

ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΜΗΚΟΥΣ ΛΥΓΙΣΜΟΥ ΔΙΑΜΗΚΩΝ ΡΑΒΔΩΝ ΑΝΕΠΑΡΚΩΣ ΟΠΛΙΣΜΕΝΩΝ ΤΟΙΧΙΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ FRP

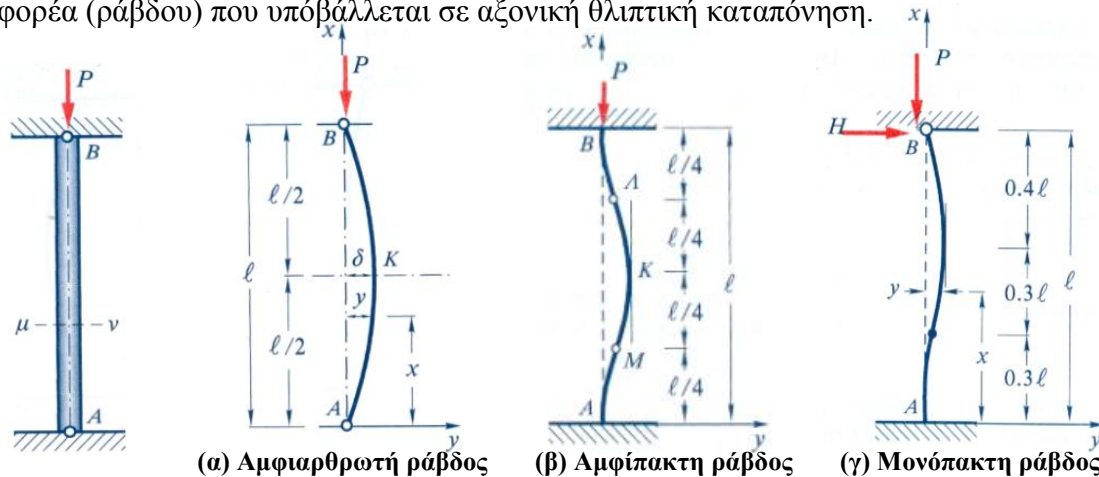
ΧΡΙΣΤΙΔΗΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ
Υποψήφιος Διδάκτορας Ε.Μ.Π

Περίληψη

Η συμπεριφορά «ανεπαρκώς» οπλισμένων τοιχίων παρουσιάζει μεγάλο ενδιαφέρον, αφού η κατανόησή της αποτελεί απαραίτητη προϋπόθεση για την φάση της ενίσχυσης ή/και επισκευής τους. Η παρούσα εργασία πραγματεύεται το φαινόμενο του λυγισμού των θλιβόμενων διαμήκων ράβδων ανεπαρκώς οπλισμένων τοιχίων, αλλά και την ευμενή παρουσία μανδυών FRP στον περιορισμό του φαινομένου αυτού. Εξετάζεται πειραματικά η συμπεριφορά τεσσάρων τοιχίων, σχεδιασμένα το καθένα με διαφορετική διαμόρφωση οπλισμού, αλλά και η επιρροή μανδυών FRP ως μέσο επισκευής και ενίσχυσης. Τα τοιχία εξετάζονται ως καμπτικοί πρόβολοι και υποβάλλονται σε στατική ανακυκλιζόμενη φόρτιση.

1. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ ΛΥΓΙΣΜΟΥ.

Με τον όρο λυγισμός νοείται η αστοχία λόγω απώλειας της ευστάθειας ενός φορέα (ράβδου) που υποβάλλεται σε αξονική θλιπτική καταπόνηση.



Σχήμα 1. Μορφή λυγισμού ράβδων.

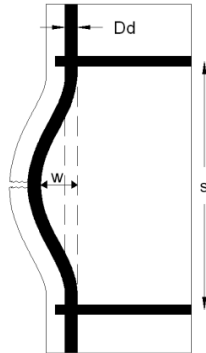
Το κρίσιμο φορτίο λυγισμού, δηλαδή το ελάχιστο φορτίο για το οποίο η ράβδος μεταπίπτει σε κατάσταση ασταθούς ισορροπίας εξαρτάται από τα ελαστικά χαρακτηριστικά του υλικού, από τις διαστάσεις της διατομής, από το μήκος της ράβδου και τις συνοριακές συνθήκες στήριξης, ενώ ισούται με:

$$\text{Αμφιαρθρωτή ράβδος: } P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{l^2}$$

Αμφίπακτη ράβδος: $P_{cr} = \frac{4\pi^2 EI}{l^2}$

Μονόπακτη ράβδος: $P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{0,49l^2}$

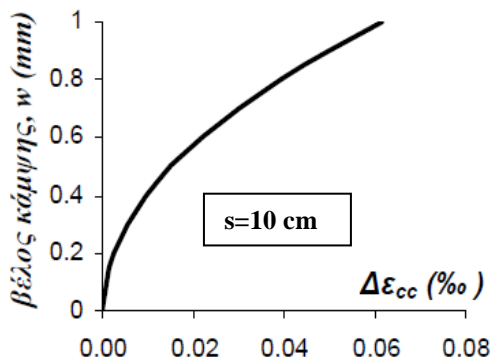
Στην περίπτωση δομικών στοιχείων από σκυρόδεμα (υποστυλώματα, τοιχία) έντονο λυγισμό εμφανίζουν οι θλιβόμενοι ράβδοι χάλυβα. Με βάση την προηγούμενη



Σχήμα 2. Λυγισμός θλιβόμενης ράβδου.

γενική περιγραφή του λυγισμού, κύριοι παράγοντες για την ανάπτυξη του φαινομένου αποτελούν το μήκος της ράβδου, δηλαδή η απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών συνδετήρων s , η διάμετρος της ράβδου D_d , καθώς και οι συνθήκες στήριξης που μπορούν να εξασφαλίσουν οι συνδετήρες.

Αν ο συνδετήρας θεωρηθεί ότι διαθέτει χαμηλή δυστένεια ώστε να μην μπορεί να περιορίσει τη στροφή του άκρου της ράβδου τότε η στήριξη θεωρείται άρθρωση. Σε διαφορετική περίπτωση θεωρείται πάκτωση.

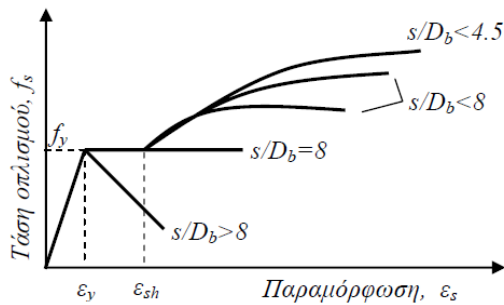


Διάγραμμα 1. Βέλος κάμψης w συναρτήσει της παραμόρφωσης $\Delta\epsilon_{cc}$ για ασταθή λυγισμό (Pantazopoulou, 2008)

μεταξύ $\Delta\epsilon_{cc}$ και w : $\Delta\epsilon_{cc} = [w^2\pi^2(1+3w^2/16s^2)]/(4s^2)$ η οποία φαίνεται στο διπλανό διάγραμμα.

Για φορτίο μεγαλύτερο από το P_{cr} η ράβδος μεταπίπτει σε κατάσταση ασταθούς ισορροπίας κατά την οποία μικρή αύξηση φορτίου ή διατήρηση φορτίου και επιβολή πρόσθετης αξονικής παραμόρφωσης $\Delta\epsilon_{cc}$ επιφέρει μεγάλη ανάπτυξη βέλους κάμψης w της ράβδου. Ενδεικτικά, αναφέρεται η σχέση που προτείνει η Pantazopoulou (1998) για την έντονη μη γραμμικότητα

Όπως προαναφέρθηκε, ιδιαίτερα σημαντικός παράγοντας για την ανάπτυξη του φαινομένου του λυγισμού αποτελεί το μήκος του λυγισμού της θλιβόμενης ράβδου το οποίο με τη σειρά του εξαρτάται από τις συνοριακές συνθήκες στήριξής του και από το αρχικό του μήκος (απαραμόρφωτο) s . Οι Maalej et al. (2003) κατέληξαν σε διάγραμμα που απεικονίζει τη σχέση τάσεων – παραμορφώσεων θλιβόμενης ράβδου συναρτήσει της ανηγμένης απόστασης συνδετήρων s/D_d .



Διάγραμμα 2. Επιρροή s/D_d στο νόμο τάσης-παραμόρφωσης θλιβόμενου οπλισμού (Maalej et al., 2003).

