

Προσομοίωση με πεπερασμένα στοιχεία υποστυλωμάτων οπλισμένου σκυροδέματος τετραγωνικής διατομής σε αξονικό φορτίο περισφιγμένων με εξωτερική ελαστική ενίσχυση

Finite element modeling of reinforced concrete columns of
square section under axial load confined with external elastic
strengthening reinforcement

Θεοδώρα ΦΑΝΑΡΑΔΕΛΛΗ – ΜΑΡΙΟΛΑ¹, Θεόδωρος ΡΟΥΣΑΚΗΣ²

Λέξεις κλειδιά: Σύνθετα υφάσματα, σχοινιά, περίσφιγξη, πεπερασμένα στοιχεία
Keywords: Composite sheets, composite ropes, confinement, finite elements

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Διερευνάται αναλυτικά η συμπεριφορά μη κυκλικών υποστυλωμάτων οπλισμένου σκυροδέματος (με εσωτερικό χαλύβδινο διαμήκη οπλισμό και συνδετήρες) τα οποία είναι περισφιγμένα εξωτερικά με ελαστικό υλικό. Γίνονται προσομοιώσεις με τρισδιάστατα πεπερασμένα στοιχεία, υφιστάμενων υποστυλωμάτων τετραγωνικής διατομής με σκυρόδεμα χαμηλής αντοχής και ανεπαρκείς λεπτομέρειες όπλισης (αραιούς συνδετήρες, κίνδυνο λυγισμού διαμήκων ράβδων). Τα υποστύλωματα ενισχύονται εξωτερικά με σύνθετα υφάσματα γυαλιού ή σύνθετα σχοινιά πολυπροπυλενίου. Στην παρούσα εργασία εξετάζονται 3 χαρακτηριστικά προσομοιώματα υποστυλωμάτων και οι προβλέψεις τάσεων - ανηγμένων παραμορφώσεων που παρέχουν συγκρίνονται με τα αντίστοιχα πειραματικά αποτελέσματα.

ABSTRACT: The present analytical study concerns 3D finite element modelling of existing columns of low concrete strength externally strengthened with glass FRP sheet confinement or Ropes of Polypropylene. The columns under investigation are reinforced concrete ones of square section with side 150 mm and 750 mm height having low concrete strength and internal steel reinforcement of different quality (smooth S220 or ribbed B500C steel bars). Two columns were externally confined with ropes of polypropylene and one specimen was strengthened by glass FRP sheet. The analytical predictions of the models are compared with the experimental stress-strain curves.

¹ Υποψήφια Διδάκτορας, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης,
email: theofanar@gmail.com

² Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης,
email: trousak@civil.duth.gr

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

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). Εκτεταμένη πειραματική και αναλυτική έρευνα έχει γίνει μέχρι σήμερα σε υποστυλώματα σκυροδέματος κυκλικής και μη κυκλικής διατομής εξωτερικά περισφιγμένα με υφάσματα σύνθετων υλικών εμποτισμένων με ρητίνες (ινοπλισμένα πολυμερή, ΙΩΠ, FRP, Karabinis & Rousakis (2002), Karantzakis et al. (2005), Vintzileou & Panagiotidou (2008), Rousakis et al. (2007), Rousakis & Karabinis (2008), Rousakis & Karabinis (2012), Rousakis et al. (2012), Shehata et al. (2002), Wang & Hsu (2008), Wei & Wu (2012), De Luca et al. (2011) μεταξύ άλλων). Όμως, λιγότερες εργασίες εστιάζουν στην αποτίμηση της ικανότητας των υποστυλωμάτων υποκείμενα σε επαναλαμβανόμενο σεισμικό αξονικό φορτίο και παραμορφώσεις λαμβάνοντας υπόψη την επιρροή τόσο της εξωτερικής ενίσχυσης με σύνθετα υλικά όσο και του εσωτερικού διαμήκους οπλισμού (Vintzileou & Panagiotidou (2008), Rousakis et al. (2012), μεταξύ άλλων).

Πρόσφατα οι Jesus et al. (2018) αξιολογήσαν τις υφιστάμενες σχέσεις σχεδιασμού και τις ανέπτυξαν περαιτέρω ώστε να παρέχουν ακριβέστερη πρόβλεψη της καμπύλης τάσεων – ανηγμένων παραμορφώσεων τόσο για κυκλικά όσο και για τετραγωνικά υποστυλώματα ωπλισμένου σκυροδέματος περισφιγμένα με υφάσματα σύνθετων υλικών, υποκείμενα σε μονότονη αξονική φόρτιση.

