

Προσομοίωση με πεπερασμένα στοιχεία της συμπεριφοράς υποστυλωμάτων ωπλισμένου σκυροδέματος περισφιγμένων με ινωπλισμένα πολυμερή

Α.Ι. Καραμπίνης

Δρ. Πολιτικός Μηχανικός. Καθηγητής ΔΠΘ, karabin@civil.duth.gr*

Θ.Χ. Ρουσάκης

Δρ. Πολιτικός Μηχανικός. ΕΕΔΙΠ ΔΠΘ, trousak@civil.duth.gr*

Γ.Ε. Μανωλίτση

MSc Πολιτικός Μηχανικός. Υποψήφια Διδάκτορας ΔΠΘ, gmanolit@civil.duth.gr*

**Εργαστήριο Ωπλισμένου Σκυροδέματος, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης (ΔΠΘ), Ξάνθη 67100.*

Λέξεις κλειδιά: Ινωπλισμένα πολυμερή, περίσφιγξη, πεπερασμένα στοιχεία, θεωρία πλαστικότητας, πειράματα, ανάλυση

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Διερευνάται αναλυτικά η συμπεριφορά υποστυλωμάτων συμβατικά ωπλισμένου σκυροδέματος (χαλύβδινος διαμήκης οπλισμός και συνδετήρες) τα οποία είναι περισφιγμένα εξωτερικά με υφάσματα ινωπλισμένων πολυμερών (ΙΩΠ). Η παρούσα έρευνα επικεντρώνεται στην συμπεριφορά υποστυλωμάτων χαμηλής αντοχής σκυροδέματος με αραιούς συνδετήρες ώστε να εξετασθεί το ενδεχόμενο ελαστικού λυγισμού των θλιβόμενων διαμήκων ράβδων. Εξετάζεται επίσης η συνεισφορά της εξωτερικής περίσφιγξης με ινωπλισμένα πολυμερή στην μηχανική συμπεριφορά των παραπάνω στοιχείων και η δυνατότητα καθυστέρησης ή αποτροπής του ελαστικού λυγισμού των θλιβόμενων ράβδων. Η διερεύνηση περιλαμβάνει την αναλυτική προσομοίωση των υποστυλωμάτων με πεπερασμένα στοιχεία καθώς και την σύγκριση των αποτελεσμάτων με πειραματικά δεδομένα.

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σε πολλές περιπτώσεις διαπιστώνονται σε κατασκευές σχεδιασμένες με το πλέγμα των πρώτων θεσμοθετημένων Ελληνικών Κανονισμών (του 1954 για το σκυρόδεμα, και του 1959 για σεισμικές δράσεις) βλάβες σε υποστυλώματα μετά από σεισμό οι οποίες σχετίζονται με την έλλειψη επαρκούς εγκάρσιου οπλισμού περίσφιγξης (συνδετήρες) τόσο για την αποτροπή της ψαθυρής μορφής διατμητικών ρηγματώσεων σε κρίσιμες περιοχές, όσο και για την αποτροπή του λυγισμού των θλιβόμενων διαμήκων ράβδων. Τα παραπάνω δομικά στοιχεία εμφανίζουν ανεπαρκή συμπεριφορά σε σχέση με την επιδιωκόμενη πλαστική απόκριση. Για την αναβάθμιση της απόκρισης τέτοιων δομικών στοιχείων απαιτείται επαρκής περίσφιγξη του σκυροδέματος, ώστε μέσω της προσαύξεσης της αντοχής και της πλαστιμότητας παραμορφώσεών του, σε συνδυασμό με την αποτροπή της διατμητικής αστοχίας, των φαινομένων λυγισμού των θλιβόμενων ράβδων και της αστοχίας των αγκυρώσεων να προκύπτει καμπτική αστοχία, μετά από διαρροή των οπλισμών και ανάπτυξη μεγάλων στροφών στα άκρα του στοιχείου χωρίς σημαντική απώλεια της αντίστασής του.

Σημαντική είναι η συνεισφορά των εξωτερικά επικολλούμενων υφασμάτων ινωπλισμένων πολυμερών (ΙΩΠ) άνθρακα ή γυαλιού ως επιπρόσθετου οπλισμού περίσφιγξης τόσο για την ενίσχυση υποστυλωμάτων όσο και για την επισκευή τους μετά από σεισμική διέγερση. Πολλές

έρευνες αναφέρονται στην αποτελεσματικότητα των υφασμάτων ΙΩΠ ως οπλισμών περίσφιγξης και την εφαρμογή τους τόσο σε κυκλικές όσο και σε ορθογωνικές διατομές (Campione & Miraglia 2003, Fam & Rizkalla 2001, Karabinis & Rousakis 2002, 2003, Rochette & Labossière 2000, Ρουσάκης 2005, κ.α.). Παράλληλα έχουν προταθεί ημιεμπειρικά ή καταστατικά προσομοιώματα (Samaan και Συνεργάτες 1998, Spoolstra & Monti 1999, Saafi & Toutanji 1999, Fam & Rizkalla 2001, Karabinis & Rousakis 2002, Fujikake και Συνεργάτες 2004, Ρουσάκης 2005, Wang & Restrepo 2001 κ.α.) για την συμπεριφορά του σκυροδέματος υπό ομοιόμορφη περίσφιγξη με ΙΩΠ ή για ορθογωνικές διατομές και στοιχεία ωπλισμένου σκυροδέματος περισφιγμένα με ΙΩΠ.

Η έρευνα αφορά επίσης στην ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία (Rochette & Labossière 1996, Mirmiran και Συνεργάτες 2000, Parvin & Wang 2001, Montoya και Συνεργάτες 2004, κ.α.) για την μικροδομική ανάλυση της συμπεριφοράς του σκυροδέματος περισφιγμένου με σύνθετα υλικά. Εξετάζεται τόσο η ακρίβεια της πρόβλεψης της γενικής σχέσης τάσεων – ανηγμένων παραμορφώσεων του περισφιγμένου σκυροδέματος, όσο και η κατανομή των τάσεων και των παραμορφώσεων σε επίπεδο διατομής ή στον μανδύα ΙΩΠ.

Στην παρούσα εργασία διερευνάται αναλυτικά η συμπεριφορά υποστυλωμάτων συμβατικά ωπλισμένου σκυροδέματος (χαλύβδινος διαμήκης οπλισμός και συνδετήρες) τα οποία είναι περισφιγμένα εξωτερικά με υφάσματα ινωπλισμένων πολυμερών (ΙΩΠ). Η μελέτη επικεντρώνεται στην συμπεριφορά υποστυλωμάτων χαμηλής αντοχής σκυροδέματος με ενδεχόμενο ελαστικού λυγισμού των θλιβόμενων διαμήκων ράβδων. Εξετάζεται η συνεισφορά της εξωτερικής περίσφιγξης με ινωπλισμένα πολυμερή στην μηχανική συμπεριφορά των παραπάνω στοιχείων και η δυνατότητα υστέρησης ή αποτροπής του ελαστικού λυγισμού των θλιβόμενων ράβδων. Τα αναλυτικά αποτελέσματα σχολιάζονται σε σύγκριση με διεξαχθείσες πειραματικές δοκιμές.