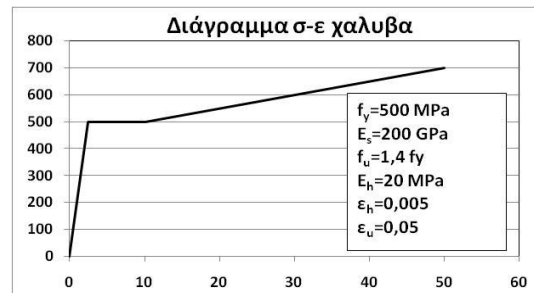
Από το διάγραμμα φαίνεται ότι για $s/D_d > 8$ η ράβδος αναπτύσσει έντονο λυγισμό αμέσως μετά τη διαρροή της με απότομη γραμμική πτώση της τάσης της. Φυσικά, για λόγους $s/D_d \gg 8$ η ράβδος ενδέχεται να μην προλάβει να φτάσει στο όριο διαρροής της και να αστοχήσει σε ελαστικό λυγισμό.

Συμπερασματικά, η ράβδος μπορεί να αστοχήσει είτε σε ελαστικό λυγισμό, αν δεν προλάβει να φτάσει στο όριο διαρροής, είτε σε ανελαστικό λυγισμό αν ξεπεράσει το όριο διαρροής, με την προϋπόθεση βέβαια ότι στο τμήμα του οριζόντιου κλάδου $\sigma-\epsilon$, όπου το μέτρο ελαστικότητας E μηδενίζεται, η ράβδος θα στηριχθεί από τον πυρήνα του σκυροδέματος. Για τις δύο αυτές περιπτώσεις, εφαρμόζοντας τις σχέσεις κρίσιμου φορτίου στην ελαστική περιοχή και την περιοχή κράτυνσης αντίστοιχα με $I = \pi d^4 / 64$, και $P_{cr} = f_{cr} \pi d^2 / 4$ προκύπτουν:

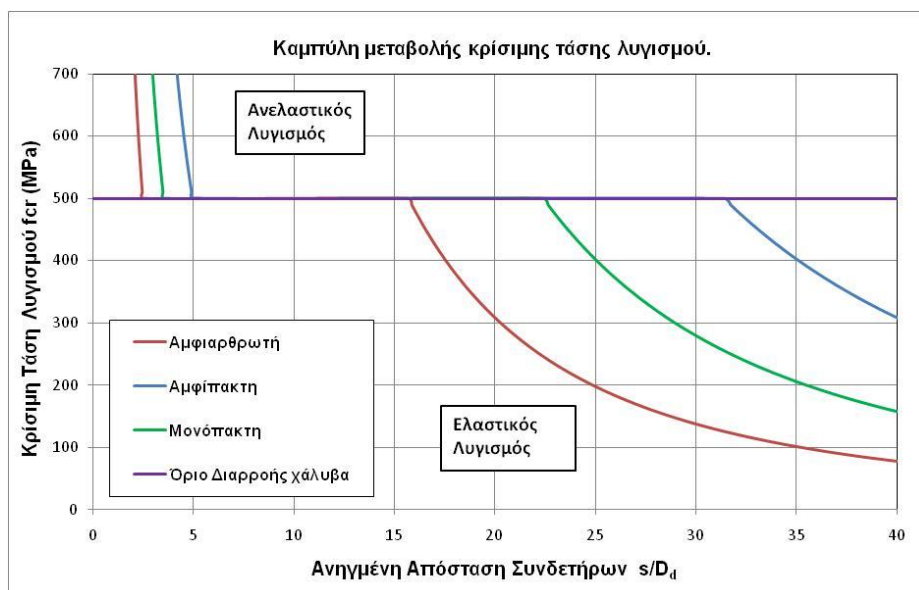
Αμφιαρθρωτή ράβδος:
$$\left(\frac{s}{D_d}\right) = \frac{\pi}{4} \sqrt{\frac{E}{f_{cr}}}$$

Αμφίπακτη ράβδος:
$$\left(\frac{s}{D_d}\right) = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{E}{f_{cr}}}$$

Μονόπακτη ράβδος:
$$\left(\frac{s}{D_d}\right) = \frac{\pi}{2,8} \sqrt{\frac{E}{f_{cr}}}$$

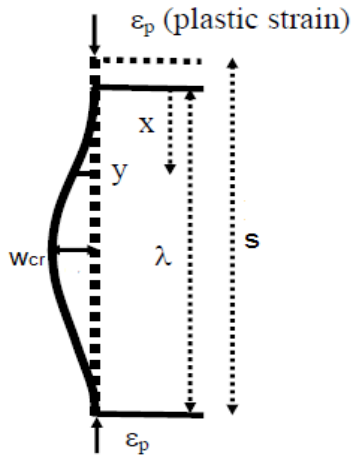


Διάγραμμα 3. Εξειδανικευμένο διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων



Διάγραμμα 4. Μεταβολής κρίσιμης τάσης λυγισμού συναρτήσει της ανηγμένης απόστασης συνδετήρων s/D_d .

Το φαινόμενο του λυγισμού των θλιβόμενων ράβδων συνδέεται αναπόσπαστα με την αποκόλληση της θλιβόμενης ζώνης του σκυροδέματος. Η συμβατότητα παραμορφώσεων χάλυβα και σκυροδέματος οδηγεί στην ανάπτυξη εγκάρσιων εφελκυστικών τάσεων στην επικάλυψη με τελικό αποτέλεσμα την καταστροφή και αποκόλλησή της από τον πυρήνα του σκυροδέματος.



Σχήμα 3. Λυγισμός θλιβόμενης ράβδου.

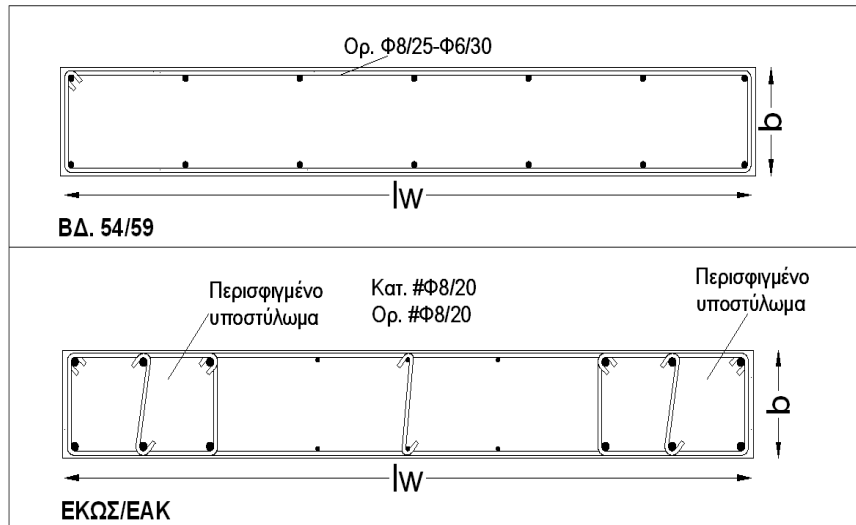
Οι Dhakal και Maekawa (2002) πρότείνουν μια σχέση η οποία συσχετίζει τη συνολική τιμή της πλαστικής θλιπτικής παραμόρφωσης που προκαλεί εκτίναξη της θλιβόμενης ζώνης με το κρίσιμο βέλος κάμψης ως $\epsilon_p = w_{cr}^2 \pi^2 / 4s^2$. Η συνολική θλιπτική παραμόρφωση του χάλυβα είναι ίση με $\epsilon_{cr} = \epsilon_p + \epsilon_y$. Σημειώνεται ότι ο παραπάνω τύπος ισχύει για μονοτονική φόρτιση.

Αυτό που έχει σημασία να τονιστεί είναι ότι επιθυμητός είναι ο ανελαστικός λυγισμός, αφού το φαινόμενο εκδηλώνεται σε μεγάλες παραμορφώσεις και έτσι αποφεύγεται η πρόωρη αποδιαργάνωση της θλιβόμενης ζώνης.

2. ΑΝΕΠΑΡΚΩΣ ΟΠΛΙΣΜΕΝΑ ΤΟΙΧΙΑ Ο/Σ.

