

Χρήση Καουτσούκ από Ανακυκλωμένα Ελαστικά Αυτοκινήτων για τη Δημιουργία Σκυροδέματος Υψηλής Παραμορφωσιμότητας

Use of Waste Tyre Rubber for High-Deformability Concrete

Samar RAFFOUL¹, Reyes GARCIA², Λάμπρος ΚΟΥΤΑΣ³,
Σωτηρία ΑΘΑΝΑΣΟΠΟΥΛΟΥ⁴, Κύπρος ΠΗΛΑΚΟΥΤΑΣ⁵

Λέξεις κλειδιά: Καουτσούκ, Ανακυκλωμένα ελαστικά αυτοκινήτων, Ινοπλισμένα Πολυμερή, Υψηλή παραμορφωσιμότητα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Στην παρούσα εργασία διερευνάται πειραματικά η θλιπτική συμπεριφορά σκυροδέματος που περιέχει αδρανή από καουτσούκ, τα οποία προέρχονται από ανακυκλωμένα ελαστικά αυτοκινήτων, ως αντικατάσταση των φυσικών αδρανών, με σκοπό την αύξηση της ικανότητας θλιπτικής παραμόρφωσης. Το πειραματικό πρόγραμμα χωρίστηκε σε δύο μέρη. Στο πρώτο μέρος, εξετάστηκαν 13 μίγματα με διάφορα ποσοστά αντικατάστασης των φυσικών αδρανών. Το δεύτερο μέρος της μελέτης εστίασε στη συμπεριφορά του καλύτερου μίγματος από την πρώτη μελέτη, αλλά περισιφισμένου με μανδύες ινοπλισμένων πολυμερών (ΙΟΠ) αποτελούμενων από 2, 3 ή 4 στρώσεις υφασμάτων αραμιδίου ή άνθρακα. Όλα τα δοκίμια υποβλήθηκαν σε μονοτονική θλιπτική φόρτιση. Από τα αποτελέσματα προέκυψε ότι είναι εφικτή η δημιουργία σκυροδέματος υψηλής αντοχής έως και 95 MPa και πολύ υψηλής παραμορφωσιμότητας (έως και 6.4%), συνδυάζοντας τα πλεονεκτήματα από τη χρήση καουτσούκ και μανδύων ΙΟΠ.

ABSTRACT: This paper studies the use of waste tyre rubber in concrete to produce high-deformability elements. Focus is given on the compressive behaviour of both unconfined and FRP-confined rubberised concrete cylinders. The experimental

¹ PhD Candidate, Department of Civil & Structural Engineering, The University of Sheffield, email: s.raffoul@sheffield.ac.uk

² Post-Doctoral Research Associate, Department of Civil & Structural Engineering, The University of Sheffield, email: r.garcia@sheffield.ac.uk

³ Post-Doctoral Research Associate, Department of Civil & Structural Engineering, The University of Sheffield, email: koutasciv@gmail.com

⁴ Erasmus Intern, Department of Civil & Structural Engineering, The University of Sheffield, email: sotiria90@gmail.com; PhD Candidate, Dept. of Civil Engineering, University of Patras

⁵ Professor of Construction Innovation, Department of Civil & Structural Engineering, The University of Sheffield, email: k.pilakoutas@sheffield.ac.uk

program splits in two series. In the first series, 13 concrete mixes with various rubber contents were studied by compression tests on unconfined concrete cylinders. The second series investigated the compressive behaviour of FRP-confined concrete cylinders using the best mix among those tested in the first series. In total, 12 concrete cylinders confined with 2, 3 or 4 layers of aramid or carbon-FRP were tested. Overall, it was concluded that by combining the favourable properties of rubber particles and FRP jackets, high concrete strength up to 95 MPa with very high axial deformations (up to 6.4%) could be achieved.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η παγκόσμια παραγωγή ελαστικών αυτοκινήτων προβλέπεται ότι θα έχει ξεπεράσει τις 2.9 δισεκατομμύρια μονάδες έως το τέλος του 2017 (Business, 2014) και εκτιμάται ότι σε κάθε ελαστικό που βγαίνει στην αγορά, αντιστοιχεί ένα ελαστικό που ολοκληρώνει τον πρώτο κύκλο ζωής του. Με 300 εκατομμύρια ελαστικά ανά χρόνο να ολοκληρώνουν τον πρώτο κύκλο ζωής τους μόνο στις χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης (Ε.Ε.), και τις οδηγίες της Ε.Ε. να γίνονται ολοένα πιο αυστηρές σχετικά με την τελική διάθεση των μεταχειρισμένων ελαστικών σε χώρους υγειονομικής ταφής (Ε.Ε. 98/2008), η εύρεση εναλλακτικών τρόπων διαχείρισής τους είναι ιδιαίτερα κρίσιμη.

Η παρούσα μελέτη αποτελεί κομμάτι του ερευνητικού προγράμματος “Anagennisi” (www.anagennisi.org), χρηματοδοτούμενο από την Ευρωπαϊκή Ένωση (στο πλαίσιο της δράσης FP7), το οποίο διερευνά την επανάχρηση όλων των υλικών που προέρχονται από την ανακύκλωση ελαστικών αυτοκινήτων.

