

Πειραματική διερεύνηση συμπεριφοράς στοιχείων Ω/Σ με σπειροειδή οπλισμό

Χ.Γ. Καραγιάννης

Καθηγητής. Τομέας Δομικών Κατασκευών – Εργαστήριο Ωπλισμένου Σκυροδέματος ΔΠΘ.

Γ.Μ. Σιρκελής

Πολιτικός Μηχανικός, MSc. Υποψ. Διδάκτωρ. Εργαστήριο Ωπλισμένου Σκυροδέματος ΔΠΘ.

Π. Μαυροειδής

Μεταλλειολόγος-Μεταλλουργός Μηχανικός ΕΜΠ.

Λέξεις κλειδιά: Ανακυκλιζόμενη φόρτιση, σπειροειδής οπλισμός, υστερητική απόκριση

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Διερευνάται πειραματικά η συμπεριφορά στοιχείων ωπλισμένου σκυροδέματος με συνεχή σπειροειδή οπλισμό υπό ανακυκλιζόμενη καταπόνηση και συγκρίνεται με την απόκριση αντίστοιχων στοιχείων με μεμονωμένους συνδετήρες. Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα προκαταρτικού πειραματικού προγράμματος που αποτελείται από τρία δοκίμια υποστυλωμάτων εκ των οποίων το ένα έχει συμβατικό εγκάρσιο οπλισμό με μεμονωμένους συνδετήρες (δοκίμιο ελέγχου), ενώ στα άλλα δύο έχει τοποθετηθεί σπειροειδής οπλισμός με ορθογωνικό σχήμα. Εξετάζεται η επιρροή δύο διαφορετικών διατάξεων σπείρας στην αποτελεσματικότητα του σπειροειδούς οπλισμού. Για την εξαγωγή συμπερασμάτων γίνεται σύγκριση της υστερητικής απόκρισης και της ικανότητας απορρόφησης ενέργειας των δοκιμίων.

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η χρήση συνεχούς σπειροειδούς οπλισμού σε στοιχεία ωπλισμένου σκυροδέματος με κυκλική διατομή βελτιώνει ουσιαστικά την αντοχή και την πλαστιμότητα του σκυροδέματος και κατ' επέκταση τη συνολική σεισμική ικανότητα και συμπεριφορά του δομικού στοιχείου (Park & Paulay 1975, Saatcioglu & Razvi 1992, Sheikh & Toklucu 1993). Αυτό έχει γίνει δεκτό και από του κανονισμούς που δέχονται σε αυτές τις περιπτώσεις αυξημένους συντελεστές απόδοσης της περίσφιξης (ACI 318, ΕΚΩΣ-2000).

Τα τελευταία χρόνια διερευνάται η αποτελεσματικότητα της εφαρμογής του συνεχούς σπειροειδούς οπλισμού και σε δομικά στοιχεία με ορθογωνική διατομή. Η προσδοκώμενη βελτίωση της ικανότητας των στοιχείων ορθογωνικής διατομής με τη χρήση του συνεχούς σπειροειδούς οπλισμού κατ' αναλογία της βελτίωσης που επιτυγχάνεται σε στοιχεία με κυκλική διατομή, σε συνδυασμό και με την τεχνολογική δυνατότητα ευρείας εφαρμογής του σπειροειδούς οπλισμού με ορθογωνική μάλιστα μορφή, προσδίδει στη συστηματική διερεύνηση του θέματος ιδιαίτερο τεχνικό και οικονομικό ενδιαφέρον.

Αρχικές προσπάθειες εφαρμογής συνεχούς σπειροειδούς οπλισμού κυκλικής μορφής σε στοιχεία με ορθογωνική διατομή έχουν ήδη πραγματοποιηθεί (Park & Paulay 1975, Essawy & Hawary 1998). Η αποτελεσματικότητα της χρήσης συνεχούς σπειροειδούς οπλισμού ορθογωνικής μορφής σε ακραίους κόμβους δοκού - υποστυλωμάτων με ορθογωνική διατομή έχει προσφάτως αρχίσει να εξετάζεται πειραματικά (Καραγιάννης κ.ά. 2003, Καραγιάννης & Σιρκελής 2003, 2004, Karayannis & Sirkelis 2005). Παρ' όλα αυτά, η επιρροή του συνεχούς σπειροειδούς οπλισμού σε στοιχεία με ορθογωνικές διατομές με οποιαδήποτε μορφή και αν αυτός εφαρμόζεται δεν έχει ακόμη γίνει ακόμα πλήρως κατανοητή και απαιτείται περαιτέρω έρευνα του θέματος.