Έχει παρατηρηθεί ότι η περισφιγξη με σύνθετα σχοινιά από ίνες πολυπροπυλενίου, βίνυλον, αραμιδίου, βασάλτη κλπ, ακόμη και χωρίς εμποτισμό με ρητίνες, μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική αύξηση τόσο της αντοχής σε αξονικό θλιπτικό φορτίο όσο και της αντίστοιχης ανηγμένης παραμόρφωσης (Rousakis (2013), Rousakis (2014), Rousakis (2016), Kwon et al. (2016)).

Η παρούσα αναλυτική εργασία αφορά τη μελέτη της συμπεριφοράς υφιστάμενων υποστυλωμάτων ωπλισμένου σκυροδέματος, με χαμηλής αντοχής σκυροδέμα, τα οποία είναι περισφιγμένα εξωτερικά με σύνθετα υφάσματα ή σύνθετα σχοινιά. Χρησιμοποιούνται τα πειραματικά αποτελέσματα από τρία χαρακτηριστικά υποστυλώματα τα οποία έχουν πραγματοποιηθεί στο Εργαστήριο Ωπλισμένου Σκυροδέματος του Δημοκριτείου Πανεπιστημίου Θράκης (Rousakis & Tourtouras (2014), Triantafyllou et al. (2014), Rousakis et al. (2015)). Τα υποστυλώματα ποικίλλουν ανάλογα με την αντοχή του σκυροδέματος, την ποιότητα των χαλύβδινων ράβδων και τα σύνθετα υλικά που χρησιμοποιούνται για την περισφιγξη. Οι αναλύσεις πραγματοποιούνται με το λογισμικό ANSYS.

ΒΑΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Στην εργασία των Φαναραδέλλη κ.ά. (2016) έχει γίνει εκτεταμένη έρευνα και συλλογή όλων των πειραματικών αποτελεσμάτων υποστυλωμάτων ωπλισμένου σκυροδέματος με τετράγωνη και ορθογωνική διατομή που είναι ενισχυμένα με

σύνθετα υλικά αλλά και με άλλες σύγχρονες τεχνικές, με ή χωρίς εσωτερικό χαλύβδινο οπλισμό, υποκείμενα σε μονότονο και επαναλαμβανόμενο σεισμικό αξονικό φορτίο και καταρτίστηκε μια βάση δεδομένων. Περιλαμβάνονται 58 πειραματικές εργασίες και συνολικά 786 πειράματα που έλαβαν χώρα από το 2001 έως το 2017. Για την επεξεργασία αυτής 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, αλλά και για την πρόβλεψη της τάσης και της ανηγμένης παραμόρφωσης στην αστοχία.

Για την πρόβλεψη των ανηγμένων παραμορφώσεων στη μέγιστη τιμή του φορτίου για δοκίμια με αύξουσα μετελαστική συμπεριφορά παρατηρείται μεγάλο μέσο απόλυτο σφάλμα και αποκλίσεις του λόγου αναλυτικής προς πειραματική τιμή από τη μονάδα, σε όλα τα αναλυτικά προσομοιώματα της εργασίας. Τα μικρότερα σφάλματα και την καλύτερη διασπορά τιμών για ολόκληρη τη βάση δεδομένων δίνουν τα προσομοιώματα των Shehata et al. (2002), με μέσο απόλυτο σφάλμα 74.8% και μέσο όρο λόγων 1.31, των Chaallal et al. (2003) με μέσο απόλυτο σφάλμα 75.4% και μέσο όρο λόγων 1.36 και των Cao et al. (2016) με μέσο απόλυτο σφάλμα 84.7% και μέσο όρο λόγων 1.35. Περισσότερες λεπτομέρειες μπορούν να αναζητηθούν στην εργασία Φαναραδέλλη κ.α. (2016).

