

## ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΣΕ ΚΟΠΩΣΗ ΔΟΚΩΝ ΩΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΩΝ ΣΕ ΚΑΜΨΗ ΜΕ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ

**Βαρβάρα Χαραλαμπίδη**

Διδάκτορας Δ.Π.Θ., [vcharal@civil.duth.gr](mailto:vcharal@civil.duth.gr)

**Θεόδωρος Ρουσάκης**

Επίκουρος Καθηγητής Δ.Π.Θ., [trousak@civil.duth.gr](mailto:trousak@civil.duth.gr)

**Αθανάσιος Καραμπίνης**

Καθηγητής Δ.Π.Θ., [karabin@civil.duth.gr](mailto:karabin@civil.duth.gr)

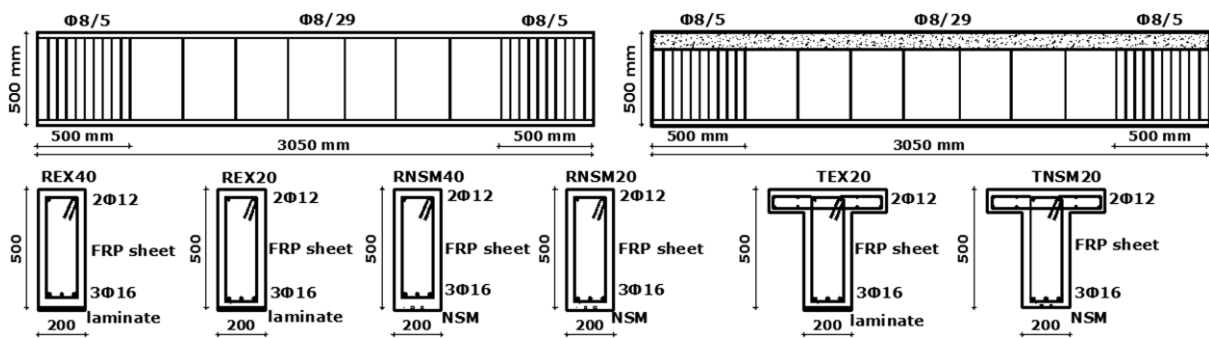
### Εισαγωγή

Η μειωμένη ικανότητα δοκών οδογεφυρών λόγω φορτίων κόπωσης αποτελεί σημαντικό πρόβλημα που οδηγεί στον περιορισμό της επιτελεστικότητάς τους στο χρόνο. Παρά την υψηλή απαιτητικότητα των πειραματικών ερευνών σε αυτόν τον τομέα, υπάρχουν αρκετές έρευνες που εξετάζουν τη δυνατότητα αύξησης του χρόνου ζωής των συγκεκριμένων δομικών στοιχείων μέσω ενίσχυσής τους με προηγμένα σύνθετα υλικά (Senthilnath et al. 2001, Papakonstantinou et al. 2001, Bizindavgi et al. 2003, Heffernan and Erki 2004, Aidoo et al. 2004, Gussenhoven and Brena 2005, Toutanji et al. 2006, Ekenel et al. 2006, Gheorgiu et al. 2007, Wang et al. 2007, Williams and Higgins 2008, Ferrier et al. 2011, Charalambidi et al. 2016, μεταξύ άλλων). Η παρούσα εργασία αποτελεί μέρος μιας εκτενούς έρευνας που πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Ωπλισμένου Σκυροδέματος του Δημοκριτείου Πανεπιστημίου Θράκης και αφορά στην πειραματική διερεύνηση της συμπεριφοράς, κάτω από φορτίο κόπωσης, δοκών ωπλισμένου σκυροδέματος μεγάλης κλίμακας ενισχυμένων έναντι ροπής και τέμνουσας με ελάσματα και υφάσματα ινοπλισμένων πολυμερών, αντίστοιχα. Στα πλαίσια της διερεύνησης εξετάζεται η επιρροή δύο διαφορετικών ευρών φόρτισης κόπωσης και η αποτελεσματικότητα της καμπτικής ενίσχυσης των δοκών είτε μέσω εξωτερικής επικόλλησης ελασμάτων (EBR FRP laminates) είτε τοποθέτησης ελασμάτων εγκοπής (NSM laminates) στο εφελκόμενο πέλμα τους. Στόχος της ενίσχυσης ήταν η αύξηση του φορτίου αστοχίας των δοκών κατά 30% μέσω της τοποθέτησης ινοπλισμού και η διερεύνηση διαφορετικών λόγων δυστένειας χάλυβα ( $k_s=A_sE_s$ ) και ΙΩΠ ( $k_f=A_fE_f$ ),  $k_s/k_f$ . Ο σχεδιασμός του απαιτούμενου εμβαδού ινοπλισμού πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με της κανονιστικές διατάξεις της ACI Committee 440.2R-08 (2008). Τέλος, καταγράφεται ο τρόπος αστοχίας των δοκών και η επιρροή της μεθόδου καμπτικής ενίσχυσης στην τελική απόκριση των δοκιμών.