Στόχος της παρούσας έρευνας είναι η πειραματική διερεύνηση της δυνατότητας για βελτίωση της σεισμικής ικανότητας δομικών στοιχείων με τη χρήση συνεχούς σπειροειδούς οπλισμού με

ορθογωνικό σχήμα στο υποστυλώμα. Εξετάζεται η αποτελεσματικότητα δύο διαφορετικών μορφών σπειροειδούς οπλισμού. Τα αποτελέσματα συγκρίνονται με τα αντίστοιχα αποτελέσματα δοκιμών που οπλίζονται με κοινούς μεμονωμένους ορθογωνικούς συνδετήρες. Περιλαμβάνονται τα αποτελέσματα πειραματικού προγράμματος τριών δοκιμών υποστυλωμάτων, τα οποία υποβάλλονται σε κοινή ανακυκλιζόμενη φόρτιση με βήματα αυξανόμενου εύρους και δύο πλήρεις κύκλους ανά βήμα. Παρουσιάζεται η υστερητική απόκριση των δοκιμών καθώς και συγκριτική εξέταση των μεγίστων τιμών του φορτίου των κύκλων απόκρισης και της απορροφούμενης ενέργειας μετρούμενης ως εμβαδόν των υστερητικών κύκλων απόκρισης.

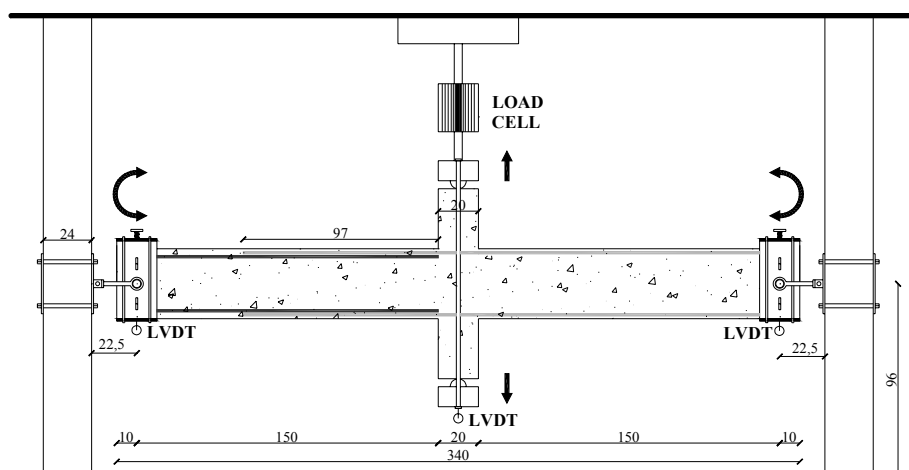
2 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ

Το πειραματικό πρόγραμμα αποτελείται από 3 δοκίμια υποστυλωμάτων των οποίων τα χαρακτηριστικά φαίνονται στον Πίνακα 1. Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά όλων των δοκιμών είναι τα ίδια. Το υποστυλώμα έχει μήκος 340 cm και διατομή 30×30 cm και η δοκός έχει μήκος 90 cm και διατομή 20/30 cm. Ο διαμήκης οπλισμός του υποστυλώματος και της δοκού είναι ίδιος σε όλες τις περιπτώσεις. Στο υποστυλώμα έχουν τοποθετηθεί 8Ø12 (3Ø12 σε κάθε πλευρά) ως διαμήκης οπλισμός ενώ ως οπλισμός διάτμησης έχουν τοποθετηθεί Ø8/10 cm στις κρίσιμες περιοχές και Ø8/15 cm στις μη κρίσιμες περιοχές, είτε με την μορφή μεμονωμένων συνδετήρων είτε με την μορφή σπειροειδούς οπλισμού. Στην δοκό έχουν τοποθετηθεί 6Ø12 (3Ø12 άνω και 3Ø12 κάτω) ως διαμήκης οπλισμός και Ø8/10 cm ως οπλισμός διάτμησης. Οι διαμήκεις οπλισμοί του υποστυλώματος έχουν το απαιτούμενο από τον κανονισμό μήκος μάτισης ίσο με 97 cm. Η διαφορά των δοκιμών βρίσκεται στη μορφή εγκάρσιου οπλισμού των υποστυλωμάτων (Πίν. 2).