Στη βάση πειραματικών αποτελεσμάτων των Fanaradelli et al. (2017) περιλαμβάνονται μόνο περισφιγμένα δοκίμια τετράγωνης και ορθογωνικής διατομής τα οποία υπόκεινται σε επαναλαμβανόμενη αξονική φόρτιση. Πιο συγκεκριμένα περιλαμβάνονται 11 πειραματικές εργασίες και συνολικά 125 πειράματα που έλαβαν χώρα από το 2007 έως το 2017. Για την επεξεργασία αυτής της βάσης χρησιμοποιήθηκαν μόνο τα προσομοιώματα που προτείνουν καμπύλες τάσεων – παραμορφώσεων με φθίνοντα μετελαστικό κλάδο και παρατηρείται μεγάλο μέσο απόλυτο σφάλμα και αποκλίσεις του λόγου αναλυτικής προς πειραματική τιμή από τη μονάδα. Τα μικρότερα σφάλματα και την καλύτερη διασπορά τιμών δίνουν τα προσομοιώματα των Wei and Wu (2012), με μέσο απόλυτο σφάλμα 39.5% και μέσο όρο λόγων 1.18 και των Hany et al. (2015) με μέσο απόλυτο σφάλμα 41.1% και μέσο όρο λόγων 1.20.

Πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι για αντισεισμικές ενισχύσεις το κρίσιμο ζητούμενο είναι η πρόβλεψη της πλαστιμότητας ανηγμένων παραμορφώσεων του περισφιγμένου σκυροδέματος που ορίζεται στην αστοχία τόσο για κρατυνόμενη όσο και για φθίνουσα μετελαστική συμπεριφορά τάσεων - ανηγμένων παραμορφώσεων. Επιπλέον, τα διαθέσιμα πειραματικά αποτελέσματα δείχνουν ότι στα υποστυλώματα ΩΣ φυσικής κλίμακας ενισχυμένα με FRP (De Luca et al. (2011) κλπ) η φθίνουσα μετελαστική συμπεριφορά είναι χαρακτηριστική. Επομένως, προκύπτει η ανάγκη για τη χρήση καταστατικών προσομοιωμάτων που να έχουν τη δυνατότητα να περιγράψουν την ενδεχόμενη φθίνουσα μετελαστική συμπεριφορά ώστε να εφαρμοστεί αξιόπιστο κριτήριο αστοχίας. Από την άλλη η τεχνική εξωτερικής ενίσχυσης με μη εμποτισμένα σύνθετα σχοινιά μπορεί να οδηγήσει σε πολύ υψηλή πλαστιμότητα ανηγμένων παραμορφώσεων

στο σκυρόδεμα ενώ παρατηρούνται φαινόμενα ανακατανομής των βλαβών εσωτερικά στον περισιγμένο πυρήνα σκυροδέματος (Rousakis (2016)).

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, τη συμπεριφορά των υλικών και την αλληλεπίδρασή τους στα κοινά τους σημεία ή επιφάνειες (Rousakis et al. (2007), Karabinis et al. (2008), Charalambidi et al. (2012), Triantafyllou et al. (2017)). Είναι δυνατή η διερεύνηση της επιρροής της μεταβολής παραμέτρων της μηχανικής συμπεριφοράς των υλικών ή δομικών στοιχείων σε μακροδομικό ή μικροδομικό επίπεδο ανάλογα με την διακριτοποίηση και τα προσομοιώματα υλικών τα οποία επιλέγονται. Παρακάτω παρουσιάζονται οι θεωρήσεις για τις ιδιότητες του σκυροδέματος, του χάλυβα και των σύνθετων υλικών. Η προσομοίωση γίνεται με το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ANSYS.

Το σκυρόδεμα προσομοιώνεται με τρισδιάστατο οκτακομβικό στοιχείο. Για την αναπαραγωγή της συμπεριφοράς του σκυροδέματος χρησιμοποιήθηκε το προσομοίωμα βασισμένο στη θεωρία της πλαστικότητας τύπου Drucker – Prager. Εκτός από το μέτρο ελαστικότητας και το λόγο Poisson, ορίζονται τρεις βασικές παράμετροι για το σκυρόδεμα: ο συντελεστής συνοχής, η γωνία εσωτερικής τριβής και ο συντελεστής διόγκωσης.

Για την προσομοίωση του χάλυβα χρησιμοποιείται γραμμικό στοιχείο (LINK element) θεωρώντας το υλικό με διαρροή. Η προσομοίωση του διαμήκους χάλυβα και των συνδετήρων έγινε θεωρώντας όριο διαρροής $f_y=500$ MPa και $f_y=220$ MPa αντίστοιχα. Το μέτρο ελαστικότητας του χάλυβα θεωρήθηκε ίσο με $E_s=200.000$ MPa με λόγο του Poisson $\nu=0,3$. Θεωρείται συμπεριφορά του υλικού τέλεια πλαστική.

