένης δοκού αυξήθηκε κατά 35 % έναντι αυτής χωρίς ενίσχυσης .

Η διατμητική αντοχή ενισχυμένων δοκών μπορεί να αυξηθεί με εξής τρόπους : με πύκνωση των NSM ράβδων ,ή με αγκύρωση των ράβδων στο πέλμα , ή με την τοποθέτηση των ράβδων υπό γωνία 45° , αντί 90° .

Οι τρόποι αυτοί έχουν διαφορετικό βαθμό αποδοτικότητας . Η μείωση των αποστάσεων μεταξύ NSM ράβδων από 178 σε 127 mm , αντιστοιχεί σε αύξηση κατά 40 % ποσοστού υλικού ΙΟΠ , που οδηγεί σε αύξηση αντοχής κατά 10,8 % και 7,5 % για κατακόρυφες και υπό γωνία 45° , αντίστοιχα . Η αντικατάσταση κατακόρυφων ράβδων με υπό γωνία 45° , αυξάνει την ποσότητα του υλικού ΙΟΠ κατά 41,1 % ,και η αντοχή του μέλους μεγαλώνει 43,6 % και 39,4 % για τις αποστάσεις 178 και 127 mm αντίστοιχα .Τέλος η αγκύρωση των ράβδων στο πέλμα , απαιτεί 33 % περισσότερο ΙΟΠ υλικού με αύξηση διατμητικής αντοχής του μέλους κατά 45,5 % . Η σύγκριση αυτή δείχνει ότι ο ποιο αποτελεσματικός τρόπος για αύξηση διατμητικής αντοχής δοκών Ο.Σ. διατομής T είναι η χρήση NSM ΙΟΠ ράβδων αγκυρωμένων στο πέλμα .Χρήση των υπό γωνία 45° ράβδων NSM ΙΟΠ αντί των κατακόρυφων είναι επίσης αποτελεσματική ενώ μείωση των αποστάσεων μεταξύ των ράβδων δεν παράγει αξιόλογη αύξηση της διατμητικής αντοχής .

Συμπεράσματα .

Από την πειραματική μελέτη που παρουσιάστηκε παραπάνω μπορούν να διαγραφούν τα ακόλουθα συμπεράσματα :

- Η χρήση των NSM ΙΟΠ ράβδων είναι αποτελεσματική τεχνική στην αύξηση διατμητικής αντοχής δοκών Ο.Σ. Σε περίπτωση έλλειψης των συνδετήρων , αυξάνει μέχρι 106% , και εξασφαλίζεται διατμητική επάρκεια δοκού .
- Από τους δύο δοκούς με συνδετήρες η ποσότητα των οπίων είναι μικρότερη από τις διατάξεις ACI , ενισχυμένη δοκός έδειξε αύξηση διατμητικής αντοχής κατά 35 % έναντι μη ενισχυμένης . Επομένως αυτό δηλώνει ότι η συνεισφορά των NSM ΙΟΠ ράβδων μπορεί να είναι σημαντική στους υπάρχοντες διατμητικούς οπλισμούς .

- Ένας από τους τρόπους αστοχίας που παρατηρήθηκαν είναι η απώλεια της συνάφειας ενός ή παραπάνω NSM IOΠ ράβδων με διάσπαση και αποχώρηση της εποξειδικής επικαλύψεις μαζί με τμήμα σκυροδέματος .Αποτελέσματα των δοκιμών δείχνουν ότι αυτός ο μηχανισμός μπορεί να παρεμποδιστεί με αύξηση της συνάφειας ,αγκυρώνοντας NSM IOΠ ράβδους στο πέλμα της δοκού ή τοποθετώντας τους ράβδους υπό γωνία 45° αρκετά πυκνά .
- Αφού προληφθεί η απώλεια συνάφειας των NSM IOΠ ράβδων , ως καθοριστικός τρόπος αστοχίας επέρχεται να είναι ρηγμάτωση και απώλεια επικαλύψεις σκυροδέματος καμπτικού οπλισμού . Αυτός ο μηχανισμός μπορεί να εξηγηθεί με διαφορετική διαμόρφωση NSM IOΠ ράβδων και των συνδετήρων .Αντίθετα με τους συνδετήρες , NSM IOΠ ράβδοι δεν είναι ικανοί να περιορίσουν την δράση των παραμορφωμένων διαμηκών οπλισμών συμπεριλαμβανόμενης και της δράσης σφήνας . Αυτές οι δυνάμεις αυξάνουν τις εφελκυστικές τάσεις στο γύρο σκυρόδεμα , που οδηγεί τελικά σε διαχωρισμό του διαμήκους οπλισμού από σκυρόδεμα και απώλεια αγκύρωσης .

ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΣΙΛΟ ΜΕ IOΠ NSM ΡΑΒΔΟΥΣ

Τη δεκαετία του 70 τα σιλό ΟΣ ήταν μια ευρέως διαδεδομένη λύση για μακροχρόνια αποθήκευση τσιμέντου, άνθρακα και άλλων υλικών στην Αμερική. Οι διαστάσεις των κατασκευών αυτών άλλαζαν ανάλογα με το αποθηκευόμενο υλικό. Σιλό αποθήκευσης τσιμέντου η άνθρακα, το οποίο παρουσιάζεται σ'αυτή την εργασία, συνήθως χαρακτηρίζονται από λόγο ύψος προς διάμετρο μεγαλύτερο του 2 και από τοιχεία με συνεχόμενη πεδילוδοκό ή γενική κοιτόστρώση.(Saffarian,Harris 1985). Ξεκινώντας από την κορυφή προς τη βάση μιας τυπικής κατασκευής σιλό αναγνωρίζουμε τα πιο κάτω τμήματα: η στέγη, με μια ή περισσότερες οπές τροφοδοσίας, ο όγκος αποθηκεύσεως, το χωνί τροφοδοσίας, με έναν ή περισσότερους κώνους εκφόρτωσης και το τμήμα της βάσης το οποίο μερικές φορές διαμορφώνεται σαν ένα τούνελ για τη συλλογή και μεταφορά του εκφορτωμένου υλικού.

Ανάλογα με το πάχος και τη διάμετρο του τοιχείου του σιλό, κάθετοι και οριζόντιοι οπλισμοί τοποθετούνται σε ένα ή περισσότερα επίπεδα. Όταν τοποθετείται μονή εσχάρα οπλισμών αυτή βρίσκεται κοντά στην εξωτερική επιφάνεια του τοιχείου. Ο εσωτερικός οπλισμός αντιστέκεται σε δυνάμεις και καμπτικές ροπές λόγω των επιβαλλόμενων φορτίων (νεκρά φορτία, στατική πίεση αποθηκευόμενου υλικού, υπερπιέσεις που δημιουργούνται κατά τη διάρκεια φόρτωσης ή εκφόρτωσης, έκκεντρες φορτίσεις λόγω της παρουσίας πολλαπλών ανοιγμάτων εκφόρτωσης, θερμικές τάσεις και ανεμοπιέσεις ή σεισμικές δράσεις).

Πολλά σιλό έδειξαν σημεία καταπόνησης με αποτέλεσμα να παρακινήσουν τους ιδιοκτήτες να απαιτήσουν τεχνικές έρευνες, με σκοπό να προσδιορισθούν τα αίτια και να αναπτυχθούν στρατηγικές ενίσχυσης. Θρυμματισμοί της επικάλυψης σκυροδέματος, εμφάνιση ρωγμών διαφόρων σχημάτων και η πτώση σκόνης από τα τοιχεία είναι οι πιο καινές προειδοποιήσεις της αναγκαιότητας επεμβάσεων. Στην πλειοψηφία των περιπτώσεων οι έρευνες των μηχανικών τόνισαν ότι οι συνθήκες καταπόνησης αποδίδονται κυρίως τόσο σε κατασκευαστικές όσο και σχεδιαστικές ατέλειες όπως φαίνεται πιο κάτω:

- Ο σύγχρονος Αμερικάνικος κώδικας προτείνει δύο επίπεδα οπλισμού για τοιχεία παχύτερα των 230mm και αποθαρρύνει τους μηχανικούς από τη χρήση

