

# Μήκος Υπερκάλυψης Μανδύων από Ινοπλισμένα Πολυμερή για Περίσφιγξη Υποστυλωμάτων από Σκυρόδεμα

## On the Overlap Length of FRP Jackets for Confinement of Concrete Columns

Μαρίνα Α. ΜΩΡΕΤΤΗ<sup>1</sup>, Ευτύχιος ΑΡΒΑΝΙΤΟΠΟΥΛΟΣ<sup>2</sup>

*Λέξεις κλειδιά: Μανδύας, Ινοπλισμένα Πολυμερή, Μήκος Αγκύρωσης, Σκυρόδεμα, Περίσφιγξη*

*Keywords: Overlap length; Jacket; FRP; Confinement; Concrete*

**ΠΕΡΙΛΗΨΗ :** Παρουσιάζονται τα συμπεράσματα μιας πειραματικής έρευνας που διερευνά τις παραμέτρους από τις οποίες εξαρτάται το ελάχιστο απαιτούμενο μήκος αγκύρωσης ενός μανδύα από ινοπλισμένα πολυμερή (FRP) για την περίσφιγξη κυλίνδρων σκυροδέματος (διαμέτρου 152 mm και ύψους 305 mm) υπό κεντρική θλίψη προκειμένου να αποφευχθεί η πρόωγη αστοχία του μανδύα λόγω αποκόλλησης του μήκους υπερκάλυψης. Εξετάστηκαν δύο τύποι μανδύων από ίνες άνθρακα (CFRP) και ένας τύπος μανδύα από ίνες γυαλιού (GFRP). Γενικώς στην κατασκευή των μανδύων υιοθετήθηκε η μέθοδος ξηρής εφαρμογής με χρήση σκληρού ρολού, ενώ δοκιμάστηκαν για σύγκριση και η χρήση μαλακού ρολού, καθώς και η μέθοδος της υγρής εφαρμογής. Από τα αποτελέσματα προέκυψε ότι το ελάχιστο απαιτούμενο μήκος υπερκάλυψης είναι πολύ μικρότερο στους μανδύες GFRP συγκριτικά με τους μανδύες CFRP, ενώ σε περίπτωση ξηρής εφαρμογής είναι πολύ σημαντικός ο χρόνος ωρίμανσης της ρητίνης για την επίτευξη της επιθυμητής αντοχής συνάφειας μεταξύ ρητίνης και υφάσματος.

**ABSTRACT :** The present paper summarizes the basic conclusions of an experimental study on the minimum required overlap length in fiber reinforced polymer (FRP) jackets in order to avoid premature failure because of debonding prior to rupture of the FRP jacket. Two types of carbon FRP (CFRP) and one type of glass FRP (GFRP) were investigated. Application of the FRP jackets was performed by means of a hard plastic roller through dry lay-up method. Alternative schemes tested were the wet lay-up method and the use of a soft roller for the application of the jacket. It was concluded that the type of fabric is the

---

<sup>1</sup> Επίκουρη Καθηγήτρια, Σχολή Αρχιτεκτόνων Μηχανικών, ΕΜΠ, email: [moretti@central.ntua.gr](mailto:moretti@central.ntua.gr)

<sup>2</sup> Πολιτικός Μηχανικός, Π.Θ., Βόλος, email: [eftihissk888@hotmail.com](mailto:eftihissk888@hotmail.com)

main parameter that affects the overlap length and that GFRP jacket requires considerably less overlap length than CFRP jacket. Finally, for dry lay-up method the maturing period of the adhesive is of crucial importance, especially for CFRP jackets.

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η χρήση των μανδύων από ινοπλισμένα πολυμερή (FRP) ως μέθοδος ενίσχυσης υποστρωμάτων από σκυρόδεμα κερδίζει διαρκώς έδαφος χάρη στην σημαντική αύξηση της αντοχής και της πλαστιμότητας που επιφέρει, σε συνδυασμό με την ευκολία εφαρμογής και την πρακτικώς μηδενική αλλοίωση των διαστάσεων του στοιχείου που ενισχύεται. Η έρευνα σχετικά με την χρήση FRP έχει ξεκινήσει πριν από δύο δεκαετίες (Nanni, A. & Bradford, N.M. 1995; Saaman, M. et al., 1998; Toutanji, H. 1999; Rousakis, T. & Tepfers, R. 2004). και εστιάζεται κυρίως στην διερεύνηση της ποσοτικής αύξησης των μηχανικών χαρακτηριστικών των στοιχείων συναρτήσει διαφόρων διατάξεων μανδύων από FRP, τόσο πειραματικά όσο και αναλυτικά. Η έρευνα με αντικείμενο το μήκος αγκύρωσης μανδύων από FRP περιορίζεται στην επιρροή του μήκους αγκύρωσης στην κατανομή των εγκάρσιων παραμορφώσεων και των αντίστοιχων πλευρικών τάσεων περίσφιγξης που ασκούνται από τον μανδύα στο σκυρόδεμα (Lam, L. & Teng, J.G. 2004; Lim, J.C. & Ozbakkaloglu, T. 2015; Smith, T.S. et al. 2010; Vincent, T. & Ozbakkaloglu, T. 2016; Wu, Y.F. & Jiang, J.F. 2013). Το ελάχιστο απαιτούμενο μήκος υπερκάλυψης του μανδύα από FRP ώστε να αποφευχθεί η πρόωρη αστοχία έναντι αποκόλλησης δεν έχει διερευνηθεί πειραματικά μέχρι τώρα καθώς η συνήθης πρακτική είναι να τοποθετείται μεγαλύτερο μήκος υπερκάλυψης από το ελάχιστο απαιτούμενο, ώστε να εξασφαλίζεται η αποφυγή της αστοχίας στην αγκύρωση. Η πρακτική αυτή μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική αύξηση του κόστους προμήθειας των υλικών σε εκτεταμένες ενισχύσεις.