2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Η ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία παρέχει τη δυνατότητα κατασκευής προσομοιωμάτων λαμβάνοντας υπόψη μη γραμμικότητες οι οποίες προκύπτουν από τη γεωμετρία των υλικών και την αλληλεπίδρασή τους στα κοινά τους σημεία ή επιφάνειες. Είναι δυνατή η διερεύνηση της μεταβολής των αποτελεσμάτων παραμέτρων της μηχανικής συμπεριφοράς των υλικών ή δομικών στοιχείων σε μακροδομικό ή μικροδομικό επίπεδο ανάλογα με την διακριτοποίηση η οποία επιλέγεται. Απαραίτητη προϋπόθεση για την αξιόπιστη προσομοίωση είναι η θεώρηση κατάλληλων προσομοιωμάτων για τα υλικά των επιμέρους μελών του προσομοιώματος, καθώς και για τις μεταξύ τους αλληλεπιδράσεις. Παρουσιάζονται οι θεωρήσεις για τις ιδιότητες του σκυροδέματος, του χάλυβα και του ΙΩΠ. Η προσομοίωση γίνεται με το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS.

Για την προσομοίωση του σκυροδέματος αξιοποιούνται τα αποτελέσματα από την πειραματική διερεύνηση των πλαστικών παραμέτρων καθώς και την αναλυτική προσομοίωση με την θεωρία της πλαστικότητας τύπου Drucker-Prager για σκυρόδεμα περισφιγμένο με σύνθετα υλικά (Ρουσάκης 2005). Το σκυρόδεμα προσομοιώνεται με τρισδιάστατο οκτάκομβο στοιχείο. Υιοθετήθηκε κριτήριο αστοχίας τύπου Drucker-Prager της μορφής:

$$F = \sqrt{J_{2D}} f(K) + \theta J_1 - \kappa = 0 \quad (1)$$

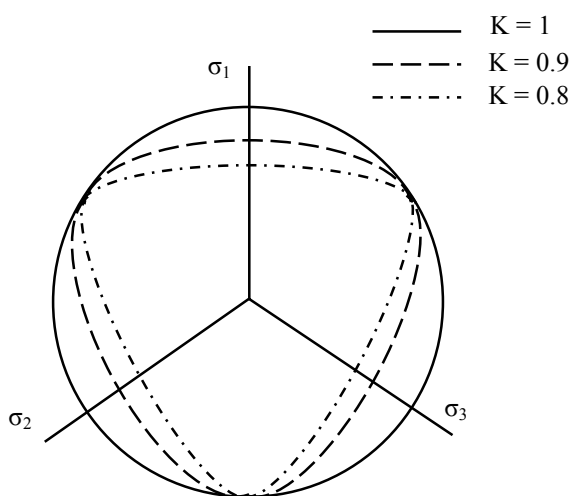
όπου J_{2D} η δεύτερη αναλλοίωτη του εκτροπέα της τάσης, J_1 η πρώτη αναλλοίωτη της τάσης και θ παράμετρος τριβής. Η συνάρτηση $f(K)$ εκφράζει την μεταβολή της διατμητικής αντοχής του σκυροδέματος ανάλογα με το ιστορικό φόρτισης για δεδομένη υδροστατική πίεση καθορίζοντας το σχήμα της επιφάνειας που προκύπτει από την συνάρτηση φόρτισης κατά το επίπεδο εκτροπής και εξαρτάται από την παράμετρο K (σχ. 1). Η παράμετρος κράτνυσης κ προκύπτει από την σχέση:

$$\kappa = \left(\frac{1}{\sqrt{3}} - \theta \right) \sigma_c \quad (2)$$

όπου σ_c είναι η αντοχή του απερίσφιγκτου σκυροδέματος. Στην ανάλυση εισάγεται η συμπεριφορά τάσεων - πλαστικών παραμορφώσεων του απερίσφιγκτου σκυροδέματος σύμφωνα με την προσέγγιση έμμεσου προσδιορισμού (Ρουσάκης 2005) ώστε να ληφθεί υπόψη η συμπεριφορά κράτυνσης του σκυροδέματος. Χρησιμοποιείται συνάρτηση πλαστικής ροής G τύπου Drucker-Prager:

$$G = \sqrt{J_{2D}} f(K) + f(\alpha) J_1 \quad (3)$$

όπου $f(\alpha)$ είναι έκφραση του συντελεστή πλαστικής διόγκωσης του σκυροδέματος ώστε να ληφθεί υπόψη ότι το διάνυσμα των πλαστικών παραμορφώσεων είναι κάθετο σε οριακή επιφάνεια διαφορετική της επιφάνειας αστοχίας F (μη συνεταιριστικός νόμος πλαστικής ροής).



Σχήμα 1. Απεικόνιση της μορφής της συνάρτησης φόρτισης σκυροδέματος στο επίπεδο εκτροπής για διάφορες τιμές της παραμέτρου υλικού K .

Για την προσομοίωση του χάλυβα χρησιμοποιείται ομοίως τρισδιάστατο οκτάκομβο στοιχείο θεωρώντας υλικό με διαρροή και κράτυνση. Για την συνεισφορά του χάλυβα λαμβάνεται υπόψη η τροποποίηση της συμπεριφοράς τάσεων-παραμορφώσεων σε θλίψη ανάλογα με το ενδεχόμενο λυγισμού, κατά την σχέση των Yalcin & Saatcioglu (2000). Δηλαδή για λόγο απόστασης μεταξύ συνδετήρων προς την διάμετρο του θλιβόμενου οπλισμού (s/Φ_L) μεγαλύτερο του 8 εμφανίζεται ελαστικός λυγισμός. Για λόγο $4.5 < s/\Phi_L < 8$ διαφοροποιείται η συμπεριφορά κράτυνσης του χάλυβα από ιδεατά πλαστική έως αντίστοιχη της συμπεριφοράς του χάλυβα σε εφελκυσμό. Για λόγο $s/\Phi_L < 4.5$ η συμπεριφορά του χάλυβα σε θλίψη ή εφελκυσμό είναι ίδια.

Το ινωπλισμένο πολυμερές προσομοιώνεται ως στοιχείο τύπου ελάσματος στο οποίο έχουν δοθεί ιδιότητες μεμβράνης. Η απόκριση του υλικού είναι ορθοτροπική γραμμικά ελαστική. Θεωρείται πλήρης συμβατότητα παραμορφώσεων μεταξύ σκυροδέματος και σύνθετου υλικού τόσο κατά τη διεύθυνση επιβολής του αξονικού φορτίου όσο και στην κάθετη σε αυτήν, εφόσον δεν εξετάζεται η μεταβολή της συνάφειας μεταξύ των δύο υλικών.

Για την ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία ακολουθήθηκε η παρακάτω πορεία εργασιών:

- Καθορίζονται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των μελών του προσομοιώματος.
- Ορίζονται οι ιδιότητες των υλικών.
- Διαμορφώνονται οι συνδέσεις και οι επαφές μεταξύ των μελών.

