

Υποστυλώματα Ωπλισμένου Σκυροδέματος Τετραγωνικής και Ορθογωνικής Διατομής Περισφιγμένα με Ινωπλισμένα Πολυμερή – Πρόβλεψη Αντοχής και Παραμόρφωσης Αστοχίας

Θεοδώρα Φαναραδέλλη – Μαριόλα, Υποψήφια Διδάκτορας Δ.Π.Θ., theofanar@gmail.com

Θεόδωρος Ρουσάκης, Επίκουρος Καθηγητής Δ.Π.Θ., trousak@civil.duth.gr

Αθανάσιος Καραμπίνης, Καθηγητής Δ.Π.Θ., ak@duth.gr

Εκτενής περίληψη

Η χρήση των Ινωπλισμένων Πολυμερών (ΙΩΠ, Fiber Reinforced Polymers, FRP) ως οπλισμού ενίσχυσης σε κατασκευές είναι πολύ δημοφιλής. Τα υποστυλώματα θεωρούνται τα κρισιμότερα δομικά στοιχεία των κατασκευών από ωπλισμένο σκυρόδεμα. Όμως σε μια έντονα σεισμική περιοχή, όπως η Ελλάδα, πολλά από τα υφιστάμενα υποστυλώματα παρουσιάζουν ανεπάρκειες και είναι απαραίτητη η ενίσχυσή τους ώστε να ικανοποιούν τους σύγχρονους αντισεισμικούς κανονισμούς (ΕΑΚ, EC8). Τα κυριότερα δομικά ΙΩΠ περιλαμβάνουν ίνες άνθρακα, αραμιδίου ή γυαλιού, παρουσιάζουν κυρίως γραμμικά ελαστική συμπεριφορά μέχρι την αστοχία τους και προσδίδουν στο σκυρόδεμα βελτιωμένη αντοχή και πλαστιμότητα ανηγμένων παραμορφώσεων. Τα ανθρακούφασματα συνδυάζουν εκτός από υψηλή εφελκυστική αντοχή και υψηλό μέτρο ελαστικότητας, ενώ το γυαλί έχει κυρίως υψηλή παραμορφωσιμότητα και το αραμίδιο μεγάλη αντίσταση σε κρούση.

Πολλές και σημαντικές επιμέρους πειραματικές έρευνες αφορούν τη συμπεριφορά υποστυλωμάτων σκυροδέματος κυκλικής διατομής περισφιγμένων εξωτερικά με ΙΩΠ. Ταυτόχρονα πολλές μελέτες υποστυλωμάτων υπό αξονικό φορτίο έχουν επεκταθεί και σε δοκίμια που περιλαμβάνουν χαλύβδινο οπλισμό (εγκάρσιο ή/και διαμήκη). Παράλληλα, έχουν προκύψει σχέσεις και προσομοιώματα τα οποία περιγράφουν ικανοποιητικά τη μηχανική συμπεριφορά του σκυροδέματος, προβλέποντας με σημαντική ακρίβεια τη θλιπτική αντοχή και την αξονική παραμόρφωση των δοκιμίων. Εξίσου σημαντική έρευνα έχει γίνει και για δοκίμια μη κυκλικής διατομής. Μία από τις πιο πρόσφατες βάσεις δεδομένων καταρτίστηκε από τους Nistico et al. (2014) και αφορά δοκίμια κυκλικής και τετράγωνης διατομής καθώς και τη συλλογή των προσομοιωμάτων πρόβλεψης της αντοχής και της παραμόρφωσής τους. Παρομοίως, οι Lim and Ozbakkaloglu (2014) επικεντρώθηκαν στη συλλογή των προσομοιωμάτων αντοχής και παραμόρφωσης για να καταλήξουν στη δική τους πρόταση για ένα ακριβές προσομοίωμα για την πρόβλεψη της αντοχής και της παραμόρφωσης τετράγωνων δοκιμίων. Ακόμα πιο πρόσφατη είναι και η μελέτη των Triantafillou et al. (2015) η οποία αφορά υποστυλώματα ωπλισμένου σκυροδέματος με λόγο πλευρών 3 και 4, ενισχυμένα με φύλλα CFRP. Εξετάζονται η αποτελεσματικότητα των διαφορετικών αγκυρώσεων, η επιρροή των φύλλων του FRP καθώς και παράγοντες που σχετίζονται με τη διατομή των υποστυλωμάτων της μελέτης. Με βάση αυτές τις παραμέτρους πρότειναν ένα αναλυτικό προσομοίωμα για το μέγιστο φορτίο που αναπτύσσουν τα δοκίμια.