Η πειραματική εργασία που παρουσιάζεται στην παρούσα εργασία ξεκίνησε ως μία προσπάθεια ερμηνείας της αστοχίας λόγω αποκόλλησης του μανδύα FRP στο μήκος υπερκάλυψης που παρατηρήθηκε σε κυλινδρικά δοκίμια περισφιγμένα με FRP που υποβλήθηκαν σε θλίψη (Παπαρίζος, Ι. 2016), σε αντίθεση με την απουσία παρόμοιου τύπου αστοχίας σε προγενέστερα δοκίμια (Kalogerakis, E. & Moretti, M.L. 2014, Καλογεράκης, Ε. 2013) τα οποία είχαν παρόμοια χαρακτηριστικά (υλικά, τρόπο κατασκευής και δοκιμής). Στην προσπάθεια να ερμηνευθεί ο λόγος εμφάνισης της πρόωρης αστοχίας στην υπερκάλυψη διερευνήθηκε μια σειρά παραμέτρων που πιθανολογήθηκε ότι μπορεί να οδήγησαν στην διαφοροποίηση του τρόπου αστοχίας. Οι πειραματικές δοκιμές πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Τεχνολογίας και Κατασκευών Οπλισμένου Σκυροδέματος του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας.

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται συνοπτικά τα χαρακτηριστικά και οι διαφορετικές παράμετροι των δοκιμών, τα σημαντικότερα πειραματικά αποτελέσματα των δοκιμών αναφορικά με την παρατήρηση ή μη αστοχίας συνάφειας του μήκους υπερκάλυψης του μανδύα, καθώς και της

αποτελεσματικότητας της περίσφιγξης που επιτεύχθηκε από την κάθε διάταξη μανδύα.

## ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

### Παράμετροι δοκιμίων και σκεπτικό επιλογής τους

Τα δοκίμια που παρουσιάζονται ήταν κύλινδροι από άοπλο σκυρόδεμα διαμέτρου 152 mm και ύψους 305 mm, περισφιγμένοι με διαφορετικές διατάξεις μανδύων από FRP οι οποίοι υποβλήθηκαν σε κεντρική θλίψη. Η σκυροδέτηση έγινε ταυτοχρόνως σε όλα τα δοκίμια με χρήση έτοιμου σκυροδέματος θλιπτικής αντοχής 28 ημερών  $f_{cc} = 19$  MPa. Η διεξαγωγή των πειραμάτων έγινε σε διάστημα 4 περίπου μηνών, καθώς η επιλογή των χαρακτηριστικών των μανδύων αποφασιζόταν σταδιακά σε συνάρτηση με τα αποτελέσματα των προηγούμενων δοκιμών. Η θλιπτική αντοχή των δοκιμίων προσδιορίστηκε από απερίσφιγκτα δοκίμια σε διαφορετικές ημερομηνίες μέσα στην περίοδο των δοκιμών. Επισημαίνεται ότι η επιρροή της διαφοροποίησης της θλιπτικής αντοχής είναι μικρή καθώς η τελική συμπεριφορά του περισφιγμένου δοκιμίου καθορίζεται κυρίως από τον μανδύα FRP. Από την κάθε διάταξη μανδύα έγινε μόνον μία δοκιμή, με στόχο να δοκιμαστούν κατά το δυνατόν περισσότερες εναλλακτικές διατάξεις (Αρβανιτόπουλος, Ε. 2016).

Οι μανδύες εφαρμόστηκαν στα δοκίμια μέσω ξηρής εφαρμογής με βασικό μήκος υπερκάλυψης μανδύα  $L_f = 10$  cm. Δοκιμάστηκαν μανδύες από άνθρακα (CFRP) με βάρος  $235 \text{ gr/m}^2$  και από γυαλί (GFRP) με βάρος  $445 \text{ gr/m}^2$ , παράμετροι ίδιες με εκείνες που είχαν εφαρμοστεί στις προγενέστερες πειραματικές έρευνες οι οποίες αποτέλεσαν την αφορμή της πειραματικής έρευνας που παρουσιάζεται. Η τοποθέτηση του μανδύα έγινε με την χρήση σκληρού πλαστικού ρολού. Από τα αποτελέσματα των πρώτων δοκιμών προέκυψε ότι το μήκος υπερκάλυψης  $L_f = 10$  cm οδήγησε σε αστοχία συνάφειας της υπερκάλυψης στους μανδύες από CFRP με βάρος  $235 \text{ gr/m}^2$  ενώ στους μανδύες από GFRP δεν παρατηρήθηκε αστοχία της υπερκάλυψης. Στην συνέχεια δοκιμάστηκαν μανδύες CFRP με μεγαλύτερα μήκη υπερκάλυψης από 10 cm,  $L_f = 12, 14$  και 17 cm προκειμένου να προσδιοριστεί το μήκος  $L_f$  στο οποίο δεν συμβαίνει αστοχία συνάφειας, και μανδύες GFRP με μικρότερα μήκη υπερκάλυψης,  $L_f = 7.5, 5, 3$  και 1 cm προκειμένου να προσδιοριστεί το μήκος  $L_f$  στο οποίο δεν θα συμβεί αστοχία συνάφειας. Από τις δοκιμές προέκυψε ότι για μανδύες CFRP με  $L_f = 17$  cm παρατηρήθηκε μικρής έκτασης αστοχία συνάφειας στην υπερκάλυψη του μανδύα, ενώ για μανδύες GFRP με  $L_f = 1$  cm παρατηρήθηκε περιορισμένη αστοχία συνάφειας στην υπερκάλυψη και μάλιστα σε θέσεις όπου μετρήθηκε ότι το μήκος υπερκάλυψης που είχε τοποθετηθεί ήταν μικρότερο από το προβλεπόμενο (σε ορισμένες θέσεις μετρήθηκε ίσο με 3 mm). Μετά την διαπίστωση της καλύτερης συνάφειας του μανδύα από γυαλί δοκιμάστηκαν και μανδύες από δύο στρώσεις με εσωτερικό μανδύα από CFRP και εξωτερική στρώση GFRP. Επισημαίνεται ότι σύμφωνα με τις προδιαγραφές της κατασκευάστριας εταιρείας, μήκος υπερκάλυψης ίσο με  $L_f = 10$  cm γενικώς θεωρείται ότι επαρκεί για μανδύες από τα ινοπλισμένα πολυμερή που χρησιμοποιήθηκαν.