Στο άρθρο αυτό, διερευνάται η δυνατότητα χρήσης του καουτσούκ που προέρχεται από τα ανακυκλωμένα λάστιχα για την παραγωγή σκυροδέματος με υψηλή ικανότητα παραμόρφωσης, με τελικό στόχο τη χρήση σε εφαρμογές με ειδικές απαιτήσεις (π.χ. κόμβοι σε υποστυλώματα κτιρίων ή βάθρα γεφυρών, δοκοί σύζευξης τοιχωμάτων). Το πειραματικό πρόγραμμα που χωρίζεται σε δύο μέρη, βασίζεται στη θλιπτική δοκιμή κυλινδρικών δοκιμίων σκυροδέματος. Στο πρώτο μέρος της μελέτης εξετάστηκαν συνολικά 52 απερίσφιγκτα δοκίμια, με κύρια παράμετρο το ποσοστό αντικατάστασης των συμβατικών αδρανών με καουτσούκ. Το δεύτερο μέρος της μελέτης εστίασε στη συμπεριφορά του καλύτερου μίγματος από το πρώτο μέρος, αλλά περισφιγμένου με μανδύες ινοπλισμένων πολυμερών (ΙΟΠ). Συνολικά δοκιμάστηκαν 12 κυλινδρικά δοκίμια σκυροδέματος, περισφιγμένα με 2, 3 ή 4 στρώσεις ΙΟΠ αραμιδίου ή ΙΟΠ άνθρακα, τα οποία υποβλήθηκαν σε μονοτονική θλιπτική φόρτιση.

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ

Δοκίμια και παράμετροι διερεύνησης

Στο πρώτο μέρος του πειραματικού προγράμματος εξετάστηκε η θλιπτική συμπεριφορά απερίσφιγκτου σκυροδέματος που περιέχει αδρανή από καουτσούκ (rubberised concrete, RuC). Συνολικά παρασκευάστηκαν και δοκιμάστηκαν 52 κυλινδρικά δοκίμια (ύψους 200 mm και διαμέτρου 100 mm), με βάση 13 διαφορετικά μίγματα (4 δοκίμια ανά μίγμα). Επιλέχθηκε η αντικατάσταση είτε των α) μόνο λεπτόκοκκων αδρανών (άμμος) σε ποσοστά 10, 20, 40, 60 και 100% κατ' όγκον (δοκίμια 10FR, 20FR, κ.ο.κ), β) μόνο χονδρόκοκκων (γαρμπίλι) σε ποσοστά 10, 20, 40, 60 ή 100% κατ' όγκον (δοκίμια 10CR, 20CR, κ.ο.κ) και γ) λεπτόκοκκων και χονδρόκοκκων αδρανών σε ποσοστά 40% και 60% κατ' όγκον (δοκίμια 40FR40CR και 60FR60CR).

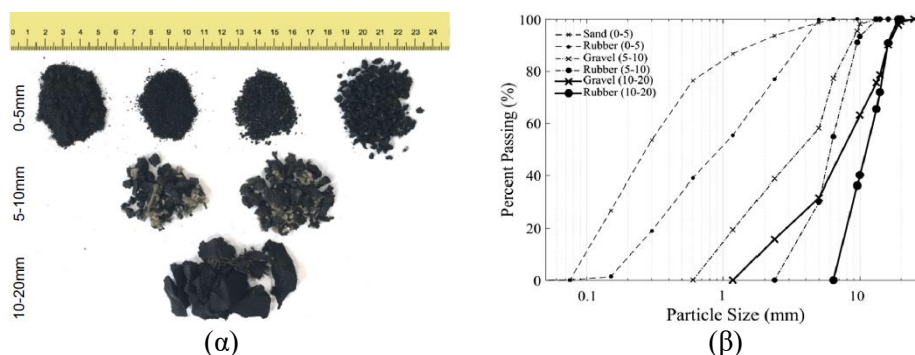
Στο δεύτερο μέρος, εξετάστηκε κατά πόσο η εξωτερική περίσφιγξη μπορεί να καθυστερήσει τη ρηγμάτωση και να περιορίσει την απομείωση της αντοχής του σκυροδέματος λόγω της χρήσης αδρανών από καουτσούκ. Στοχεύοντας σε υψηλές τιμές αξονικής παραμόρφωσης του περισφιγμένου σκυροδέματος με αδρανή από καουτσούκ (confined rubberised concrete, CRuC), επιλέχθηκε προς διερεύνηση το μίγμα 60FR60CR της πρώτης σειράς δοκιμών. Ο λόγος της επιλογής ήταν η πολύ υψηλή ικανότητα πλευρικής παραμόρφωσης του συγκεκριμένου μίγματος, η οποία θα βοηθούσε στην καλύτερη ενεργοποίηση του εξωτερικού μανδύα περίσφιγξης. Η θλιπτική συμπεριφορά του CRuC εξετάστηκε πειραματικά μέσω δοκιμών μονοτονικής φόρτισης σε 12 κυλινδρικά δοκίμια. Οι κύλινδροι είχαν τις ίδιες διαστάσεις με τα δοκίμια του πρώτου μέρους (ύψος 200 mm και διάμετρος 100 mm) και περισφίχθηκαν με 2, 3 ή 4 στρώσεις από ΙΟΠ από ίνες αραμιδίου (δοκίμια 2LA-M, 3LA-M και 4LA-M) ή ΙΟΠ από ίνες άνθρακα (δοκίμια 2LC-M, 3LC-M και 4LC-M).