- Καθορίζεται ο τύπος της διακριτοποίησης του στοιχείου καθώς και η πυκνότητα της διακριτοποίησης επιλέγοντας ανάλογο αριθμό σπόρων σε κάθε επιφάνεια καθώς και την κατάλληλη τεχνική. Η διακριτοποίηση των στοιχείων επιδιώχθηκε να είναι όσο το δυνατόν πιο απλή με ταύτιση των κόμβων των στοιχείων οι οποίοι είναι σε επαφή έτσι ώστε να αποφευχθούν προβλήματα σύγκλισης κατά την ανάλυση.
- Επιλέγεται ο τρόπος φόρτισης του στοιχείου. Επιβάλλεται μονότονο αξονικό θλιπτικό φορτίο πάνω σε άκαμπτη πλάκα φόρτισης η οποία μεταβιβάζει ομοιόμορφα το φορτίο στην επιφάνεια του δοκιμίου μέχρι την αστοχία του. Η φόρτιση επιβάλλεται μόνο στην επιφάνεια του σκυροδέματος και όχι στον μανδύα.
- Επιλέγονται οι συνοριακές συνθήκες του υπό μελέτη στοιχείου. Στην περίπτωση των δοκιμίων από ωπλισμένο σκυρόδεμα, όπου προσομοιώθηκε το $\frac{1}{4}$ της διατομής (λόγω της συμμετρίας φόρτισης και γεωμετρίας του στοιχείου), το δοκίμιο δεσμεύτηκε κατάλληλα στα επίπεδα συμμετρίας ώστε να είναι ελεύθερη η κίνησή του κατά την διεύθυνση του άξονα επιβολής του φορτίου καθώς και κάθετα σε αυτόν.

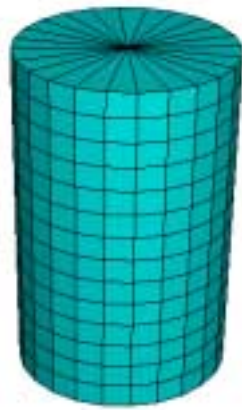
3 ΑΝΑΛΥΤΙΚΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Στο εργαστήριο Ωπλισμένου Σκυροδέματος του ΔΠΘ βρίσκεται σε εξέλιξη πειραματικό πρόγραμμα φόρτισης σε αξονική θλίψη στοιχείων υποστυλωμάτων συμβατικά ωπλισμένου σκυροδέματος (χαλύβδινος διαμήκης οπλισμός και συνδετήρες) τα οποία είναι περισφιγμένα εξωτερικά με υφάσματα ινωπλισμένων πολυμερών (Karabinis & Rousakis 2006). Η παρούσα έρευνα επικεντρώνεται στην αναλυτική προσομοίωση μέρους του πειραματικού προγράμματος το οποίο αφορά στην συμπεριφορά υποστυλωμάτων χαμηλής αντοχής σκυροδέματος με ανεπαρκή απόσταση μεταξύ συνδετήρων και κίνδυνο ελαστικού λυγισμού των θλιβόμενων διαμήκων ράβδων. Εξετάζεται η συνεισφορά της εξωτερικής περίσφιγξης με ινωπλισμένα πολυμερή στην μηχανική συμπεριφορά των παραπάνω στοιχείων και η δυνατότητα υστέρησης ή αποτροπής του ελαστικού λυγισμού των θλιβόμενων ράβδων.

3.1 Κυλινδρικό προσομοίωμα σκυροδέματος περισφιγμένου με ΙΩΠ

Για την διαβάθμιση των παραμέτρων του προσομοιώματος πλαστικότητας χρησιμοποιείται η πρόταση έμμεσου προσδιορισμού των πλαστικών παραμέτρων του σκυροδέματος από αποτελέσματα πειραμάτων μονότονης φόρτισης (Ρουσάκης, 2005). Η παράμετρος τριβής θ και η παράμετρος πλαστικής διόγκωσης α υπολογίζονται από κλειστές εκφράσεις όπου συσχετίζονται μονοσήμαντα με την αντοχή του σκυροδέματος (η παράμετρος α συσχετίζεται και με τη δυστένεια του μέσου περίσφιγξης). Ομοίως επιλέγεται η έμμεση εξαγωγή της πλαστικής συμπεριφοράς του απερίσφιγκτου σκυροδέματος (Ρουσάκης, 2005). Για τον έλεγχο των παραπάνω υποθέσεων διεξάγεται αρχικά ανάλυση σε αξονική θλίψη κυλινδρικών δοκιμίων αντοχής 25.2 MPa περισφιγμένων με 1, 2 και 3 στρώσεις σύνθετου υλικού υψηλού μέτρου ελαστικότητας 377 GPa από το πειραματικό πρόγραμμα των Rousakis & Terfers (2004). Στο σχήμα 2 παρουσιάζεται η διακριτοποίηση του σκυροδέματος καθώς και του μανδύα σύνθετου υλικού.

Στα σχήματα 3 έως 5 παρουσιάζεται η σύγκριση των προβλέψεων της ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία με τα αντίστοιχα πειραματικά δεδομένα. Στα παραπάνω σχήματα παρουσιάζονται επίσης τα αποτελέσματα από την εφαρμογή για το σκυρόδεμα της πρότασης των Rochette & Labossière (1996). Το σκυρόδεμα θεωρείται ως ιδεατά πλαστικό υλικό ενώ τόσο η παράμετρος τριβής, όσο και η παράμετρος πλαστικής διόγκωσης εξαρτώνται μονοσήμαντα από την αντοχή του απερίσφιγκτου σκυροδέματος.

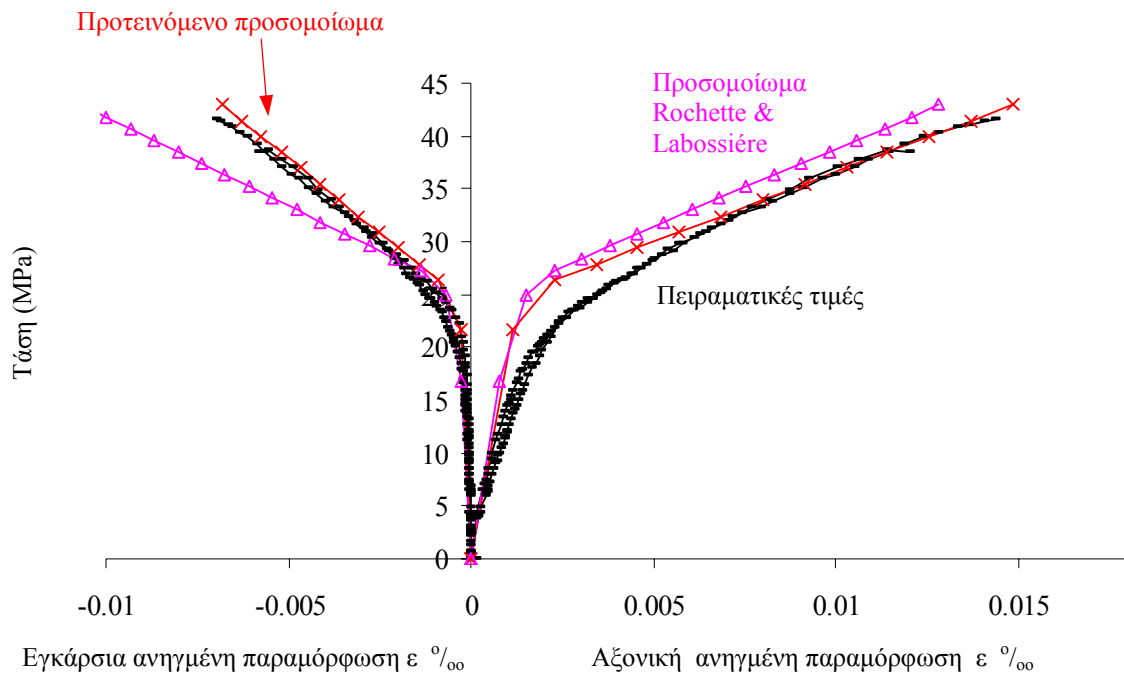


(α)