Στην ονομασία των δοκιμίων τα γράμματα C και G υποδηλώνουν μανδύα από ίνες άνθρακα και γυαλιού, αντιστοίχως, ενώ ο αριθμός σε cm στο τέλος του ονόματος υποδηλώνει το μήκος υπερκάλυψης των μανδύων. Σε περίπτωση δύο μανδύων τα πρώτα στοιχεία αναφέρονται στον εσωτερικό μανδύα, λ.χ. το δοκίμιο CG-17cm-1cm είχε εσωτερικό μανδύα από CFRP με μήκος υπερκάλυψης  $L_f = 17$  cm και εξωτερικό μανδύα από GFRP με  $L_f = 1$  cm. Γενικώς οι μανδύες με 2 στρώσεις είχαν δύο διαφορετικά μήκη υπερκάλυψης διατεταγμένα σε αντιδιαμετρική θέση ώστε να περιοριστεί ο κίνδυνος συγκέντρωσης τάσεων λόγω της υπερκάλυψης. Εξετάστηκε επίσης και ένα δοκίμιο με δύο στρώσεις άνθρακα με συνεχόμενο μανδύα και με ένα μήκος υπερκάλυψης στο τέλος, το δοκίμιο CC-17cm με στόχο να διερευνηθεί το κατά πόσον η συγκριτικά μικρότερη καταπόνηση του υφάσματος στην περίπτωση δύο στρώσεων μπορεί να αποτρέψει την αστοχία στο μήκος υπερκάλυψης. Άλλες παράμετροι που εξετάστηκαν ήταν: (α) Η χρήση μαλακού (soft) ρολού στην εφαρμογή του υφάσματος από δύο όμοια δοκίμια CFRP (C-s-1-10cm, C-s-2-10cm) και GFRP (G-s-1-10cm, G-s-2-10cm), καθώς στα δοκίμια του Καλογερόπουλου (2013) που δεν εμφανίστηκε αστοχία συνάφειας οι μανδύες FRP είχαν εφαρμοστεί μέσω μαλακού ρολού, (β) Η χρήση υγρής εφαρμογής (wet lay-up) σε μανδύα CFRP (δοκίμια wC-10cm, wC-17cm), (γ) Η χρήση πυκνότερου υφάσματος CFRP με βάρος  $309 \text{ gr/m}^2$  (δοκίμια C-309g-10cm, C-309g-17cm), (δ) Η επιρροή του χρόνου ωρίμανσης της ρητίνης μέσω του δοκιμίου C-old-10cm στο οποίο μεσολάβησαν 79 ημέρες μεταξύ της εφαρμογής του μανδύα και της δοκιμής. Στην ονομασία των δοκιμίων οι αριθμοί -1, -2 πριν από το μήκος υπερκάλυψης υποδηλώνουν δύο πανομοιότυπα δοκίμια. Στον Πίνακα 1 παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά των μανδύων από τον κατασκευαστή.

**Πίνακας 1.** Τεχνικά χαρακτηριστικά μανδύων.

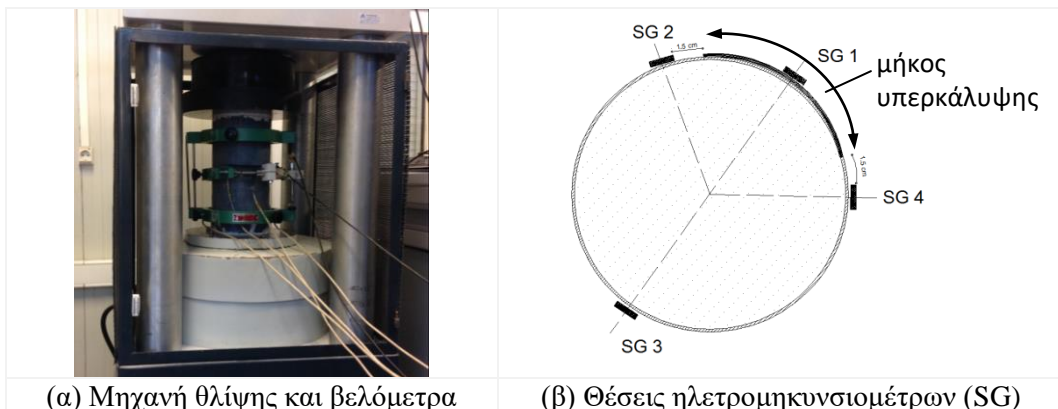
Ξηρή εφαρμογή				
Χαρακτηριστικά FRP	Βάρος ( $\text{g/m}^2$ )	Πάχος (mm/στρώση)	Μέτρο ελαστικότητας ( $\text{N/mm}^2$ )	Παραμόρφωση αστοχίας $\epsilon_{fu}$ (%)
CFRP-235g	235	0.129	230000	1.7
CFRP-309g	309	0.167	230000	1.7
GFRP	445	0.172	76000	2.8
Resin A			4500	0.9
Υγρή εφαρμογή (δοκίμια wC-10cm και wC-17cm)				
Χαρακτηριστικά FRP	Βάρος ( $\text{g/m}^2$ )	Πάχος (mm/στρώση)	Μέτρο ελαστικότητας ( $\text{N/mm}^2$ )	Παραμόρφωση αστοχίας $\epsilon_{fu}$ (%)
CFRP-235g	235	0.129	230000	1.7
Resin A			3000	1.5
Resin B			4500	0.9

### Τρόπος κατασκευής των δοκιμίων

Πριν από την επικόλληση των μανδύων προηγήθηκε απομάκρυνση του τσιμεντοπολλτού από την περιμετρική επιφάνεια σκυροδέματος των δοκιμίων μέσω τροχού, καθαρισμός αρχικά με αέρα υπό πίεση και στην συνέχεια με βρεγμένο πανί. Αφού στέγνωσε πλήρως το σκυρόδεμα, εφαρμόστηκε στο σκυρόδεμα η ρητίνη Α με τη χρήση μαλακού ρολού έτσι ώστε να επικαλυφθούν όλες οι επιφάνειες ομοιόμορφα και να απομακρυνθούν τυχόν θύλακες αέρα. Ο μανδύας εφαρμόστηκε επάνω στα ασταρωμένα δοκίμια με την χρήση σκληρού ρολού γενικώς, ή μαλακού ρολού σε 4 δοκίμια, με τρόπο ώστε οι ίνες των FRP να είναι κάθετες στον άξονα των δοκιμίων και αφέθηκαν να στεγνώσουν κατ'ελάχιστον για 7 ημέρες σύμφωνα με τις οδηγίες της κατασκευάστριας εταιρείας προτού υποβληθούν σε δοκιμή θλίψης. Για την εξασφάλιση της αστοχίας των δοκιμίων στην μεσαία περιοχή, τα άκρα των δοκιμίων ενισχύθηκαν με πρόσθετη λωρίδα CFRP πλάτους 3 cm και μήκους υπερκάλυψης 15 cm. Για την εξασφάλιση της παραλληλότητας των βάσεων των δοκιμίων ώστε η θλίψη να είναι κεντρική και όχι έκκεντρη εφαρμόστηκε σκληρός γύψος στα άκρα του δοκιμίου με αφράδι και τοποθέτηση γυάλινης πλάκας.

