ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΔΟΜΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ Ο.Σ. ΜΕ ΠΛΑΣΤΙΜΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ

ΒΟΥΚΛΑΡΗ ΕΥΑΓΓΕΛΙΑ

Προπτυχιακή φοιτήτρια τμήματος Πολιτικών Μηχανικών ΔΠΘ, vouklarievaggelia@yahoo.com

ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΔΙΠΑΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Σκοπός αυτής της εργασίας είναι η διερεύνηση τσιμεντοειδών σύνθετων υλικών, που εν συντομία στην παρούσα διπλωματική αναφέρονται ως πλάστιμα σκυροδέματα, παρά το γεγονός ότι από την δομή απουσιάζουν αδρανή μέγιστης διαμέτρου άνω των 0.5mm. Εισήχθησαν ερευνητικά από το 1990 ως μηγανικά σχεδιασμένα στην μικροδομή σύνθετα τσιμεντοειδή (ECC, V. Li 1990). Τα υλικά αυτά εξετάζονται εδώ σε συνδυασμό με οπλισμούς από χάλυβα και ΙΟΠ στην κατασκευή καμπτόμενων και έκκεντρα θλιβόμενων δομικών στοιχείων. Η εξέταση αυτή πραγματοποιείται μέσω τεκμηρίωσης της μεθοδολογίας ανάλυσης που ακολουθείται βάσει σύγκρισης με δημοσιευμένα πειράματα σε καμπτικά στοιχεία οπλισμένου ECC με διαφορετικές κατά περίπτωση λεπτομέρειες όπλισης, είδη οπλισμών και στατικά συστήματα, τα οποία θα αναλυθούν παρακάτω. Μέσω της ανάλυσης και της πραγματοποιούμενης τεκμηρίωσης με πειραματικά δεδομένα, εζάγονται συμπεράσματα για την συμπεριφορά των οπλισμένων ECC δομικών μελών, ως προς την παραμορφωσιακή κατάσταση της κρίσιμης διατομής σε διακριτά παραμορφωσιακά στάδια των συμμετεχόντων υλικών. Όπου είναι δυνατόν (βάσει των διαθέσιμων πειραματικών δεδομένων) γίνεται και σύγκριση με αντίστοιγα δομικά στοιχεία οπλισμένου συμβατικού σκυροδέματος. Τα συμπεράσματα αναδεικνύουν το αν και κατά πόσο η χρήση του ECC υπερέχει έναντι συμβατικού σκυροδέματος, και μπορούν να αζιοποιηθούν όχι μόνο στον σχεδιασμό νέων δομικών στοιχείων κατασκευασμένων εξ ολοκλήρου από ECC, αλλά και σε τμηματική χρήση του πλάστιμου σκυροδέματος, όπως για παράδειγμα σε επισκευές.

1. ΔΙΑΡΘΡΩΣΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Για το πρώτο πείραμα, το στατικό σύστημα που επιλέχθηκε από τη διεθνή βιβλιογραφία είναι δοκός σε κάμψη τεσσάρων σημείων. Η δοκός κατά περίπτωση οπλίζεται με διαφορετικής διαμέτρου ράβδους ΙΟΠ, ή συμβατικού χάλυβα, και η μήτρα της διατομής παρασκευάζεται από πλάστιμο σκυρόδεμα, και για λόγους σύγκρισης, και από συμβατικό σκυρόδεμα...Πέραν των αναγκαίων συνδετήρων στα διατμητικά ανοίγματα, στο διάστημα σταθερής ροπής απουσιάζει οιαδήποτε περίσφιξη της θλιβόμενης ζώνης. Το δεύτερο πείραμα είχε ως στατικό σύστημα τον πρόβολο, υπό πλευρική εναλλασσόμενη φόρτιση στο ελεύθερο άκρο του. Παράλληλα στο ίδιο στατικό σύστημα εξετάζεται επιπλέον και η επιρροή σταθερού θλιπτικού φορτίου. Το δοκίμιο είναι κατασκευασμένο από πλάστιμο σκυρόδεμα και φέρει όπλιση χάλυβα με νευρώσεις, χωρίς όμως συνδετήρες. Για το τρίτο πείραμα εξετάστηκε στατικό σύστημα υποστυλώματος υπό έκκεντρη θλιπτική φόρτιση. Τα δοκίμια είναι κατασκευασμένα από πλάστιμο σκυρόδεμα ή συμβατικό σκυρόδεμα και οπλίζονται κατά περίπτωση με διαφορετικής διαμέτρου ράβδους χάλυβα. Οι διατομές είναι περισφιγμένες με συνδετήρες. Η επιρροή διαφορετικών παραμέτρων, όπως το ποσοστό διαμήκους οπλισμού και η εκκεντρότητα φόρτισης, αξιολογήθηκαν συγκριτικά ως προς το είδος σκυροδέματος (πλάστιμο ή συμβατικό).

2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

Ως πλάστιμο σκυρόδεμα ορίζεται σύνθετο τσιμεντοειδές κονίαμα υψηλής ικανότητας παραμόρφωσης, η φιλοσοφία σχεδιασμού του οποίου αφορά μείξη ανόργανων υλικών παραπλήσιας λεπτότητας κόκκων (τσιμέντο, ιπτάμενη τέφρα, λεπτή άμμος) με μικρό υδατοτσιμεντο - συντελεστή σε συνδυασμό με υπερρευστοποιητή και υψηλό ογκομετρικό ποσοστό πλαστικών μικρο-ινών.

Ζητούμενο αυτής της ενέργειας είναι να παρασκευαστεί ένα σκυρόδεμα το οποίο θα καλύψει το κενό που παρουσίαζε το συμβατικό όσον αφορά την εφελκυστική απόκριση (αναβαθμισμένη αντοχή και αντίσταση σε ρηγμάτωση, δηλαδή μεγάλη ικανότητα παραμόρφωσης σε εφελκυσμό), και που αυτή

ήταν η κύρια αιτία μείωσης της αντοχής των δομικών στοιχείων σε βάθος χρόνου. Σε αυτή την προσπάθεια, η έρευνα έχει στραφεί τα τελευταία χρόνια (Victor Li 1998) σε αναβάθμιση της δομής του υλικού, συνδυάζοντας κόκκους ανόργανων υλικών ίδιας τάξης μεγέθους (τσιμέντο, ιπτάμενη τέφρα, λεπτή άμμος) με πλαστικές μικρο-ίνες υψηλού ογκομετρικού ποσοστού, δίνοντας τα σύνθετα τσιμεντοειδή, γνωστά διεθνώς ως Engineered Cementitious Composites. Αυτή η κλάση ινοπλισμένου σκυροδέματος διαθέτει μεγάλη πλαστιμότητα, και αναπτύχθηκε για εφαρμογές στον κατασκευαστικό τομέα.