### Πειραματική διαδικασία

Για την αποτίμηση της μηχανικής συμπεριφοράς του συστήματος ενίσχυσης δοκών ωπλισμένου σκυροδέματος έναντι κάμψης και διάτμησης κατασκευάστηκαν δοκοί μορφής ορθογωνικής και πλακοδοκού από ωπλισμένο σκυρόδεμα οι οποίες ενισχύθηκαν στο εφελκόμενο πέλμα τους έναντι κάμψης και στα άκρα τους έναντι τέμνουσας δύναμης, με σύνθετα υλικά. Συγκεκριμένα, κατασκευάστηκαν 7 δοκοί ωπλισμένου σκυροδέματος διατομής ορθογωνικής και T, μήκους 3.05 m,

πλάτους διατομής  $b_w=0.20$  m, ύψους  $h=0.50$  m και συνεργαζόμενου πλάτους  $b_{eff}=0.50$  m όπως περιγράφεται αναλυτικά στο Σχήμα 1.



Σχ. 1 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά δοκιμίων. Περιπτώσεις ορθογωνικής διατομής και πλακοδοκού

Στο κάτω πέλμα των δοκών τοποθετήθηκε εφελκούμενος χαλύβδινος οπλισμός 3Φ16 με συνολικό εμβαδόν ίσο με  $A_{s1} = 602 \text{ mm}^2$ , και στο άνω πέλμα θλιβόμενος χαλύβδινος οπλισμός 2Φ12 με συνολικό εμβαδόν ίσο με  $A_{s2} = 226 \text{ mm}^2$ . Συνδετήρες διαμέτρου 8 mm τοποθετήθηκαν καθ' όλο το μήκος των δοκιμίων σε απόσταση 29 cm μεταξύ τους. Σκοπός των επιλεγμένων χαρακτηριστικών ήταν η προσομοίωση δοκού σχεδιασμένης με παλαιές κανονιστικές διατάξεις. Για λόγους αποφυγής της αστοχίας στην περιοχή της στήριξης, στα άκρα των δοκών έγινε πύκνωση συνδετήρων Φ8/5. Για τη διερεύνηση της επιρροής του πάχους της επικάλυψης στη συμπεριφορά των ενισχυμένων δοκών, εξετάστηκαν δύο διαφορετικές τιμές επικάλυψης σκυροδέματος στην κάτω ίνα των δοκιμίων, ίσες με 2 cm και 4 cm.

Το σκυρόδεμα που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή των δοκιμίων ήταν εργοστασιακής παρασκευής και ονομαστικής κατηγορίας C20/25 και οι χάλυβες οπλισμού κατηγορίας B500C. Για την καμπτική ενίσχυση των δοκών εφαρμόστηκαν δύο μέθοδοι ενίσχυσης, με την τοποθέτηση ελασμάτων ινών άνθρακα της εταιρίας Sika Hellas ABEE. Η πρώτη μέθοδος αφορά στην τοποθέτηση ελασμάτων ΙΩΠ επικολλούμενων εξωτερικά στο εφελκόμενο πέλμα των δοκιμίων (EBR FRP laminates). Τα εξωτερικά ελάσματα ενίσχυσης είχαν μέτρο ελαστικότητας ίσο με  $E_f = 165 \text{ GPa}$  και εφελκυστική αντοχή ίση με  $f_{tu} = 3100 \text{ MPa}$ . Η δεύτερη μέθοδος αφορά στην τοποθέτηση ελασμάτων (NSM laminates) σε κατάλληλα διαμορφωμένες εγκοπές στην επικάλυψη του σκυροδέματος του εφελκόμενου πέλματος. Τα ελάσματα εγκοπής είχαν μέτρο ελαστικότητας ίσο με  $E_f = 165 \text{ GPa}$  και εφελκυστική αντοχή ίση με  $f_{tu} = 3100 \text{ MPa}$ . Για τη διατμητική ενίσχυση των δοκών χρησιμοποιήθηκαν υφάσματα ινωπλισμένου πολυμερούς με ίνες άνθρακα της ίδιας εταιρίας. Τα υφάσματα διατμητικής ενίσχυσης είχαν μέτρο ελαστικότητας ίσο με  $E_f = 225 \text{ GPa}$  και εφελκυστική αντοχή ίση με  $f_{tu} = 3500 \text{ MPa}$ . Η ονοματολογία καθώς και τα μηχανικά χαρακτηριστικά των παραπάνω ινωπλισμένων πολυμερών παρουσιάζονται στον Πίνακα 1, όπως αυτά καταγράφονται στα φύλλα ιδιοτήτων της εταιρίας Sika Hellas ABEE.