Η σημασία των φερόντων τοιχίων στο σκελετό των κτιρίων των κατασκευών είναι πολύ σημαντική, αφού ο ρόλος τους είναι η ανάληψη μέρους ή και ολόκληρων των σεισμικών οριζόντιων δυνάμεων που ασκούνται στην κατασκευή. Σύμφωνα με τον ορισμό του ΕΑΚ, ως τοιχώματα ορίζονται τα κατακόρυφα στοιχεία που έχουν εν γένει επιμήκη διατομή (όχι υποχρεωτικά $l/b > 4$, σύμφωνα με την τροποποίηση ΦΕΚ 781B/2003) και διαθέτουν μεγάλη δυσκαμψία σε σχέση με τα οριζόντια στοιχεία (δοκούς) με τα οποία συνδέονται σε πλαισιακή λειτουργία, ώστε να μπορεί να θεωρηθεί ότι λειτουργούν ως καμπτικοί πρόβολοι με πλήρη ή και μερική πάκτωση στη βάση, όπου και συγκεντρώνεται η κύρια καμπτική καταπόνηση. Σχεδιάζονται ικανοτικά ώστε, για την μετελαστική σεισμική απόκριση, να σχηματίζουν μία μόνο πλαστική άρθρωση στη βάση. Λόγω της επιμήκους διατομής τους η περίσφιγξη της κρίσιμης περιοχής μπορεί να περιοριστεί στα άκρα της διατομής τους. Σύμφωνα, λοιπόν, και με τον ορισμό, οι σύγχρονοι κανονισμοί επιβάλλουν τη μόρφωση κρυφών περισφιγμένων υποστυλωμάτων στα άκρα με συγκεκριμένα ποσοστά κατακόρυφου οπλισμού και περίσφιγξης, για την ανάληψη της καμπτικής ροπής και την επίτευξη

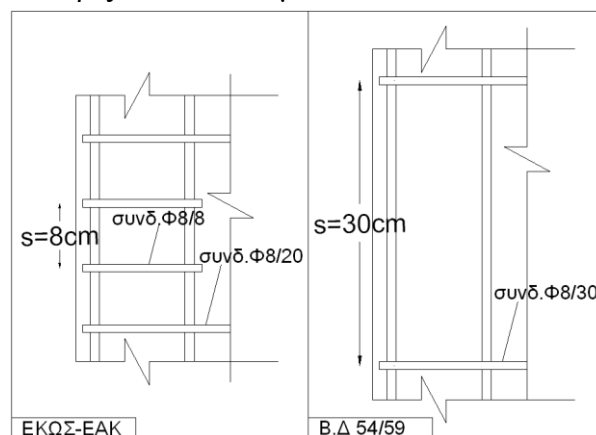
της επιθυμητής πλαστιμότητας, καθώς και συγκεκριμένα ποσοστά κατακόρυφου και οριζόντιου οπλισμού κορμού με μορφή εσχάρας ή και συνδετήρων για την ανάληψη της τέμνουσας δύναμης.



Σχήμα 4. Ενδεικτική όπλιση τοιχίων.

Αντίθετα, σε υφιστάμενες κατασκευές σχεδιασμένες σύμφωνα με τα διατάγματα Β.Δ 54' και Β.Δ 59' και πριν τις πρόσθετες διατάξεις του 1984, οι οποίες για πρώτη φορά εισήγαγαν την ενιαία διαμόρφωση ακραίων υποστυλώματων, ο τρόπος όπλισης των τοιχίων Ο/Σ ήταν τελείως διαφορετικός. Οι κανονισμοί αυτοί δεν προέβλεπαν τη διαμόρφωση κρυφού υποστυλώματων, ενώ οι απαιτήσεις τους σε εγκάρσιο διατμητικό οπλισμό περιορίζονταν στη διάταξη αραιής εσχάρας.

Γίνεται σαφές ότι τόσο οι αντισεισμικές απαιτήσεις (μικρότεροι σεισμικοί συντελεστές), όσο και εν γένει η διαφορετική φιλοσοφία σχεδιασμού των τοιχωμάτων οδηγούσαν, ειδικά προ του 1985, σε πολύ χαμηλά ποσοστά τόσο κατακόρυφου όσο και οριζόντιου οπλισμού.



Σχήμα 5. Ενδεικτικό καθαρό ύψος ράβδων.

Συμπερασματικά, προκύπτει ότι το καθαρό ελεύθερο ύψος των θλιβόμενων ράβδων μεταξύ δύο διαδοχικών συνδετήρων στα ανεπαρκώς οπλισμένα τοιχεία είναι 3-5 φορές μεγαλύτερο από το αντίστοιχο ύψος στα τοιχεία σχεδιασμένα με βάση τους σύγχρονους κανονισμούς.

Έτσι, εκτός από την ενδεχόμενη ανεπάρκεια των τοιχίων αυτών έναντι κάμψης, διάτμησης και ικανότητας ανάπτυξης επαρκούς πλαστιμότητας προκύπτει έντονο και

το φαινόμενο του *λυγισμού* των θλιβόμενων διαμήκων ράβδων εντός της θλιβόμενης ζώνης. Ο λυγισμός των θλιβόμενων ράβδων παρατηρείται στο κατώτερο τμήμα του τοιχείου αφού εκεί αναπτύσσεται η μεγαλύτερη ροπή κάμψης και επομένως οι αντίστοιχες θλιπτικές δυνάμεις. Ο λυγισμός χαρακτηρίζεται από το «τίναγμα» μέρους του σκυροδέματος της θλιβόμενης ζώνης και επομένως μερική απομείωση της διατομής. Βεβαίως, η αρνητική επίπτωση σε μεγάλες διατομές, όπως των τοιχείων, είναι περιορισμένη λόγω της δυνατότητας ακόμα και της απομειωμένης διατομής να παραλάβει την απαιτούμενη ροπή.

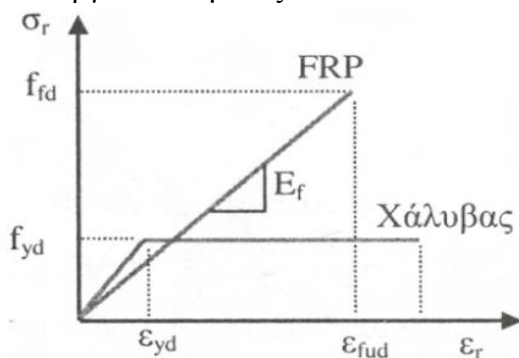
3. ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΑ ΠΟΛΥΜΕΡΗ (FIBER REINFORCED POLYMERS-FRP)

Η χρήση ινοπλισμένων πολυμερών αποτελεί μία ιδιαίτερα αναπτυσσόμενη μέθοδο ενίσχυσης μελών από οπλισμένο σκυρόδεμα. Η λειτουργία τους βασίζεται στην ικανότητα των *ινών* να αναλαμβάνουν κυρίως εφελκυστικές δυνάμεις παράλληλα στη διεύθυνσή τους, αλλά και στην *μήτρα* που αποτελεί το συνδετικό υλικό μεταξύ τους. Επίσης, σημαντικό παράγοντα στην τελική λειτουργία του υλικού αποτελεί και η κόλλα εφαρμογής τους στις επιφάνειες σκυροδέματος.

Οι τρεις κυριότεροι τύποι *ινών* είναι οι ίνες άνθρακα, οι ίνες γυαλιού και οι ίνες αραμιδίου. Οι ίνες χαρακτηρίζονται από ιδιαίτερα υψηλές εφελκυστικές αντοχές αλλά και από την γραμμικά ελαστική συμπεριφορά τους μέχρι τη θράυση.

Ως *μήτρα* χρησιμοποιείται, κατά κύριο λόγο, εποξειδική ρητίνη. Αποτελεί το συγκολλητικό υλικό μεταξύ των ινών, εξασφαλίζοντας τη μεταφορά δυνάμεων σε αυτές, ενώ καθορίζει σε μεγάλο βαθμό την αντοχή του σύνθετου υλικού κάθετα στην διεύθυνση των ινών καθώς και τη διατμητική και θλιπτική αντοχή του.

Ως *κόλλα* χρησιμοποιείται, κατά κύριο λόγο, εποξειδική ρητίνη δύο συστατικών. Η σημασία της είναι ιδιαίτερα σημαντική, αφού εξασφαλίζει την συνεργασία μεταξύ του σύνθετου υλικού και του σκυροδέματος.



Σχήμα 6. Σχέση τάσης-παραμόρφωσης χάλυβα και FRP.

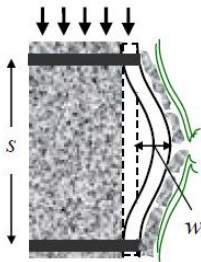
Το τελικό *σύνθετο υλικό* που προκύπτει από την συνεργασία των επιμέρους συστατικών του, αποτελεί ένα υλικό με γραμμικά ελαστική συμπεριφορά που χαρακτηρίζεται από ιδιαίτερα υψηλή εφελκυστική αντοχή, χαμηλό βάρος και μεγάλη ευκαμψία.