Το ECC και το σκυρόδεμα έχουν κοντινό εύρος εφελκυστικής (4-6 MPa) και θλιπικής (30-80 MPa) αντοχής, ενώ παρουσιάζουν πολύ διαφορετική συμπεριφορά σε παραμόρφωση. Η μεγαλύτερη παραμόρφωση του πλάστιμου σκυροδέματος σε άμεσο εφελκυσμό οφείλεται στον έλεγχο του μηγανισμού συνάφειας ίνας – μήτρας που δημιουργεί ένα εκτενέστερο δίκτυο μικρορηγμάτωσης σε σχέση με αυτό του συμβατικού σκυροδέματος. Όσον αφορά το συμβατικό σκυρόδεμα, αστοχεί με ψαθυρό τρόπο μόλις φτάσει την εφελκυστική του αντοχή. Ωστόσο, για το ECC κάτω από αξονικό εφελκυσμό, μετά την πρώτη ρηγμάτωση, η ανάληψη αξονικού φορτίου συνεχίζει να αυξάνει με συμπεριφορά ψευδο - κράτυνσης συνοδευόμενη με πολλαπλές ρηγματώσεις κάθετα στην διεύθυνση εφελκυσμού. Η πολύ-ρηγμάτωση του υλικού ECC όταν φτάσει μία κορεσμένη κατάσταση πυκνής διάταξης (σταθεροποίηση ρηγμάτωσης), η οποία καθορίζεται από την τάση συνάφειας μεταξύ ινών – μήτρας και από την δυστένεια των δύο υλικών, σηματοδοτεί και την έναρξη αστοχίας με σταδιακή μείωση της αντοχής (mechanical softening) η οποία εντοπίζεται σε μία μεμονωμένη ρωγμή η οποία διευρύνεται περισσότερο από τις άλλες. Στη θλίψη, το ECC έχει παρόμοια αντοχή με το σκυρόδεμα, αλλά αυτή συμβαίνει σε μεγαλύτερη παραμόρφωση (πέραν του 0.002 που ισχύει για συμβατικό σκυρόδεμα) ενώ διαθέτει και πολύ μεγαλύτερη ενέργεια θραύσης (το εμβαδόν κάτω από την καμπύλη τάσης – παραμόρφωσης). Προηγούμενες μελέτες έχουν δείξει ότι, δεδομένων των συμβατικών παραμορφώσεων μεταξύ ECC και χάλυβα, η σχετική τους μετακίνηση (ολίσθηση) είναι ελεγχόμενη για μεγάλες τιμές παραμόρφωσης δηλώνοντας διατήρηση συνάφειας. Η αστοχία σε αυτές τις περιπτώσεις σηματοδοτήθηκε από θρυμματισμό ECC στην διεπιφάνεια, στο ύψος των νευρώσεων, δηλαδή με εξόλκευση. Καμπτικά στοιχεία παρουσιάζουν σημαντική αύξηση πλαστιμότητας, ανάληψης φορτίου, διατμητικης αντοχής αν το σκυρόδεμα αντικατασταθεί από ECC (F. Yuan, P. Pan, 2013)

Ο συνδυασμός πλάστιμων σκυροδεμάτων με χαλύβδινο οπλισμό αλλάζει την φιλοσοφία σχεδιασμού: επειδή υπάρχει συμβολή του σκυροδέματος στην ανάληψη εφελκυσμού (είτε λόγω κάμψης είτε λόγω διαγώνιου εφελκυσμού-διάτμηση) μειώνεται η γεωμετρία διατομής καθώς και η ισχύουσα απαίτηση για διαμήκη/διατμητικό οπλισμό (Zhang et al. 2015, Georgiou and Pantazopoulou 2017). Η ικανότητα εφελκυστικής παραμόρφωσης του πλάστιμου σκυροδέματος αποδίδεται επίσης σε υψηλή συνάφεια μεταξύ ράβδων και μήτρας προσομοιώνοντας συνθήκες καλά περισφιγμένης αγκύρωσης (Eleftheriou, Tastani, Pantazopoulou, 2017).

Η συνεργασία χάλυβα-ECC- (R/ECC) με πρισματικά δοκίμια σε άμεσο εφελκυσμό (Fischer and Li 2002) έδειξε ότι τα δύο υλικά αναπτύσσουν συμβατή παραμόρφωση ακόμη και σε ανελαστική απόκριση, ανακατανέμοντας επιτυχώς τις τάσεις σε όλο το δομικό στοιχείο και έτσι επιτυγχάνοντας κράτυνση του συστήματος πέρα της διαρροής του χάλυβα γεγονός που δηλώνει την επάρκεια – δυσθραυστότητα του μηχανισμού συνάφειας μεταξύ τους. Αυτό το χαρακτηριστικό κατά τους ερευνητές αναμένεται να ωφελήσει την καμπτική απόκριση δομικών στοιχείων, ειδικά κάτω από συνθήκες κυκλικής φόρτισης σε μεγάλες ανελαστικές παραμορφώσεις.

Η διάρρηξη του σκυροδέματος σε εφελκυσμό με την δημιουργία ρωγμών είναι επίσης ένα μεγάλο ζήτημα πτώσης της ανθεκτικότητα κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος. Αυτό το φαινόμενο οδηγεί σε σοβαρή διάβρωση οπλισμού στις κατασκευές, ειδικά σε παραθαλάσσια ή υψηλής χημικής συγκέντρωσης περιβάλλοντα. Μία πιθανή λύση στο ζήτημα της διάβρωσης είναι η αντικατάσταση του οπλισμού με ελαστικό οπλισμό ΙΟΠ. Παρ' όλα αυτά η εκτεταμένη χρήση του τελευταίου περιορίζεται λόγω το χαμηλού μέτρου ελαστικότητας των ΙΟΠ και την έλλειψη πλαστιμότητας. Ο οπλισμός ΙΟΠ είναι κατάλληλος για κατασκευές σκυροδέματος που εκτίθενται σε διαβρωτικά περιβάλλοντα.