Υλικά και προετοιμασία δοκιμών

Στον Πίνακα 1 παρουσιάζεται η σύνθεση σκυροδέματος που χρησιμοποιήθηκε ως βάση όλων των μιγμάτων (Raffoul et al., 2016). Οι κόκκοι καουτσούκ που χρησιμοποιήθηκαν για την αντικατάσταση των λεπτόκοκκων ή/και χονδρόκοκκων φυσικών αδρανών, απεικονίζονται στο Σχήμα 1α, ενώ η κοκκομετρική τους διαβάθμιση σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C136 (2006) παρουσιάζεται στο Σχήμα 1β, και συγκρίνεται με αυτήν των φυσικών αδρανών.

Πίνακας 1 Σύνθεση σκυροδέματος

Υλικό	Ποσότητα
Τσιμέντο CEM II – 52.5N	340 kg/m ³
Πυριτική παιπάλη (SF)	42.5 kg/m ³
Ιπτάμενη τέφρα (PFA)	42.5 kg/m ³
Φυσικά αδρανή 0-5mm	820 kg/m ³
Φυσικά αδρανή 5-10mm	364 kg/m ³
Φυσικά αδρανή 10-20mm	637 kg/m ³
Νερό	150 l/m ³
Ρευστοποιητής (P)	2.5 l/m ³
Υπερρευστοποιητής (SP)	5.1 l/m ³



Σχήμα 1. (α) Κόκκοι καουτσούκ για την αντικατάσταση άμμου (διάμετρος: 0-5 mm) και γαρμπιλιού (διάμετροι 5-10 mm και 10-20 mm), και (β) κοκκομετρική διαβάθμιση καουτσούκ και φυσικών αδρανών (Raffoul et al. 2017).

Για την παραγωγή του σκυροδέματος ακολουθήθηκε η παρακάτω διαδικασία: α) πραγματοποιήθηκε ξηρή ανάμιξη των φυσικών αδρανών με τους κόκκους καουτσούκ για 30 δευτερόλεπτα, 2) προστέθηκε το μισό της συνολικής ποσότητας του νερού και ακολούθησε ανάμιξη για ένα λεπτό, 3) το μίγμα αφαιρέθηκε σε κατάσταση ηρεμίας για 3 λεπτά επιτρέποντας τον κορεσμό των αδρανών, 4) προστέθηκε το τσιμέντο (με τα τσιμεντοειδή υλικά) καθώς και η υπόλοιπη ποσότητα του νερού και ακολούθησε ανάμιξη για ακόμα 3 λεπτά. Τα κυλινδρικά δοκίμια σκυροδετήθηκαν σε δύο στρώσεις και δονήθηκαν για 20 δευτερόλεπτα ανά στρώση. Τα δοκίμια συντηρήθηκαν σε συνθήκες εργαστηρίου μέχρι την αφαίρεση των καλουπιών (48 ώρες μετά τη σκυροδέτηση).

Μετά την αφαίρεση των καλουπιών, τα δοκίμια του πρώτου μέρους του πειραματικού προγράμματος συντηρήθηκαν σε συνθήκες δωματίου για 4 ημέρες. Η κορυφή και η βάση αυτών των δοκιμίων περισφίχθηκαν με υψηλής αντοχής και

υψηλής παραμορφωσιμότητας προεντεταμένα μεταλλικά ελάσματα (post-tensioned metal straps, Garcia et al. 2015) πάχους 0.8 mm και πλάτους 13 mm για την αποφυγή πρόωρης αστοχίας του σκυροδέματος λόγω συγκέντρωσης τάσεων κατά τη διάρκεια της πειραματικής δοκιμής. Τα δοκίμια από το πρώτο μέρος εξετάστηκαν σε ηλικία 7 ημερών.

Τα δοκίμια του δεύτερου μέρους του πειραματικού προγράμματος εξετάστηκαν σε ηλικία 28 ημερών, κι ως εκ τούτου, μετά την αφαίρεση των καλουπιών συντηρήθηκαν σε συνθήκες δωματίου για διάστημα 25 ημερών. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την εφαρμογή περίσφιγξης ήταν μία τυπική διαδικασία υγρής εφαρμογής. Το συνολικό ύψος των υφασμάτων που χρησιμοποιήθηκαν ήταν 180 mm (δηλ. η περιοχή σε απόσταση 10 mm από την κορυφή και από τη βάση των κυλίνδρων παρέμεινε απερίσφιγκτη για να την αποφυγή απευθείας επαφής των πλακών της μηχανής φόρτισης με τον μανδύα ΙΟΠ). Υιοθετήθηκε μήκος υπερκάλυψης της τελευταίας στρώσης ΙΟΠ ίσο με 100 mm. Η κορυφή και η βάση όλων των δοκιμίων είχαν περισφιχθεί χρησιμοποιώντας θήκες αλουμινίου με σκοπό την αποφυγή πρόωρης αστοχίας του σκυροδέματος.