Η χρήση μανδύων ινοπλισμένων πολυμερών αποσκοπεί σε:

- Ενίσχυση σε κάμψη.
- Ενίσχυση σε τέμνουσα.
- Επίτευξη περίσφιγξης και στην επακόλουθη αύξηση της πλαστιμότητας.

Όσον αφορά τα τοιχία η συνεισφορά της χρήσης μανδύων FRP περιορίζεται σε ενίσχυση σε κάμψη και τέμνουσα, αφού η επίτευξη περίσφιγξης είναι πρακτικά αδύνατη λόγω της επιμήκους διατομής τους.

Μια σημαντική εφαρμογή μανδύων ινοπλισμένων πολυμερών αποτελεί και ο περιορισμός του μήκους λυγισμού των θλιβόμενων διαμήκων ράβδων, ένα φαινόμενο το οποίο, όπως προαναφέρθηκε, παρατηρείται έντονα σε τοιχία σχεδιασμένα με παλαιότερους κανονισμούς. Τα περισσότερα πειραματικά δεδομένα που εξετάζουν την επιρροή μανδύα FRP στο φαινόμενο του λυγισμού αφορούν υποστυλώματα υπό αξονική θλίψη. Σε αυτά τα δοκίμια η συμβολή του μανδύα πραγματοποιείται μέσω της περίσφιγξης, η οποία ενεργοποιείται κατά τη διόγκωση του σκυροδέματος λόγω Poisson. Αυτό που έχει ιδιαίτερη σημασία είναι ότι ο τρόπος αστοχίας των ενισχυμένων με FRP υποστυλωμάτων διαφέρει μεταξύ των πειραματικών αποτελεσμάτων. Υπάρχουν διστάμενες απόψεις στο κατά πόσο



Σχήμα 7. Αστοχία μανδύα FRP μετά τον λυγισμό της ράβδου.

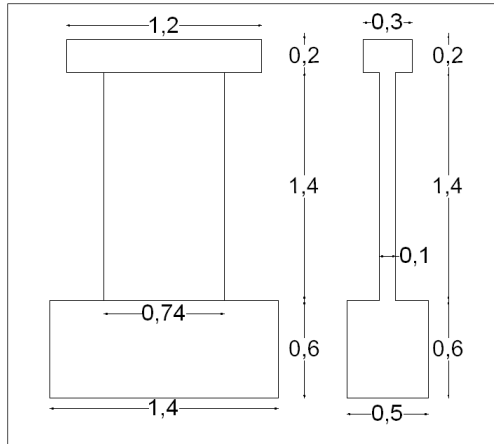
προηγείται αστοχία του μανδύα λόγω υπέρβασης της ικανότητας παραμόρφωσής του και εν συνεχεία αναπτύσσεται το φαινόμενο του λυγισμού λόγω απουσίας περίσφιγξης ή προηγείται το φαινόμενο του λυγισμού που οδηγεί στην αστοχία του

μανδύα. Η πρώτη από τις δύο περιπτώσεις είναι προτιμότερη αφού μεταθέτει το φαινόμενο του λυγισμού σε υψηλότερες παραμορφώσεις ή ακόμα και το περιορίζει πλήρως.

Η λειτουργία του μανδύα FRP σε τοιχία είναι διαφορετική σε σχέση με αυτήν σε ορθογωνικές ή κυκλικές διατομές. Όπως προαναφέρθηκε, η επίτευξη τριαξονικής θλίψης λόγω των διαστάσεων των τοιχίων είναι πρακτικά αδύνατη. Για το λόγο αυτό σχέσεις υπολογισμού απαιτούμενου πάχους μανδύα ο οποίος επιβάλλει στο υποστυλώμα τάσεις περίσφιγξης και αποτρέπει το φαινόμενο του λυγισμού (π.χ Priestley et al., 1996) δεν μπορούν να εφαρμοστούν σε τοιχία οπλισμένου σκυροδέματος.

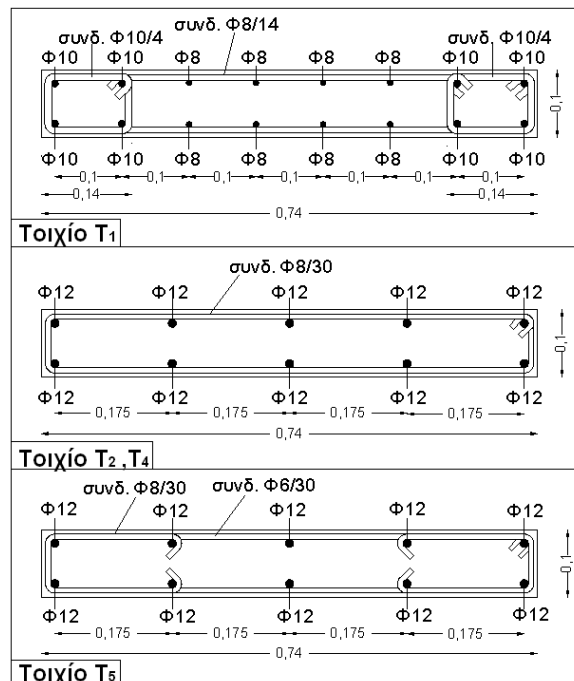
4. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι αφενός να εξακριβωθεί πειραματικά το φαινόμενο του λυγισμού και το πώς επηρεάζεται ανάλογα με τον τρόπο όπλισης και αφετέρου να εξεταστεί η συμβολή μανδύα FRP στην αντιμετώπιση αυτού. Για τον



Σχήμα 8. Διαστάσεις τοιχίων.

σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται τα πειραματικά αποτελέσματα τεσσάρων διαφορετικών τοιχίων. Το T_1 αποτελεί το δοκίμιο αναφοράς και είναι σχεδιασμένο με βάση τους σύγχρονους κανονισμούς, δηλαδή με διαμόρφωση ακραίων κρυφοϋποστρωμάτων και σύμφωνα με τις αρχές του ικανοτικού σχεδιασμού σε τέμνουσα. Τα τοιχία T_2 - T_4 χαρακτηρίζονται από την απουσία ακραίων κρυφοϋποστρωμάτων και την αραιή διάταξη περιμετρικών συνδετήρων ενώ δεν έχουν σχεδιαστεί ικανοτικά, προσομοιώνοντας τοίχιο σχεδιασμένο με βάση τα Β.Δ 54/59. Τέλος, το τοίχιο T_5 περιλαμβάνει αραιή διάταξη διατμητικού οπλισμού αλλά χαρακτηρίζεται από τη διαμόρφωση ακραίων ανοιχτών συνδετήρων με σκοπό την συμβολή τους στο φαινόμενο του λυγισμού.

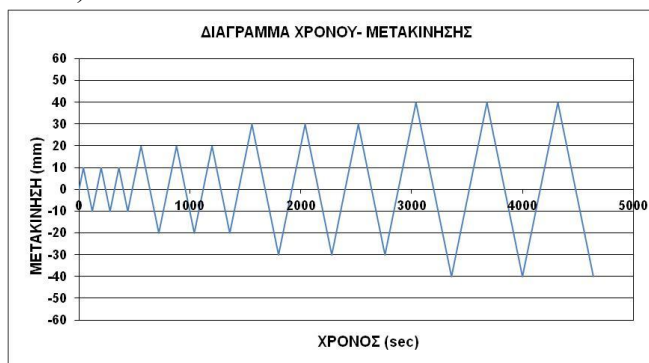


Σχήμα 9. Όπλιση τοιχίων.

Με βάση τα παραπάνω προκύπτει ότι η ανηγμένη απόσταση των συνδετήρων είναι $s/D_d = 4$, $s/D_d = 25$ και $s/D_d = 12,5$ για τα τοιχία T_1 , T_2 - T_4 και T_5 αντίστοιχα.

5. ΕΚΤΕΛΕΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ-ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Η διαδικασία ήταν να επιβάλλονται μετατοπίσεις ,οι οποίες ξεκινώντας από το μηδέν θα αυξάνονταν σταδιακά προς τα θετικά και τα αρνητικά με μέγιστες τιμές αρχικά αυτές των ± 10 mm, ενώ στην συνέχεια οι μέγιστες αυτές τιμές θα αυξάνονταν ανά 10 mm. Για κάθε τέτοια μέγιστη τιμή επιλέχθηκε να πραγματοποιηθούν τρεις ανακυκλίσεις (τρεις κύκλοι).