Συμπεριφορά ΕCC σε θλίψη:

Το διάγραμμα του ECC σε θλίψη, ακολουθεί παραβολική σχέση τάσης – παραμόρφωσης, η οποία μπορεί να περιγραφεί ικανοποιητικά με την παραβολή του Hognestadt. Κατόπιν αυτού του σημείου, ξεκινά κατιών γραμμικός κλάδος της πλαστιμότητας που λήγει για τιμή πτώσης θλιπτικής αντοχής ίση με 50%. Από Georgiou-Pantazopoulou (2016), οι δύο περιγράφονται ως εξής:

for
$$\varepsilon_{c} < \varepsilon_{\infty}$$
 $\sigma_{c} = f_{c} \left[2 \frac{\varepsilon_{c}}{\varepsilon_{co}} - \left(\frac{\varepsilon_{c}}{\varepsilon_{\infty}} \right)^{2} \right]$
for $\varepsilon_{\infty} < \varepsilon_{c} < \varepsilon_{cu}$ $\sigma_{c} = f_{c} - (\varepsilon_{c} - \varepsilon_{\infty}) \cdot Z \ge (1 - j) \cdot f_{c}$

Παρατηρήθηκε ότι τη στιγμή της θραύσης το σκυρόδεμα έχει φτάσει στο μισό της μέγιστης αντοχής του, και έτσι στοιχειοθετήθηκε και το διάγραμμα θλιπτικής τάσης – παραμόρφωσης.



Σχ.1. Συμπεριφορά ΕCC υπό κεντρική θλίψη [4]

Συμπεριφορά συμβατικού σκυροδέματος σε θλίψη:

Ισχύει η ίδια εξίσωση μέχρι παραμόρφωση εu= 0.0035, όπου εco=0.002.



Σχ.2. Συμπεριφορά συμβατικού σκυροδέματος σε θλίψη [4]

Συμπεριφορά ΕСС σε εφελκυσμό:



Σχ.3. Συμπεριφορά του πλάστιμου σκυροδέματος ΕСС σε εφελκυσμό [4] Καταστατικές σχέσεις ράβδων οπλισμού :





Σχ.4. Συμπεριφορά χάλυβα σε εφελκυσμό [4]

Ο χάλυβας σε θλίψη ακολουθεί την ίδια μορφή με αυτήν σε εφελκυσμό, όμως η οριακή παραμόρφωση συγκρατείται στα επίπεδα θραύσης του συμβατικού σκυροδέματος, δηλ. εu=0,0035.

ΙΟΠ ράβδος σε εφελκυσμό :



3. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Προκειμένου να εκτιμηθεί η αντοχή και ο τρόπος αστοχίας των δοκιμίων των πειραμάτων που επιλέχθηκαν, αναπτύχθηκε μεθοδολογία, η οποία προγραμματίσθηκε σε φύλλο excel (spreadsheet). Σημειώνεται ότι η μεθοδολογία διαφοροποιήθηκε ανά πείραμα ώστε να ληφθούν υπόψη οι διαφορετικές λεπτομέρειες όπλισης (π.χ. παρουσία ή μη περίσφιγξης) και οι νόμοι τάσης – παραμόρφωσης των ράβδων (ελαστικές ΙΟΠ και ελαστοπλαστικός με κράτυνση χάλυβας). Για κάθε περίπτωση πειράματος ζητούμενο αποτελεί η εκτίμηση της παραμορφωσιακής κατάστασης των υλικών της κρίσιμης διατομής που συνάδει με την αντοχή του δοκιμίου και εξηγεί επαρκώς και τον παρατηρούμενο από τους ερευνητές τρόπο αστοχίας. Για την κάμψη υιοθετείται αναλυτικός υπολογισμός με διακριτοποίηση της διατομής σε στρώσεις. Στο κέντρο βάρους έκαστης στρώσης υπολογίζονται οι αναπτυσσόμενες τάσεις του πλάστιμου σκυροδέματος, περισφιγμένου (αν υπάρχουν συνδετήρες με τροποποίηση της καταστατικής σχέσης τάσης – παραμόρφωσης) ή απερίσφιγκτου (στην περιοχή της επικάλυψης), καθώς επίσης και οι αξονικές δυνάμεις που προκύπτουν και τα καμπτικά φορτία. Το ίδιο γίνεται και για τις στρώσεις που περιέχουν οπλισμό, ούτως ώστε να υπολογιστούν οι τάσεις του χάλυβα ή ΙΟΠ (αναλόγως τι έχει χρησιμοποιηθεί στο πείραμα) και οι αντίστοιχες αξονικές δυνάμεις και οι ροπές. Όλες οι αξονικές και οι ροπές συνυπολογίζονται στην ισορροπία της διατομής για συνδυασμούς παραμορφώσεων εφελκυόμενου οπλισμού εs1 και σκυροδέματος εc στην ακραία θλιβόμενη ίνα.

Η καμπτική ανάλυση εφαρμόσθηκε σε διακριτά στάδια, από τα οποία διέρχεται η διατομή κατά την αύξηση της φόρτισης (και άρα των παραμορφώσεων) μέχρι την αντοχή, η οποία πιστοποιείται από την οριακή παραμορφωσιακή κατάσταση του υλικού που καθίσταται κρίσιμο για την αμέσως επερχόμενη αστοχία.

Τα στάδια που ορίσθηκαν είναι:

- Η ρηγμάτωση της επικάλυψης του εφελκυόμενου οπλισμού
- Η παραμόρφωση ες της ακραίας θλιβόμενης ίνας ώστε ταυτόχρονα να συμβαίνει διαρροή του θλιβόμενου οπλισμού (συνθήκες αστάθειας λόγω λυγισμού, ειδικά αν δεν υπάρχουν συνδετήρες)
- Το στάδιο διαρροής του εφελκυόμενου οπλισμού (αν επρόκειτο για χάλυβα)
- Το στάδιο όπου η ες αντιστοιχεί στην αντοχή του ECC

 Το στάδιο θραύσης του εφελκυόμενου οπλισμού σε συνδυασμό με παραμόρφωση ECC που δεν μπορεί να αντιστοιχεί σε πτώση αντοχής του μεγαλύτερη του 50%.

Από τα ανωτέρω στάδια διαμορφώνεται το διάγραμμα ροπής – καμπυλότητας της κρίσιμης διατομής από όπου προκύπτει η κυρίαρχη μορφή αστοχίας του κάθε δομικού στοιχείου. Δηλαδή, ανάλογα το στατικό σύστημα, η ροπή αντοχής χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό π.χ. της επιβαλλόμενης τέμνουσας, η οποία συγκρίνεται με το φορτίο αστοχίας του πειράματος.

Στην καμτπική ανάλυση, οι παραμορφώσεις καθ' ύψους της διατομής συσχετίζονται με τάσεις βάσει του καταστατικού νόμου του ECC τόσο σε θλίψη όσο και σε εφελκυσμό. Στην συνέχεια περιγράφονται οι σχέσεις που υιοθετήθηκαν.