Τέλος, για την προσομοίωση των σύνθετων σχοινιών και του υαλοϋφάσματος χρησιμοποιείται υλικό γραμμικά ελαστικό με ιδιότητες κατά τη διεύθυνση των ινών (εγκάρσια στον άξονα του υποστρώματος). Πιο συγκεκριμένα, για την προσομοίωση του σχοινιού πολυπροπυλενίου δόθηκε μέτρο ελαστικότητας $E_{pp}=2.000$ MPa, ενώ για το υαλοϋφασμα δόθηκε μέτρο ελαστικότητας $E_{gfr}=73.000$ MPa. Θεωρείται πλήρης συμβατότητα παραμορφώσεων μεταξύ σκυροδέματος και χάλυβα καθώς και μεταξύ σκυροδέματος και σύνθετου υλικού.

Για την ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία ακολουθήθηκε η παρακάτω διαδικασία:

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

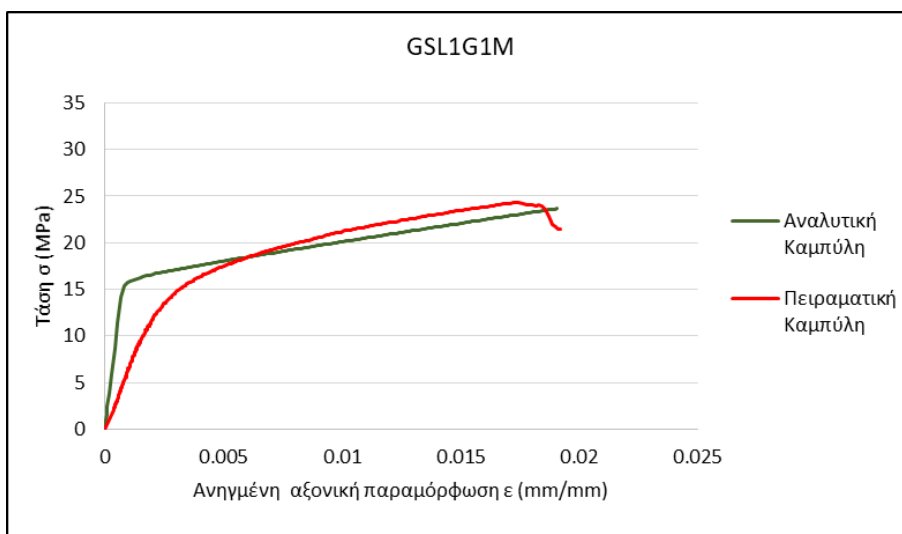
- Καθορίζεται ο τύπος της διακριτοποίησης του στοιχείου καθώς και η πυκνότητα της διακριτοποίησης. Η διακριτοποίηση των στοιχείων επιδιώχθηκε να είναι όσο το δυνατόν πιο απλή με ταύτιση των κόμβων των στοιχείων οι οποίοι είναι σε επαφή έτσι ώστε να αποφευχθούν προβλήματα σύγκλισης κατά την ανάλυση.
- 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.
- Επιλέγονται οι συνοριακές συνθήκες του υπό μελέτη στοιχείου. Το δοκίμιο δεσμεύτηκε κατάλληλα στις εξωτερικές του στηρίξεις ώστε να είναι ελεύθερη η κίνησή του κατά την κατακόρυφη διεύθυνση δηλαδή του άξονα επιβολής του φορτίου και να είναι δυνατή η εγκάρσια παραμόρφωσή του.

ΑΝΑΛΥΤΙΚΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

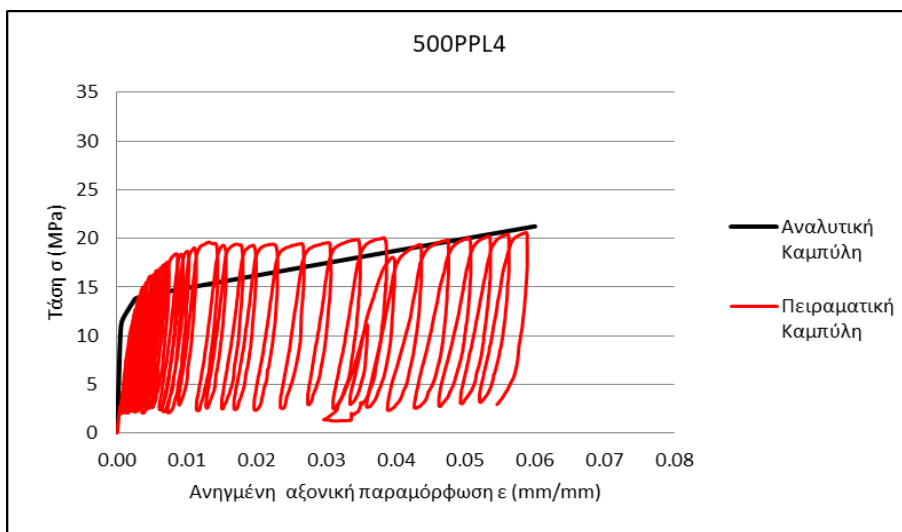
Προσομοιώθηκαν 3 δοκίμια με διαστάσεις 150mm x 150 mm και ύψος 750 mm. Τα υποστύλωμα 500PPL4 και RCPPL4 έχουν εσωτερικό διαμήκη χαλύβδινο οπλισμό 4Φ8 ποιότητας B500C και συνδετήρες Φ5,5/100 mm ποιότητας S220. Το υποστύλωμα GSL1G1M έχει λείο διαμήκη χαλύβδινο οπλισμό 4Φ8 και συνδετήρες Φ5,5/100 mm ποιότητας S220. Το δοκίμιο 500PPL4 έχει σκυρόδεμα αντοχής 14.2 MPa, ακτίνα καμπυλότητας ακμών 11 mm και είναι περισφιγμένο εξωτερικά με 4 στρώσεις σχοινού πολυπροπυλενίου με συνολικό ισοδύναμο πάχος 2.12 mm. Το RCPPL4 έχει σκυρόδεμα αντοχής 19 MPa, ακτίνα ακμών καμπυλότητας 17 mm και είναι περισφιγμένο με 4 στρώσεις σχοινού πολυπροπυλενίου συνολικού ισοδύναμου πάχους 1.79 mm. Τέλος, το GSL1G1M έχει σκυρόδεμα αντοχής 14.2 MPa, είναι περισφιγμένο με 1 στρώση υαλοφάσματος και έχει ακτίνα καμπυλότητας 25 mm.

Στα σχήματα 1-3 παρουσιάζεται η σύγκριση της καμπύλης τάσεων – ανηγμένων αξονικών παραμορφώσεων της αναλυτικής πρόβλεψης και του πειραματικού αποτελέσματος για κάθε υποστύλωμα. Παρατηρείται ικανοποιητική συμφωνία μεταξύ του διαγράμματος τάσεων - παραμορφώσεων που προέκυψε από την ανάλυση με τρισδιάστατα πεπερασμένα στοιχεία και των αντίστοιχων πειραματικών τιμών του δοκιμίου. Διαφορά μεταξύ των καμπυλών παρατηρείται στον ελαστικό κλάδο του δοκιμίου. Η διαφορά οφείλεται κυρίως στις διαφορές μεταξύ των συνοριακών συνθηκών του πραγματικού δοκιμίου και του αναλυτικού και του υλικού επιπέδωσης των δύο επιφανειών φόρτισης στα υποστύλωμα κατά τα πειράματα. Το διάγραμμα των αναλυτικών τάσεων – αξονικών ανηγμένων παραμορφώσεων τερματίζεται στο σημείο της πειραματικής τιμής ανηγμένης παραμόρφωσης αστοχίας του υποστύλωματος.

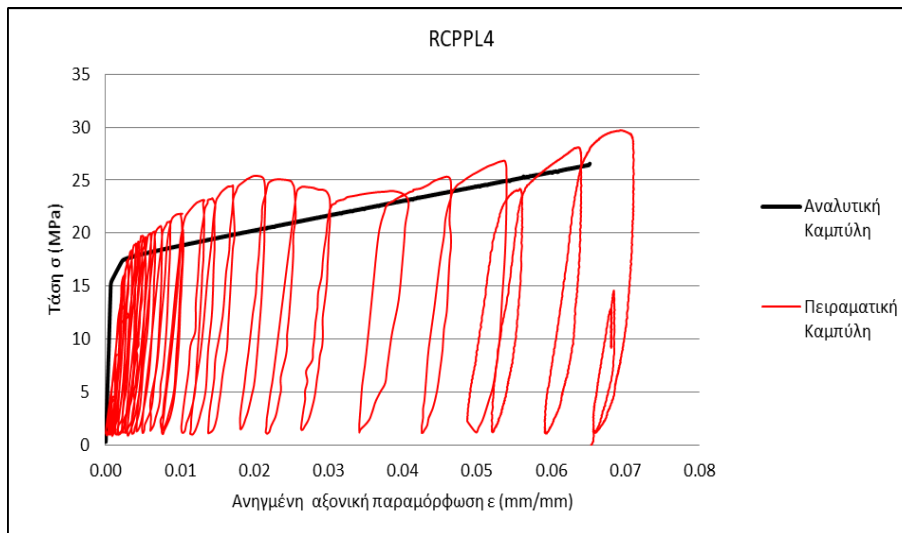
Στο σχήμα 4 παρουσιάζεται η κατανομή των θλιπτικών τάσεων του σκυροδέματος σε ολόκληρο το ύψος του υποστύλωματος GSL1G1M κατά την αστοχία του. Επίσης σημειώνεται μία τομή του σκυροδέματος στο μέσο του