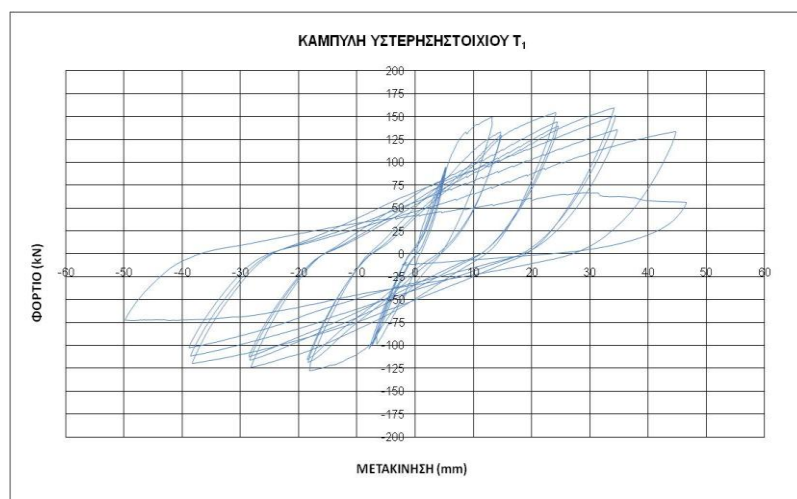
Διάγραμμα 5. Ιστορία φόρτισης τοιχίων

Τοιχίο T₁

Η μέγιστη δύναμη μετρήθηκε κατά τον πρώτο κύκλο στα +40mm και ήταν ίση $F_{max}=157$ kN. Η σημαντική αποδιοργάνωση και απώλεια της φέρουσας ικανότητας του τοιχίου παρατηρήθηκε κατά το δεύτερο κύκλο της ομάδας μετακινήσεων ± 50 mm. Όσον αφορά τον σχηματισμό ρωγμών και τις μορφές αστοχίας το τοιχίο αστόχησε με καμπτικό τρόπο. Αυτό καταδεικνύεται από την απουσία κύριων χιαστί διατμητικών ρωγμών αλλά και την συγκέντρωση οριζόντιων ρωγμών στη βάση του. Η παρουσία διαγώνιων, μικρού εύρους, ρωγμών οι οποίες εμφανίστηκαν από τους κύκλους των μετακινήσεων των ± 10 mm δεν χαρακτηρίζονται ως αστοχία διατμητικού τύπου. Η πτώση του φορτίου ήταν ομαλή και η αστοχία του τοιχίου παρατηρήθηκε σε μεγάλες μετακινήσεις λόγω της πλήρους αποδιοργάνωσης της θλιβόμενης ζώνης. Η καμπτική συμπεριφορά του τοιχίου καταδικνύεται και από την τιμή της αναπτυσσόμενης πλαστιμότητας , η οποία εκτιμήθηκε ίση με $\mu_{\Delta}=4,56$.



Φώτ. 1 Ρωγμάτωση τοιχίου T₁ μετά το τέλος του πειράματος.



Διάγραμμα 6. Καμπύλη υστέρησης τοιχίου T₁

Τοιγίο T₅

Η συμπεριφορά του τοιχίου T₅ διαφέρει από αυτή του T₁, κυρίως ως προς τον σχηματισμό των ρωγμών. Ήδη κατά τις μετακινήσεις των ± 20 mm αρχίσαν να σχηματίζονται δύο κύριες διατμητικές ρωγμές που δεν συνοδεύτηκαν από πτώση της αντοχής του τοιχίου. Αντιθέτως, κατά τον πρώτο κύκλο των ± 20 mm για μετακίνηση +19,24 mm μετρήθηκε και η μεγαλύτερη τιμή φορτίου ίση με 155,04 kN.



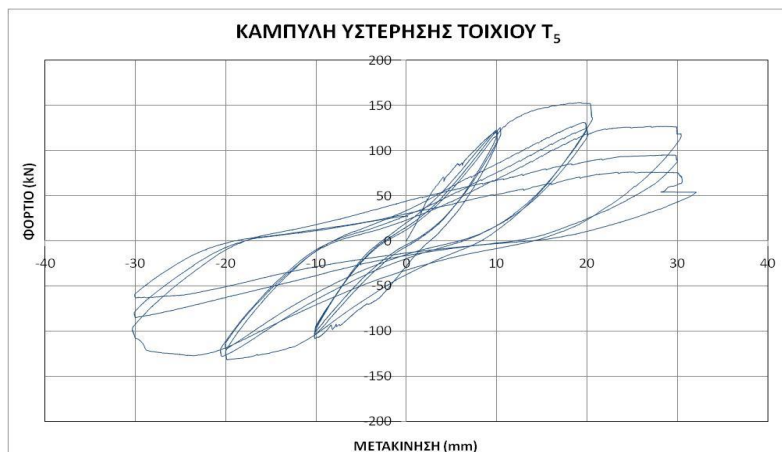
Φωτ. 2. Ρωγμάτωση τοιχίου T₅ μετά το τέλος του πειράματος.

του εύρους των κύριων διατμητικών ρωγμών και της αποδιοργάνωσης της θλιβόμενης ζώνης, χωρίς ωστόσο να συνοδευτεί από πτώση του φορτίου. Η πλήρης απώλεια της φέρουσας ικανότητας πραγματοποιήθηκε κατά το δεύτερο και τρίτο κύκλο, κατά τον οποίο η τιμή του φορτίου έφτασε τα 80 kN. Το εύρος των διατμητικών ρωγμών ήταν πλέον αρκετά μεγάλο ώστε αυτές να μην προλάβουν να κλείσουν με την εναλλαγή της φοράς φόρτισης με αποτέλεσμα μετά το τέλος του πειράματος να πάρουν μορφή χιαστί. Η πλαστιμότητα μετρήθηκε ίση με $\mu_{\Delta} = 2,38$.

Τέλος, οι περιοχές της θλιβόμενης ζώνης εμφανίζονται πλήρως αποδιοργανωμένες με έντονο λυγισμό του διαμήκους οπλισμού. Αυτό που έχει

Στους επόμενους δύο κύκλους, οι διατμητικές αυτές ρωγμές έγιναν αισθητά εντονότερες ενώ ταυτόχρονα παρατηρήθηκε και μία σχετική αποδιοργάνωση της θλιβόμενης ζώνης. Κατά τον πρώτο κύκλο των μετακινήσεων των ± 30 mm ουσιαστικά παρατηρήθηκε μεγάλη αύξηση

ιδιαίτερη σημασία, όμως, είναι ότι ο λυγισμός αυτός παρατηρήθηκε σε μεγάλες μετακινήσεις όταν πλέον η αποδιοργάνωση του σκυροδέματος της θλιβόμενης ζώνης αλλά και του κορμού, λόγω των χιαστί ρωγμών, είχε ήδη φτάσει σε προχωρημένο στάδιο. Παρόλο που το φαινόμενο του λυγισμού συνέβαλε στην αποδιοργάνωση της θλιβόμενης ζώνης, δεν μπορεί να θεωρηθεί ότι αποτελέσε την κύρια αιτία. Συμπερασματικά, για ανηγμένη απόσταση συνδετήρων $s/D=12.5$ παρατηρήθηκε ανελαστικός λυγισμός σε μεγάλες παραμορφώσεις που δεν επηρέασε πρόωρα τη συμπεριφορά του τοιχίου.



Διάγραμμα 7. Καμπύλη υστέρησης τοιχίου T_5 .