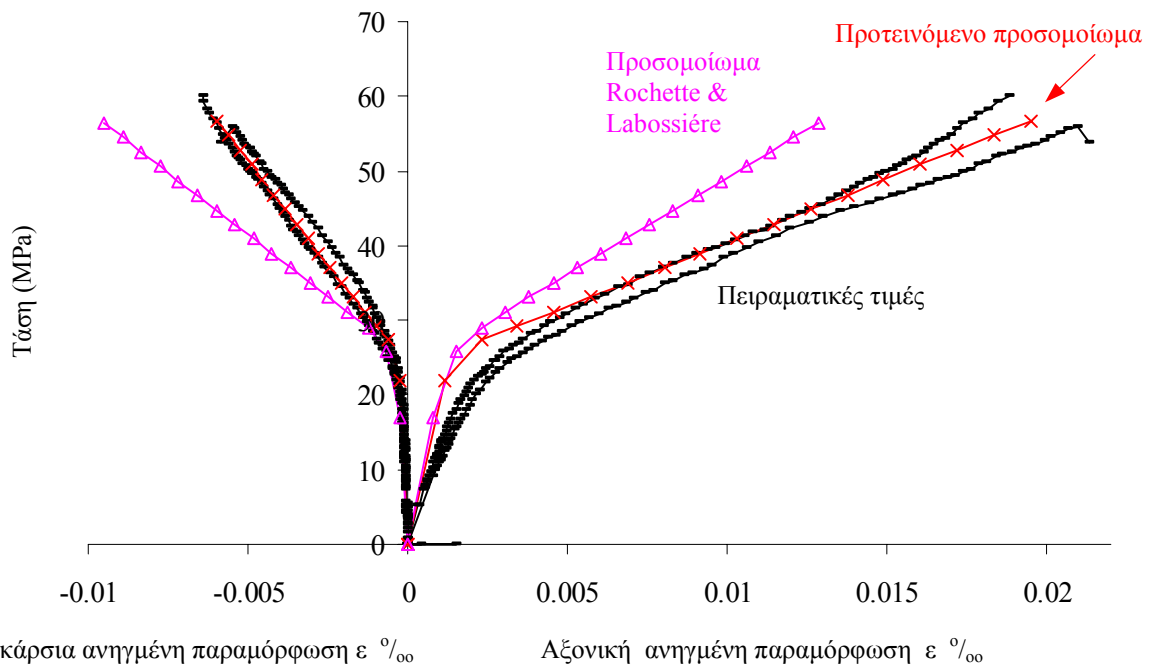


(β)

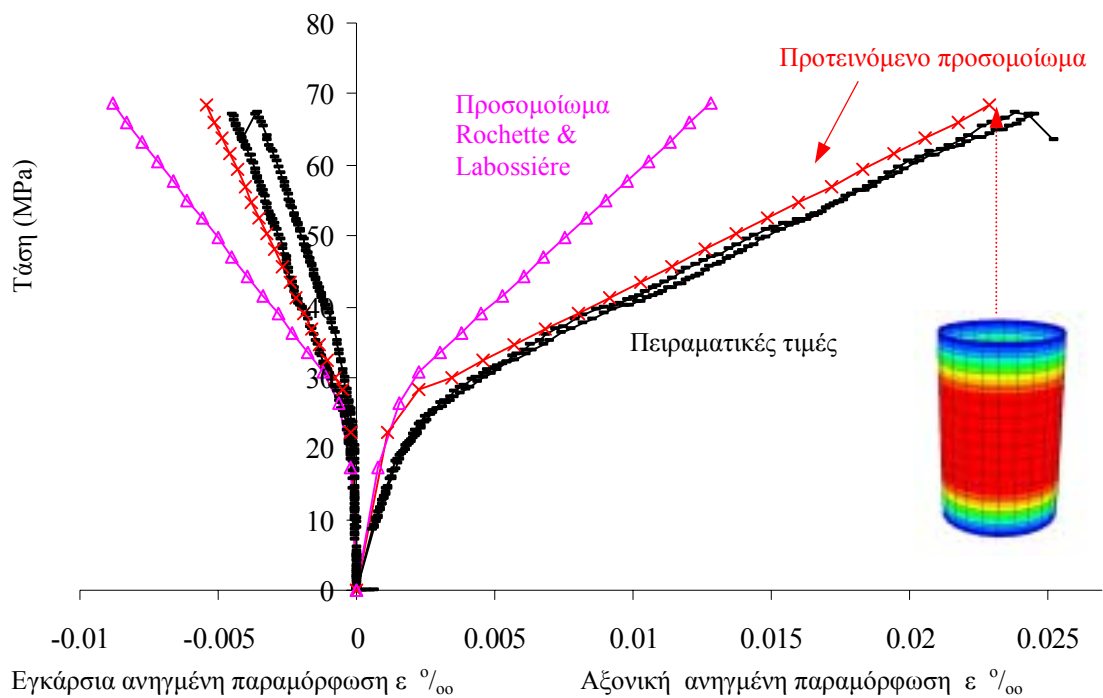
Σχήμα 2. Απεικόνιση της διακριτοποίησης του σκυροδέματος (α) και του μανδύα σύνθετου υλικού (β).



Σχήμα 3. Σύγκριση αναλυτικής πρόβλεψης και πειραματικών αποτελεσμάτων για δοκίμια σκυροδέματος 25.2 MPa αντοχής περισφιγμένα με 1 στρώση ΙΩΠ άνθρακα υψηλού μέτρου ελαστικότητας.



Σχήμα 4. Σύγκριση αναλυτικής πρόβλεψης και πειραματικών αποτελεσμάτων για δοκίμια σκυροδέματος 25.2 MPa αντοχής περισιφισμένα με 2 στρώσεις ΙΩΠ άνθρακα υψηλού μέτρου ελαστικότητας.