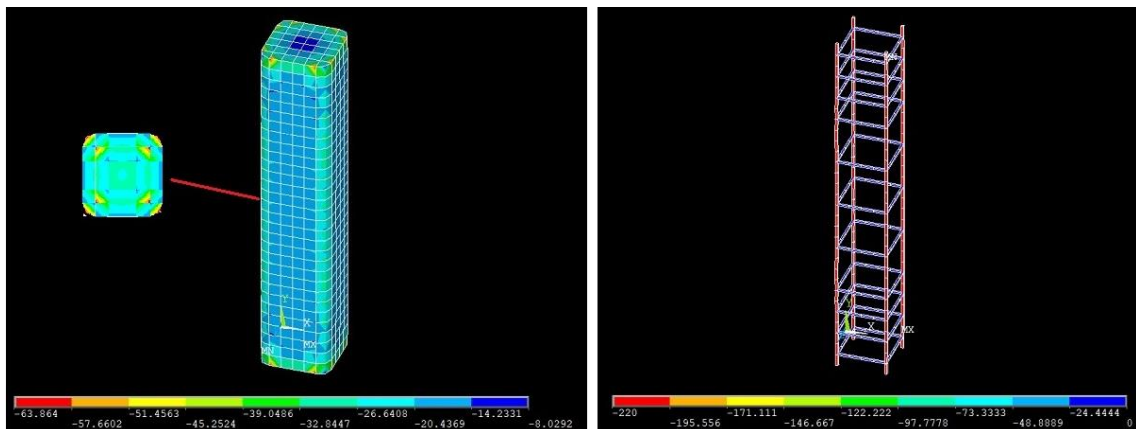
Σχήμα 1: Σύγκριση της καμπύλης τάσεων – ανηγμένων αξονικών παραμορφώσεων της αναλυτικής πρόβλεψης και πειραματικών αποτελεσμάτων για το δοκίμιο GSL1G1M ωπλισμένου σκυροδέματος αντοχής 14.2 MPa περισφιγμένο με 1 στρώση υαλοϋφάσματος



Σχήμα 2: Σύγκριση της καμπύλης τάσεων – ανηγμένων αξονικών παραμορφώσεων της αναλυτικής πρόβλεψης και πειραματικών αποτελεσμάτων για το δοκίμιο 500PPL4 ωπλισμένου σκυροδέματος αντοχής 14.2 MPa περισφιγμένο με 4 στρώσεις σχοινιών πολυπροπυλενίου

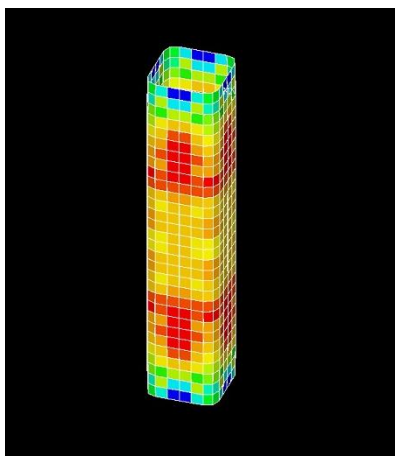


Σχήμα 3: Σύγκριση της καμπύλης τάσεων – ανηγμένων αξονικών παραμορφώσεων της αναλυτικής πρόβλεψης και πειραματικών αποτελεσμάτων για το δοκίμιο RCPPL4 ωπλισμένου σκυροδέματος αντοχής 19 MPa περισφιγμένο με 4 στρώσεις σχοινιών Πολυπροπυλενίου



Σχήμα 4: Διάγραμμα κύριων θλιπτικών τάσεων (3rd principal stress) του σκυροδέματος και του χαλύβδινου οπλισμού στην αστοχία του δοκιμίου GSL1G1M.