### Μετρητικά όργανα και δοκιμή

Τα δοκίμια υποβλήθηκαν σε μονοτονική θλίψη μέσω υδραυλικής μηχανής θλίψης DMG ικανότητας 3000 kN (**Σχήμα 1α**). Χρησιμοποιήθηκε μεταλλική συσκευή Humboldt στην οποία προσαρμόζονται δύο βελόμετρα (LVDTs) για την μέτρηση (α) των εγκάρσιων παραμορφώσεων στο μέσον του ύψους του δοκιμίου, (β) των αξονικών παραμορφώσεων σε ύψος 22 εκατοστά στο μεσαίο τμήμα του δοκιμίου. Η καταγραφή των τοπικών εγκάρσιων παραμορφώσεων του μανδύα έγινε μέσω ηλεκτρομηκυνσιομέτρων (strain gages, SG) μήκους 20 mm τα οποία επικολλήθηκαν στον μανδύα γενικώς στις θέσεις που αποτυπώνονται στο **Σχήμα 1β**: στον άξονα του μήκους υπερκάλυψης και στο αντιδιαμετρικό σημείο, καθώς και σε απόσταση 15 mm από την αρχή και το τέλος του μήκους υπερκάλυψης.



**Σχήμα 1.** Πειραματική διάταξη και μετρητικά όργανα.

## ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Στον **Πίνακα 2** παρέχονται: Για το μέγιστο αξονικό φορτίο  $P_{max}$  ο λόγος  $f_{cc}/f_{co}$  της περισφιγμένης αντοχής,  $f_{cc}$  προς την αντοχή του απερίσφιγκτου σκυροδέματος,  $f_{co}$ , και η αξονική παραμόρφωση  $\epsilon_{cu}$ , ο αριθμός των ημερών που μεσολάβησαν μεταξύ εφαρμογής του μανδύα FRP και της δοκιμής, η έκταση της αστοχίας που παρατηρήθηκε λόγω συνάφειας (Debonding) στο μήκος υπερκάλυψης, καθώς και ο λόγος της μέσης διατμητικής τάσης συνάφειας στο μήκος υπερκάλυψης,  $L_f$ , προς την αντοχή του απερίσφιγκτου σκυροδέματος,  $\tau_{fu,aver}/f_{co}$ .

Η μέση διατμητική τάση κατά μήκος του  $L_f$  εκτιμάται από τις εγκάρσιες παραμορφώσεις του μανδύα που μετρήθηκαν μέσω των ηλεκτρομηκυνσιομέτρων (SG) θεωρώντας γραμμική κατανομή των τάσεων συνάφειας: μηδέν στο τέλος του  $L_f$  και μέγιστη τιμή στην αρχή του  $L_f$ . Εάν η μετρούμενη παραμόρφωση αντιστοιχεί στον άξονα του  $L_f$  (SG1, **Σχήμα 1β**), τότε θεωρούμε ότι η τιμή αυτή αντιστοιχεί στην μέση τιμή των διατμητικών τάσεων  $\tau_{fu,aver}$  εντός του  $L_f$ . Εάν η μετρούμενη παραμόρφωση αντιστοιχεί στην αρχή ή στο πέρας του μήκους  $L_f$  (SG2 ή SG4, **Σχήμα 1β**), τότε θεωρούμε ότι το 50% της τιμής αυτής αντιστοιχεί στην μέση τιμή των διατμητικών τάσεων  $\tau_{fu,aver}$  εντός του  $L_f$ .

### Τρόπος αστοχίας

Στον **Πίνακα 2** η έκταση της αστοχίας συνάφειας (Debonding) στο μήκος υπερκάλυψης σημειώνεται με D, DD, DDD, DDDD ανάλογα με την έκτασή της. Η βαθμονόμηση έγινε μέσω της τιμής του λόγου  $L_{deb}/L_{FRP, failure}$ , όπου  $L_{deb}$ =ύψος του μανδύα που παρατηρήθηκε αστοχία συνάφειας στο μήκος υπερκάλυψης, και  $L_{FRP, failure}$ = συνολικό ύψος στο οποίο αποκαλύφθηκε το σκυρόδεμα, το οποίο μπορεί να οφείλεται είτε σε σκίσιμο του μανδύα είτε σε αστοχία συνάφειας. Η επεξήγηση του εύρους των τιμών των ορίων DD γίνεται στο υπόμνημα του **Πίνακα 2**. Γενικώς η εμφάνιση αστοχίας συνάφειας στο  $L_f$  συνοδευόταν και από σκίσιμο του μανδύα, με τους δύο τρόπους αστοχίας να εμφανίζονται σχεδόν ταυτόχρονα τις περισσότερες φορές. Στο **Σχήμα 2** φαίνονται μορφές τυπικών δοκιμίων.

Από τα αποτελέσματα του **Πίνακα 2** φαίνεται ότι τα δοκίμια με μανδύα GFRP, CFRP-309g, και υγρή εφαρμογή δεν εμφάνισαν γενικώς αστοχία συνάφειας, παρά τις συγκριτικώς μεγαλύτερες τιμές της μέσης διατμητικής τάσης που εκτιμήθηκαν στο μήκος υπερκάλυψης  $L_f$ . Στα δοκίμια με CFRP-235g και ξηρή εφαρμογή παρατηρήθηκε μικρής έκτασης αστοχίας συνάφειας ακόμη και στα δοκίμια με  $L_f = 17$  cm. Το δοκίμιο C-old-10cm στο οποίο ο μανδύας είχε ωριμάσει 79 ημέρες δεν παρουσιάστηκε αστοχία συνάφειας. Από την παρούσα έρευνα προκύπτει ότι η διατμητική τάση συνάφειας μεταξύ στρώσεων FRP εξαρτάται άμεσα και κατά κύριο λόγο από το είδος του υφάσματος και, βεβαίως, από τον τρόπο εφαρμογής (ξηρή η υγρή). Επισημαίνεται ότι σύμφωνα με την κατασκευάστρια εταιρεία των ινοπλισμένων πολυμερών που χρησιμοποιήθηκαν, μήκος υπερκάλυψης  $L_f = 10$  cm γενικώς θεωρείται ότι επαρκεί για 7 ημέρες κατ'ελάχιστον χρόνο ωρίμανσης του μανδύα μετά την τοποθέτησή του.