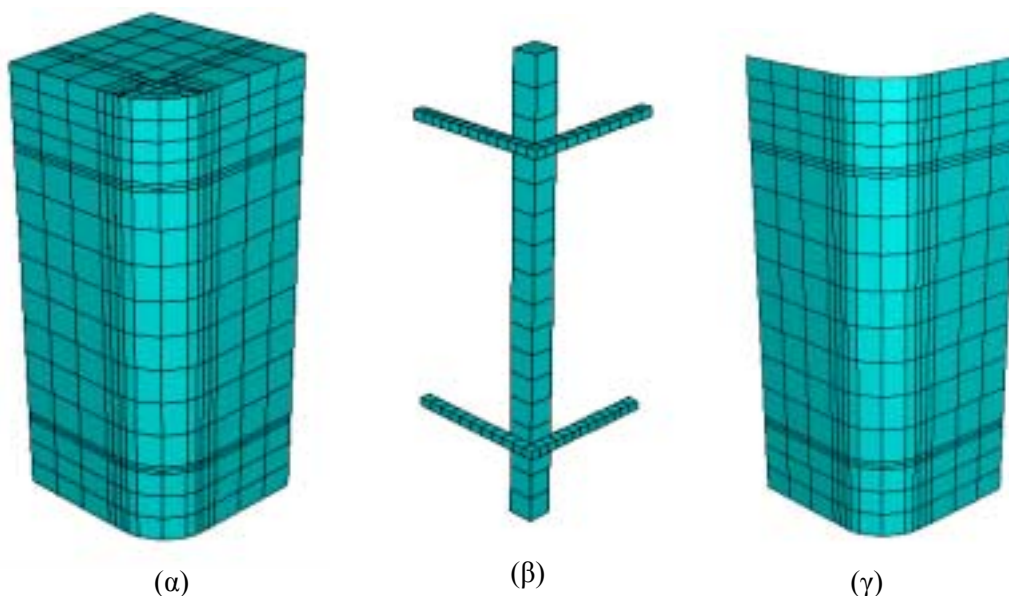


Σχήμα 5. Σύγκριση αναλυτικής πρόβλεψης και πειραματικών αποτελεσμάτων για δοκίμια σκυροδέματος 25.2 MPa αντοχής περισιφισμένα με 3 στρώσεις ΙΩΠ άνθρακα υψηλού μέτρου ελαστικότητας. Κατανομή τάσεων στον μανδύα πριν την αστοχία.

Παρατηρείται σημαντική συμφωνία μεταξύ πειραματικών τιμών και της αναλυτικής πρόβλεψης της σχέσης τάσεων - παραμορφώσεων από το προτεινόμενο προσομοίωμα τόσο για χαμηλή περίσφιγξη ΙΩΠ όσο και για υψηλή. Αντίθετα στην πρόταση των Rochette & Labossière η αξιοπιστία πρόβλεψης αφορά σε χαμηλή περίσφιγξη ΙΩΠ.

3.2 Προσομοίωμα υποστυλώματος ωπλισμένου σκυροδέματος περισφιγμένου με ΙΩΠ

Ακολουθεί η παρουσίαση των αποτελεσμάτων από την διερεύνηση της συμπεριφοράς υποστυλώματος ωπλισμένου σκυροδέματος τετραγωνικής διατομής με εξωτερική διάσταση 200 mm και ακτίνα καμπυλότητας 30 mm. Το υποστυλόμετρο έχει χαμηλή αντοχή σκυροδέματος 13.4 MPa. Ο διαμήκης οπλισμός είναι διαμέτρου 14 mm και έχει ονομαστική τάση διαρροής 500 MPa. Οι συνδετήρες είναι διαμέτρου 6 mm και ονομαστικής τάσης διαρροής 220 MPa. Ο μανδύας ανθρακοϋφάσματος ΙΩΠ έχει μέτρο ελαστικότητας 240 GPa και πάχος στρώσης 0.117 mm (S&P-Sinteco, 1999). Οι συνδετήρες είναι τοποθετημένοι σε απόσταση 200 mm ώστε σε υποστυλώματα χωρίς εξωτερική περίσφιγξη με ΙΩΠ να προκύψει ελαστικός λυγισμός των διαμήκων ράβδων ($s/\Phi_L=14.3$). Στο σχήμα 6 παρουσιάζεται η διακριτοποίηση των μελών του αναλυτικού προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων.

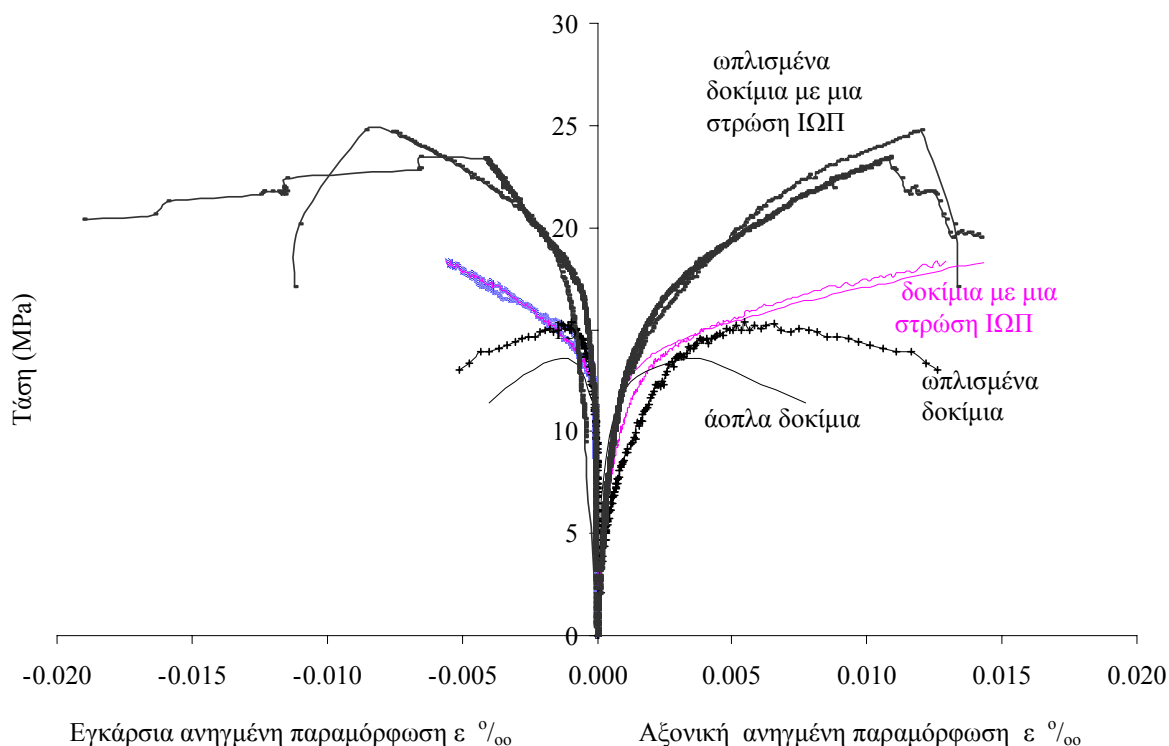


Σχήμα 6. Διακριτοποίηση μελών ωπλισμένης διατομής. Διακριτοποίηση σκυροδέματος (α), χαλύβδινου οπλισμού (β) και μανδύα ΙΩΠ (γ).