Ο Πίνακας 2 παρουσιάζει τις μηχανικές και φυσικές ιδιότητες των υφασμάτων από ίνες αραμιδίου και ίνες άνθρακα μίας διεύθυνσης, που χρησιμοποιήθηκαν για την εξωτερική περίσφιγξη (τιμές όπως δίνονται από τους κατασκευαστές, Weber και FYFE, αντίστοιχα). Ως μήτρα του σύνθετου υλικού, χρησιμοποιήθηκε μία χαμηλού ιξώδους, δύο συστατικών εποξειδική ρητίνη (Tyfo® S Epoxy).

Πίνακας 2. Ιδιότητες υφασμάτων ινών αραμιδίου και άνθρακα

Ιδιότητες	Υφασμα	Υφασμα
	Αραμιδίου	Άνθρακα
	S&P A120/290	Tyfo® SCH-41.5X Composite
Μέση εφελκυστική αντοχή (MPa)	2400	4140
Μέσο μέτρο ελαστικότητας (GPa)	116	241
Μέση ικανότητα παραμόρφωσης (%)	2.10	1.70
Πάχος (mm)	0.290	0.185

Οι βασικές μηχανικές ιδιότητες της ρητίνης ήταν: εφελκυστική αντοχή $f_{adh}=72.4$ MPa, αντοχή συνάφειας $b_{adh}>123.4$ MPa και μέτρο ελαστικότητας $E_{adh}=3.18$ GPa (τιμές όπως δίνονται από τον κατασκευαστή, FYFE).

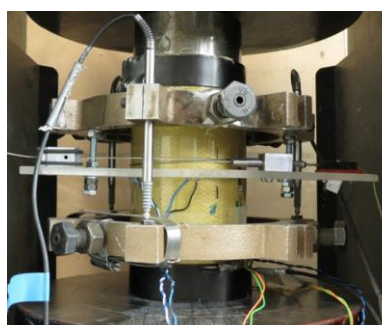
Επιπλέον των ιδιοτήτων των υφασμάτων, προσδιορίστηκαν πειραματικά οι ιδιότητες του σύνθετου υλικού των μανδύων. Για το σκοπό αυτό παρασκευάστηκαν

δοκίμια εφελκυσμού ΙΟΠ αραμιδίου και ΙΟΠ άνθρακα, τα οποία υποβλήθηκαν σε εφελκυσμό. Οι μανδύες ΙΟΠ αραμιδίου επέδειξαν υψηλότερη εφελκυστική αντοχή (827.1 MPa) και μέγιστη ικανότητα παραμόρφωσης (2.07%) και χαμηλότερο μέτρο ελαστικότητας (40.1 GPa), σε σχέση με τους μανδύες ΙΟΠ άνθρακα, των οποίων η εφελκυστική αντοχή, η μέγιστη ικανότητα παραμόρφωσης και το μέτρο ελαστικότητας ήταν ίσα με 642.2 MPa, 0.88% και 73.5 GPa, αντίστοιχα.

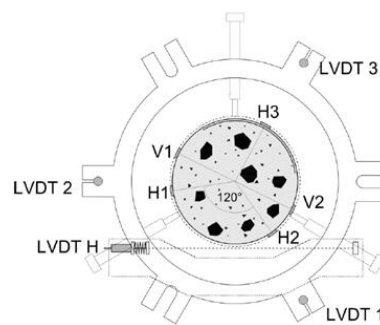
Πειραματική διάταξη

Οι δοκιμές αξονικής θλίψης των κυλίνδρων πραγματοποιήθηκαν σε μηχανή θλιπτικής ικανότητας 3000 kN, με ταχύτητα φόρτισης 0.25 ή 0.1 MPa/s μέχρι την αστοχία. Η χαμηλότερη ταχύτητα φόρτισης υιοθετήθηκε για τους κυλίνδρους με υψηλό ποσοστό περιεκτικότητας σε καουτσούκ (πάνω από 60% αντικατάσταση λεπτόκοκκων και χονδρόκοκκων αδρανών).