Όλα τα δοκίμια υποβλήθηκαν στην ίδια εναλλασσόμενη καταπόνηση με αυξανόμενο εύρος παραμόρφωσης και δύο κύκλους φόρτισης ανά βήμα φόρτισης. Η μέγιστη παραμόρφωση ανά βήμα φόρτισης ήταν ± 8 mm, ± 15 mm, ± 30 mm, ± 55 mm και ± 80 mm.

Η αντοχή του σκυροδέματος ήταν $f_c = 31.6$ MPa (μέση κυλινδρική αντοχή). Χρησιμοποιήθηκε χάλυβας S500 με χαρακτηριστική τιμή διαρροής $f_y = 584$ MPa. Για την μέτρηση του επιβαλλόμενου φορτίου χρησιμοποιήθηκε δυναμοκυψέλη (Load Cell) ακρίβειας 0.05 kN. Για την μέτρηση της επιβαλλόμενης βύθισης χρησιμοποιήθηκε ηλεκτρονικό επιμηκυνσιόμετρο (LVDT) ακρίβειας 0.01 mm. Επίσης χρησιμοποιήθηκαν άλλα δύο LVDTs στις στηρίξεις της πειραματικής διάταξης, για την μέτρηση πιθανών αθέλητων μετατοπίσεων.

Η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε, τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των δοκιμών και το ιστορικό φόρτισης φαίνονται στο Σχήμα 1 και Σχήμα 2 αντίστοιχα.



Σχήμα 1. Πειραματική διάταξη και ιστορικό φόρτισης δοκιμών

Πίνακας 1. Χαρακτηριστικά δοκιμίων

Διατομή δοκιμίων 30×30 cm

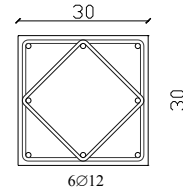
Διαμήκης οπλισμός: 8Ø12

Μήκος μάτισης: 97 cm

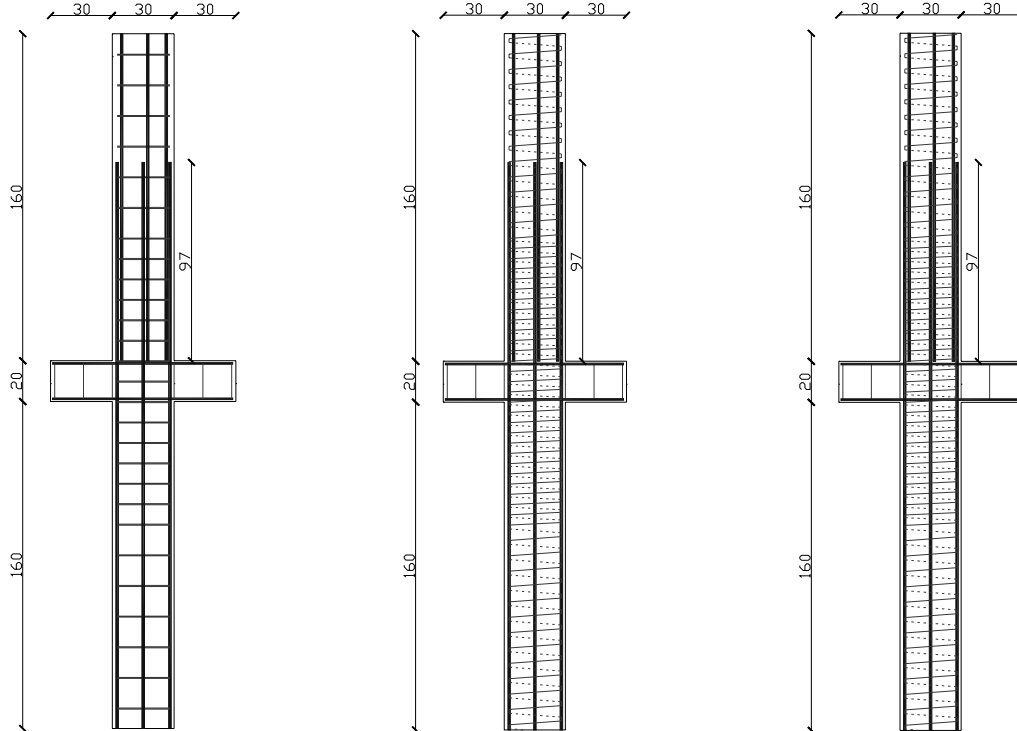
Εγκάρσιος οπλισμός:

Ø8/10 cm στην κρίσιμη περιοχή του υποστυλώματος

Ø8/15 cm στην μη κρίσιμη περιοχή του υποστυλώματος



Πίνακας 2. Γεωμετρικά χαρακτηριστικά δοκιμίων κόμβων



Δοκίμιο B1s:

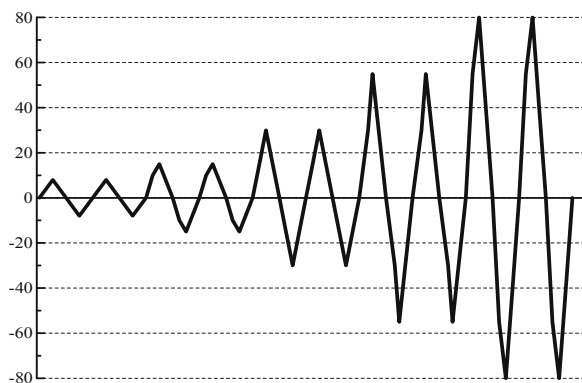
Συνδετήρες ως εγκάρσιος οπλισμός

Δοκίμιο B1sp:

Σπειροειδής οπλισμός ως εγκάρσιος οπλισμός

Δοκίμιο B2sp:

Σπειροειδής οπλισμός ως εγκάρσιος οπλισμός



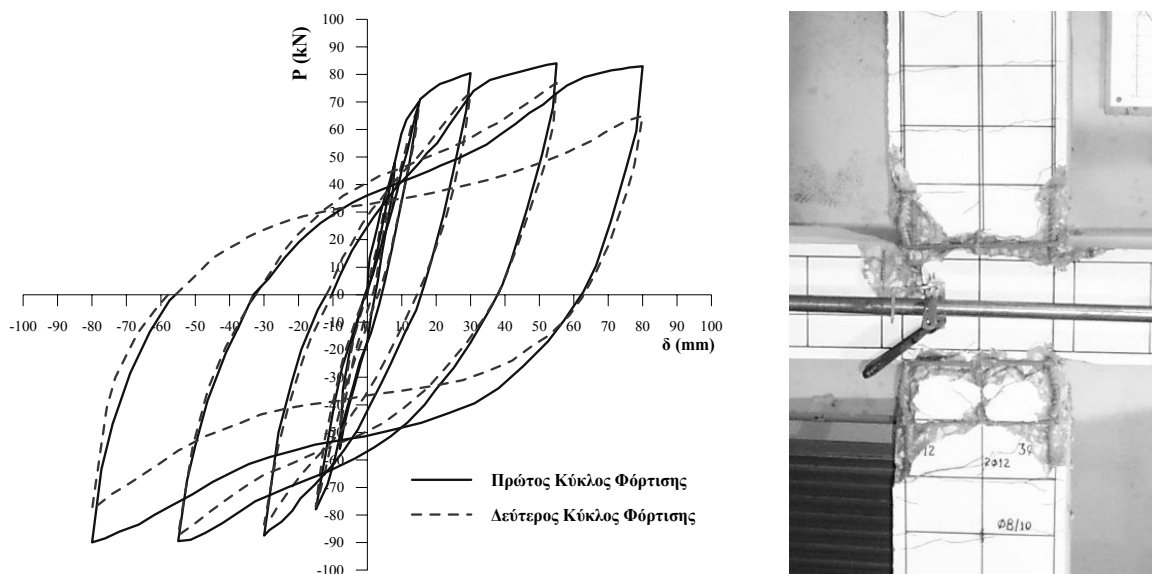
Σχήμα 2. Ιστορικό φόρτισης δοκιμίων

3 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

3.1 Δοκίμιο B1s

Το δοκίμιο B1s έχει ως εγκάρσιο οπλισμό στην περιοχή του υποστυλώματος μεμονωμένους συνδετήρες $\varnothing 8/10$ cm στις κρίσιμες περιοχές και $\varnothing 8/15$ cm στις μη κρίσιμες. Στο Σχήμα 3 παρουσιάζονται οι υστερητικοί βρόχοι απόκρισης καθώς και φωτογραφία της τελικής κατάστασης του δοκιμίου, μετά την ολοκλήρωση του πειράματος. Στον Πίνακα 3 παρουσιάζονται τα μέγιστα φορτία και η απορροφούμενη ενέργεια που καταγράφηκαν σε κάθε κύκλο φόρτισης.