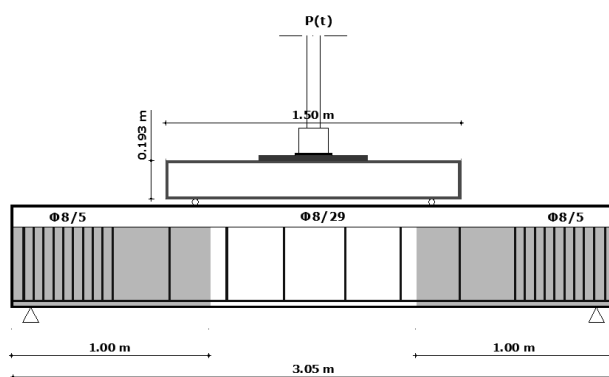
Στόχος της τοποθέτησης του ινωπλισμού καμπτικής ενίσχυσης ήταν η αύξηση της υπολογιστικής καμπτικής ικανότητας των δοκών κατά 30% και η διερεύνηση της επιρροής διαφορετικών λόγων  $k_f/k_t$  κάτω από συνθήκες φόρτισης κόπωσης.

Μηχανικά χαρακτη- ριστικά	Καμπτική Ενίσχυση		Διατμητική Ενίσχυση	
	Sika® CarboDur® S1012	Sika® CarboDur® S1212	Sika® CarboDur® S1.030	Sika Wrap® - 230C
$E_f$ (N/mm <sup>2</sup> )	165000	165000	165000	225000
$f_{tm}$ (N/mm <sup>2</sup> )	3100	3100	3100	3500
$t_f$ (mm)	1.2	1.2	3	0.129
$w_f$ (mm)	100	120	10	600

Οι υπολογιστικές και κανονιστικές διατάξεις πάνω στις οποίες βασίστηκε ο σχεδιασμός των ενισχύσεων αντιστοιχούν στις οδηγίες της επιτροπής ACI Committee 440.2R-08 (2008) για την ενίσχυση κατασκευών σκυροδέματος με εξωτερικά τοποθετούμενα ινωπλισμένα πολυμερή. Τα δοκίμια περιλαμβάνουν την τοποθέτηση α) εξωτερικών ελασμάτων ινωπλισμένου πολυμερούς πλάτους  $b_f = 100$  mm στα δοκίμια ορθογωνικής διατομής και  $b_f = 120$  mm στις πλακοδοκούς και πάχους  $t_f = 1.2$  mm, τοποθετημένων στη μέση του εφελκόμενου πέλματος της διατομής των δοκών και β) δύο ελασμάτων εγκοπής διατομής 10 x 3 mm. Τα διατμητικά ανοίγματα των δοκών ενισχύθηκαν με συνεχή υφάσματα ινωπλισμένου πολυμερούς πάχους  $t_f = 0.12$  mm.

### Φόρτιση κόπωσης

Τα δοκίμια υποβλήθηκαν σε επαναλαμβανόμενη φόρτιση συχνότητας 2 Hz προσομοιώνοντας φορτία κόπωσης. Επιλέχθηκαν δύο ομάδες επιβολής φορτίου διαχωρίζοντας τα δοκίμια σε δύο επιμέρους κατηγορίες. Στην πρώτη κατηγορία, τα δοκίμια υποβλήθηκαν σε επαναλαμβανόμενο φορτίο εύρους 20% με 60% της ικανότητάς τους στην αστοχία,  $P_u$ . Με το όριο του 20%  $P_u$ , προσομοιώνονται τα μόνιμα φορτία μιας γέφυρας και με το όριο του 60%  $P_u$  προσομοιώνεται το ποσοστό των φορτίων λειτουργίας (Heffernan & Erki, 2004). Στην δεύτερη κατηγορία φόρτισης, τα δοκίμια υποβλήθηκαν σε επαναλαμβανόμενο φορτίο εύρους 20% του φορτίου αστοχίας  $P_u$  με 80% του υπολογιστικού φορτίου διαρροής τους  $P_y$ . Το όριο του 80% του ορίου διαρροής  $P_y$ , καθορίζεται από τις διατάξεις της ACI Committee 4402R.08 σύμφωνα με τις οποίες το μέγιστο όριο τάσης στο χάλυβα μιας διατομής με ενίσχυση ΙΩΠ για φορτία λειτουργίας δεν θα πρέπει να υπερβαίνει το 80% του ορίου διαρροής του. Αναλόγως του εύρους επιβολής της φόρτισης καθορίστηκε το τελικό σύνολο πειραματικών δοκιμών από όπου και προέκυψαν οι 7 δοκοί ωπλισμένου σκυροδέματος ενισχυμένες με ινωπλισμένα πολυμερή. Από αυτές 2 δοκιμάστηκαν στο χαμηλό εύρος φόρτισης (Σειρά L) και 5 δοκιμάστηκαν στο υψηλό εύρος φόρτισης (Σειρά H). Τέλος, στα δοκίμια εφαρμόστηκε φόρτιση τεσσάρων σημείων. Σε όλα τα δοκίμια, η απόσταση της εφαρμογής του φορτίου από τη στήριξη ήταν περίπου 0.845 m (Σχ. 2). Η επιβολή του φορτίου πραγματοποιήθηκε μέσω σερβοϋδραυλικού εμβόλου MTS 244.41 ικανότητας 500 KN (MTS Systems, Eden Prairie, Minnesota). Η καταγραφή των εξαγόμενων δεδομένων από το σερβοϋδραυλικό έμβολο πραγματοποιούνταν στο σύστημα απόληξης δεδομένων MTS 793 FlexTest SE Test Controller με συχνότητα καταγραφής δεδομένων τέσσερις τιμές ανά δευτερόλεπτο.