**Πίνακας 2.** Χαρακτηριστικά μεγέθη των δοκιμίων κατά την αστοχία (μέγιστο φορτίο)

Δοκίμιο	$f_{cc}/f_{co}$	$\epsilon_{cu}$ (‰)	Ημέρες μεταξύ εφαρμογής- δοκιμής	Έκταση αστοχίας συνάφειας	$\tau_{fu,aver}/f_{co}$ (MPa)
C-s-1-10cm	1.98	24.6	7	DDD	0.131
C-s-2-10cm	2.26	20.2	8	DD	0.166
C-1-10cm	2.07	23.1	7	DDD	0.140
C-2-10cm	2.13	18.9	8	DDD	0.124
G-s-1-10cm	1.44	11.4	8	-	0.061
G-s-2-10cm	1.50	10.3	13	-	0.063
G-1-10cm	1.41	12.3	13	-	0.064
G-2-10cm	1.47	13.0	8	-	0.058
C-12cm	2.23	20.2	8	DDD	0.126
C-14cm	2.24	21.3	8	DDD	0.091
C-17cm	2.15	n.a <sup>(1)</sup>	8	D	0.072
wC-10cm	2.01	17.7	13	-	0.119
wC-17cm	1.87	16.7	15	-	0.066
C-309g-10cm	2.01	13.2	28	-	0.124
C-309g-17cm	2.00	15.8	7	-	0.069
C-old-10cm	2.06	19.6	79	-	0.103
G-7.5cm	1.48	17.1	13	-	0.085
G-5cm	1.41	13.5	8	-	0.112
G-3cm	1.34	11.1	9	-	0.124
G-1cm	1.37	12.6	8	-	0.766
CC-17cm	2.99	25.1	13	D	0.064
CC-5cm-10cm	2.86	28.4	14	D	0.105
GG-1cm-6.5cm	2.03	30.2	8	-	0.105
GG-3cm-5cm	1.81	14.4	8	-	0.114
CG-10cm-1cm	2.48	22.3	25	DDDD	0.449
CG-17cm-1cm	2.56	21.9	15	D	0.506

Υπόμνημα:

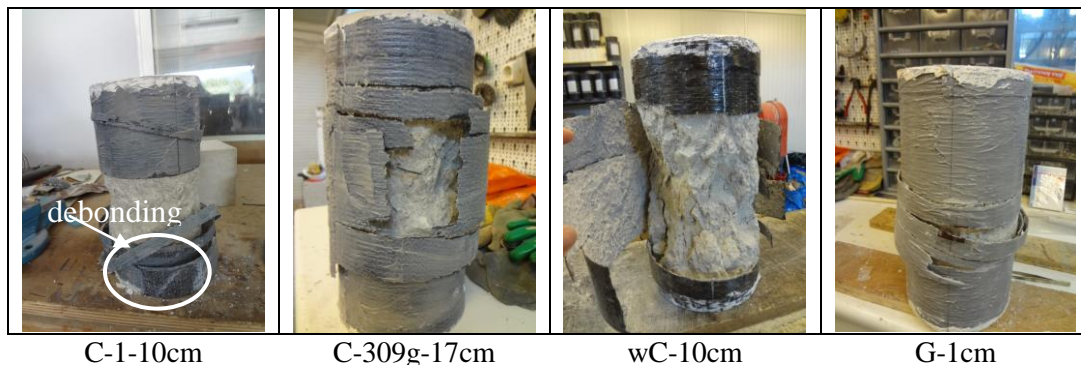
$\tau_{fu,aver}$  = μέση τάση συνάφειας στο μήκος υπερκάλυψης

Έκταση αστοχίας συνάφειας: D:  $0 < L_{deb}/L_{FRP, failure} \leq 0.20$ , DD:  $0.20 < L_{deb}/L_{FRP, failure} \leq 0.40$ ,

DDD:  $0.40 < L_{deb}/L_{FRP, failure} \leq 0.70$ , DDDD:  $0.70 < L_{deb}/L_{FRP, failure} \leq 1$

όπου  $L_{deb}$  = ύψος στοιχείου που παρατηρήθηκε αστοχίας συνάφειας,

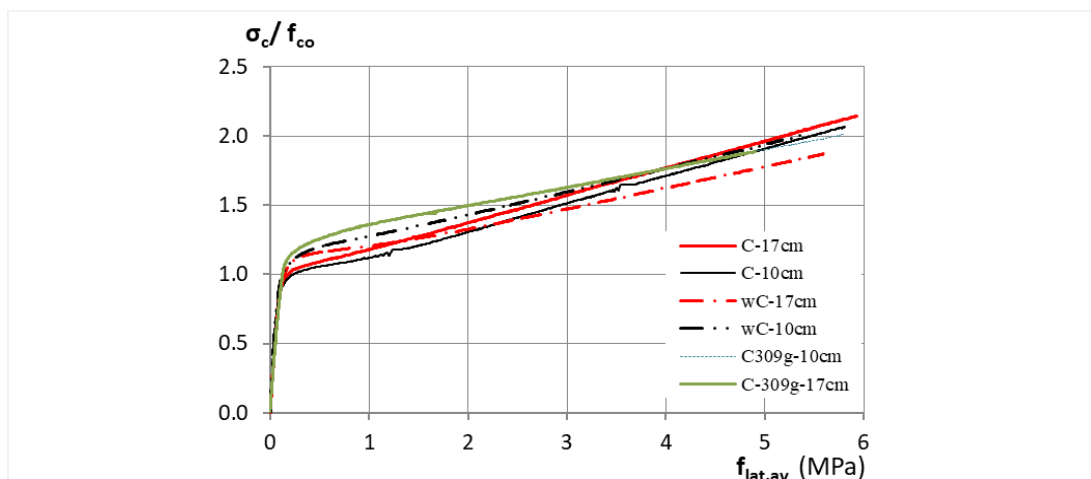
$L_{FRP, failure}$  = ύψος όπου αποκαλύφθηκε το σκυρόδεμα λόγω αστοχίας του μανδύα