Οι αξονικές και πλευρικές παραμορφώσεις καταγράφηκαν χρησιμοποιώντας αισθητήρες μετακίνησης (LVDTs) και ηλεκτρομηκυσιομέτρα, όπως προτείνεται από τον Papastergiou (2010). Το Σχήμα 2α απεικονίζει τη γενική πειραματική διάταξη. Οι καθολικές αξονικές μετακινήσεις μετρήθηκαν με 3 αισθητήρες μετακίνησης τοποθετημένους ακτινικά (ανά 120°) γύρω από το δοκίμιο και προσαρμοσμένους σε δύο μεταλλικούς δακτύλιους σε απόσταση 100 mm μεταξύ των. Η καθολική πλευρική διόγκωση μετρήθηκε με ένα αισθητήρα μετακίνησης προσαρμοσμένο σε ένα μεταλλικό σύρμα τοποθετημένο περιμετρικά του δοκιμίου στο μέσον του ύψους του (LVDT H). Οι τοπικές παραμορφώσεις μετρήθηκαν με τη χρήση 5 ηλεκτρομηκυσιομέτρων: δύο εξ' αυτών (V1 και V2) επικολλήθηκαν κατακόρυφα στο μέσον του ύψους του δοκιμίου (ανά 180°), ενώ τα υπόλοιπα τρία (H1 έως H3) επικολλήθηκαν οριζόντια στο μέσον του ύψους του κυλίνδρου (ανά 120°) (Σχημα 2β).



(α)



(β)

Σχήμα 2. (α) Πειραματική διάταξη, και (β) διάταξη των αισθητήρων.

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

1^ο μέρος: Απερίσφιγκτο σκυρόδεμα

Ο Πίνακας 3 παρουσιάζει τα πειραματικά αποτελέσματα από τα απερίσφιγκτα δοκίμια. Οι τιμές που παρουσιάζονται στον Πίνακα 3 είναι οι μέσοι όροι από τέσσερα δοκίμια.

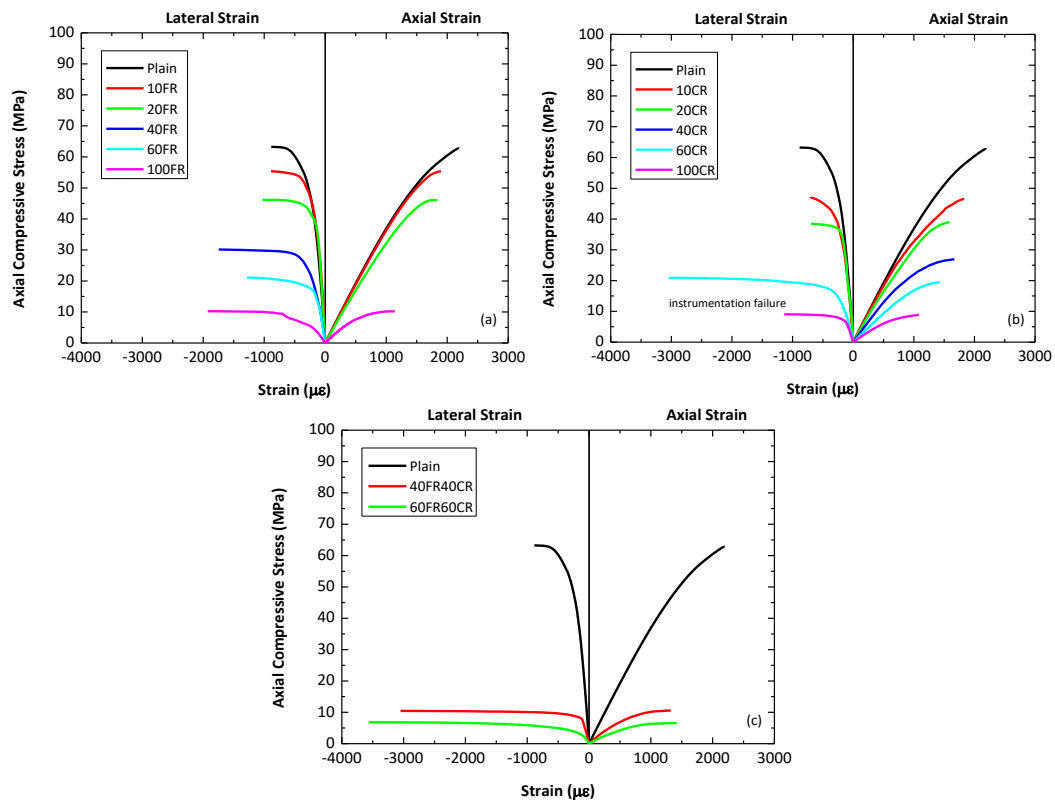
Πίνακας 3. Σύνοψη αποτελεσμάτων 1^{ου} μέρους πειραματικών δοκιμών

Δοκίμιο	Κατ' όγκο αντικατάσταση αδρανών με καουτσούκ (%)	Θλιπτική αντοχή, f_c (MPa)	Αξονική παραμόρφωση Θραύσης, ϵ_{cu} (με)	Πλευρική παραμόρφωση κατά τη θραύση, ϵ_{clu} (με)	Μέτρο ελαστικότητας, E_c (GPa)
Συμβατικό σκυρόδεμα	-	61.7	2180	885	39.4
10FR	4.5	53.4	1900	890	38.8
20FR	9.0	43.2	1840	1000	35.6
40FR	18.0	32.0	-	1745	-
60FR	27.0	20.6	-	1280	-
100FR	45.0	9.6	1140	1925	19.9
10CR	5.5	45.9	1830	695	38.7
20CR	11.0	35.5	1590	700	37.0
40CR	22.0	25.3	1670	-	26.9
60CR	33.0	15.8	1430	3040	20.5
100CR	55.0	8.7	1080	1440	14.0
40FR40CR	40.0	10.5	1320	3005	18.3
60FR60CR	60.0	7.1	1420	3565	11.4