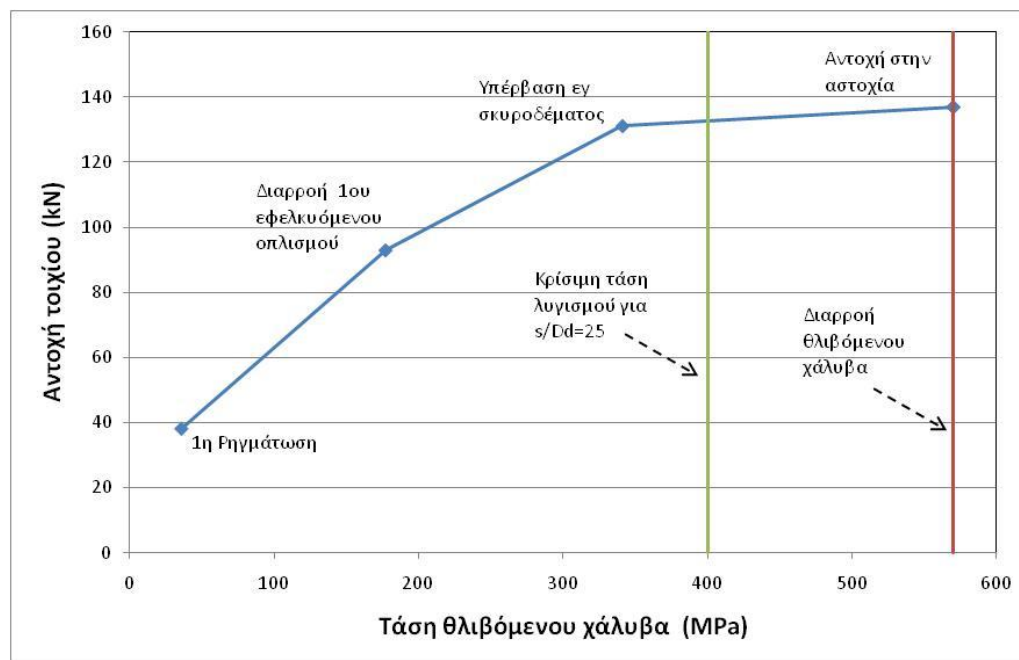
Τοιχίο T_2

Κατά στους πρώτους δυο κύκλους των μετακινήσεων ± 10 mm εμφανίζονται οι πρώτες διαγώνιες τριχοειδείς ρωγμές στον κορμό του τοιχίου αλλά και κοντά στη βάση του οι οποίες αυξάνουν το εύρος τους κατά τις μετακινήσεις των ± 20 mm. Ενώ το πείραμα συνεχιζόταν, κατά τις μετακινήσεις των ± 30 mm, πριν προλάβει να ολοκληρωθεί ο πρώτος κύκλος και για μετακίνηση $-8,6$ mm παρατηρήθηκε στη θλιβόμενη ζώνη έντονος λυγισμός των ακραίων ράβδων οπλισμού, όπως διακρίνεται και στην παρακάτω φωτογραφία .



Φώτο 3. Λυγισμός ακραίων ράβδων οπλισμού τοιχίου T_2

Αυτό που πρέπει να τονιστεί είναι ότι η μέγιστη δύναμη που μετρήθηκε σε αρνητικές μετατοπίσεις είναι $P=124\text{kN}$. Η συγκεκριμένη τιμή είναι μικρότερη από την τιμή που αντιστοιχεί στη διαρροή του σκυροδέματος και επομένως και του χάλυβα σε θλίψη, κάτι που σημαίνει ότι πραγματοποιήθηκε ελαστικός λυγισμός.

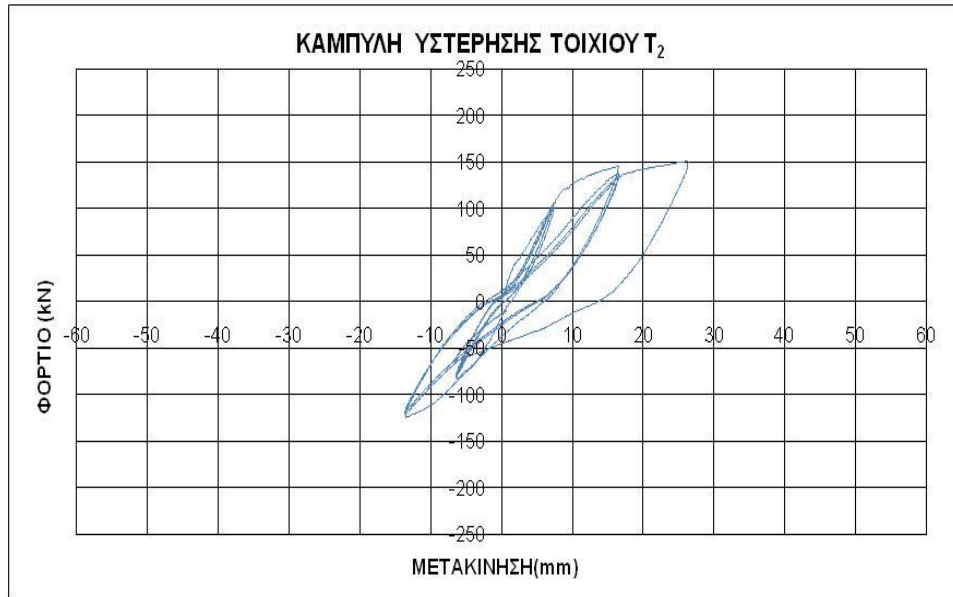


Διάγραμμα 8. Καμπύλη υστέρησης τοιχίου T_2

Στο σημείο αυτό πρέπει να αναφερθεί η επιρροή της ανακύκλισης στο κρίσιμο μήκος λυγισμού της ράβδου. Υπέρβαση του υπολογιστικού κρίσιμου φορτίου λυγισμού φαίνεται να γίνεται οριακά κατά το δεύτερο κύκλο στις αρνητικές μετακινήσεις -20mm . Η ανακύκλιση του φορτίου και η μετάβαση από θλιπτικές σε εφελκυστικές τάσεις καθυστέρησε την εκδήλωση του φαινομένου. Το γεγονός όμως ότι παρατηρήθηκε έντονος λυγισμός ξαφνικά κατά τον τρίτο κύκλο με χαρακτηριστική απότομη αποκόλληση της επικάλυψης του σκυροδέματος για φορτίο μικρότερο του P_{cr} σημαίνει ότι η ράβδος πέρασε σε έντονα μη γραμμική κατάσταση αστάθειας για φορτίο πολύ μικρότερο του υπολογιστικού κρίσιμου. Αυτό καταδεικνύει ότι, το γεγονός ότι η θλιβόμενη ράβδος είχε λυγίσει κατά τους προηγούμενους κύκλους (έστω κι αν δεν είχε περάσει σε κατάσταση ασταθούς ισορροπίας) προκάλεσε έντονη μείωση έως και 50% του κρίσιμου φορτίου.

Η περαιτέρω αύξηση της επιβαλλόμενης δύναμης στις αρνητικές μετακινήσεις θα επέφερε απότομη πτώση της τάσης των θλιβόμενων ράβδων, πρόωρη αστοχία τους και αδυναμία ανάληψης εφελκυστικών δυνάμεων στους επόμενους θετικούς κύκλους. Επομένως θα οδηγούσε σε ραγδαία μείωση της αντοχής και πλαστιμότητας του τοιχίου. Ενώπιον αυτού του προβλήματος, παρόλο που δεν υπήρξε καμία πτώση

του φορτίου, αποφασίστηκε η παύση του πειράματος και η επισκευή και ενίσχυση του τοιχίου.



Διάγραμμα 9. Καμπύλη υστέρησης τοιχίου T₂

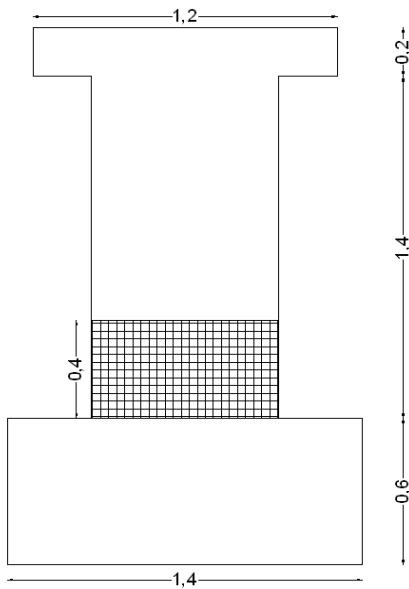
Επισκευή και ενίσχυση τοιχίου T₂

Η επισκευή και ενίσχυση του τοιχίου περιελάμβανε δυο στάδια. Αρχικά την απομάκρυνση του σκυροδέματος σε μια ζώνη ύψους 20 cm και την αντικατάστασή του με επισκευαστικό κονίαμα και εν συνεχεία την ενίσχυσή του με δύο στρώσεις από υαλοϋφασμα GFRP ($E_{jm}=65000\text{MPa}$, $t_j=0,23\text{ mm}$, $\epsilon_{ju}=2,6\%$) με σκοπό την αποφυγή εκ νέου λυγισμού των ράβδων οπλισμού.



Φώτο 4. Απομάκρυνση παλαιού σκυροδέματος και καλούπωμα τοιχίου T₂

Επίσης, δοκιμάστηκε δοκίμιο του κατασκευαστικού κονιάματος προκειμένου να έχουμε μία ένδειξη της αντοχής του. Η δοκιμή σε μονοαξονική καταπόνηση έδειξε αντοχή 23 MPa.



Σχήμα 10. Τοποθέτηση FRP στο τοίχιο T₂.