Στο δοκίμιο B1s οι βλάβες επικεντρώθηκαν στις κρίσιμες περιοχές του υποστυλώματος με την δημιουργία πλαστικής άρθρωσης. Σημαντικές βλάβες παρουσιάστηκαν στην κρίσιμη περιοχή του κάτω υποστυλώματος.



Σχήμα 3. Υστερητική απόκριση και φωτογραφία τελικής κατάστασης δοκιμίου B1s

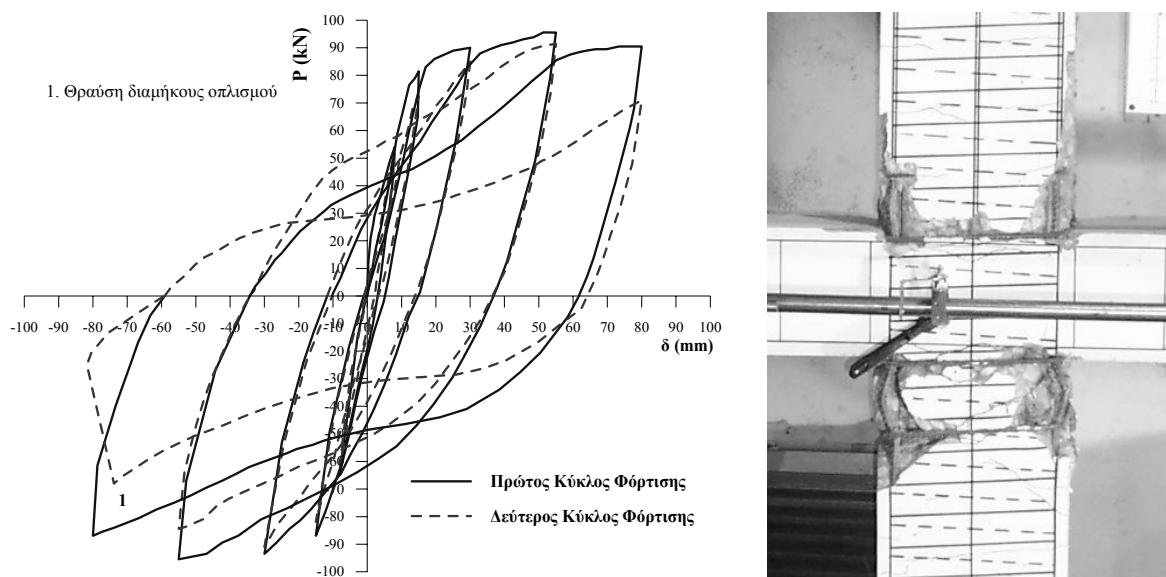
Πίνακας 3. Μέγιστα φορτία και απορροφούμενη ενέργεια ανά κύκλο φόρτισης δοκιμίου B1s

Μετακίνηση (mm)	1 ^{ος} κύκλος φόρτισης		2 ^{ος} κύκλος φόρτισης	
	P _{max} (kN)	Εμβαδόν (kNmm)	P _{max} (kN)	Εμβαδόν (kNmm)
+8	48.00	268.53	47.50	102.16
-8	56.00		48.00	
+15	70.00	559.00	69.00	363.88
-15	78.00		77.00	
+30	80.50	2950.12	73.50	2673.23
-30	87.50		83.50	
+55	84.00	7574.48	77.00	7443.02
-55	89.50		87.50	
+80	83.00	11792.87	65.00	9633.14
-80	90.00		78.00	

3.2 Δοκίμιο B1sp

Το δοκίμιο B1sp έχει ως εγκάρσιο οπλισμό στην περιοχή του υποστυλώματος σπειροειδή οπλισμό ορθογωνικής μορφής με βήμα σπείρας $\varnothing 8/10$ cm στις κρίσιμες περιοχές και $\varnothing 8/15$ cm στις μη κρίσιμες. Στο Σχήμα 4 παρουσιάζονται οι υστερητικοί βρόχοι απόκρισης καθώς και φωτογραφία της τελικής κατάστασης του δοκιμίου, μετά την ολοκλήρωση του πειράματος. Στον Πίνακα 4 παρουσιάζονται τα μέγιστα φορτία και η απορροφούμενη ενέργεια που καταγράφηκαν σε κάθε κύκλο φόρτισης.