**Σχήμα 2.** Τυπικές μορφές αστοχία μανδύων δοκιμίων.

### Διαγράμματα τάσεων παραμορφώσεων

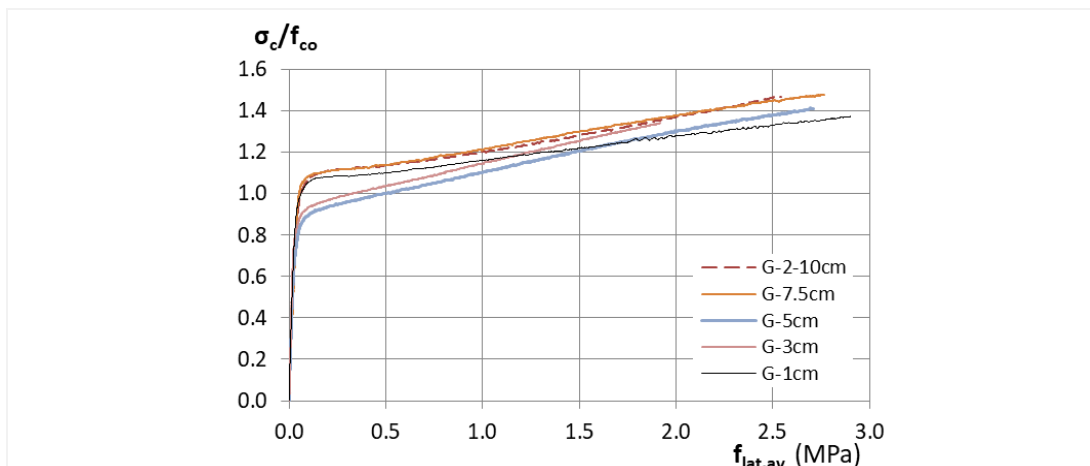
Στο **Σχήμα 3** συγκρίνονται τα διαγράμματα αξονικού φορτίου,  $\sigma_c$ , -μέσης εγκάρσιας τάσης,  $f_{lat,aver}$ , δοκιμίων με μία στρώση CFRP και μήκη υπερκάλυψης  $L_f = 10$  cm και 17 cm. Παρατηρείται ότι στα δοκίμια με βάρος  $309\text{g/m}^2$  για ίδια αξονική τάση  $\sigma_c$  αναπτύσσεται μικρότερη μέση εγκάρσια τάση περίσφιγξης  $f_{lat,av}$  συγκριτικά με τα αντίστοιχα δοκίμια με βάρος υφάσματος  $235\text{g}$ . Επίσης, στα δοκίμια με υγρή εφαρμογή (wC-17cm, wC-10cm) ο μανδύας φαίνεται να ενεργοποιείται σε υψηλότερες τιμές αξονικής τάσης συγκριτικά με τα δοκίμια ξηρής εφαρμογής. Η μέθοδος εφαρμογής (ξηρή ή υγρή) καθώς και το μήκος υπερκάλυψης δεν δείχνουν να επηρεάζουν τα μηχανικά χαρακτηριστικά των δοκιμίων κατά την αστοχία. Επισημαίνεται ότι απ'τα δοκίμια που παρουσιάζονται στο **Σχήμα 3** αστοχία συνάφειας εμφανίστηκε στα C-10cm και C-17cm.



**Σχήμα 3.** Διάγραμμα αξονικής τάσης,  $\sigma_c$ , και μέσης εγκάρσιας τάσης περίσφιγξης,  $f_{lat,aver}$  για δοκίμια με μία στρώση CFRP και μήκος υπερκάλυψης  $L_f=10\text{cm}$ ,  $17\text{cm}$ .



Στο **Σχήμα 4** συγκρίνονται τα διαγράμματα αξονικού φορτίου,  $\sigma_c$ , -μέσης εγκάρσιας τάσης,  $f_{lat,aver}$ , δοκιμίων με μία στρώση GFRP και διαφορετικά μήκη υπερκάλυψης, όλα με ξηρή εφαρμογή. Παρατηρείται ότι δεν φαίνεται να υπάρχει συσχέτιση ανάμεσα στο μήκος υπερκάλυψης του μανδύα και στην συμπεριφορά των περισφιγμένων δοκιμίων.



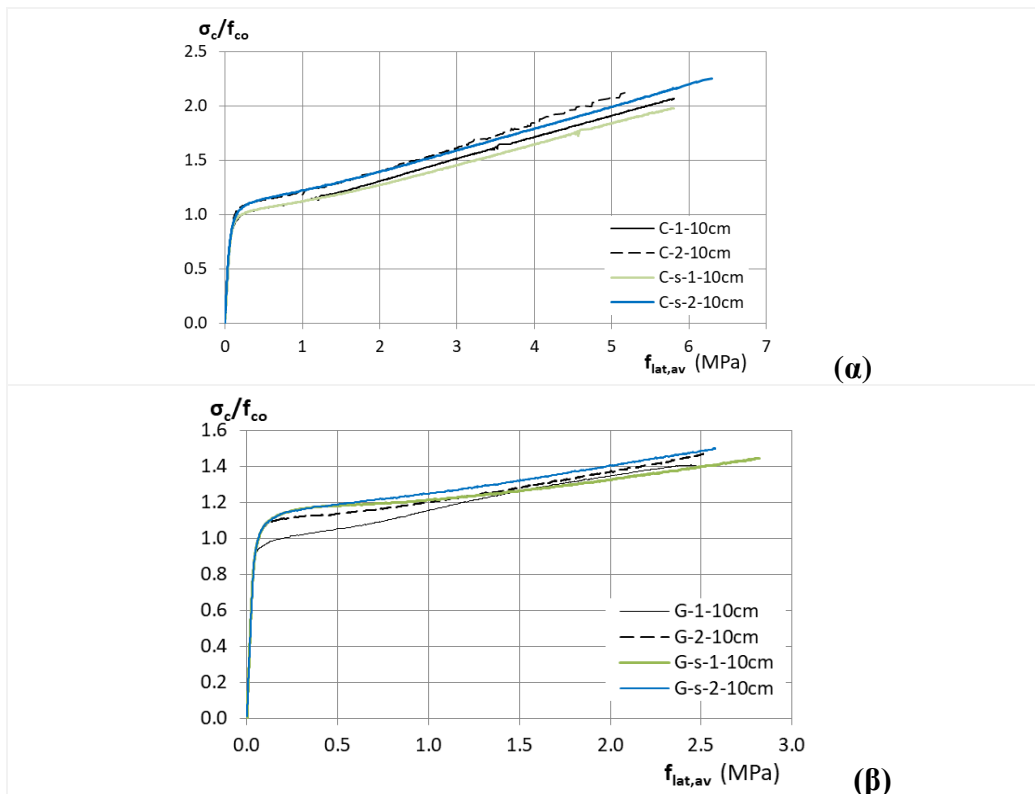
**Σχήμα 4.** Διάγραμμα αξονικής τάσης,  $\sigma_c$ , και μέσης εγκάρσιας τάσης περίσφιξης,  $f_{lat,aver}$ , για δοκίμια με μία στρώση GFRP και διαφορετικά μήκη υπερκάλυψης.