Η αστοχία των απερίσφιγκτων κυλίνδρων με χαμηλό ποσοστό περιεκτικότητας αδρανών από καουτσούκ (μικρότερο του 20% του συνολικού όγκου των αδρανών) ήταν ξαφνική και εκρηκτική. Τα δοκίμια με υψηλότερο ποσοστό περιεκτικότητας σε καουτσούκ αστόχησαν προοδευτικά με την εμφάνιση μεγάλου ποσοστού μικρορωγμών και αυξημένης πλευρικής διόγκωσης. Αυτό μπορεί να αποδοθεί στην τάση του καουτσούκ να διογκώνεται περισσότερο από το περιβάλλον σκυρόδεμα. Συμπεραίνεται επομένως, ότι ο υψηλός λόγος Poisson και το μικρό μέτρο ελαστικότητας του καουτσούκ επηρεάζουν τη θλιπτική συμπεριφορά σκυροδέματος που περιέχει αδρανή από καουτσούκ.

Τα διαγράμματα τάσης-παραμόρφωσης της 1^{ης} σειράς πειραματικών δοκιμών παρουσιάζονται στο Σχήμα 3. Η αξονική παραμόρφωση προσδιορίστηκε χρησιμοποιώντας το μέσο όρο των καταγραφών των τριών αισθητήρων μετακίνησης. Οι πλευρικές παραμορφώσεις υπολογίστηκαν ως ο μέσος όρος των τριών οριζόντιων ηλεκτρομηκυσιομέτρων.

Οι καταγραφές από τον αισθητήρα μετακίνησης που προσαρμόστηκε στο σύρμα περιμετρικά του κυλίνδρου, δε χρησιμοποιήθηκαν καθώς κρίθηκαν αναξιόπιστες. Θα πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι η αξονική παραμόρφωση των μίγμάτων 40FR και 60FR, καθώς και η πλευρική παραμόρφωση του μίγματος 40CR, δεν καταγράφηκε λόγω προβλημάτων. Τέλος, η πλευρική παραμόρφωση του μίγματος 100CR παρουσιάζεται μέχρι το σημείο όπου σταμάτησε η καταγραφή από τους αντίστοιχους αισθητήρες λόγω πρόωρης αστοχίας τους.



Σχήμα 3. Διαγράμματα τάσης-παραμόρφωσης για τα δοκίμια με αντικατάσταση: (α) μόνο των λεπτόκοκκων αδρανών (FR), (β) μόνο των χονδρόκοκκων αδρανών και (γ) των λεπτόκοκκων και των χονδρόκοκκων αδρανών

Από τα αποτελέσματα προέκυψε ότι η θλιπτική αντοχή σκυροδέματος και η ικανότητα αξονικής παραμόρφωσης μειώνονται όσο η περιεκτικότητα σε καουτσούκ αυξάνεται, ανεξάρτητα από τον τύπο των αδρανών που αντικαθίστανται. Αντίθετα, η ικανότητα πλευρικής παραμόρφωσης αυξήθηκε σημαντικά, με την αύξηση της περιεκτικότητας σε καουτσούκ.

Για σχετικά μικρό ποσοστό περιεκτικότητας λεπτόκοκκων αδρανών από καουτσούκ, η θλιπτική συμπεριφορά του απερίσφιγκτου σκυροδέματος, RuC, δεν επηρεάστηκε σημαντικά (Σχημα 3α). Συγκεκριμένα, για τα μίγματα 10FR και 20FR, η θλιπτική αντοχή μειώθηκε κατά 12% και 27% σε σχέση με το μίγμα συμβατικού σκυροδέματος, αντίστοιχα, ενώ η ικανότητα αξονικής και πλευρικής παραμόρφωσης ήταν παρόμοια με τις αντίστοιχες για το συμβατικό σκυροδέμα. Παρόλα αυτά, για υψηλότερα ποσοστά περιεκτικότητας σε καουτσούκ (δηλ. 40FR, 60FR και 100FR), η θλιπτική συμπεριφορά του RuC επηρεάστηκε σημαντικά. Για το μίγμα 100FR, η θλιπτική αντοχή και η αξονική παραμόρφωση μειώθηκε κατά 84%, και 48%, αντίστοιχα, ενώ η πλευρική παραμόρφωση αυξήθηκε κατά 118% σε σχέση με το συμβατικό σκυροδέμα.