ύψους όπου περιλαμβάνεται ένας χαλύβδινος συνδετήρας. Παρατηρείται αύξηση των τάσεων στα σημεία όπου βρίσκεται ο χαλύβδινος οπλισμός αλλά και στις γωνίες του δοκιμίου. Στο σχήμα 5 παρατηρείται η κατανομή των τάσεων στο ύφασμα γυαλιού.



Σχήμα 5: Κατανομή κύριων εφελκυστικών τάσεων (1st principal stress) στο ύφασμα γυαλιού κατά την αστοχία του δοκιμίου GSL1G1M

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Χρησιμοποιούνται τρισδιάστατα πεπερασμένα στοιχεία για την αναλυτική πρόβλεψη της συμπεριφοράς υποστρωμάτων ωπλισμένου σκυροδέματος τετράγωνης διατομής με ύπαρξη εσωτερικών χαλύβδινων οπλισμών και περισφιγμένων εξωτερικά με ελαστικά υλικά (υφάσματα FRP ή σύνθετα σχοινιά). Η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων της ανάλυσης θεωρείται αρκετά ικανοποιητική ώστε να ακολουθήσουν προκαταρκτικές παραμετρικές αναλύσεις. Η αναλυτική διερεύνηση σημαντικών παραμέτρων θα επιτρέψει την πρόταση ακριβέστερων σχέσεων σχεδιασμού για την πρόβλεψη της πλαστιμότητας ανηγμένων θλιπτικών παραμορφώσεων του σκυροδέματος. Επιπλέον είναι αναγκαία η περαιτέρω ανάπτυξη των προσομοιωμάτων πεπερασμένων στοιχείων ώστε να είναι ευαίσθητα σε επιρροές ανακύκλισης και συσσώρευσης βλάβης τόσο στο σκυρόδεμα όσο και στο χάλυβα και στον μανδύα FRP για περιπτώσεις υβριδικών ενισχύσεων FRP και σύνθετων σχοινιών (βλέπε Rousakis (2013)).

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

Άρθρα σε επιστημονικά περιοδικά

Cao, Y.G., Wu, Y.F. & Li, X.Q., “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., “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

De Luca, A., Nardone, F., Matta, F., Nanni, A., Lignola, G. & Prota, A., "Structural Evaluation of Full-Scale FRP-Confined Reinforced Concrete Columns", *J. Compos. Constr.*, 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000152, 112-123

Hany, N.F., Hantouche, E.G. & Harajli, M.H., "Axial Stress-Strain Model of CFRP-Confined Concrete under Monotonic and Cyclic Loading", *Journal of Composites for Construction*, DOI: 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000557

Jesus, M., Lobo, P.S. & Faustino, P., "Design models of circular and square RC columns confined with GFRP sheets under axial compression", *Composites Part B* (2018), doi: 10.1016/j.compositesb.2017.12.043

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

Karabinis, A.I., Rousakis, T.C. & Manolitsi, G., "3D Finite Element Analysis of Substandard Columns Strengthened by Fiber Reinforced Polymer Sheets." *ASCE Journal of Composites for Construction*, (2008), Volume 12, Issue 5, pp. 531-540

Karantzikis, M., Papanicolaou, C.G., Antonopoulos, C.P. & Triantafyllou, T.C., "Experimental investigation of nonconventional confinement for concrete using FRP." *J Compos Constr* 2005;9(6):480e7

Kwon, M., Seo, H. & Kim, J., "Seismic performance of RC-column wrapped with Velcro." *Struct Eng Mech Int'l J* (2016);58(2)

Rousakis, T.C, Karabinis, A.I. & Kioussis P.D., "FRP-Confined Concrete Members: Axial Compression Experiments and Plasticity Modelling." *Elsevier, Engineering Structures Journal*. 2007, Vol 29, No 7, 1343-1353

Rousakis, T.C. & Karabinis, A.I., "Substandard Reinforced Concrete Members Subjected to Compression - FRP Confining Effects." *RILEM Materials and Structures*, Springer Netherlands, 15.01.2008, vol. 41, no. 9, pp. 1595-1611

Rousakis, T.C. & Karabinis, A.I., "Adequately FRP confined reinforced concrete columns under axial compressive monotonic or cyclic loading." *RILEM Materials and Structures*, Springer Netherlands, 2012;45(7) 957-975