### Επιρροή χρήσης σκληρού ή μαλακού ρολού

Στο **Σχήμα 5** συσχετίζεται ο λόγος  $\sigma_c/f_{co}$  με την μέση εγκάρσια τάση περίσφιξης,  $f_{lat,av}$ , μεταξύ δοκιμίων στα οποία εφαρμόστηκε το FRP με χρήση σκληρού ή μαλακού ρολού για μανδύα από CFRP και GFRP. Παρατηρείται ότι η εφαρμογή του μανδύα μέσω σκληρού ρολού φαίνεται να οδηγεί σε πιο γρήγορη ενεργοποίηση του μανδύα FRP σε χαμηλότερες τιμές εγκάρσιας παραμόρφωσης, αλλά δεν φαίνεται να επηρεάζει τα μηχανικά χαρακτηριστικά κατά την αστοχία (Moretti, M.L. & Arvanitopoulos, E. 2017b). Επισημαίνεται ότι στα διαγράμματα η αξονική τάση διαιρείται με την αντοχή του απερίσφιγτου σκυροδέματος,  $f_{co}$ , ώστε τα αποτελέσματα να είναι ανεξάρτητα από το μέγεθος  $f_{co}$  το οποίο διέφερε ελαφρώς λόγω του διαφορετικού χρόνου δοκιμής των δοκιμίων.

### Αποτελεσματικότητα μανδύα

Για την αποτίμηση των διαφόρων διατάξεων μανδύων που δοκιμάστηκαν προτείνεται η χρήση του συντελεστή αποτελεσματικότητας,  $E_{eff}$ , που υπολογίζεται από την Εξίσωση 1, και εκφράζει την αύξηση της θλιπτικής αντοχής του περισφιγμένου δοκιμίου σε σχέση με την αντοχή του άοπλου σκυροδέματος, συνεκτιμώντας και το ογκομετρικό ποσοστό του υφάσματος και του αντίστοιχου κόστους αγοράς του υφάσματος (Moretti, M.L. & Arvanitopoulos, E. 2017a). Στο

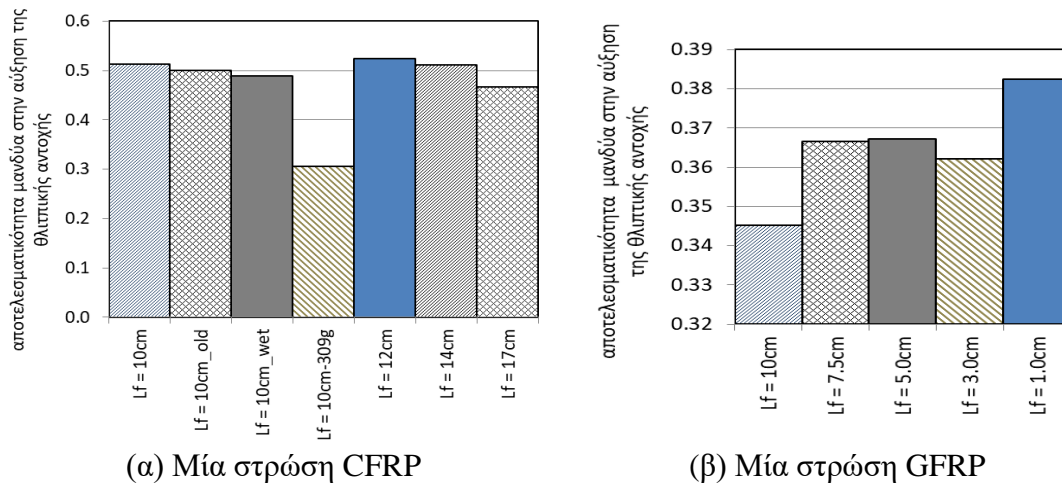


**Σχήμα 5.** Καμπύλες αξονικής τάσης,  $\sigma_c$  συναρτήσει της μέσης εγκάρσιας τάσης,  $f_{lat,av}$ , για μανδύες που κατασκευάστηκαν με μαλακού και σκληρό ρολό (α) CFRP, (β) GFRP.

**Σχήμα 6** συγκρίνονται οι συντελεστές  $E_{eff}$  για διάφορα δοκίμια με μανδύα μιας στρώσης. Προκύπτει ότι οι μανδύες από CFRP 235g είναι πιο αποτελεσματικοί από τους αντίστοιχους από CFRP 309g και από GFRP. Το μήκος υπερκάλυψης δεν οδηγεί σε σημαντική διαφοροποίηση. Η χρήση δύο στρώσεων μανδύων είναι λιγότερο αποτελεσματική (Moretti M.L. & Arvanitopoulos, E. 2017a). Ως τιμές προμήθειας των υφασμάτων ανά μέτρο μήκους, θεωρώντας πλάτος 60 cm, θεωρήθηκαν: CFRP 235g: 16.42€, CFRP 309g: 20.32€, και GFRP 445g: 12.66€. Το κόστος της ρητίνης θεωρήθηκε ότι είναι ίδιο και δεν λήφθηκε υπ' όψιν.

$$E_{conf} = \frac{f_{cc}}{f_{co} \omega_{vol} k_c} \quad (1)$$

όπου  $E_{conf}$  = συντελεστής αποτελεσματικότητας μανδύα για περίσφιξη  
 $f_{cc}$  = θλιπτική αντοχή περισφιγμένου σκυροδέματος λόγω FRP  
 $f_{co}$  = θλιπτική αντοχή απερίσφιγτου σκυροδέματος  
 $\omega_{vol}$  = ογκομετρικό ποσοστό FRP (%)  
 $k_c$  = κόστος υφάσματος FRP ανά τρέχον μέτρο (τιμές αγοράς)



**Σχήμα 6.** Αποτελεσματικότητα περίσφιγξης σε όρους θλιπτικής αντοχής για μία στρώση μανδύα και διαφορετικά υλικά και μήκη υπερκάλυψης,  $L_f$ , βάσει της Εξίσωσης 1.