Στο προτεινόμενο προσομοίωμα απαιτήθηκε η αναδιαβάθμιση της παραμέτρου τριβής καθώς η χαμηλή αντοχή σκυροδέματος είναι εκτός των ορίων των προτεινόμενων σχέσεων έμμεσου προσδιορισμού της πλαστικής συμπεριφοράς του σκυροδέματος (μικρότερη της αντοχής των 25 MPa, Ρουσάκης 2005).

Στο σχήμα 7 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για δοκίμια άοπλα, για δοκίμια άοπλα με μια στρώση μανδύα ΙΩΠ, για δοκίμια με διαμήκη και εγκάρσιο χαλύβδινο οπλισμό χωρίς μανδύα ΙΩΠ, καθώς και για δοκίμια ωπλισμένα με εξωτερική περίσφιγξη με μανδύα ΙΩΠ. Παρατηρείται ότι παρουσιάζεται ελαστικός λυγισμός των θλιβόμενων οπλισμών όταν δεν υπάρχει εξωτερική περίσφιγξη με ΙΩΠ και η συνεισφορά τους στην παραλαβή του αξονικού φορτίου είναι οριακή. Η αναλαμβανόμενη θλιπτική τάση από το στοιχείο αυξάνεται από 13.35 MPa για άοπλο σκυρόδεμα,

σε 14.32 MPa για ωπλισμένη διατομή ενώ η αναμενόμενη συνεισφορά των διαμήκων ράβδων για αποτροπή του λυγισμού τους και κρατυνόμενη συμπεριφορά είναι 8.7 MPa. Συγκρίνοντας την συμπεριφορά των άοπλων δοκιμίων με εξωτερική περίσφιγξη με ΙΩΠ με τα αντίστοιχα ωπλισμένα, παρατηρείται σημαντική συνεισφορά των διαμήκων ράβδων στην ανάληψη αξονικού φορτίου ενώ επιτυγχάνονται παρόμοια επίπεδα πλαστιμότητας παραμορφώσεων. Για δοκίμιο άοπλο με μια στρώση ΙΩΠ προκύπτει μέγιστη τάση 18.33 MPa ενώ μετά την εφαρμογή της περίσφιγξης με ΙΩΠ στο ωπλισμένο δοκίμιο η τάση αυξάνεται σε 24.1 MPa (αύξηση 5.77 MPa, ποσοστό αύξησης 31.5%). Επίσης λόγω της εξωτερικής περίσφιγξης με ΙΩΠ περιορίστηκε η περαιτέρω ανάπτυξη του αρχικού ελαστικού λυγισμού και δεν εμφανίστηκε πρόωρη αστοχία.

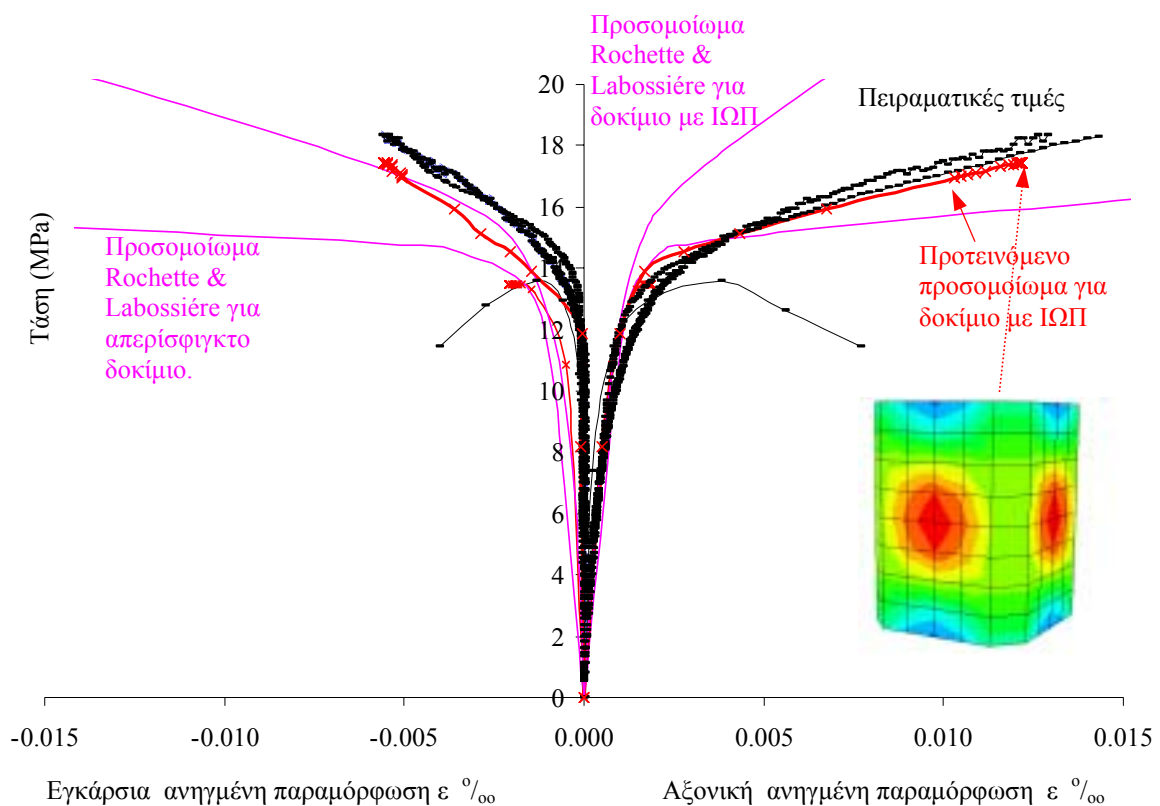


Σχήμα 7. Διαγράμματα τάσεων – ανηγμένων αξονικών και εγκαρσίων παραμορφώσεων άοπλων και ωπλισμένων δοκιμίων περισιφιγμένων με 1 στρώση ανθρακούφασματος ΙΩΠ.

Στο σχήμα 8 παρουσιάζονται οι αναλυτικές προβλέψεις για άοπλο δοκίμιο και για αντίστοιχο με περίσφιγξη από μια στρώση ΙΩΠ άνθρακα, οι οποίες παρουσιάζουν ικανοποιητική ακρίβεια σε σύγκριση με την πειραματική συμπεριφορά περισιφιγμένων τετραγωνικών διατομών.