Σχ. 2 Πειραματική διάταξη

### Πειραματικά αποτελέσματα

Οι δοκοί της Σειράς L, REX20-L και TEX20-L, ανταποκρίθηκαν επιτυχώς στη δοκιμή κόπωσης φορτίου χαμηλού εύρους. Συγκεκριμένα, η δοκός REX20-L έφτασε επιτυχώς τους 2,000,000 κύκλους και η δοκός TEX20-L έφτασε επιτυχώς τους 1,300,000 κύκλους (Πιν. 2) και έπειτα η πειραματική διαδικασία κόπωσης τερματίστηκε. Η μέγιστη τάση που εφαρμόστηκε στον εφελκόμενο χάλυβα των δοκών ισούνταν με 292.8 MPa και 288.1 MPa και λόγο μέγιστης τάσης χάλυβα προς όριο διαρροής χάλυβα  $\sigma_{\max}/f_y$  ίσο με 0.55 και 0.56, αντίστοιχα. Αντίθετα με τα δοκίμια της Σειράς L, όλες οι δοκοί της Σειράς H αστόχησαν λόγω κόπωσης του εφελκόμενου χάλυβα οπλισμού σε κύκλους φόρτισης χαμηλότερους των  $1.5 \times 10^6$  (Πιν. 2). Οι δοκοί ανέπτυξαν μέγιστη τάση στον εφελκόμενο χάλυβα που κυμαινόταν από 395.3 MPa (για το δοκίμιο TNSM20-H) και 413.9 MPa (για το δοκίμιο REX40-H) και λόγο  $\sigma_{\max}/f_y$  μεταξύ 0.76 και 0.80. Σε όλες τις περιπτώσεις των δοκιμών κρίσιμο υλικό ήταν ο εφελκόμενος χάλυβας και η αστοχία επήλθε έπειτα από αστοχία του εφελκόμενου χάλυβα σε κόπωση. Δεν παρατηρήθηκε καμία πρόωμη μορφή αστοχίας στην περιοχή σκυροδέματος επικάλυψης, λόγω κόπωσης, ή του ελάσματος ΙΩΠ, λόγω αποκόλλησης. Σε όλα τα δοκίμια της Σειράς H παρατηρήθηκε ο σχηματισμός μιας κύριας ρωγμής κάθετα στον εφελκόμενο οπλισμό, περίπου στο μέσον του καμπτικού ανοίγματος του δοκιμίου (Σχ. 3). Με την εξέλιξη των κύκλων φόρτισης, καταγράφηκε και η ανάπτυξη μικρότερου εύρους ρωγμών στο καμπτικό άνοιγμα των δοκών με διεύρυνση συγχρόνως του ανοίγματος της κύριας ρωγμής. Κατά τους τελευταίους κύκλους φόρτισης, το εύρος της κύριας ρωγμής αυξήθηκε απότομα και τελικά τα δοκίμια αστόχησαν μετά από απότομη θραύση σε κόπωση ενός ή περισσότερων ράβδων εφελκόμενου οπλισμού στην περιοχή του ανοίγματος της κύριας ρωγμής ( Σχ. 4).



Σχ. 3 Όψη ανοίγματος της δοκού REX20-H έπειτα από αστοχία του χάλυβα σε κόπωση



Σχ. 4 Λεπτομέρεια αστοχίας του εφελκόμενου χάλυβα της δοκού REX20-H σε κόπωση

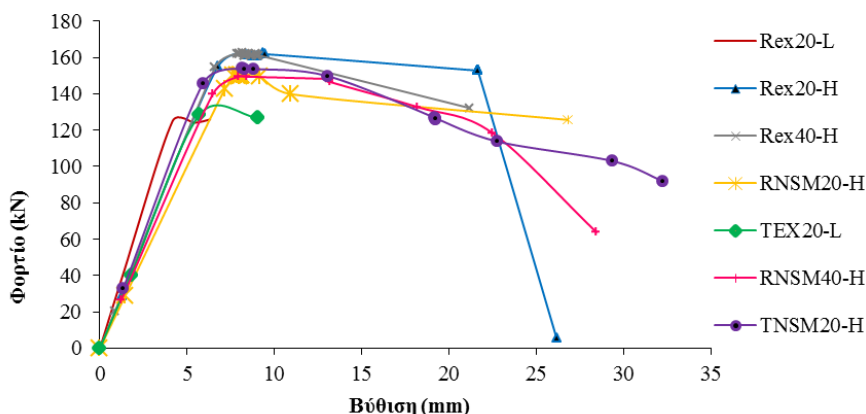
Η αποκόλληση του εξωτερικού ελάσματος ενίσχυσης προέκυψε ως δευτερογενής μορφή αστοχίας των δοκιμίων REX20-H και REX40-H, ακολουθώντας την αστοχία σε κόπωση του χάλυβα. Η αποκόλληση ξεκίνησε από την περιοχή της κύριας ρωγμής και επεκτάθηκε σε όλο το καμπτικό άνοιγμα των δοκιμίων. Στην περίπτωση ενίσχυσης με ελάσματα εγκοπής (NSM, Σχ. 6), δεν παρατηρήθηκε αποκόλληση των ελασμάτων μετά την αστοχία του χάλυβα.