Στην περίπτωση αντικατάστασης των χονδρόκοκκων φυσικών αδρανών με καουτσούκ, η θλιπτική συμπεριφορά του RuC ήταν παρόμοια με τη συμπεριφορά για την περίπτωση αντικατάστασης των λεπτόκοκκων αδρανών (Σχημα 3β). Παρατηρήθηκε ότι όλα τα μίγματα παρουσίασαν μία μείωση στην ικανότητα αξονικής παραμόρφωσης και μία αύξηση στην ικανότητα πλευρικής παραμόρφωσης (εξαιρουμένων των μιγμάτων 10CR και 20CR όπου μειώθηκε η πλευρική παραμόρφωση), με την αύξηση της περιεκτικότητας σε καουτσούκ. Η επιρροή της προσθήκης κόκκων καουτσούκ στη συμπεριφορά τάσης-παραμόρφωσης του RuC ήταν πιο εμφανής στα μίγματα με υψηλή περιεκτικότητα σε καουτσούκ (δηλ. 40CR, 60CR και 100CR). Για το μίγμα 60CR, η αξονική παραμόρφωση μειώθηκε κατά 35% και η πλευρική παραμόρφωση αυξήθηκε κατά 245%, σε σύγκριση με το συμβατικό σκυροδέμα.

Η επιρροή της αντικατάστασης λεπτόκοκκων και χονδρόκοκκων φυσικών αδρανών με καουτσούκ ήταν αξιοσημείωτη (Σχήμα 3γ). Η πλευρική παραμόρφωση του μίγματος 40FR40CR ήταν 55% υψηλότερη από αυτή του μίγματος 100FR, παρόλο που τα δύο μίγματα είχαν παρόμοια περιεκτικότητα σε καουτσούκ ως ποσοστό του συνολικού όγκου των αδρανών. Τέλος, για το μίγμα 60FR60CR, η θλιπτική αντοχή μειώθηκε κατά 88%, ενώ η αξονική παραμόρφωση μειώθηκε κατά 35% και η πλευρική παραμόρφωση αυξήθηκε κατά 303% σε σχέση με το μίγμα συμβατικού σκυροδέματος. Συνολικά, το μίγμα 60FR60CR επέδειξε την υψηλότερη ικανότητα πλευρικής παραμόρφωσης, ίση με 3565 με.

2^ο μέρος: Σκυροδέμα περισφιγμένο με μανδύες ΙΟΠ

Ο Πίνακας 4 παρουσιάζει τα αποτελέσματα από τα δοκίμια περισφιγμένα με ΙΟΠ αραμιδίου και ΙΟΠ άνθρακα και περιλαμβάνει τον λόγο των αντοχών f_{cc}/f_c , που αντικατροπτίζει την αύξηση της θλιπτικής αντοχής του περισφιγμένου σκυροδέματος (CRuC) σε σχέση με τη θλιπτική αντοχή του απερίσφιγκτου (RuC).

Πίνακας 4. Σύνοψη αποτελεσμάτων 2^{ου} μέρους πειραματικών δοκιμών

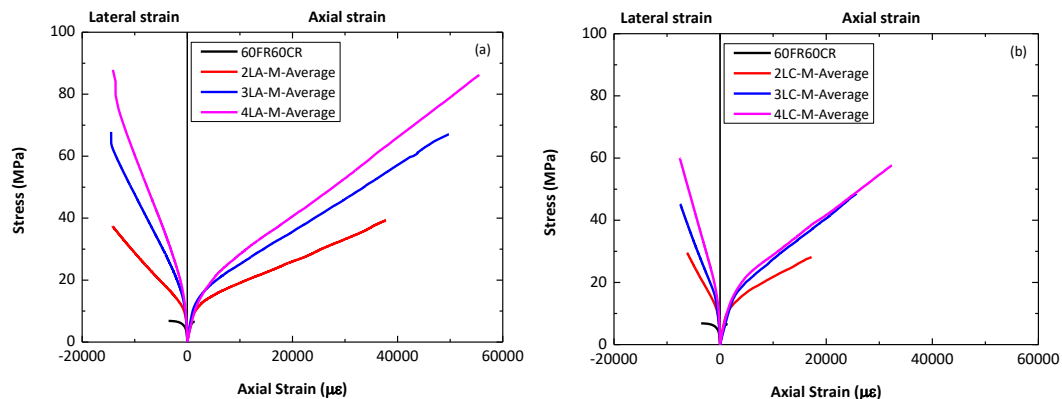
Δοκίμιο	Υλικό και αριθμός στρώσεων μανδύα ΙΟΠ	Θλιπτική ή αντοχή, f_c ή f_{cc} (MPa)	Αξονική παραμόρφωση Θραύσης, ϵ_{cu} (με)	Πλευρική παραμόρφωση κατά τη θραύση, ϵ_{clu} (με)	Λόγος f_{cc}/f_c
60FR60CR	-	8.2	-	-	-
2LA-M	Αραμίδιο: 2	42.3	41910	16745	5.15
3LA-M	Αραμίδιο: 3	69.9	52408	15094	8.52
4LA-M	Αραμίδιο: 4	96.0	64307	16056	11.72
60FR60CR	-	6.8	-	-	-
2LC-M	Άνθρακας: 2	31.7	21873	6803	4.66
3LC-M	Άνθρακας: 3	48.8	25947	8279	7.18
4LC-M	Άνθρακας: 4	62.6	36574	8051	9.21

Όλα τα δοκίμια αστόχησαν λόγω θραύσης του μανδύα ΙΟΠ στο μέσο του ύψους του κυλίνδρου, όταν αναπτύχθηκε η πλήρης ικανότητα παραμόρφωσης του ΙΟΠ, καθώς έφτασε κοντά στη θεωρητικά οριακή παραμόρφωση των ινών. Αυτό σημαίνει ότι αξιοποιήθηκαν σχεδόν πλήρως τα μηχανικά χαρακτηριστικά του μανδύα ΙΟΠ ως υλικού περίσφιξης.