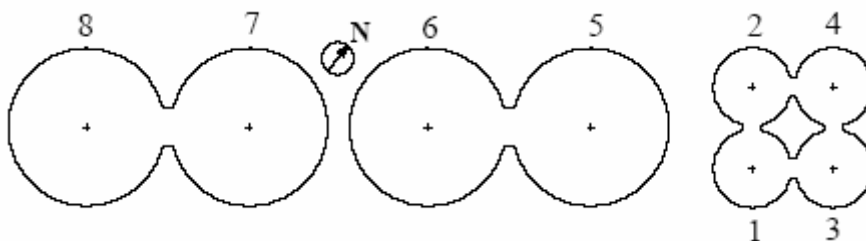
- λεπτότερων τοιχείων, καθώς τότε γίνεται δύσκολη η τοποθέτηση διπλής εσχάρας οπλισμού. Η ύπαρξη μονής εσχάρας οπλισμού είναι από τα πιο κοινά ελαττώματα που παρατηρήθηκαν από τους μηχανικούς.
- Το πάχος των τοιχείων είναι πολλές φορές υποδιαστασιολογημένο σε σύγκριση με τη διάμετρο του σιλό.
- Οι αποστάσεις των ράβδων οπλισμού είναι τόσο μεγάλες που δεν ικανοποιούν πολλές φορές τον κανονισμό, χωρίς να έχουν υπολογισθεί πιθανές παραμορφώσεις του τοιχείου κάτω από μη κατανεμημένη φόρτιση, υποχώρηση ή θερμοκρασιακά φαινόμενα (Saffarian, Harris 1985).
- Η πτωχή ποιότητα σκυροδέματος είναι ίσως ο κύριος παράγοντας της πρόκλησης προβλημάτων τοπικής αποσάθρωσης. Η έλλειψη του ελέγχου ποιότητας κατά τη διάρκεια σκυροδέτησης είχε ως αποτέλεσμα την πτωχή συμπίεση και προκάλεσε θρυμματισμό του αδύναμου σκυροδέματος.

Διάφοροι μέθοδοι ενίσχυσης έχουν υλοποιηθεί για την αναβάθμιση καταπονημένων σιλό. Αυτές οι παραδοσιακές μέθοδοι περιλαμβάνουν: προένταση με εξωτερικά καλώδια, κατασκευή νέου τοιχείου ΟΣ στο εσωτερικό του υπάρχοντος σιλό, προσθήκη ΟΣ εξωτερικά των τοιχείων (π.χ. εκτοξευόμενο). Μια ενδιαφέρουσα μέθοδος είναι αυτή του εκτοξευόμενου σκυροδέματος, που επιτρέπει κατασκευή προστατευτικού φλοιού για το υπάρχον σιλό. Πρώτα καθαρίζεται η επιφάνεια σκυροδέματος με αμμοβολή για να εξασφαλισθεί καλή πρόσφυση ανάμεσα στο εκτοξευόμενο και το προϋπάρχον σκυρόδεμα και η αποκόλληση τυχόν σαθρών κομματιών σκυροδέματος. Μετά τοποθετούνται πλέγματα οπλισμών πάνω σε αγκύρια στερεωμένα με εποξειδική ρητίνη. Η εκτόξευση ξεκινά από το κάτω τμήμα και συνήθως γίνεται σε μία στρώση.

Στη παράγραφο αυτή παρουσιάζεται μια πρωτοποριακή τεχνική που περιέχει τη χρήση μη μεταλλικού οπλισμού εφαρμοζόμενο στην εξωτερική επιφάνεια του σιλό. Αυτή η τεχνική βασίζεται στην ανάπτυξη της χρήσης εξωτερικά κολλούμενων ελασμάτων ΙΟΠ και εμφανίζεται σαν μία παγκοσμίως αποδεκτή μέθοδος ενίσχυσης. Η μέθοδος NSM ΙΟΠ ράβδων είναι μια εναλλακτική λύση στην εξωτερική τοποθέτηση ράβδων ΙΟΠ. Σ' αυτή τη περίπτωση τοποθετούμε και αγκυρώνουμε μια ράβδο ΙΟΠ σε εγκοπή που κατασκευάσαμε πριν.

Γενικά πλεονεκτήματα της μεθόδου σε σύγκριση με τα ελάσματα είναι ότι έχουμε αυτόματα και αγκύρωση και ενίσχυση δεν είναι εκτεθειμένη σε πιθανέ μηχανικές ζημιές. Η πιο πάνω μέθοδος δεν απαιτεί καθαρισμό όλης της επιφάνειας του σιλό και μετά την κατασκευή των εγκοπών απαιτεί πολύ λίγο χρόνο σε σχέση με τη χρήση ελασμάτων. Συνδέοντας την ενίσχυση που επιτυγχάνουμε, με τη γρήγορη διαδικασία κατασκευής εγκοπών, το μη διαβρωτικό περιβάλλον και το πολύ μικρό βάρος καθιστά την τεχνική NSM ΙΟΠ ράβδων ως την απόλυτα ανταγωνίσιμη λύση ενίσχυσης σε σχέση με τις υπάρχουσες επιλογές.