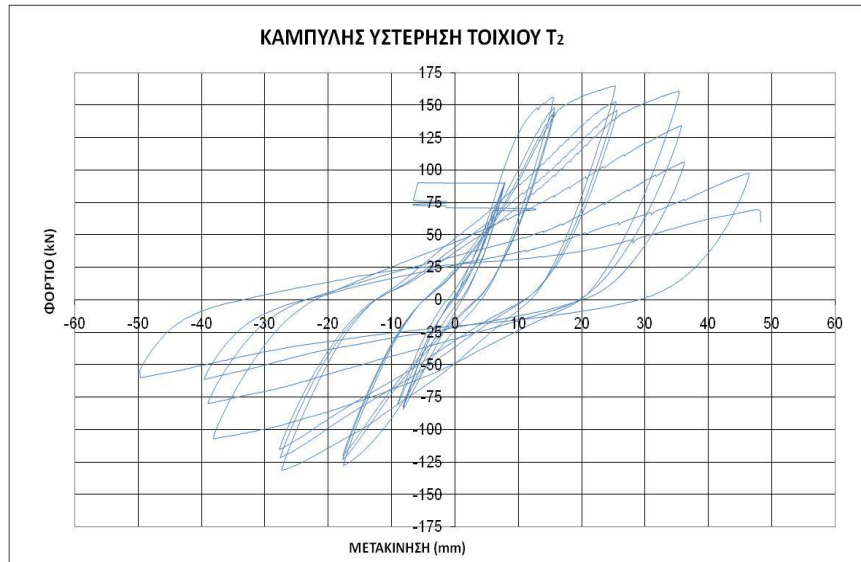
Στο σημείο αυτό πρέπει να τονιστεί ότι η λωρίδα FRP τοποθετήθηκε σε ένα ύψος 40cm, με σκοπό αποκλειστικά τον περιορισμό του μήκους του λυγισμού των θλιβόμενων διαμήκων ράβδων. Όπως προαναφέρθηκε, λόγω της επιμήκους διατομής του τοιχίου είναι αδύνατη η επίτευξη περίσφιξης, ενώ η απουσία αγκύρωσης του μανδύα δεν οδηγεί σε αύξηση της καμπτικής αντοχής. Βεβαίως, η παρουσία του μανδύα οδηγεί σε αύξηση της διατμητικής αντοχής. Για τον λόγο αυτό ο μανδύας περιορίστηκε μόνο στο κάτω τμήμα, και όχι σε ψηλότερο όπου και θα σχηματίζονταν οι ενδεχόμενες χιαστί διατμητικές ρωγμές.

Το μέγιστο φορτίο τόσο προς τα θετικά όσο και προς τα αρνητικά με $F_{\max+}=163$ kN και $F_{\max-}=129$ kN αντίστοιχα μετρήθηκε κατά τον πρώτο κύκλο των ± 30 mm. Κατά τον πρώτο κύκλο της ομάδας μετακινήσεων ± 40 mm παρατηρήθηκε φούσκωμα του υφάσματος, ένδειξη αποδιοργάνωσης της βάσης του τοιχίου. Η μεγάλη πτώση του φορτίου παρατηρείται στον πρώτο κύκλο των ± 50 mm όπου και για μετακίνηση +50mm απαιτείται φορτίο μόλις 96 kN. Η αστοχία επήλθε καμπτικά κάτι που αποδεικνύεται και από την αποδιοργάνωση της βάσης του τοιχίου αλλά και από την απουσία σημαντικής διατμητικής ρωγμής στον κορμό του τοιχίου. Σχηματισμός διαγώνιων ρωγμών στον κορμό του τοιχίου μικρού, όμως, εύρους παρατηρήθηκε καθ' όλη την διάρκεια του πειράματος. Η πλαστιμότητα μετρήθηκε ίση με $\mu_{\Delta}=2,47$.



Φώτο 5. Αστοχία επισκευασμένου τοιχίου T₂.

Ιδιαίτερα σημαντική αποδείχθηκε η συμβολή του FRP στην αποφυγή του φαινομένου του λυγισμού. Όπως φαίνεται και στην παραπάνω φωτογραφία δεν παρατηρήθηκε κάποιο φύσκωμα του μανδύα κατά το πλάτος του τοιχίου (μικρή διάσταση) που να υποδεικνύει τον λυγισμό των ράβδων και την αποφλοιώση του σκυροδέματος.



Διάγραμμα 10. Καμπύλη υστέρησης επισκευασμένου τοιχίου T₂

Τοιχίο T₄

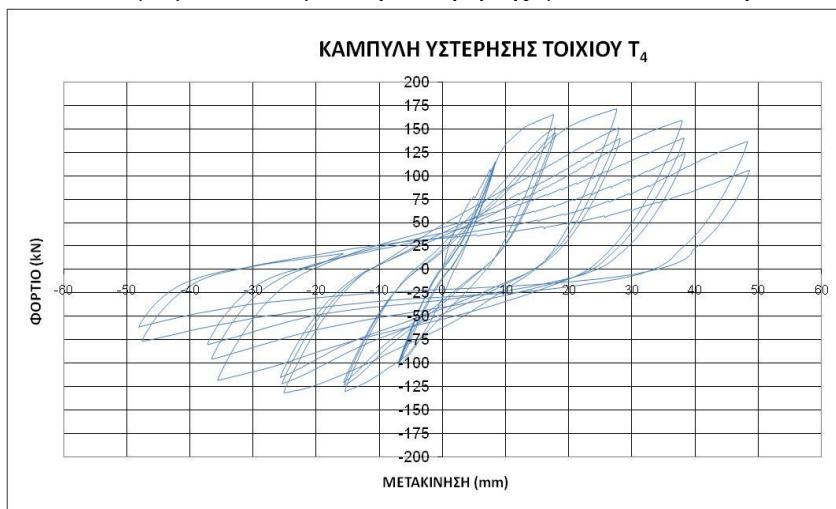
Το τοιχίο T₄ παρουσίασε παρόμοια συμπεριφορά με το τοιχίο T₂. Κατά τον πρώτο κύκλο των ± 30 mm παρατηρήθηκε το μέγιστο φορτίο τόσο προς τα θετικά όσο



Φώτο 6. Αστοχία επισκευασμένου τοιχίου T₄.

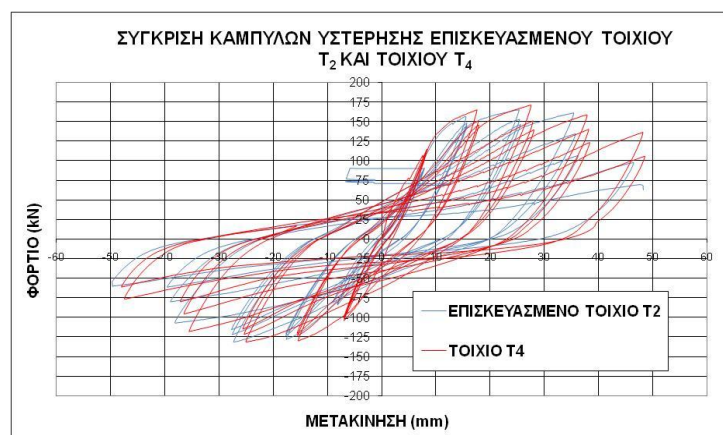
και προς τα αρνητικά με $F_{\max+}=171$ kN και $F_{\max-}=131$ kN αντίστοιχα. Στις μετακινήσεις των ± 40 mm κατά τον πρώτο κύκλο παρατηρήθηκε φύσκωμα του υφάσματος, σαφής ένδειξη αποδιοργάνωσης της βάσης του τοιχίου. Η αστοχία του χαρακτηρίστηκε ως καμπτική, αφού χαρακτηριστική είναι η απουσία κύριων διατμητικών ρωγμών. Η αναπτυσσόμενη πλαστικότητα μετρήθηκε ίση με $\mu_{\Delta}=2,96$. Η

παρουσία του μανδύα FRP εμπόδιζε, όπως και στο τοιχίο T₂, την ανάπτυξη του φαινομένου του λυγισμού. Η καμπύλη υστέρησης φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα.



Διάγραμμα 11. Καμπύλη υστέρησης ενισχυμένου τοιχίου T₄

Από την σύγκριση των δύο τοιχίων προκύπτει ότι το τοιχίο T₂ παρουσίασε πιο γρήγορη πτώση του φορτίου του κάτι το οποίο αντικατοπτρίζεται και από την μικρή διαφορά της αναπτυσσόμενης πλαστιμότητας. Ωστόσο, η πτώση αυτή του φορτίου δεν είναι σημαντική και αποδίδεται στο γεγονός ότι το τοιχίο T₂ είναι προρηγματωμένο. Επίσης, φαίνεται ότι παρόλο το γεγονός ότι ο διαμήκης οπλισμός



έχει ήδη λυγίσει, η απλή επισκευή του τοιχίου με αντικατάσταση με επισκευαστικό κονίαμα και προσθήκη μανδύα FRP του επιτρέπει να αναπτύξει ικανοποιητική συμπεριφορά.