Rousakis, T.C., Rakitzis, T.D. & Karabinis, A.I., "Design - Oriented Strength Model for FRP Confined Concrete Members." *ASCE Composites for Construction* 2012, 16(6), 615–625

Rousakis, T., "Hybrid Confinement of Concrete by FRP Sheets and Fiber Ropes Under Cyclic Axial Compressive Loading." *ASCE, J. Compos. Constr.*, 17(5), (2013), 732–743

Rousakis, T., "Elastic Fiber Ropes of Ultrahigh-Extension Capacity in Strengthening of Concrete Through Confinement." *J. Mater. Civ. Eng.*, 26(1), (2014), 34–44.

Rousakis, T.C. & Tourtouras, I.S., "RC Columns of Square Section – Passive and Active Confinement with Composite Ropes." *Elsevier, Journal of Composites Part B: Engineering*. Volume 58, March (2014), pages 573-581

Rousakis, T.C., "Reusable and recyclable nonbonded composite tapes and ropes for concrete columns confinement." *Elsevier, Journal of Composites Part B: Engineering* (2016), doi: 10.1016/j.compositesb.2016.08.003

Shehata, A.E.M., Carneiro, L.A.V. & Shehata, L.C.D., "Strength of short concrete columns confined with CFRP sheets", *Materials and Structures/Materiauxet Constructions*, Vol. 35, January-February 2002, pp 50-58

Triantafyllou, G.G., Rousakis, T.C. & Karabinis, A.I., “Axially Loaded Reinforced Concrete Columns with a Square Section Partially Confined by Light GFRP Straps”, *Journal of Composites for Construction*, ASCE, ISSN 1090-0268/04014035(15)

Triantafyllou, G.G., Rousakis, T.C. & Karabinis, A.I., Corroded RC beams patch repaired and strengthened in flexure with fiber-reinforced polymer laminates. Elsevier *Journal of Composites Part B: Engineering*, Volume 112, 1 March 2017, Pages 125-136

Vintzileou, E. & Panagiotidou, E., “An empirical model for predicting the mechanical properties of FRP-confined concrete”. *Construction and Building Materials*, 22 (5), p.841-854, May 2008

Wang, Y.C. & Hsu, K., “Design of FRP-wrapped reinforced concrete columns for enhancing axial load carrying capacity”. *Compos Struct* 82 (2008), pp. 132–139

Wei, Y.Y. & Wu, Y.F., “Unified stress–strain model of concrete for FRP-confined columns”, *Construction and Building Materials* 26 (2012) 381–392

Άρθρα σε διεθνή επιστημονικά συνέδρια (δημοσιευμένα σε πρακτικά)

Charalambidi, B.G., Rousakis, T.C. & Karabinis, A.I., “Finite element modeling of reinforced concrete columns seismically strengthened through partial FRP jacketing”, in *Proceedings of the 15 WCEE*, Lisboa, Portugal, 24-28 September 2012

Fanaradelli, T. & Rousakis, T., “Concrete Columns Under Repeated Axial Load Strengthened With Composites And Other Novel Techniques”, in *Proceedings of the ICCE 25*, Rome, Italy, 17-21 July 2017

Rousakis, T.C., Manolitsi, G. & Karabinis, A.I., “FRP Strengthening of RC Columns – Parametric Finite Element Analyses of Bar Quality Effect”, in *Proceedings of the Asia-Pacific Conference on FRP in Structures (APFIS 2007)*, 12-14 December 2007, HK

Rousakis, T.C., Panagiotakis, G., Kostopoulos, A. & Archontaki, E., “Experimental Testing of Prismatic Concrete Columns Confined by FRP and Composite Fiber Ropes”, in *Proceedings of the ICCE 23*, Chengdu, China, 12-18 July 2015

Φαναραδέλλη, Θ., Ρουσάκης, Θ. & Καραμπίνης, Α., «Υποστυλώματα Ωπλισμένου Σκυροδέματος Τετραγωνικής και Ορθογωνικής Διατομής Περισφιγμένα με Ινωπλισμένα Πολυμερή - Πρόβλεψη Αντοχής και Παραμόρφωσης Αστοχίας», στα *Πρακτικά του 17^{ου} Πανελληνίου Συνεδρίου Σκυροδέματος*, Θεσσαλονίκη, 10-12 Νοεμβρίου 2016