Η συμπεριφορά του δοκιμίου B1sp ήταν παρόμοια με αυτή του δοκιμίου B1s στα τρία πρώτα βήματα φόρτισης αλλά βελτιώθηκε σημαντικά στα δύο τελευταία βήματα. Οι βλάβες επικεντρώθηκαν στις κρίσιμες περιοχές κυρίως του κάτω υποστυλώματος με την δημιουργία πλαστικής άρθρωσης. Στον δεύτερο κύκλο του 5ου βήματος φόρτισης σε μετατόπιση 80 mm παρουσιάστηκε θραύση των διαμήκων οπλισμών του υποστυλώματος.



Σχήμα 4. Υστερητική απόκριση και φωτογραφία τελικής κατάστασης δοκιμίου B1sp

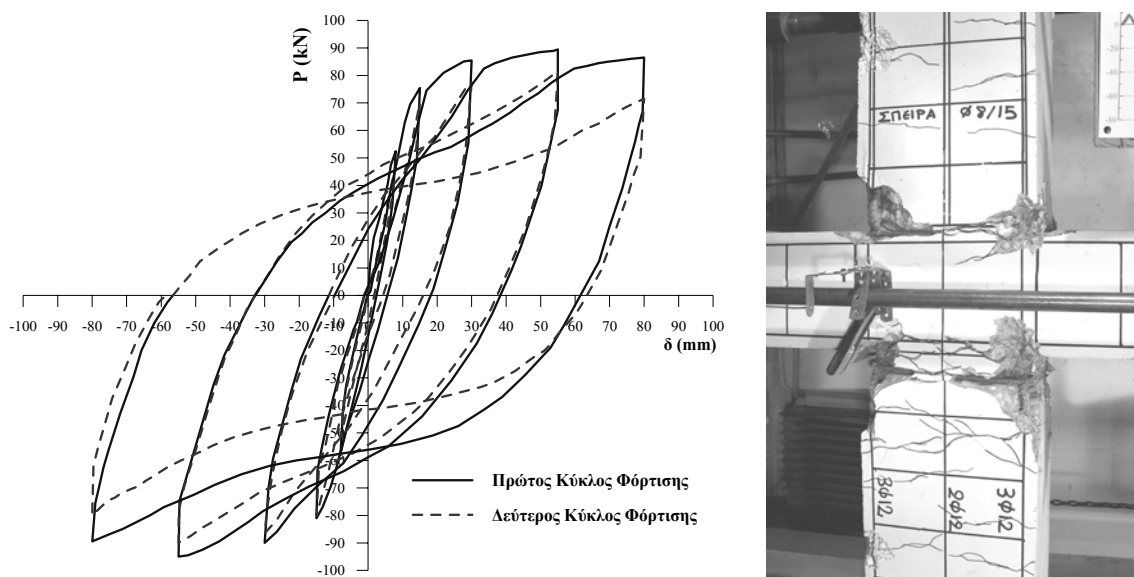
Πίνακας 4. Μέγιστα φορτία και απορροφούμενη ενέργεια ανά κύκλο φόρτισης δοκιμίου B1sp

Μετακίνηση (mm)	1 ^{ος} κύκλος φόρτισης		2 ^{ος} κύκλος φόρτισης	
	P _{max} (kN)	Εμβαδόν (kNmm)	P _{max} (kN)	Εμβαδόν (kNmm)
+8	54.00	308.24	52.00	170.93
- 8	64.50		61.00	
+15	79.00	800.97	72.50	423.35
-15	87.00		82.00	
+30	90.00	3092.90	85.00	2889.51
-30	93.50		91.00	
+55	95.00	8473.84	91.50	8659.45
-55	95.00		84.50	
+80	90.50	12441.20	71.00	9430.26
-80	87.00		68.00	

3.3 Δοκίμιο B2sp

Το δοκίμιο B2sp έχει ως εγκάρσιο οπλισμό στην περιοχή του υποστυλώματος σπειροειδή οπλισμό ορθογωνικής μορφής με βήμα σπείρας $\varnothing 8/10$ στις κρίσιμες περιοχές και $\varnothing 8/15$ στις μη κρίσιμες. Η μορφή της σπείρας σε αυτό το δοκίμιο είναι διαφορετική από αυτή του δοκιμίου B1sp καθώς το κλείσιμο του κύκλου της γίνεται κάθε φορά σε διαφορετικό σημείο. Στο Σχήμα 5 παρουσιάζονται οι υστερητικοί βρόχοι απόκρισης καθώς και φωτογραφία της τελικής κατάστασης του δοκιμίου, μετά την ολοκλήρωση του πειράματος. Στον πίνακα 5 παρουσιάζονται τα μέγιστα φορτία και η απορροφούμενη ενέργεια που καταγράφηκαν σε κάθε κύκλο φόρτισης.