Διάγραμμα 12. Σύγκριση επισκευασμένου τοιχίου T₂ και ενισχυμένου τοιχίου T₄.

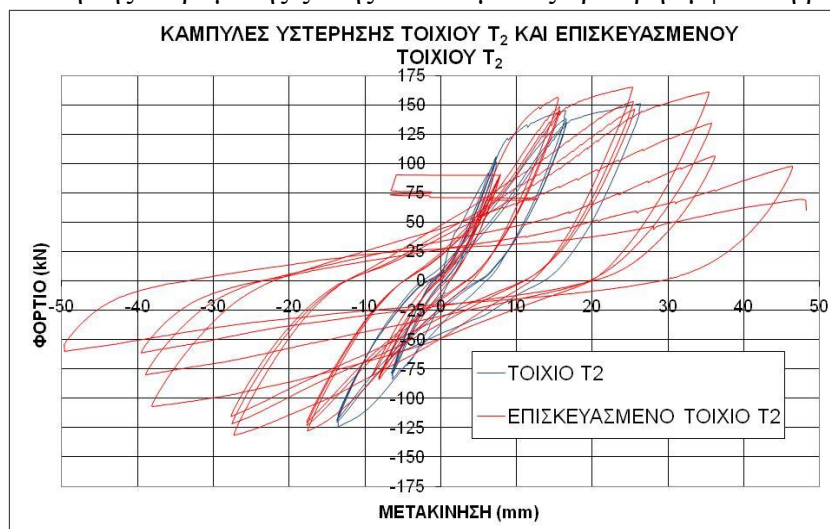
6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από τα πειραματικά αποτελέσματα προκύπτουν πολλά συμπεράσματα όσον αφορά την συμπεριφορά των ανεπαρκώς οπλισμένων τοιχίων. Η δυνατότητα ανάληψης τεμνουσών δυνάμεων, η εξέταση της ορθότητας της μεθοδολογίας για τον υπολογισμό της διατμητικής αντοχής τους που περιλαμβάνεται στους κανονισμούς, καθώς και η ικανότητα ή μη να αναπτύσσουν ικανοποιητικές τιμές τοπικής πλαστιμότητας είναι κάποια από τα θέματα που εξετάζονται.

Η συγκεκριμένη εργασία θίγει αποκλειστικά το θέμα του λυγισμού των θλιβόμενων διαμήκων ράβδων. Όπως αποδείχθηκε και πειραματικά το φαινόμενο του λυγισμού παρουσιάζεται έντονο σε τοιχία σχεδιασμένα σύμφωνα με τα Β.Δ 54' και 59', πριν τις πρόσθετες διατάξεις του 1984, δηλαδή σε τοιχία για τα οποία ισχύει $s/D_d > 15$.

Για τον υπολογισμό του κρίσιμου φορτίου θεωρείται ακριβέστερη η θεώρηση της ράβδου ως μονόπακτης. Στο κατώτερο τμήμα του τοιχίου όπου αναπτύσσεται η μεγαλύτερη ένταση και επομένως πιο έντονο το φαινόμενο του λυγισμού, η ράβδος θεωρείται πακτωμένη στη βάση ενώ ο συνδετήρας θεωρείται ότι έχει χαμηλή δυστένεια ώστε να μην μπορεί να περιορίσει τη στρόφη του άκρου της ράβδου (άρθρωση).

Το φαινόμενο αυτό επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τη ρωγμάτωση των τοιχίων, αφού για μικρές σχετικά μετακινήσεις προκαλεί αποφλοιώση του σκυροδέματος, αποδιοργάνωση της θλιβόμενης ζώνης και επομένως πρόωρη εμφάνιση βλαβών.



Διάγραμμα 13. Σύγκριση καμπυλών υστέρησης τοιχίου T₂ πριν και μετά την επισκευή.

Όπως προκύπτει από τα συγκεκριμένα πειραματικά αποτελέσματα η ενίσχυση του τοιχίου με χρήση μανδύα FRP σε ένα τμήμα 25-40 cm από τη βάση του βελτιώνει σημαντικά την συμπεριφορά του, αφού συγκρατεί το πλευρικό σκυρόδεμα, περιορίζει στο ελάχιστο το μήκος λυγισμού των διαμήκων ράβδων και επομένως φαίνεται να μεταθέτει το φαινόμενο σε πολύ μεγάλες μετατοπίσεις ή και να το αποτρέπει τελείως. Έτσι, ακόμα κι αν αυτός ο τρόπος ενίσχυσης δεν μπορεί να αποτελέσει από μόνος του μία πλήρη ενίσχυση, διαφαίνεται η σημασία του σε συνδυασμό με την επέμβαση για αύξηση της αντοχής σε κάμψη και διάτμηση.

7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. **Antoniades Konstantinos K., Salonikios Thomas N., Kappos Andreas J. 2003.** Cyclic Tests on Seismically Damaged Reinforced Concrete Walls Strengthened Using Fiber-Reinforced Polymer Reinforcement. *ACI Structural Journal*. July-August, 2003, Vol. 100, Issue 4, pg. 510-518.
2. **Dhakal Rajesh Prasad, Maekawa Koichi. 2002.** Modeling of Post-yield Buckling of Reinforcement. *ASCE Journal of Structural Engineering*. 2002, Vol. 128, (9), pg.1139-1147.
3. **Dhakal Rajesh Prasad, Maekawa Koichi. 2002.** Reinforcement Stability and Fracture of Cover Concrete in Reinforced Concrete. *ASCE Journal of Structural Engineering*. 2002, Vol. 128, (10), pg. 1253-1262.
4. **Dritsos S, Pilakoutas K, Kotsira E. 1995.** Effectiveness of flexural strengthening of RC members. *Construction and Building Materials*. June, 1995, Vol. 9, Issue 3, pg. 165-171.
5. **Maalej M., Tanwongsvat S., Paramasivam P. 2003.** Modelling of rectangular RC columns strengthened with FRP. *Elsevier Cement and Concrete Composites*. February, 2003, Vol. 25, Issue 2, pg. 263-276.
6. **Priestley M.L.N, Seible F., Calvi G.M. 1996.** *Seismic Design and Retrofit of Bridges*. New York, USA, John Wiley & Sons, 1996.
7. **Pantazopoulou S. 1998.** Detailing for Reinforcement Stability in RC Members. *ASCE Journal of Structural Engineering*. 1998, Vol. 124, (6), pg. 623-632.
8. **Δρίτσος, Στέφανος. 2009.** *Ενισχύσεις- Επισκευές Κατασκευών Οπλισμένου Σκυροδέματος*. Πάτρα, 2009.
9. **Ρουσάκης Θεόδωρος, Καραμπίνης Αθανάσιος. 2009.** 16ο Συνέδριο Σκυροδέματος ΤΕΕ, ΕΤΕΚ. 21-23 Νοεμβρίου, 2009.
10. **Σπυράκος, Κωνσταντίνος. 2004.** *Ενίσχυση Κατασκευών για Σεισμικά φορτία*. ΤΕΕ, 2004.
11. **Τάσιος, Θ.Π. 2010.** *Θεωρία Σχεδιασμού Επισκευών και Ενισχύσεων*. Εκδόσεις Συμμετρία, 2010.
12. **Ταστάνη Σουζάνα, Δερβίσης Αθανάσιος, Πανταζοπούλου Σταυρούλα. Νοέμβριος 2008.** *Επίπτωση του Λυγισμού των Θλιβόμενων Ράβδων στην Ενεργό Παραμόρφωση Μανδύα Περίσφιγξης από ΙΟΠ*, 3ο Πανελλήνιο Συνέδριο Αντισεισμικής Μηχανικής & Τεχνικής Σεισμολογίας, Νοέμβριος 2008.
13. **Τρανούλης Νικόλαος, Χριστίδης Κωνσταντίνος. 2009.** *Διπλωματική Εργασία με τίτλο " Πειραματική Διερεύνηση Ανεπαρκώς Οπλισμένων Τοιχίων "*. Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, ΕΜΠ, Αθήνα, 2009.
14. **Τριανταφύλλου, Αθανάσιος. 2η έκδοση, 2004.** *Ενισχύσεις Κατασκευών Οπλισμένου Σκυροδέματος με Σύνθετα Υλικά*, 2η έκδοση Πάτρα, 2004.
15. **Χριστίδης, Κωνσταντίνος. 2010.** *Μεταπτυχιακή Εργασία με τίτλο " Ανεπαρκώς Οπλισμένα Τοιχία Ο/Σ υπό Ανακυκλιζόμενη Φόρτιση "*. Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, ΕΜΠ, Αθήνα, 2010.