Σχ. 6 Όψη εφελκόμενου πέλματος της δοκού TNSM20-H

Από τα αποτελέσματα του πειραματικού προγράμματος αναδείχθηκε η επιρροή του λόγου δυστένειας χάλυβα προς ΙΩΠ ( $k_s/k_f$ ) στην απόκριση των δοκών σε κόπωση. Η συνεισφορά της ενίσχυσης στη διάρκεια ζωής σε κόπωση των δοκών είναι μεγαλύτερη για μικρότερο λόγο  $k_s/k_f$ . Το συμπέρασμα προκύπτει από τα αποτελέσματα της παρούσας έρευνας όπου τα δοκίμια με  $k_s/k_f = 6.09$  (REX20-H και REX40-H) αστόχησαν σε περισσότερους κύκλους φόρτισης από ότι τα δοκίμια με  $k_s/k_f = 12.18$  (RNSM20-H, RNSM40-H, TNSM20-H).

Η μηχανική συμπεριφορά των δοκιμίων εκτιμήθηκε μέσω της καταγραφής και του σχεδιασμού διαγραμμάτων φορτίου – βύθισης και βύθισης – κύκλων φόρτισης. Οι βυθίσεις σε όλες τις περιπτώσεις των δοκιμίων αυξάνονταν κατά την εξέλιξη της φόρτισης. Σε όλες τις περιπτώσεις των δοκιμίων που αστόχησαν, η μέγιστη βύθιση ξεπέρασε τα 20 mm, πάνω από τρεις φορές τη μέγιστη βύθιση των δοκιμίων της σειράς χαμηλής φόρτισης.



Διαγρ. 1 Περιβάλλουσες φορτίου – βύθισης δοκιμίων

Πίν. 2 Πειραματικές καταγραφές φορτίου – βύθισης και παραμορφώσεων δοκιμίων REX20-L, TEX20-L, REX20-H, REX40-H, RNSM20-H, RNSM40-H, TNSM20-H

Φόρτιση κόπωσης						
Σειρά δοκιμίων	Δοκίμιο	$F_{max}$ (kN)	$F_{min}$ (kN)	Κύκλοι φόρτισης	$P_{max}$ (kN)	$\delta_{P_{max}}$ (mm)
Σειρά L	REX20-L	60% $P_u$ 126	20 % $P_u$ 41	2,000,000	126	5.75
	TEX20-L	60 % $P_u$ 128	20 % $P_u$ 44	1,300,000	127	9.01
Σειρά H	REX20-H	77 % $P_u$ (80% $P_{fy}$ ) 161	20 % $P_u$ 41	990,147	153	21.65
	REX40-H	78 % $P_u$ (80% $P_{fy}$ ) 161	20 % $P_u$ 41	1,450,105	159	21.18
	RNSM20-H	73 % $P_u$ (80% $P_{fy}$ ) 150	20 % $P_u$ 40	807,437	147	26.79
	RNSM40-H	74 % $P_u$ (80% $P_{fy}$ ) 150	20 % $P_u$ 37	696,500	148	22.46
	TNSM20-H	70 % $P_u$ (80% $P_{fy}$ ) 153	20 % $P_u$ 44	774,411	153	22.75