Η περίπτωση μελέτης εφαρμογών ΙΟΠ σε αποθηκευτικές κατασκευές, αντιπροσωπεύεται από 6 σιλό ΟΣ, που βρίσκονται στο ΒΑ τμήμα των ΗΠΑ και χρησιμοποιούνται για φορτοεκφόρτωση όγκων τσιμέντου. Είναι τμήμα ενός μεγάλου συγκροτήματος το οποίο συνθέτουν κατασκευές οι οποίες έγιναν σε διαφορετικές περιόδους.



Το 1962 κατασκευάστηκαν 4 σιλό(1,2,3,4) με διαστάσεις 45.7 μέτρα ύψος και διάμετρο 7 μέτρα το καθένα. Το 1979 προστέθηκαν τα υπόλοιπα 4 (5,6,7 και 8) ύψους 39,6 μέτρα και 13,4 μετά διάμετρο το καθένα. Σ' αυτή την εργασία λαμβάνονται υπ' όψιν τα σιλό 1,2,3,4,7,8.

Το πάχος του τοιχείου είναι 203 mm για τα πρώτα 4 και 254mm για τα άλλα 2. σε όλα υπήρχε μια μονή εσχάρα οπλισμών, τοποθετημένη στην εξωτερική επιφάνεια του τοιχείου. Τα αρχικά δείγματα εξάντλησης παρατηρήθηκαν το 1994 υπό μορφή ρωγμών και αποκόλλησης υλικών σκυροδέματος από τα τοιχεία σε όλη την έκταση των σιλό.

Διάφορες τεχνικές αναβάθμισης εισηγήθηκαν. Οι κύριες ανάγκες προς επίλυση κατά τη διάρκεια επιλογής της κατάλληλης μεθόδου ενίσχυσης ήταν:

- Η ταχύτητα, ούτως ώστε να προκληθεί ελάχιστη διακοπή στην κανονική χρήση του σιλό.
- Μεγάλη διάρκεια στο χρόνο έτσι ώστε να προληφθούν παρόμοιες ζημιές στο μέλλον.
- Πιθανότητα ολοκλήρωσης με αναπτυγμένα συστήματα για αυτόματη διαχείριση διαδικασιών φορτοεκφόρτωσης.
- Ικανότητα να παρέχει αποτελεσματική περίσφιξη του σιλό, παρά τη διαμόρφωση της ομάδας του σιλό.
- Ελάχιστη μείωση του εσωτερικού όγκου χωρίς επιπλέον επιφόρτιση των θεμελίων.
- Πιθανότητα πραγματοποίησης της ενίσχυσης στην εξωτερική επιφάνεια για την αποφυγή προβλημάτων που σχετίζονται με υψηλές θερμοκρασίες κατά τη διάρκεια παραγωγής τσιμέντου και η μη ύπαρξη ανάγκης καθαρισμού της εσωτερικής επιφάνειας.

Η εκτίμηση βασίστηκε στα πιο πάνω κριτήρια , μαζί με μια οικονομοτεχνική μελέτη έπεισε τον ιδιοκτήτη να χρησιμοποιηθεί η μέθοδος NSM ΙΟΠ ράβδων σε κάθετη και οριζόντια διεύθυνση στην εξωτερική επιφάνεια του τοιχείου. Ως ένα επιπρόσθετο όφελος είναι και η χρήση των υπάρχοντων τοιχείων για αγκύρωση των ράβδων.