Εφαρμόζοντας μεθοδολογία ανάλυσης διατομής διακριτοποιημένης σε φέτες και με την υιοθέτηση των κατάλληλων εργαλείων – καταστατικών σχέσεων των υλικών, ζητούμενο αποτέλεσε η πρόβλεψη της πειραματικής συμπεριφοράς σε όρους αντοχής και παραμόρφωσης διατομής οπλισμένου ECC. Το αρχικό spreadsheet της εργασίας αναπτύχθηκε στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας καθώς και της μεταπτυχιακής διατριβής της Σ. Δολιανίτου (2006, 2007) υπό την επικούρηση της Σ. Ταστάνη και επίβλεψη της Σ. Πανταζοπούλου.

4. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΤΕΚΜΗΡΙΩΣΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ

Επιλέχθηκαν να μελετηθούν τρία πειράματα από τη διεθνή βιβλιογραφία:

Στο πρώτο πείραμα (F.Yuan, L. Pan, 2013) [1], μελετήθηκε αμφιέρειστη δοκός σε κάμψη τεσσάρων σημείων. Η μήτρα της δοκού ήταν κατασκευασμένη από πλάστιμο σκυρόδεμα στις δύο περιπτώσεις δοκιμίων, και στην τρίτη περίπτωση κατασκευασμένη από συμβατικό σκυρόδεμα χαμηλότερης θλιπτικής αντοχής. Τα δύο πρώτα δοκίμια διαφοροποιήθηκαν μεταξύ τους ως προς το ποσοστό όπλισης σε διαμήκη εφελκυόμενο οπλισμό. Οι εφελκυόμενες δοκοί διαμήκους όπλισης ήταν κατασκευασμένες από BFRP (κατά περίπτωση χρησιμοποιήθηκαν ράβδοι διαμήκους οπλισμού διαμέτρου Φ12 και Φ20) και οι θλιβόμενες από συμβατικό οπλισμό χάλυβα.



Σχ.6.Χαρακτηριστική λεπτομέρεια όπλισης της δοκού. Παρατηρείται απουσία συνδετήρων στο διάστημα σταθερής ροπής. [1]

Series	Specimen ID	Longitudinal reinforcement ratio (%)	Shear reinforcement (mm)	Matrix type
	BRE12	0.377	φ8@100	ECC
	BRE20	1.05	φ8@100	ECC
1	BRC20	1.05	φ8@100	Concrete

Table 2: Summary of specimen information

Σχ.7. Πίνακας λεπτομερειών όπλισης δοκιμίων πειράματος, όπου BRE12 δοκίμιο οπλισμένο με ράβδους BFRP διαμέτρου 12mm και μήτρας πλάστιμου σκυροδέματος ECC, BRE20 δοκίμιο

όμοιου υλικού κατασκευής μήτρας και διαμέτρου οπλισμού BFRP 20mm, ενώ BRC20 δοκίμιο μήτρας συμβατικού σκυροδέματος και οπλισμού ράβδων BFRP 20mm. [1]

Διεξήχθη αναλυτική διερεύνηση της διατομής ως προς την παραμορφωσιακή της κατάσταση για τα χαρακτηριστικά στάδια από τα οποία περνάει κατά τη διάρκεια της φόρτισης του στοιχείου. Τα χαρακτηριστικά σημεία είναι το σημείο στο οποίο ρηγματώνεται η επικάλυψη του εφελκυόμενου οπλισμού, το σημείο διαρροής του θλιβόμενου οπλισμού, το στάδιο αντοχής, καθώς και το στάδιο τελικής αστοχίας της διατομής, αν αυτή αναφερόταν από τους ερευνητές ότι συνέβαινε σε σημείο πέρα από το στάδιο της αντοχής. Για τα στάδια αυτά πραγματοποιούνταν ισορροπία διατομής, μέσω της μεθοδολογίας που προτάθηκε στο spreadsheet, και ευρίσκονταν τιμές παραμόρφωσης, τόσο για τον εφελκυόμενο και τον θλιβόμενο οπλισμό, όσο και για την ακραία θλιβόμενη ίνα. Βρέθηκαν επίσης τιμές καμπυλότητας διατομής, ύψους θλιβόμενης ζώνης αλλά και τιμές καμπτικής ροπής και θεωρητικώς επιβαλλόμενου διατμητικού φορτίου. Τα δύο τελευταία συγκρίνονταν κάθε

Σε περίπτωση χρήσης του πλάστιμου σκυροδέματος ECC σε συνδυασμό με όπλιση από ράβδους FRP, σε κυρίως καμπτόμενα στοιχεία (δοκούς) – όπως έγινε στο πρώτο πείραμα παρατηρήθηκε σημαντική βελτίωση της καμπτικής απόκρισης του δομικού στοιχείου, από την άποψη αντοχής, ικανότητας παραμόρφωσης, και κατανάλωσης ενέργειας. Δεδομένου ότι το πείραμα διεξήχθη για διαφορετικά ποσοστά όπλισης της διατομής, η ικανότητα παραμόρφωσης δοκού από ECC/FRP παρουσιάσθηκε μεγαλύτερη σε χαμηλότερο ποσοστό διαμήκους οπλισμού. Κατόπιν σύγκρισης δοκιμίου ECC/FRP με δοκίμιο συμβατικού σκυροδέματος και οπλισμού FRP, διαπιστώθηκε για άλλη μια φορά η μεγαλύτερη ικανότητα ανάληψης φορτίου με παράλληλη αύξηση της καμπυλότητας της διατομής στην περίπτωση χρήσης πλάστιμου σκυροδέματος.



Σχ.8. Σχέση θεωρητικώς επιβαλλόμενου φορτίου Ρ– αναπτυσσόμενης καμπυλότητας φ για τις περιπτώσεις των τριών δοκιμίων. Το διάγραμμα παράχθηκε στο πλαίσιο της διπλωματικής εργασίας.

Από τη συγκριτική αναλυτική μελέτη των τριών δοκιμίων μέσω της προτεινόμενης μεθοδολογίας, παρατηρήθηκε σημαντική διαφορά στις αναπτυσσόμενες καμπυλότητες μεταξύ των δοκιμίων από πλάστιμο σκυρόδεμα σε σχέση με το δοκίμιο συμβατικού σκυροδέματος, όπου στο τελευταίο (συμβατικού σκυροδέματος με όπλιση BFRP) παρατηρήθηκε μικρότερη ανάπτυξη καμπυλοτήτων διατομής. Σε περίπτωση κοινών λεπτομερειών όπλισης, η μήτρα πλάστιμου σκυροδέματος συνείσφερε σε μεγαλύτερη

ικανότητα ανάληψης φορτίου, σε σχέση με την περίπτωση μήτρας συμβατικού σκυροδέματος (χαμηλότερης ωστόσο θλιπτικής αντοχής). Για την περίπτωση διαφορετικών ποσοστών όπλισης, η ικανότητα παραμόρφωσης δοκού από ECC/FRP παρουσιάσθηκε μεγαλύτερη σε χαμηλότερο ποσοστό διαμήκους οπλισμού. Το συμπέρασμα που εξάχθηκε επίσης είναι ότι η αντικατάσταση συμβατικού σκυροδέματος με πλάστιμο σκυρόδεμα μπορεί να προσδώσει στο δομικό στοιχείο μεγαλύτερη παραμορφωσιμότητα (αναπτυσσόμενες καμπυλότητες διατομής) και μεγαλύτερη αντοχή (ικανότητα παράληψης φορτίου). Η χρήση του ECC επίσης διασφάλισε την καμπτική αστοχία του δοκιμίου και απέτρεψε την θραύση/εκτίναξη του σκυροδέματος στη θλιβόμενη ζώνη της διατομής.