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Το ελάχιστο μήκος υπερκάλυψης μανδύων FRP για αποφυγή πρόωρης αστοχίας συνάφειας στο μήκος υπερκάλυψης εξαρτάται κυρίως από το είδος του μανδύα, και από την μέθοδο εφαρμογής, υγρής ή ξηρής. Για ξηρή εφαρμογή του μανδύα, απαιτείται πολύ μικρότερο μήκος υπερκάλυψης σε μανδύες GFRP απ'ότι σε μανδύες CFRP. Ο χρόνος ωρίμανσης της ρητίνης είναι πολύ σημαντικός στην περίπτωση ξηρής εφαρμογής σε CFRP-235g. Το είδος ρολού, μαλακό ή σκληρό, που χρησιμοποιείται για την εφαρμογή του μανδύα δεν φαίνεται να επηρεάζει τα μηχανικά χαρακτηριστικά κατά την αστοχία. Από τα είδη μανδύων που δοκιμάστηκαν, πιο αποτελεσματική περίσφιγξη για αύξηση αντοχής συνεκτιμώντας το κόστος αγοράς πετυχαίνεται με μία στρώση CFRP-235g.

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Εκφράζονται ευχαριστίες προς την εταιρεία SIKA HELLAS για την ευγενική χορηγία των υλικών, προς τον κ. Α. Κουτσελίνη, τεχνικό του Εργαστηρίου Τεχνολογίας και Κατασκευών Ο/Σ του Π.Θ., για την κατασκευή των δοκιμίων, και προς τον Χάρη Παπαθεοχάρη, υποψήφιο διδάκτορα Π.Θ., για τις πολύτιμες συμβουλές του κατά την διεξαγωγή των δοκιμών.

## ΑΝΑΦΟΡΕΣ

Αρβανιτόπουλος, Ε., “Μελέτη του μήκους υπερκάλυψης ινοπλισμένων πολυμερών σε δοκίμια άοπλου σκυροδέματος”, Διπλωματική Εργασία (υπό την επίβλεψη της Επικ. Καθ. Μ. Μωρέττη), Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Π.Θ., Βόλος (2016)

Καλογεράκης, Ε., “Θεωρητική και πειραματική διερεύνηση εφαρμογής ινοπλισμένων πολυμερών στην περίσφιγξη κυλίνδρων σκυροδέματος”, Διπλωματική Εργασία (υπό την επίβλεψη της Επικ. Καθ. Μ. Μωρέττη), Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Π.Θ., Βόλος (2013)

Kalogerakis M. & Moretti M.L. “Behavior of concrete confined by glass and carbon fibers”, in Proceedings Civil Engineering for Sustainability and Resilience, CESARE’14 (Amman Jordan April 24-27, 2014)

Lam L. & Teng J.G. “Ultimate condition of fiber reinforced polymer-confined concrete”, ASCE J Composite Constructions, Vol. 8, No 6 (2004) 539-548

Lim J.C. & Ozbakkaloglu T. “Hoop strains in FRP-confined concrete columns: experimental observations”, J. Material Structures, Vol. 48 (2015) 2839-2854

Moretti M.L. & Arvanitopoulos E. “Effectiveness of CFRP- and GFRP-jacketed concrete columns with different overlap configurations”, in Proceedings 25th Annual International Conference on Composites/Nano Engineering (Rome Italy July 16-22, 2017a)

Moretti M.L. & Arvanitopoulos E. “Different application methods on CFRP- and GFRP-confined concrete: experimental results”, in Proceedings of the 4<sup>th</sup> International Conference on Smart Monitoring, Assessment and Rehabilitation of Civil Structures (Zurich Switzerland September 13-15, 2017b)

Nanni A. & Bradford N.M. “Model of concrete confined by fiber composites”, J. Construction and Building Materials, Vol. 9, No 2 (1995) 115-124

Παπαρίζος, Ι., “Αναλυτική και πειραματική αξιολόγηση προσομοιωμάτων για την περίσφιγξη θλιβομένων στοιχείων από οπλισμένο σκυρόδεμα μέσω ινοπλισμένων πολυμερών”, Διπλωματική Εργασία (υπό την επίβλεψη της Επικ. Καθ. Μ. Μωρέττη), Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Π.Θ., Βόλος (2016)

Rousakis T. & Tepfers R. “Behavior of concrete confined by high E-modulus carbon FRP sheets, subjected to monotonic and cyclic axial compressive load”, J. Nordic Concrete Research, Vol. 31, No 1 (2004) 73-82

Saaman M., Mirmiran A. & Shahawy M. “Model of concrete confined by fiber composites”, ASCE J. Structural Engineering, Vol. 124, No 9 (1998) 1025-1031

Toutanji H. “Stress-strain characteristics of concrete columns externally confined with advanced fiber composite sheets”, ACI J. Materials, Vol. 96, No 3 (1999) 397-404.

Smith T.S., Kim S.J. & Zhang H. “Behavior and effectiveness of FRP wrap in the confinement of large concrete cylinders”, ASCE J. Composite Constructions, Vol. 14, No 5 (2010) 573-582

Vincent T. & Ozbakkaloglu T. “Influence of overlap configuration on compressive behavior of CFRP-confined normal- and high-strength concrete”, J. Material Structures, Vol. 49, No 4 (2015) 1245-1268

Wu Y.F. & Jiang J.F. “Effective strain of FRP for confined circular concrete columns”, J. Composite Structures, Vol. 95 (2013) 479-491