Η παρούσα εργασία επικεντρώνεται στα δοκίμια μη κυκλικής διατομής. Πιο συγκεκριμένα, συλλέχθηκαν όλα τα διαθέσιμα πειραματικά αποτελέσματα της διεθνούς βιβλιογραφίας για δοκίμια

τετράγωνης και ορθογωνικής διατομής, με ή χωρίς εσωτερικό χαλύβδινο οπλισμό. Συγκεντρώθηκαν συνολικά 786 δοκίμια διαφορετικών διατομών και συντάχθηκε μια μεγάλη βάση δεδομένων και πειραματικών αποτελεσμάτων. Από αυτά τα δοκίμια, τα 155 είναι άοπλα ορθογωνικής διατομής, τα 375 άοπλα τετραγωνικής διατομής, τα 172 οπλισμένα τετραγωνικής διατομής και τα 84 οπλισμένα δοκίμια ορθογωνικής διατομής. Τα δοκίμια αυτά είναι περισφιγμένα με ΙΩΠ άνθρακα, υάλου και αραμιδίου. Επίσης, υπάρχουν και δοκίμια περισφιγμένα με σχοινιά από σύνθετα υλικά (PPFR) τα οποία δοκιμάστηκαν στο Εργαστήριο του Ωπλισμένου Σκυροδέματος, του ΔΠΘ (Rousakis and Tourtouras, 2014). Τα περισσότερα δοκίμια υπόκεινται σε μονότονη φόρτιση, ενώ έχουν συμπεριληφθεί και αρκετά που υπόκεινται σε επαναλαμβανόμενη. Όσον αφορά την περισφιγξη, υπάρχουν δοκίμια πλήρως περισφιγμένα και άλλα με περισφιγξη σε λωρίδες υφασμάτων, ενώ οι στρώσεις των υλικών της περισφιγξης κυμαίνονται από 1 έως 12. Οι ακτίνες καμπυλότητας των δοκιμίων κυμαίνονται από 0 έως 60 mm, οι λόγοι πλευρών (b/h) από 0,18 (ορθογωνικής διατομής) μέχρι 1 (τετράγωνης διατομής). Στα δοκίμια ορθογωνικής και τετράγωνης διατομής η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος κυμαίνεται από 10 MPa έως 145 MPa. Στα οπλισμένα δοκίμια, η τάση διαρροής του οπλισμού κυμαίνεται από 200 MPa έως 500 MPa. Τέλος, ο λόγος s/Φ_L κυμαίνεται από 3,5 μέχρι 18,75. Ο λόγος αυτός εκφράζει την ευστάθεια της θλιβόμενης ράβδου που στηρίζεται λόγω ύπαρξης συνδετήρων ανά απόσταση s και διαθέτει δυσκαμψία που εξαρτάται από τη διάμετρό της Φ_L . Αν ο λόγος s/Φ_L είναι υψηλός, η ράβδος μπορεί να χάσει την ικανότητα παραλαβής αξονικού θλιπτικού φορτίου λόγω πρόωρου λυγισμού πριν ακόμη αναπτύξει την πλήρη τάση κράτυνσης (Maalej et al., 2002).

Για την επεξεργασία των στοιχείων της βάσης δεδομένων συγκεντρώθηκαν 23 εμπειρικά προσομοιώματα, που έχουν δημοσιευθεί από το 2002 μέχρι το 2016 για την πρόβλεψη της μέγιστης αναλαμβανόμενης τάσης και της αντίστοιχης αξονικής ανηγμένης παραμόρφωσης των δοκιμίων μη κυκλικών διατομής. Κάποια από αυτά μπορούν να εφαρμοστούν τόσο σε δοκίμια τετράγωνης όσο και σε ορθογωνικής διατομής (Shehata et al., 2002), (Chaallal et al., 2003), (Lam and Teng, 2003), (Ilki et al., 2004), (Vintzileou and Panagiotidou, 2007), (Kumutha, 2007), (Youssef et al., 2007), (Wei and Wu, 2012), (Lim and Ozbakkaloglu, 2014), (Triantafillou et al., 2016). Επίσης υπάρχουν προσομοιώματα που εφαρμόζονται μόνο σε δοκίμια τετράγωνης διατομής (Campione & Miraglia, 2003), (Al-Salloum, 2006), (Wu and Wang, 2009), (Toutanji et al., 2009), (Wu and Zhou, 2010), (Csuka and Kollar, 2012), (Rousakis et al., 2012), (Nistico and Monti, 2014). Τα προσομοιώματα για την πρόβλεψη των παραμορφώσεων είναι λιγότερα και με πιο πρόσφατο εκείνο των Cao et al. (2015) που στηρίζεται στην πρόβλεψη της παραμόρφωσης με βάση την ενέργεια που απορροφά το σύστημα όταν υπόκειται σε αξονική φόρτιση. Τέλος, υπάρχουν και προσομοιώματα που εφαρμόζονται σε δοκίμια περισφιγμένα με GFRP (Kumutha, 2007) ή AFRP (Wang and Wu, 2010, 2011).