Η συμπεριφορά του δοκιμίου B2sp ήταν παρόμοια με αυτή του δοκιμίου B1sp. Οι βλάβες επικεντρώθηκαν στις κρίσιμες περιοχές κυρίως του κάτω υποστυλώματος με την δημιουργία πλαστικής άρθρωσης. Παρατηρήθηκε αύξηση των μέγιστων φορτίων και της απορροφούμενης ενέργειας σε σχέση με το δοκίμιο B1s (δοκίμιο ελέγχου).



Σχήμα 5. Υστερητική απόκριση και φωτογραφία τελικής κατάστασης δοκιμίου B2sp

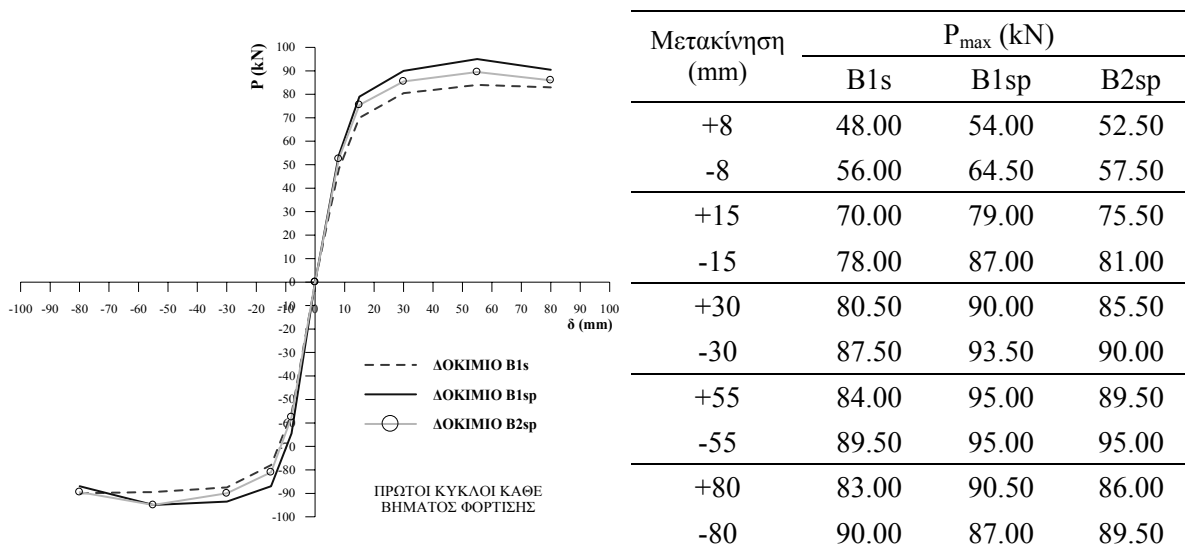
Πίνακας 5. Μέγιστα φορτία και απορροφούμενη ενέργεια ανά κύκλο φόρτισης δοκιμίου B2sp

Μετακίνηση (mm)	1 ^{ος} κύκλος φόρτισης		2 ^{ος} κύκλος φόρτισης	
	P _{max} (kN)	Εμβαδόν (kNmm)	P _{max} (kN)	Εμβαδόν (kNmm)
+8	52.50	286.82	47.00	130.47
- 8	57.50		51.50	
+15	75.50	853.82	70.00	451.20
-15	81.00		80.00	
+30	85.50	3289.60	77.50	2883.63
-30	90.00		86.50	
+55	89.50	8179.22	81.50	8085.00
-55	95.00		90.00	
+80	86.00	12687.39	71.50	10779.10
-80	89.50		80.00	

4 ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Στο Σχήμα 6 παρουσιάζεται συγκριτικά η περιβάλλουσα της υστερητικής απόκρισης των δοκιμίων, μετά την ολοκλήρωση των κύκλων φόρτισης, καθώς και οι μέγιστες τιμές φορτίων που καταγράφηκαν σε κάθε πρώτο κύκλο κάθε βήματος φόρτισης. Παρατηρείται αύξηση στα μέγιστα φορτία των δοκιμίων στα οποία τοποθετήθηκε σπειροειδής οπλισμός σε σχέση με αυτά του δοκιμίου με μεμονωμένους συνδετήρες η οποία κυμάνθηκε από 8 έως 12%.