Σχ.9. Μηχανισμός αστοχίας δοκιμίων πειράματος [1]

Τα πειραματικά αποτελέσματα σχετικώς με τον μηχανισμό αστοχίας έκαστου δοκιμίου επιβεβαιώθηκαν και από την προτεινόμενη μεθοδολογία ανάλυσης. Για παράδειγμα, το μέγιστο αναλυτικό φορτίο, που εκτιμήθηκε περίπου ίσο με το πειραματικό φορτίο αστοχίας για το δοκίμιο BRE20, σημειώθηκε στην οριακή τιμή παραμόρφωσης εcu= 0,0082 στην ακραία θλιβόμενη ίνα του πλάστιμου σκυροδέματος (αυτή η οριακή τιμή αντιστοιχεί σε 50% πτώση της θλιπτικής αντοχής). Αυτό επιβεβαιώνει την παρατήρηση των ερευνητών, ότι το σχετικό δοκίμιο αστόχησε με έντονη ρηγμάτωση της θλιβόμενης ζώνης. Σημειώνεται ότι η αναλυτική αντοχή του δοκιμίου σημειώθηκε σε πολύ μεγαλύτερη τιμή παραμόρφωσης της ακραίας θλιβόμενης ίνας, από αυτή που αντιστοιχεί στην αντοχή του πλάστιμου σκυροδέματος στην αντοχή του πλάστιμου σκυροδέματος στην αντοχή του πλάστιμου σημειώθηκε σε πολύ μεγαλύτερη τιμή παραμόρφωσης της ακραίας θλιβόμενης ίνας, από αυτή που αντιστοιχεί στην αντοχή του πλάστιμου σκυροδέματος στην αντοχή του πλάστιμου σκυροδέματος της αλιβόμενης ένας οθλησια το δοκίμιο αστόχησε στο συμπέρασμα ότι το δοκίμιο άγγιξε το στάδιο της αντοχής όταν πλέον όλη η θλιβόμενη επικάλυψη έφτασε στην αστοχία, ενώ παράλληλα ο θλιβόμενος οπλισμός είχε διαρρεύσει και ο εφελκυόμενος ήταν κάτω του ορίου της θραύσης του.



Σχ.10. Ενδεικτικό διάγραμμα καθ' ύψος της διατομής του δοκιμίου BRE20 που παρουσιάζει την κατανομή των τάσεων για το στάδιο της αντοχής. Το διάγραμμα παράχθηκε στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Κατά ανάλογο τρόπο επιβεβαιώθηκαν και οι πειραματικές παρατηρήσεις για το δοκίμιο BRE12 (υπο-οπλισμένο): κατά την ανάλυση ανέπτυξε λίγο μεγαλύτερο φορτίο αντοχής από το πειραματικό μέγεθος. Ωστόσο, στην τιμή στην οποία η ανάλυση έφτασε το στάδιο της αντοχής, το σκυρόδεμα της επικάλυψης είχε θραυθεί και η εφελκυόμενες ράβδοι έφτασαν σε παραμόρφωση κοντινή της τιμής θραύσης, επιβεβαιώνοντας την πειραματική συμπεριφορά.



Σχ.11. Ενδεικτικό διάγραμμα καθ' ύψος της διατομής του δοκιμίου BRE12 για το στάδιο της τελικής αντοχής. Το διάγραμμα παράχθηκε στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Στο δεύτερο πείραμα (Gregor Fischer -Victor C. Li, 2002)[2] εξετάσθηκε, εν αντιθέσει με το πρώτο πείραμα, μια διατομή σε μέγιστη ροπή παρουσία και τέμνουσας που στην μία περίπτωση υπήρχε και αξονικό φορτίο (δοκίμιο S3) ενώ στην άλλη όχι (δοκίμιο S4). Το στατικό σύστημα σε αυτή την περίπτωση ήταν καμπτικός πρόβολος, υπό εναλλασσόμενη διατμητική φόρτιση. Τα δοκίμια ήταν κατασκευασμένα από πλάστιμο σκυρόδεμα, οπλισμένα με διαμήκεις ράβδους χάλυβα χωρίς συνδετήρες. Η αστοχία, παρουσία ή όχι αξονικού φορτίου, επήλθε πλάστιμα σε μεγάλη αναπτυσσόμενη στροφή (άνω του 5%) με την βλάβη να κατανέμεται ομοιόμορφα καθ΄ όλο το διατμητικό άνοιγμα. Παρά την απουσία οπλισμού διάτμησης, η αντοχή θραύσης, η αναπτυσσόμενη στροφή, καθώς και ο ελεγχόμενος τρόπος αστοχίας κρίθηκαν ικανοποιητικά για απόκριση δομικού στοιχείου, και αυτό λόγω της λειτουργίας του ECC ως υλικό να αναπτύσσει λειτουργία περίσφιγξης στη διατομή, προβάλλοντας αντίσταση έναντι του θρυμματισμού της επικάλυψης του στοιχείου. Σε αντίθεση με καμπικό πρόβολο συμβατικού σκυροδέματος, σε αυτή την περίπτωση δοκιμίου, δεν αναμένονταν και τελικώς δεν εμφανίστηκαν διαμήκεις ρωγμές λόγω απόσχισης, λόγω της καλύτερης συνεργασίας και των συμβατών ανελαστικών

παραμορφώσεων μεταξύ ECC/ράβδων όπλισης. Παρατηρήθηκε επίσης μεγαλύτερο εύρος ανάπτυξης καμπτικών ρηγματώσεων, καλύτερη κατανομή τους από ότι σε συμβατικού σκυροδέματος στοιχείο, καθώς και καλύτερα κατανεμημένη καμπυλότητα στο μήκος του στοιχείου.