<sup>a</sup> L, H αντιστοιχούν σε υψηλό και χαμηλό εύρος φορτίου

<sup>b</sup> R, T αντιστοιχούν στη διατομή της δοκού: ορθογωνική και πλακοδοκός

<sup>c</sup> EX δηλώνει εξωτερική ενίσχυση ΙΩΠ

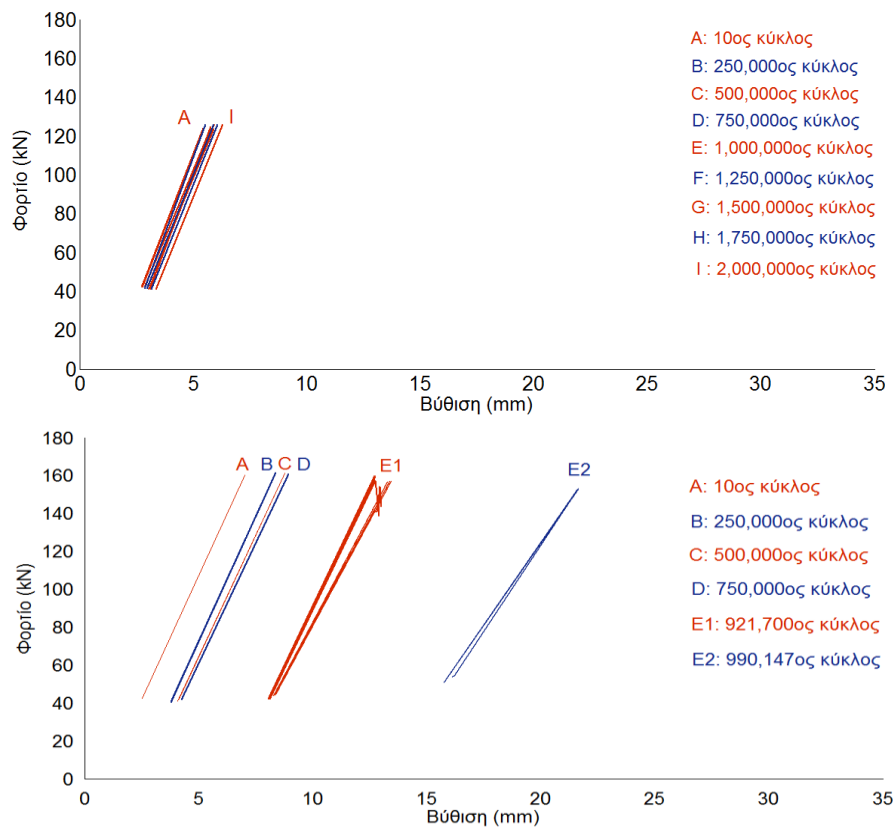
<sup>d</sup> NSM δηλώνει ελάσματα εγκοπής ΙΩΠ

<sup>e</sup> 20, 40 δηλώνουν το πάχος επικάλυψης της διατομής

<sup>f</sup>  $F_{max}$  and  $F_{min}$  αντιστοιχούν στο μέγιστο και ελάχιστο φορτίο κόπωσης

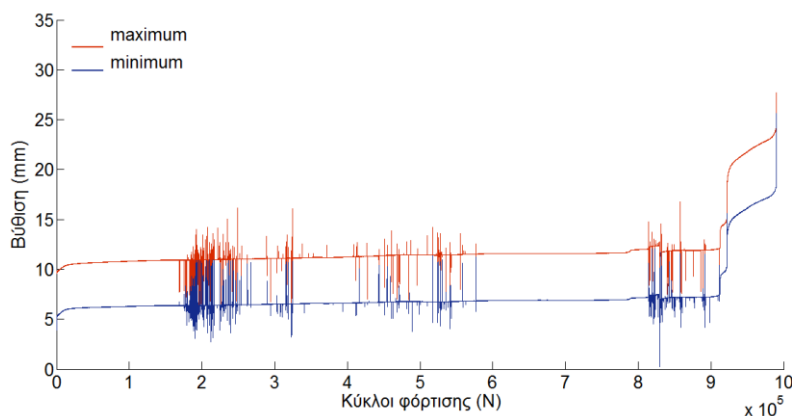
<sup>g</sup>  $P_{ult}$  and  $\delta_{P_{ult}}$  αντιστοιχούν στο φορτίο αστοχίας και στη αντίστοιχη βύθιση

Επιπλέον, καταγράφηκε η συμπεριφορά όλων των δοκιμίων σε όρους βυθίσεων ανά 250,000 κύκλους φόρτισης. Στο Διάγραμμα 2 απεικονίζεται η συμπεριφορά του δοκιμίου REX20-L της σειράς χαμηλού εύρους φόρτισης καθώς και του δοκιμίου REX20-H της σειράς υψηλού εύρους φόρτισης. Κατά τη διάρκεια των πρώτων 250,000 κύκλων η βύθιση των δοκιμίων αρχικά αυξήθηκε και στη συνέχεια η απόκριση σταθεροποιήθηκε με σχεδόν μηδενική αύξηση των βυθίσεων (1,500,000 κύκλοι για το δοκίμιο REX20-L και 500,000 κύκλοι για το δοκίμιο REX20-H). Στους τελευταίους 250,000 κύκλους φόρτισης η δοκός REX20-H παρουσίασε απότομη αύξηση των βυθίσεων (σημεία D-E1-E2 Διαγρ. 2) και αστόχησε.