Επίσης από τις τιμές της απορροφούμενης ενέργειας στους Πίνακες 3, 4 & 5 παρατηρείται αύξηση της απορροφούμενης ενέργειας στα δοκίμια με σπειροειδή οπλισμό σε σχέση με το δοκίμιο με συνδετήρες η οποία κυμάνθηκε από 10 έως 15%.



Σχήμα 6. Συγκριτική υστερητική απόκριση και μέγιστες τιμές φορτίων για κάθε πρώτο κύκλο ανά βήμα φόρτισης

5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από τη σύγκριση των πειραματικών αποτελεσμάτων της παρούσας προκαταρκτικής έρευνας φαίνεται ότι η τοποθέτηση σπειροειδούς οπλισμού ως εγκάρσιου οπλισμού στο υποστύλωμα βελτίωσε την συμπεριφορά των δοκιμίων και επέφερε αύξηση της απορροφούμενης ενέργειας σε σχέση με το δοκίμιο με μεμονωμένους συνδετήρες. Η αύξηση αυτή κυμάνθηκε από 10 έως 15%. Επίσης, από την παρούσα διερεύνηση διαφαίνεται η σημασία της μορφής του σπειροειδούς οπλισμού στην αποτελεσματικότητά του. Αυτή σχετίζεται με τη διάταξη της σπείρας, του τρόπου διαμόρφωσης και την κλίση του βήματος της σπείρας. Περαιτέρω έρευνα προγραμματίζεται προς την κατεύθυνση αυτή.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- ACI Committee 318. Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-02) and Commentary (318R-02). American Concrete Institute.
- Essawy A.S., El-Hawary M. 1998. Strength and ductility of spirally reinforced rectangular concrete columns. *Journal Construction and Building Materials*. Vol. 12. No 1: 31-37.
- Karayannis, C.G., Chalioris, C.E. & Sideris, K.K. 1998. Effectiveness of RC beam - column connection repair using epoxy resin injections. *Journal of Earthquake Engineering*, Vol. 2, No. 2: 217-240.

- Karayannis, C.G. & Sirkelis, G.M. 2002. Effectiveness of RC beam-column connections strengthening using carbon-FRP jackets. *Proceedings of the 12th European Conference on Earthquake Engineering*, London, PR 549.
- Karayannis, C.G. & Sirkelis, G.M. 2005. Improvement of seismic capacity of external beam-column joints using continuous spiral shear reinforcement. *ERES, Conference on Earthquake Resistant Engineering Structures*. Skiathos. Greece : 147-156
- Καραγιάννης, Χ.Γ. & Σirkελής Γ.Μ. 2003. Ακραίοι κόμβοι Ω.Σ. με σπειροειδείς οπλισμούς. Δείκτες βλάβης και αξιολόγηση πειραματικών αποτελεσμάτων. *Πρακτικά 14ου Ελληνικού Συνεδρίου Σκυροδέματος, Κως*, Τόμος Α: 343-353
- Καραγιάννης, Χ.Γ., Σirkελής, Γ.Μ., Χαλιορής, Κ.Ε. & Μαυροειδής, Π. 2003. Ακραίοι κόμβοι Ω.Σ. με σπειροειδείς οπλισμούς. Πειραματική διερεύνηση. *Πρακτικά 14ου Ελληνικού Συνεδρίου Σκυροδέματος, Κως*, Τόμος Α: 332-342.
- Καραγιάννης, Χ.Γ. & Σirkελής Γ.Μ. 2004. Πειραματική διερεύνηση χρήσης σπειροειδούς οπλισμού σε ακραίους κόμβους από οπλισμένο σκυρόδεμα. *Επιστημονική έκδοση περιοδικού Κτίριο*, Τεύχος Α-Β: 105-118
- Park, R. & Paulay, T. 1975. Reinforced Concrete Structures. John Wiley & Sons.
- Paulay, T. & Priestley, M.J.N. 1992. Seismic design of reinforced concrete and masonry buildings. John Wiley & Sons.
- Saatcioglu, M. & Razvi, S. 1992. Strength and ductility of confined concrete. *Journal of Structural Engineering ASCE*. Vol. 118. No 25: 1590-1607.
- Sheik, S. & Toclucu, M. 1993. Reinforced concrete columns confined by circular spirals and hoops. *ACI Structural Journal*. Vol. 90. No 5 : 542-553.