Specimens S-3, S-4

Σχ.13. Πειραματική διάταξη δοκιμίου. [2]



Σχ.14. Στάδιο τελικής αστοχίας για τα δοκίμια S3, S4. Παρατηρείται ο μηχανισμός ανάπτυξης βλαβών. [2]

Η αναλυτική προσέγγιση ήταν τέτοια, που εκτίμησε ότι, για παράδειγμα, στο στάδιο αστοχίας, το δοκίμιο S3 αστοχεί με διάρρηξη του διαμήκους οπλισμού. Σε αυτό το στάδιο το σκυρόδεμα έφτασε τη μέγιστη παραμόρφωση ίση με εc= 0,006 και η παραμόρφωση του εφελκυόμενου οπλισμού ήταν 0,024 (υπολειπόμενη της μέγιστης παραμόρφωσης του υλικού που είναι 0,12). Η παραμόρφωση του θλιβόμενου οπλισμού ήταν ίση με 0,00075. Το διατμητικό φορτίο σε αυτό το στάδιο για το δοκίμιο ήταν 15,02kN και η αναπτυσσόμενη ροπή 7,51kNm. Η μορφή αστοχίας για το δοκίμιο ήταν λόγω διάρρηξης του διαμήκους οπλισμού. Για την αστοχία του δοκιμίου S4, προέκυψε ότι, συνέβη λόγω λυγισμού του διαμήκους θλιβόμενου οπλισμού σε φορτίο 19kN. Αυτό στην ανάλυση επιβεβαιώθηκε με επιπλέον ανάλυση, προκειμένου να ξεπερασθεί το όριο διαρροής του θλιβόμενου οπλισμού. Κατά την ανάλυση αυτή, η οποία ήταν η τελευταία για τη μελέτη του δοκιμίου, η παραμόρφωση του θλιβόμενου οπλισμού είναι εs2=0.00205, και προέκυψε ότι ο λυγισμός αφορά παραμορφωσιακή κατάσταση διατομής με εc=0.0055 και εs1=-0.0143 σε φορτίο P=19.9kN, καμπτική ροπή ίση περίπου με 10kNm, και με την καμπυλότητα φ=0.0002328/mm. Το δοκίμιο S4, παρά την ύπαρξη αξονικού θλιπτικού φορτίου παρουσίασε μεγαλύτερη ικανότητα καμπτικής ροπής, σε μικρότερη καμπυλότητα διατομής. Το γεγονός ότι αστόχησε λόγω λυγισμού του θλιβόμενου οπλισμού αποτελεί έρεισμα για το γεγονός ότι απουσίαζε η παρουσία οπλισμού περίσφιγξης, και θα μπορούσε να αποτελέσει πεδίο περαιτέρω έρευνας. Ωστόσο η αστοχία συνέβη με ελεγχόμενο τρόπο και σε ικανοποιητικό ποσοστό στροφής, από άποψης απόκρισης σε πραγματικές κατασκευές.

Η διατμητική αντοχή του ECC καθαυτή παρέχει αρκετή αντοχή για τα στοιχεία. Επιπρόσθετος οπλισμός με συνδετήρες κρίθηκε περιττός για το δεδομένο ποσοστό όπλισης και αξονικό φορτίο. Επιπλέον, το ECC εξυπηρετεί και ως περίσφιγξη για το διαμήκη οπλισμό και εμποδίζει πρόωρη αστοχία του λόγω λυγισμού. Όσον αφορά τις βλάβες στα στοιχεία οπλισμένου ECC, κυριαρχεί η καμπτική ρηγμάτωση καθ' ύψους του προβόλου σε μεγάλες ανελαστικες παραμορφώσεις, με την συνάφεια μεταξύ οπλισμού – ECC να διατηρείται ισχυρή. Η συνεργιστική δράση μεταξύ οπλισμού και ECC οδηγεί σε βελτιωμένη απόδοση του στοιχείου συνολικά σε σχέση με το συμβατικό σκυρόδεμα.

Η παρουσία θλιπτικού αξονικού φορτίου οδηγεί σε εκετενέστερη καμπτική ρηγμάτωση πριν τη διαρροή, μεγαλύτερη βύθιση του δοκιμίου σε διαρροή, και αυξημένη αντοχή. Ωστόσο, είναι υπεύθυνη για έναρξη αστοχίας σε μικρότερη μετατόπιση λόγω θλιπτικής αστοχίας του ECC. Η απώλεια είναι ελεγχόμενη (καλή υστερητική συμπεριφορά), μέχρι την αστοχία λόγω λυγισμού του διαμήκους θλιβόμενου οπλισμού. Αν και είναι πιθανό αυτή η αστοχία να αποφευχθεί με χρήση συνδετήρων, ωστόσο το επίπεδο παραμόρφωσης στην αστοχία είναι υπερβολικό για πραγματικές καταστάσεις και επομένως, αυτό κρίνεται περιττό.



Δοκίμιο S3 (αστοχία από θραύση εφ. Οπλ.)



Σχ.15. Σύγκριση διαγραμμάτων τάσεων καθ' ύψος των διατομών των δοκιμίων S3 και S4 κατά το στάδιο της θραύσης τους. Τα διαγράμματα παράχθησαν στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας



Σχ.16. Συγκριτικό διάγραμμα κατανομής ροπής Μ – αναπτυσσόμενης καμπυλότητας φ. Το διάγραμμα παράχθηκε στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Στην περίπτωση του **τρίτου πειράματος** (Yuan, Chen, Zhou, Yang, 2014)[3], μελετάται υποστύλωμα σε έκκεντρη θλίψη (παρουσιάστηκαν σειρές δοκιμίων για δύο διαφορετικές εκκεντρότητες φόρτισης- 40mm και 120mm) από πλάστιμο σκυρόδεμα και οπλισμένο με συμβατικό οπλισμό χάλυβα, που φέρει περίσφιγξη λόγω πυκνής διάταξης συνδετήρων. Παρατηρείται ότι για μικρότερη εκκεντρότητα του επιβαλλόμενου φορτίου (40mm), αυξάνεται η ικανότητα ανάληψης αξονικού φορτίου από τη διατομή.



Σχ.17. Πειραματική διάταξη δοκιμίου. [3]

Για παράδειγμα, στην περίπτωση δοκιμίου E-12-40 (δηλαδή με όπλιση ράβδων διαμέτρου 12mm και 40mm θεωρητικής εκκεντρότητας φόρτισης) το θεωρητικώς αναλαμβανόμενο αξονικό φορτίο ήταν 1250kN, σε αντίθεση με την περίπτωση του δοκιμίου E-12-120 (δηλαδή με ίδιες λεπτομέρειες όπλισης με το προηγούμενο και με μεγαλύτερη εκκεντρότητα επιβαλλόμενου φορτίου) το αναλαμβανόμενο αξονικό φορτίο έφτασε έως τα 611kN. Το ίδιο συνέβη και για τις υπόλοιπες περιπτώσεις μελέτης δοκιμίων όμοιων λεπτομερειών όπλισης με διαφορετικές εκκεντρότητες στο αξονικό φορτίο.