Στο σχήμα 9 παρουσιάζονται οι αναλυτικές προβλέψεις για υποστύλωμα με χαλύβδινο οπλισμό χωρίς εξωτερική περίσφιγξη καθώς και για υποστύλωμα περισιφιγμένο με μια στρώση ΙΩΠ άνθρακα. Παρατηρείται ότι στην πρόβλεψη για δοκίμιο περισιφιγμένο με ΙΩΠ με θεώρηση αποτροπής του λυγισμού του διαμήκους οπλισμού προκύπτει σημαντική η συνεισφορά του οπλισμού στα πρώτα στάδια φόρτισης. Από τη συγκριτική διερεύνηση αναλυτικών και πειραματικών αποτελεσμάτων προκύπτει ότι ο θλιβόμενος οπλισμός λόγω της κατασκευής του δοκιμίου (αγκύρωση του οπλισμού μέσα στο σκυρόδεμα) αργεί να ενεργοποιηθεί, και αρχικά πριν την πλήρη ενεργοποίησή του μανδύα υπόκειται σε ελεγχόμενο λυγισμό ο οποίος μειώνει τη συνεισφορά του. Αντίθετα στο αναλυτικό προσομοίωμα οι οπλισμοί θεωρούνται άμεσα

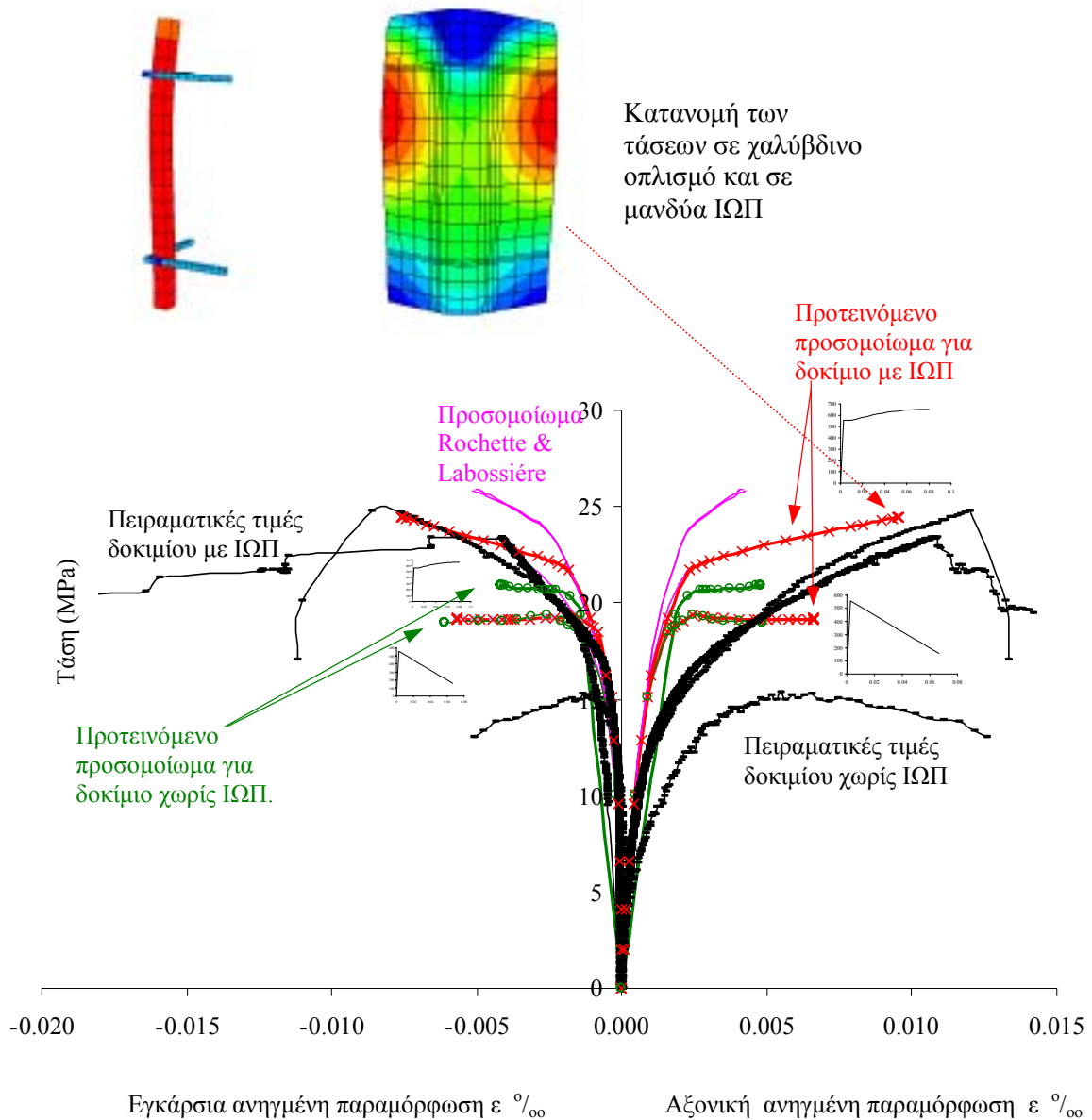
φορτιζόμενοι αφού είναι πακτωμένοι στην πλάκα φόρτισης. Για αυτόν τον λόγο προκύπτει και η αυξημένη συνεισφορά του διαμήκους οπλισμού στα αναλυτικά αποτελέσματα σε σχέση με τα πειραματικά στο πρώτο στάδιο φόρτισης. Η παραπάνω υστέρηση ενεργοποίησης του διαμήκους οπλισμού στο πείραμα απαιτεί ακόμη μεγαλύτερη περιοριστική ικανότητα από το ΙΩΠ για την αποφυγή πρόωρης αστοχίας λόγω λυγισμού. Από την παραπάνω ανάλυση προκύπτουν τελικά μεγέθη αντοχής και παραμορφωσιμότητας αντίστοιχα των πειραματικών. Επομένως μπορεί να θεωρηθεί ότι η αύξηση της αναλαμβανόμενης τάσης μόνο κατά 5.77 MPa (και όχι κατά 8.7 MPa, όπως προκύπτει για πλήρη συνεισφορά του διαμήκους οπλισμού) στο δοκίμιο του πειράματος δεν οφείλεται σε μερικό λυγισμό των διαμήκων ράβδων αλλά στην αλληλεπίδραση του παραμορφωμένου οπλισμού με τον μανδύα ΙΩΠ. Δηλαδή στο δοκίμιο του πειράματος η αστοχία δεν ήταν πρόωρη λόγω λυγισμού των ράβδων οπλισμού, αλλά ο λυγισμός του διαμήκους οπλισμού περιορίστηκε αποτελεσματικά από το ΙΩΠ χωρίς να υποβαθμιστεί η συμπεριφορά του υποστυλώματος.



Σχήμα 8. Διαγράμματα τάσεων – ανηγμένων αξονικών και εγκαρσίων παραμορφώσεων άοπλων δοκιμίων και περισφιγμένων με 1 στρώση ανθρακοϋφάσματος ΙΩΠ.

Ο περιορισμός του λυγισμού του διαμήκους οπλισμού προκύπτει επίσης από τη σύγκριση των πειραματικών τιμών με την αναλυτική πρόβλεψη για θεώρηση ελαστικού λυγισμού των θλιβόμενων ράβδων κατά Yalcin & Saatcioglu (2000). Στην ανάλυση αυτή θεωρείται γραμμική φθίνουσα συμπεριφορά του χάλυβα σε θλίψη μετά την διαρροή. Από την ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία προκύπτει μειωμένη συνεισφορά του χάλυβα η οποία οδηγεί σε χαμηλότερες τιμές

αντοχής και παραμορφωσιμότητας και πρόωρη αστοχία του ΙΩΠ σε σχέση με τα πειραματικά αποτελέσματα (σχ. 9). Σε σύγκριση με το αντίστοιχο δοκίμιο χωρίς οπλισμό (σχ. 8) παρατηρείται αύξηση του αναλαμβανόμενου φορτίου λόγω της μειωμένης συνεισφοράς του οπλισμού, αλλά πρόωρη αστοχία, με αντίστοιχα χαμηλά επίπεδα παραμορφωσιμότητας.