Διαγρ. 2 Καμπύλες φορτίου – βύθισης για τα δοκίμια REX20-L (άνω) και REX20-H (κάτω)

Η εξέλιξη των βυθίσεων ήταν τυπική για όλα τα δοκίμια της Σειράς Η. Το διάγραμμα βύθισης – κύκλων φόρτισης του δοκίμιου REX20-H (Διαγρ. 3) μπορεί να χωριστεί σε τρία διακριτά μέρη. Αρχικά, οι καμπύλες βύθισης παρουσίασαν μια σταθερά αυξανόμενη τάση στους πρώτους κύκλους της καταπόνησης, με αύξηση του ποσοστού των βυθίσεων κατά 24%. Στη συνέχεια η απόκριση σταθεροποιήθηκε έως τους 921,700 κύκλους φόρτισης με τη κλίση του διαγράμματος να γίνεται σχεδόν παράλληλη με τον οριζόντιο άξονα. Στους 921,700 κύκλους παρατηρείται μια απότομη αύξηση των βυθίσεων στους 990,147 κύκλους όπου και το δοκίμιο αστοχεί, με ποσοστό αύξησης ίσο με 220% στους 990,147 κύκλους. Η απότομη μεταβολή της κλίσης του διαγράμματος φαίνεται και στο αντίστοιχο διάγραμμα P-δ της δοκού.



Διαγρ. 3 Καμπύλες βύθισης – κύκλων φόρτισης για το δοκίμιο REX20-H

## Συμπεράσματα

Η παρούσα διερεύνηση αφορά στη συμπεριφορά δοκών ωπλισμένου σκυροδέματος υποβαλλόμενων σε φορτίο κόπωσης μετά από ενίσχυση με ινωπλισμένα πολυμερή. Επτά δοκοί ορθογωνικής διατομής και διατομής πλακοδοκού ενισχύθηκαν σε κάμψη με την εφαρμογή δύο διαφορετικών τεχνικών εφαρμογής ινωπλισμένων πολυμερών: α) τα εξωτερικά επικολλούμενα ελάσματα και β) τα ελάσματα εγκοπής.

Τα αποτελέσματα των πειραματικών δοκιμών κόπωσης συνοψίζονται ως ακολούθως:

- Η τάση που ασκείται στο χάλυβα κατά τη φόρτιση κόπωσης σε σχέση με τα μηχανικά χαρακτηριστικά του χάλυβα όπως αυτά ορίζονται από το όριο διαρροής, αποτελούν βασικό παράγοντα που καθορίζει την διάρκεια ζωής ενός στοιχείου ωπλισμένου σκυροδέματος σε κόπωση.
- Σε όλες τις περιπτώσεις των δοκιμών κρίσιμο υλικό ήταν ο εφελκόμενος χάλυβας. Οι εφελκόμενες ράβδοι δεν φαίνεται να διέρρευσαν έως τους τελευταίους κύκλους πριν την αστοχία, λειτούργησαν ελαστικά και έπειτα αστόχησαν τοπικά απότομα σε κόπωση.
- Δεν παρατηρήθηκε καμία πρόωμη μορφή αστοχίας στην περιοχή σκυροδέματος επικάλυψης, λόγω κόπωσης, ή του ελάσματος ΙΩΠ, λόγω αποκόλλησης.
- Από τα αποτελέσματα του πειραματικού προγράμματος αναδείχθηκε η επιρροή του λόγου δυστένειας χάλυβα προς ΙΩΠ ( $k_s/k_f$ ) στην απόκριση των δοκών σε κόπωση. Η συνεισφορά της ενίσχυσης στη διάρκεια ζωής σε κόπωση των δοκών είναι μεγαλύτερη για μικρότερο λόγο  $k_s/k_f$ . Το συμπέρασμα προκύπτει από τα αποτελέσματα της παρούσας έρευνας όπου τα δοκίμια με  $k_s/k_f = 6.09$  (REX20-H και REX40-H) αστόχησαν σε περισσότερους κύκλους φόρτισης από ότι τα δοκίμια με  $k_s/k_f = 12.18$  (RNSM20-H, RNSM40-H, TNSM20-H).
- Παρατηρήθηκε ο σχηματισμός μιας κύριας ρωγμής κάθετα στον εφελκόμενο οπλισμό, περίπου στο μέσον του καμπτικού ανοίγματος του δοκιμίου. Η περιοχή της ανάπτυξης της κύριας ρωγμής υποδεικνύει την περιοχή όπου θα αστοχήσει ο εφελκόμενος χάλυβας σε κόπωση.
- Η αποκόλληση του εξωτερικού ελάσματος ενίσχυσης προέκυψε ως δευτερογενής μορφή αστοχίας των δοκιμών REX20-H και REX40-H, ακολουθώντας την αστοχία σε κόπωση του χάλυβα.
- Στην περίπτωση ενίσχυσης με ελάσματα εγκοπής (NSM), δεν παρατηρήθηκε αποκόλληση των ελασμάτων μετά την αστοχία του χάλυβα. Τα ελάσματα εγκοπής λειτούργησαν αποτελεσματικότερα σε σχέση με τα εξωτερικά ελάσματα κατά την απότομη αστοχία των ράβδων χάλυβα σε κόπωση και δεν αποκολλήθηκαν από τη ρητίνη.
- Δεν φαίνεται να επηρεάστηκε ουσιαστικά η απόκριση των δοκιμών από το σχήμα της διατομής ή το πάχος της επικάλυψης.
- Σε όλες τις περιπτώσεις, το διάγραμμα των βυθίσεων παρουσιάζει ένα μεγάλο ποσοστό αύξησης στους πρώτους χιλιάδες κύκλους της φόρτισης το οποίο στη συνέχεια ελαχιστοποιείται και το διάγραμμα αναπτύσσεται σχεδόν παράλληλα με τον οριζόντιο άξονα. Στους τελευταίους κύκλους φόρτισης κόπωσης, οι παραμορφώσεις αυξάνονται απότομα ως την αστοχία. Η παραπάνω συμπεριφορά των δοκών σε κόπωση υποδεικνύει ότι υφίσταται ένα περιθώριο μερικών χιλιάδων κύκλων έως την πλήρη αστοχία του συστήματος, το οποίο μπορεί να είναι αναγνωρίσιμο μέσω της συνεχούς καταγραφής της συμπεριφοράς του στοιχείου – κατασκευής (structural health monitoring). Με τον τρόπο αυτό είναι δυνατόν να εκτιμηθεί με μεγαλύτερη ακρίβεια η διάρκεια ζωής του φορέα σε κόπωση πριν τη αστοχία του χάλυβα.
- Η έγκαιρη ενίσχυση του στοιχείου με τον κατάλληλο λόγο  $k_s/k_f$ , μπορεί να συμβάλει στην επίτευξη μεγαλύτερης διάρκειας ζωής σε κόπωση. Η ενίσχυση με ΙΩΠ εγκοπής (NSM) μπορεί