Κάθε φορά αφαιρούσανε μόνο ένα σιλό από τη λειτουργία με σκοπό να ελαχιστοποιηθεί ο χρόνος διακοπής της λειτουργίας, και η διαδικασία που ακολουθήθηκε είναι η εξής :

1. Ολοκληρωμένη επιθεώρηση των εσωτερικών και εξωτερικών επιφανειών με σκοπό να καταγραφούν όλες οι ρωγμές και οι θρυμματισμένες περιοχές. Αυτό ήταν εφικτό χρησιμοποιώντας αναρτώμενες αιωρούμενες σκαλωσιές. Μετά την επιθεώρηση όλες οι ρωγμές πληρώθηκαν με ρητίνη και έγινε τοπική επιδιόρθωση των θρυμματισμένων περιοχών.
2. Κατασκευή εγκοπών. Κατά την κατασκευή της εγκοπής, η εγκοπή έχει την καμπυλότητα του σιλό και βαθαίνει έως ότου να εξασφαλίσουμε το απαιτούμενο βάθος. Οι κάθετες εγκοπές είναι πιο βαθιές με σκοπό να έχουν τις οριζόντιες ράβδους στην εξωτερική περιφέρεια ώστε να έχουνε τη μέγιστη περίσφιξη.
3. Μετά την κατασκευή και καθαρισμό των εγκοπών, εποξειδική κόλλα τοποθετήθηκε πρώτα στις κατακόρυφες εγκοπές, έπειτα τοποθετήθηκε η ράβδος

4. και τέλος η εξωτερική στρώση κολλάς. Η ίδια διαδικασία έγινε και στις οριζόντιες ράβδους.
5. Τελείωμα κα βάνιμο της επιφάνειας.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η παραπάνω εργασία είχε ως σκοπό να παρουσιάσει μια εφαρμογή πεδίου της χρήσης NSM IOΠ ράβδων στην ενίσχυση και αναβάθμιση μιας κατασκευής σιλό. Η χρήση NSM IOΠ οπλισμού έχει πολλά πλεονεκτήματα επειδή η εφαρμογή της γίνεται στην εξωτερική επιφάνεια, χωρίς να απαιτείται καθαρισμός της εσωτερικής επιφάνειας και χωρίς την απώλεια αποθηκευτικού όγκου. Επιπρόσθετα η υψηλή αντοχή και η αντίσταση σε ακραίες περιβαλλοντολογικές συνθήκες διασφαλίζουν ικανοποιητική απόκριση σε θέματα συμπεριφοράς της κατασκευής και διάρκειας στο χρόνο. Η αντίσταση σε ακραίες περιβαλλοντολογικές συνθήκες είναι πολύ σημαντικός παράγοντας αφού οι κατασκευές αυτές βρίσκονται συνήθως κοντά σε λιμάνια, ποταμούς και εκτεθειμένα σε υγρό και αλμυρό περιβάλλον. Σύμφωνα με κατασκευαστική άποψη, η ευκολία, η ταχύτητα τοποθέτησης καθώς και η ελαχιστοποίηση της διακοπής λειτουργίας κάνει την τεχνική NSM IOΠ ράβδων ελκυστική και ανταγωνίσιμη για ενίσχυση σιλό.



Βιβλιογραφία :

- **ΠΡΟΗΓΜΕΝΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΥΛΙΚΩΝ & ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ** από τον κ.κ.
Αθ. Χ. Τριανταφύλλου
Αναπληρωτής Καθηγητής Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών Πανεπιστημίου Πατρών
- **Upgrade of RC Silos Using Near Surface Mounted FRP Composites** by
Andrea Prota
Research Assistant, University of Missouri-Rolla, Rolla, Missouri, USA
Renato Parretti
Structural Engineer, Co-Force America, Inc., Rolla, Missouri, USA
Antonio Nanni
V&M Jones Professor of Civil Engineering, University of Missouri – Rolla, Rolla, Missouri, USA
- **DOCTORAL THESIS**
Carbon Fibre Reinforced Polymers For Strengthening of Structural Elements by
ANDERS CAROLIN
Department of civil and mining engineering division of Structural Engineering
Lulea University of Technology , Sweden.
- **Shear Strengthening of Reinforced Concrete Beams with Near-Surface Mounted Fiber-Reinforced Polymer Rods** by Laura De Lorenzis and Antonio Nanni
- **Anchorage of Surface Mounted FRP Reinforcement** by **A. Khalifa¹, T. Alkhrdaji¹, A. Nanni¹, and S. Lansburg²**
University of Missouri – Rolla
ACE Restoration and Waterproofing, Fullerton, CA
- **CONCRETE STRUCTURES
STRENGTHENED WITH NEAR
SURFACE MOUNTED
REINFORCEMENT OF CFRP**
Björn Täljsten¹, Anders Carolin and Håkan
Nordin
Division of Structural Engineering, Department
of Civil Engineering
Luleå University of Technology,
SE-971 87 Luleå, SWEDEN