Παρουσιάζεται εκτενής συζήτηση σχετικά με την ακρίβεια πρόβλεψης των υφιστάμενων προσομοιωμάτων, τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά τους. Διερευνώνται τα προσομοιώματα υπολογισμού της αντοχής και της αξονικής ανηγμένης παραμόρφωσης αστοχίας, υποστυλωμάτων μη κυκλικής διατομής, χωρίς και με χαλύβδινο οπλισμό που οδηγούν σε ακριβέστερες προβλέψεις.

Βιβλιογραφία

- Al-Salloum Y.A. (2007), “Influence of edge sharpness on the strength of square concrete columns confined with FRP composite laminates”, *Composites: Part B* 38 (2007) 640–650.
- Campione G., Miraglia N. (2001), “Strength and strain capacities compression members reinforced with FRP”, *Cement and Concrete Composites* 25 (2003) 31-41.

- Cao Y.-G., Wu Y.-F., Li X.-Q. (2016), “Unified model for evaluating ultimate strain of FRP confined concrete based on energy method”, *Construction and Building Materials* 103 (2016) 23–35.
- Chaallal O., Shahawy M., Hassan M. (2003), “Performance of Axially Loaded Short Rectangular Columns Strengthened with Carbon Fiber-Reinforced Polymer Wrapping”, *Journal of Composites for Construction*, Vol. 7, No.3, August 1, 2003.
- Csuka B., Kollar L. (2012), “Fiber-reinforced plastic-confined rectangular columns subjected to axial loading”, *Journal of Reinforced Plastics and Composites* 31(7) 481–493.
- Ilki A., Kumbasar N., Koc V. (2004), “Low strength concrete members externally confined with FRP sheets”, *Structural Engineering and Mechanics*, Vol. 18, No. 2 (2004) 167-194.
- Kumutha R., Vaidyanathan R., Palanichamy M.S. (2007). “Behaviour of reinforced concrete rectangular columns strengthened using GFRP”, *Cement & Concrete Composites* 29 (2007) 609–615.
- Lam L, Teng J (2003), “Design - oriented stress - strain model for FRP - confined concrete”, *Journal of Reinforced Plastics and Composites* 2003 22: 1149.
- Lin J.C., Ozbakkaloglu T. (2014), “Design Model for FRP-Confined Normal and High – Strength Concrete Square and Rectangular Columns”, *Magazine of Concrete Research*, May 2014.
- Maalej M., Tangwongsvat S., Paramasivam P. (2003), “Modeling of rectangular RC columns strengthened with FRP”, *Cement and Concrete Composites* 25 (2003) 263-276.
- Nistico N., Pallini F., Rousakis T., Wu Y.-F., Karabinis A. (2014), “Peak strength and ultimate strain prediction for FRP confined square and circular concrete sections”, *Composites: Part B* 67 (2014) 543–554.
- Rousakis T.C., Karabinis A.I. (2008), “Substandard reinforced concrete members subjected to compression: FRP confining effects”, *Materials and Structures* (2008) 41:1595–1611.
- Rousakis T.C., Tourtouras I.S. (2014), “RC columns of square section – Passive and active confinement with composite ropes”, *Composites: Part B* 58 (2014) 573–581.
- Shehata A.E.M., Carneiro L.A.V., Shehata L.C.D. (2002), “Strength of short concrete columns confined with CFRP sheets”, *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, Vol. 35, January-February 2002, pp 50-58.
- Triantafyllou T.C., Choutopoulou E., Fotaki E., Skorda M., Stathopoulou M., Karlos K. (2016), “FRP confinement of wall-like reinforced concrete columns”, *Materials and Structures* (2016) 49:651–664.
- Vintzileou E., Panagiotidou E. (2008), “An empirical model for predicting the mechanical properties of FRP-confined concrete”, *Construction and Building Materials* 22 (2008) 841–854.
- Wang Y.-F., Wu H.-L. (2011), “Size Effect of Concrete Short Columns Confined with Aramid FRP Jackets”, *Journal of Composites for Construction*, Vol. 15, No. 4, August 1, 2011.
- Wei Y.-Y., Wu Y.-F. (2012), “Unified stress–strain model of concrete for FRP-confined columns”, *Construction and Building Materials* 26 (2012) 381–392.
- Wu Y.-F., Wei Y.-Y. (2010), “Effect of cross-sectional aspect ratio on the strength of CFRP-confined rectangular concrete columns”, *Engineering Structures* 32 (2010) 32-45.
- Wu Y.-F., Zhou Y.-W. (2010), “Unified Strength Model Based on Hoek-Brown Failure Criterion for Circular and Square Concrete Columns Confined by FRP”, *J. Compos. Constr.* 2010.14:175-184.
- Yan Z., Pantelides C.P., Reaveley L.D. (2006) “Experimental Investigation on Shape Modify Method of Rectangular Columns Confined with FRP Composites”, *Composites in Construction 2005 – Third International Conference Lyon, France, July 11 – 13, 2005*.