Σχ.18. Ενδεικτικό διάγραμμα (περιβάλλουσας ροπών) για τη σχέση αξονικού φορτίου Ν συναρτήσει της καμπτικής ροπής Μ για τα δοκίμια με περίπτωση οπλισμού διαμέτρου 12mm. Το διάγραμμα παράχθηκε στο πλαίσιο της διπλωματικής εργασίας.

Επίσης τα δοκίμια από ECC παρουσίασαν πιο πλάστιμη συμπεριφορά από το δοκίμιο συμβατικού σκυροδέματος που εξετάσθηκε. Για τα διαφορετικά ποσοστά διαμήκους

οπλισμού που παρουσιάστηκαν από τους ερευνητές, παρατηρήθηκε ότι η αντοχή της διατομής αυξήθηκε με αύξηση του ποσοστού διαμήκους όπλισης. Για παράδειγμα στο E-12-40 (διαμήκης οπλισμός 12 mm, με θεωρητική εκκεντρότητα 40mm) το φορτίο αντοχής έφτασε όπως προαναφέρθηκε τα 1250kN. Για το δοκίμιο E-16-40 (διάμετρος οπλισμού 16mm, e= 40mm) το φορτίο αντοχής αγγίζει τα 1400kN, ενώ για το E-20-40 (διάμετρος οπλισμού 20mm, e=40mm) το αξονικό φορτίο αντοχής φτάνει σε τιμή N= 1600kN.



Σχ.19. Διαγράμματα N-M για τα δοκίμια οπλισμού 16mm για συμβατικό σκυρόδεμα και πλάστιμο σκυρόδεμα, όπως αυτά εξετάσθηκαν σύμφωνα με την προτεινόμενη μεθοδολογία. Το διάγραμμα παράχθηκε στο πλαίσιο της παρουσιαζόμενης διπλωματικής εργασίας.



Σχ.20. Παραβολή διαγραμμάτων Μ-φ για τα δοκίμια S3 και S4. Το διάγραμμα παράχθηκε στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Σημαντικό ρόλο έπαιξε επίσης ο λόγος της απόστασης των συνδετήρων κατά μήκος του στοιχείου προς τη διάμετρο οπλισμού (S/Db), κάτι το οποίο ωστόσο δεν εξετάσθηκε από τους ερευνητές. Η ανάλυση, η οποία αποσκοπούσε στην ανάπτυξη διαγραμμάτων αλληλεπίδρασης αξονικού φορτίου – καμπτικής ροπής των διατομών, έδειξε ότι η πειραματική αστοχία (ειδικά για τα δοκίμια με διαμέτρους ράβδων 12 και 16 mm, οπότε τα αντίστοιχα μεγέθη βήματος συνδετήρα/διάμετρο διαμήκους ράβδου ήταν μεγαλύτερα του 6 - S/Db =8.3 και 6.25, όπου S=100mm κοινό για όλα τα δοκίμια-) δεν εξάντλησε την αντοχή

και ικανότητα παραμόρφωσης του ECC, διότι ο λυγισμός των θλιβομένων ράβδων προηγήθηκε. Αυτό εξηγεί και την μορφή των σχετικών διαγραμμάτων αλληλεπίδρασης που προέκυψαν, η οποία αποκλίνει από τις συνήθεις που υπάρχουν στην βιβλιογραφία. Στην περίπτωση του δοκιμίου E-20-40/120 όμως (με S/Db=5, πολύ καλές συνθήκες στήριξης του θλιβόμενου οπλισμού) το αναλυτικό διάγραμμα N-M είχε τυπική μορφή.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Με αυτή την εργασία αποτιμήθηκε ποσοτικά η αύξηση της προκύπτουσας αντοχής σε διαφορετικά δομικά στοιχεία με την αντικατάσταση του συμβατικού σκυροδέματος με πλάστιμο σκυρόδεμα ECC, με χρήση της προτεινόμενης μεθοδολογίας που αναλύθηκε στο αντίστοιχο κεφάλαιο της εργασίας. Εκτιμήθηκε επίσης το ποσοστό μεταβολής της προκύπτουσας αντοχής δομικού στοιχείου στο οποίο έγινε χρήση πλάστιμου σκυροδέματος, όταν αυτό μεταβάλλει το ποσοστό όπλισής του, όπως επίσης κατά περίπτωση, όταν χρησιμοποιηθεί σε αυτό οπλισμός περίσφιγξης. Εκτιμήθηκε επίσης η μεταβολή στην προκύπτουσα αντοχή του εκάστοτε δοκιμίου σε ταυτόχρονη καμπτική και αξονική θλιπτική καταπόνηση, καθώς επίσης ο βαθμός επιρροής στην αντοχή του δοκιμίου της επιβολής αξονικού θλιπτικού φορτίου με εκκεντρότητα ως προς τον κεντροβαρικό άξονα του στοιχείου. Από τα αποτελέσματα που προέκυψαν αξιολογήθηκε η συμβολή τυχόν ύπαρξης οπλισμού περίσφιγξης σε δοκίμιο με υλικό μήτρας το πλάστιμο σκυρόδεμα ECC.

Συγκεκριμένα, κατά το πρώτο πείραμα, εξετάστηκε μία σειρά από δοκούς οπλισμένες με ράβδους FRP σε διαφορετικά ποσοστά όπλισης και υλικού μήτρας σκυροδέματος (πλάστιμου και μη), υπό συνθήκες κάμψης τεσσάρων σημείων. Για μία δοκό από σκυρόδεμα και όπλιση FRP, η αντικατάσταση του σκυροδέματος με ECC, μπορεί να βελτιώσει σημαντικά τα καμπτικά χαρακτηριστικά από άποψης αντοχής, ικανότητας παραμόρφωσης, και κατανάλωσης ενέργειας. Από την παρούσα ανάλυση, μέσω της σύγκρισης των δοκιμίων BRE20 και BRC20, φάνηκε ότι για μία δοκό με ακριβώς ίδιες λεπτομέρειες όπλισης, η ικανότητα ανάληψης φορτίου και η αντίστοιχη καμπυλότητα είναι μεγαλύτερη για την περίπτωση που θα χρησιμοποιηθεί πλάστιμο σκυρόδεμα. Τεκμηριώθηκε μέσω της μεθοδολογίας, η παρατήρηση των ερευνητών, ότι η αστοχία του δοκιμίου από πλάστιμο σκυρόδεμα είναι κυρίως καμπτική, ενώ στο δοκίμιο συμβατικού σκυροδέματος, παρατηρούνται διατμητικές ρηγματώσεις και παράλληλα εκτεταμένη θραύση της επικάλυψης του σκυροδέματος στη θλιβόμενη ζώνη.