Σχήμα 9. Διαγράμματα τάσεων – ανηγμένων αξονικών και εγκαρσίων παραμορφώσεων οπλισμένων δοκιμίων χωρίς περισφιγξη ή περισφιγμένων με 1 στρώση ανθρακοϋφάσματος ΙΩΠ. Κατανομή των τάσεων σε χαλύβδινο οπλισμό και σε μανδύα ΙΩΠ πριν την αστοχία.

4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Χρησιμοποιούνται πεπερασμένα στοιχεία για την αναλυτική πρόβλεψη της συμπεριφοράς υποστυλωμάτων ωπλισμένου σκυροδέματος με ύπαρξη λυγηρών θλιβόμενων διαμήκων ράβδων οπλισμού περισφιγμένων εξωτερικά με ΙΩΠ. Για την προσομοίωση του σκυροδέματος χρησιμοποιείται συνάρτηση φόρτισης – αστοχίας τύπου Drucker – Prager και μη συνεταιριστικός νόμος πλαστικής ροής. Οι παράμετροι της θεωρίας της πλαστικότητας προσδιορίζονται από κλειστές αναλυτικές σχέσεις. Το προσομοίωμα παρέχει ικανοποιητική πρόβλεψη για σκυρόδεμα υπό ομοιόμορφη ελαστική περίσφιγξη από σύνθετα υλικά. Ικανοποιητική είναι επίσης η πρόβλεψη του προσομοιώματος για στοιχεία τετραγωνικής διατομής ωπλισμένα με χαλύβδινο οπλισμό ή/και εξωτερική περίσφιγξη με σύνθετα υλικά. Διερευνάται η συνεισφορά της εξωτερικής περίσφιγξης μανδύα ΙΩΠ στην αποτροπή του λυγισμού των θλιβόμενων ράβδων οπλισμού. Προκύπτει ότι ο μανδύας ΙΩΠ αποτρέπει αποτελεσματικά τον λυγισμό των διαμήκων ράβδων παρέχοντας τον απαιτούμενο πλευρικό περιορισμό τους.

Ευχαριστίες οφείλονται στην εταιρεία Sintecno AE για τη διάθεση των ινωπλισμένων πολυμερών καθώς και στη Σκαρλάτος AE για τη διάθεση του σκυροδέματος.

5 ΑΝΑΦΟΡΕΣ

ABAQUS / PRE. 1997. Users' manual. *Hibbit, Karlsson and Sorensen Inc.*

Campione G. & Miraglia N. 2003. Strength and Strain Capacities of Concrete Compression Members Reinforced with FRP. *Cement & Concrete Composites Journal, Elsevier*, 25. pp. 31-41.

Fam A.Z., Rizkalla S.H. 2001. Confinement model for axially loaded concrete confined by circular fiber-reinforced polymer tubes. *ACI Structural Journal*, Vol. 98, No. 4, July-August 2001, pp: 451-461.

Fujikake K., Mindess S., Xu H.F. 2004. Analytical model for concrete confined with fiber reinforced polymer composite. *ASCE, Journal of Composites for Construction*, 8 (4), Jul –Aug 2004: 341-351.

Karabinis A. I., Rousakis T.C. 2002. Concrete Confined by FRP Material: A Plasticity Approach. *Elsevier Engineering Structures Journal*, 24, 923-932.

Karabinis A.I., Rousakis T.C. 2003. Behaviour of Rectangular FRP Confined Concrete Elements Subjected to Monotonic and Cyclic Axial Compressive Load. *Fib 2003 Symposium 'Concrete Structures in Seismic Regions'*, 6-8 May 2003, Athens, pp: 372.

Mirmiran A., Zagers K., Yuan W. 2000. Nonlinear Finite Element Modeling of Concrete Confined by Fiber Composites, *Finite Elements In Analysis And Design Journal, Elsevier*, 35: 79-96.

Montoya E., Vecchio F. J., Sheikh S. A. 2004. Numerical evaluation of the behaviour of steel- and FRP-confined concrete columns using compression field modeling. *Elsevier, Engineering Structures*, Vol. 26, No. 11, September 2004, pp: 1535-1545.

Parvin A., Wang W. 2001. Behavior of FRP Jacketed Concrete Columns Under Eccentric Loading. *Journal of Composites for Construction, ASCE*, V. 5, No. 3: pp 146-152.

Shahawy M., Mirmiran A., Beitelman T. 2000. Tests and modeling of carbon-wrapped concrete columns. *Composites Part:B engineering*, 31: 471-480.

- Rochette P., Labossière P. 1996. A plasticity approach for concrete columns confined with composite materials. *2nd International Conference on Advanced Composite Materials in Bridges and Structures*, Montreal, Québec, Canada, pp. 359-366.
- Rochette P., Labossière P. 2000. Axial Testing of Rectangular Column Models Confined with Composites. *ASCE Journal of Composites for Construction*, V. 4, No. 3, August 2000. pp. 129-136.
- Karabinis A.I., Rousakis T.C. 2006. FRP Confining Effects on Steel Reinforced Concrete Square Sections Subjected to Axial Load. *2nd International fib Congress*, 5-8 June 2006, Naples, Italy, accepted for publication and oral presentation.
- Πουσακης Θ. 2005. Μηχανική συμπεριφορά σκυροδέματος περισφιγμένου με σύνθετα υλικά. Διδακτορική Διατριβή. *Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών ΔΠΘ*, Ξάνθη 2005.
- Rousakis, T., Tepfers, R. 2004. Behavior of concrete confined by high E-modulus carbon FRP sheets, subjected to monotonic and cyclic axial compressive load. *Nordic Concrete Research Journal*, Publication No. 31, (1), pp. 73-82.
- Saafi M., Toutanji H.A., Li Z. 1999. Behavior of Concrete Columns Confined with Fiber Reinforced Polymer Tubes. *ACI Materials Journal*, V. 96, No. 4, July – August 1999. pp. 500-509.
- Samaan M., Mirmiram A., Shahawy M. 1998. Model of Concrete Confined by Fiber Composites. *ASCE Journal of Structural Engineering*, V. 124, No 9, September 1998. pp. 1025-1031.
- Scherer J. 1999. S&P – Sintecno, FRP - Polymer fibers in strengthening, *User guide*, Brunnen.
- Spoelstra M. R., Monti G. 1999. FRP-Confined Concrete Model. *ASCE Journal of Composites for Construction*, V. 3, No. 3, August 1999. pp. 143-150.
- Wang Y.C. & Restrepo J.I. 2001. Investigation of Concentrically Loaded Reinforced Concrete Columns Confined with Glass Fiber-Reinforced Polymer Jackets. *ACI Structural Journal*, V. 98, No. 3, pp. 377-385.
- Yalcin C. & Saatcioglu M. 2000. Inelastic analysis of reinforced concrete columns. *Computers & Structures, Elsevier*, 77, pp. 539 – 555.