να προσφέρει ικανοποιητικότερη συμπεριφορά στην αστοχία, μιας και αποτρέπεται η αποκόλληση του ελάσματος από το σκυρόδεμα ακόμα και μετά την αστοχία του χάλυβα.

## Βιβλιογραφία

- Aidoo, J., Harries, K. a., & Petrou, M. F. (2004). Fatigue Behavior of Carbon Fiber Reinforced Polymer-Strengthened Reinforced Concrete Bridge Girders. *Journal of Composites for Construction*, Vol.8, No 6, 501–509
- Bizindavyi L., Neale K.W., Erki M.A. (2003) Experimental investigation of bonded fiber reinforced polymer-concrete joints under cyclic loading. *Journal of Composites for Construction*. Vol.7, No 2, 127-134
- Charalambidi B., Rousakis T., Karabinis A. (2016). Fatigue behavior of large scale reinforced concrete beams strengthened in flexure with fiber reinforced polymer laminates. *Journal of Composites for Construction* 2016; DOI: 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000689
- Ekenel M., Rizzo A., Myers J.J., Nanni A. (2006) Flexural fatigue behavior of reinforced concrete beams strengthened with FRP fabric and procured laminate systems. *Journal of Composites for Construction*. Vol.10, No 5, 433-442
- Ferrier E., Bigaud D., Clément J.C., Hamelin P. (2011) Fatigue-loading effect on RC beams strengthened with externally bonded FRP. *Construction and Building Materials* 25, 539-546
- Gheorgiu C., Labossiere P., Proulx J. (2007) Response of CFRP strengthened beams under fatigue with different load amplitudes. *Construction and Building Materials* 21, 756-763
- Gussenhoven R., Brena S.F. (2005) Fatigue Behavior of Reinforced Concrete Beams Strengthened with Different FRP Laminate Configurations. *Proceedings of the Seventh Fiber Reinforced Polymers for Reinforced Concrete Structures (FRPRCS7) Conference*, New Orleans, November 2005
- Heffernan P.J., Erki M.A. (2004) Fatigue Behavior of Reinforced Concrete Beams Strengthened with Carbon Fiber reinforced plastic laminates. *Journal of Composites for Construction*. Vol.8, No 2, 132-140
- Papakonstantinou C.G., Petrou M.F., Harries K.A. (2001) Fatigue behavior of RC beams strengthened with GFRP sheets. *Journal of Composites for Construction*. Vol. 5, No 4, 246-253
- Senthilnath P.S., Belarbi A., Myers J.J. (2001) Performance of CFRP Strengthened Reinforced Concrete Beams in the Presence of Delaminations and Lap Slices Under Fatigue Loading. *Proceedings of the International Conference on Composites in Construction (CCC-2001)*, Porto, Portugal, October 2001, pp. 323-328
- Toutanji H., Zhao L., Deng Y., Zhang Y., Balaguru P. (2006) Cyclic behavior of RC beams strengthened with carbon fiber sheets bonded by inorganic matrix. *Journal of Materials in Civil Engineering*. Vol.18, No1, 28-35
- Wang Y.C., Lee M.G., Chen B.C. (2007) Experimental study of FRP-strengthened RC bridge girders subjected to fatigue loading. *Composite Structures* 81, 491-498
- Williams G., Higgins C. (2008) Fatigue of diagonally cracked RC girders repaired with CFRP. *Journal of Bridge Engineering*. Vol.13, No1, 24-33