Κατά το δεύτερο πείραμα εξετάστηκε η συμβολή αξονικού θλιπτικού φορτίου στην προκύπτυσα αντοχή του δοκιμίου, αλλά και η συμβολή της ύπραξης οπλισμού περίσφιγξης σε αυτό. Μετά την ανάλυση του πειράματος με την προτεινόμενη μεθοδολογία πραγματοποιήθηκε σύγκριση μεταξύ των δυο δοκιμίων μελέτης κατά το στάδιο της θραύσης. Υπενθυμίζεται ότι το πρώτο αστόχησε λόγω διάρρηξης του διαμήκους οπλισμού και το δεύτερο λόγω λυγισμού του θλιβόμενου οπλισμού. Το δοκίμιο S4, παρά την ύπαρξη αξονικού θλιπτικού φορτίου παρουσίασε μεγαλύτερη ικανότητα καμπτικής ροπής, σε μικρότερη καμπυλότητα διατομής. Το γεγονός ότι αστόχησε λόγω λυγισμού του θλιβόμενου οπλισμού αποτελεί έρεισμα για το γεγονός ότι απουσίαζε η παρουσία οπλισμού περίσφιγξης, και θα μπορούσε να αποτελέσει πεδίο περαιτέρω έρευνας. Ωστόσο η αστοχία συνέβη με ελεγχόμενο τρόπο και σε ικανοποιητικό ποσοστό στροφής, από άποψης απόκρισης σε πραγματικές κατασκευές.

Κατά το τρίτο πείραμα, εξετάστηκε η επιρροή της εκκεντρότητας στη θέση επιβολής αξονικού θλιπτικού φορτίου στο δοκίμιο. Στην περίπτωση της εκκεντρότητας των 40mm, στα δοκίμια με μικρότερες διατομές οπλισμού – δηλαδή Φ12 και Φ16- δεν παρατηρήθηκε διαρροή του εφελκυόμενου οπλισμού, όπως επίσης το σκυρόδεμα απλώς ρηγματώθηκε αλλά δεν πλησίασε την αντοχή. Το δοκίμιο με τον οπλισμό Φ20 αντιθέτως, παρουσίασε παραμόρφωση που άγγιξε την μέγιστη αντοχή του σκυροδέματος, και ο οπλισμός διέρρευσε. Οι διατομές στην περίπτωση αυτή βρίσκονται όλες σε προέχουσα θλίψη. Όσον αφορά την εκκεντρότητα των 120 mm, ο οπλισμός δεν διαρρέει και το σκυρόδεμα απλώς ρηγματώνεται. Μόνη ίσως εξαίρεση αποτελεί και πάλι το δοκίμιο με ράβδους Φ20, στο οποίο πλησιάζεται περισσότερο η παραμόρφωση που αντιστοιχεί στη μέγιστη αντοχή, αλλά και πάλι όχι σε μεγάλο βαθμό. Οι διατομές σε αυτή την εκκεντρότητα κάμπτονται σε μεγαλύτερο βαθμό και ένα μέρος τους βρίσκεται σε θλίψη και το άλλο σε εφελκυσμό.

6. ΑΝΑΦΟΡΑ

Επιβλέπουσα καθηγήτρια : Σουσάνα Ταστάνη

7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] F.Yuan, L. Pan, «Experimental Study on flexural behaviors of Engineered Cementitious Composite Beams reinforced with FRP bars», 2013, Elsevier, Construction and Building Materials, 2002

[2] Gregor Fischer and Victor C. Li, «Effect of Matrix Ductility on Deformation Behavior of Steel- Reinforced ECC Flexural Members under Reversed Cyclic Loading Conditions», 2002
[3] Fang Yuan, Mengcheng Chen, Fengliu Zhou, Chao Yang, «Behaviors of steel-reinforced ECC columns under eccentric compression», Department of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, China, 2014

[4] Σ. Πανταζοπούλου, Εισαγωγή στο Σχεδιασμό Στοιχείων από Οπλισμένο Σκυρόδεμα έναντι οριακών καταστάσεων, 2001

[5] Eleftheriou T., Tastani S.P., Pantazopoulou S.J., "Development of reinforcing bars in SRCC matrix: modelling and interpretation", ASCE J. of Structural Engineering, 143(9), 2017

[6] Georgiou A.V., Pantazopoulou S.J., "Effect of fiber length and surface characteristics on the mechanical properties of cementitious composites". Elsevier, Construction and Building Materials, Vol. 125, 2016

[7] Georgiou A.V., Pantazopoulou S.J., «Behavior of Strain Hardening Cementitious Composites in Flexure/Shear». J. of Materials in Civil Engn, 2017.

[8] Goto, Y., "Cracks formed in Concrete around Deformed Tension Bars." J. Am Concr. Instit Proc, 1971

[9] Li, V.C., Mishra, D.K., Naaman, A.E., Wight, J.K., LaFave, J.M., Wu, H.C. and Inada, Y., «On the Shear Behavior Of Engineered Cementitious Composites», J. of Advanced Cement Based Materials, 1995

[10] Naaman, A. E., and Reinhardt, H. W., "Characterization of High Performance Fiber Reinforced Cement Composites-HPFRCC," Proceedings of High Performance Fiber Reinforced Cement Composites 2 (HPFRCC 2), 1995

[11] Naaman, A.E., and Reinhardt, H.W., Co-Editors, 'High Performance Fiber Reinforced Cement Composites – HPFRCC 4,' RILEM Proc., PRO 30, RILEM Publications, S.A.R.L., Cachan, France, 2003

[12] Naani, A., Flexural behavior and design of RC members using FRP reinforcement. J. Struct. Eng. 119(11):3344-3359, 1993

[13] T. Paulay ,M. Priestley, Seismic design of reinforced concrete and masonry buildings, Wiley Interscience Publication, 1992

[14] Tastani S.P., Konsta- Gdoutos M.S., Pantazopoulou S.J., Balopoulos V. "The effect of carbon nanotubes and polypropylene fibers on bond of reinforcing bars in strain resilient

cementitious composites", Springer Frontiers of Structural and Civil Engineering, 10(2): 214-223, 2016.

[15] Victori Li, From micromechanics to structural engineering-the design of cementitous composites for civil engineering applications, Elsevier, Engineering Structures, 1993.
[16] Zhang, R., Matsumoto, K., Hirata, T., Ishizeki, Y., Niwa, J. "Application of PP-ECC in beam–column joint connections of rigid-framed railway bridges to reduce transverse reinforcements". Elsevier, Engineering Structures, 2015.