Το Σχήμα 4α και το Σχήμα 4β παρουσιάζουν τη θλιπτική τάση 28 ημερών συναρτήσει της αξονικής και πλευρικής παραμόρφωσης για τα περισφιγμένα με ΙΟΠ αραμιδίου και ΙΟΠ άνθρακα δοκίμια, αντίστοιχα (μέση καμπύλη για τα δοκίμια με τον ίδιο αριθμό στρώσεων). Παρουσιάζεται επίσης, για σκοπούς σύγκρισης, η απόκριση του απερίσφιγκτου σκυροδέματος.

Από τα πειραματικά αποτελέσματα προκύπτει ότι η περίσφιξη βελτίωσε σημαντικά τη συμπεριφορά του σκυροδέματος σε όρους θλιπτικής αντοχής και οριακής παραμόρφωσης. Η θλιπτική αντοχή του CRuC αυξήθηκε κατά μέσο όρο κατά 5.15, 8.52 και 11.72 φορές σε σχέση με την αντοχή του RuC σκυροδέματος για δύο, τρεις και τέσσερις στρώσεις ΙΟΠ αραμιδίου, αντίστοιχα. Παρομοίως, η θλιπτική αντοχή του CRuC αυξήθηκε κατά μέσο όρο κατά 4.66, 7.18 και 9.21 σε σχέση με την αντοχή του RuC για δύο, τρεις και τέσσερις στρώσεις ΙΟΠ άνθρακα,

αντίστοιχα. Οι μέγιστες αξονικές παραμορφώσεις ήταν κατά μέσο 4.19%, 5.24% και 6.43% στις περιπτώσεις περίσφιγξης με ΙΟΠ αραμιδίου με δύο, τρεις και τέσσερις στρώσεις, αντίστοιχα. Στην περίπτωση περίσφιγξης με ΙΟΠ άνθρακα, η αξονική παραμόρφωση έφτασε κατά μέσο όρο τιμές ίσες με 2.19%, 2.59% και 3.66% για δύο, τρεις και τέσσερις στρώσεις του υλικού, αντίστοιχα.



Σχήμα 4. Διαγράμματα τάσης-παραμόρφωσης για τα δοκίμια περισφιγμένα με μανδύες: (α) ΙΟΠ αραμιδίου, και (β) ΙΟΠ άνθρακα.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η επιρροή της περιεκτικότητας του καουτσούκ στη θλιπτική συμπεριφορά του απερίσφιγκτου σκυροδέματος ήταν αξιοσημείωτη, ειδικά για μίγματα με υψηλό ποσοστό περιεκτικότητας σε καουτσούκ (>27% του συνολικού όγκου των αδρανών). Αυτό μπορεί να αποδοθεί στην πλευρική διόγκωση του καουτσούκ (μεγαλύτερη από τη διόγκωση του περιβάλλοντος σκυροδέματος) εξαιτίας του υψηλού λόγου Poisson και του μικρού μέτρου ελαστικότητάς του. Ως εκ τούτου, η ύπαρξη κόκκων καουτσούκ στο σκυρόδεμα επιτάχυνε την ανάπτυξη των ρωγμών σε χαμηλότερες τιμές φόρτισης σε σχέση με το συμβατικό σκυρόδεμα. Συμπερασματικά, η αντικατάσταση φυσικών αδρανών με αδρανή από καουτσούκ οδήγησε στη μείωση της θλιπτικής αντοχής και της ικανότητας αξονικής παραμόρφωσης του σκυροδέματος, ενώ η ικανότητα πλευρικής παραμόρφωσής του αυξήθηκε σημαντικά.

Κατά συνέπεια, ο έλεγχος της πλευρικής διόγκωσης του σκυροδέματος που περιέχει καουτσούκ είναι κρίσιμος για να αποφευχθεί αυτή η σημαντική απομείωση της θλιπτικής αντοχής του. Μία λύση είναι η εφαρμογή εξωτερικής παθητικής περίσφιγξης, η οποία μπορεί να ενεργοποιηθεί νωρίτερα από ότι

στην περίπτωση του συμβατικού σκυροδέματος. Στην παρούσα εργασία υιοθετήθηκε η περίσφιγξη με μανδύες ινοπλισμένων πολυμερών (ΙΟΠ) και εξήχθησαν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Η περίσφιγξη με μανδύες ΙΟΠ οδήγησε στην άρση των δυσμενών επιπτώσεων του καουτσούκ στη συμπεριφορά του σκυροδέματος.
- Παρά την υψηλή περιεκτικότητα σε καουτσούκ (έως και 60% αντικατάσταση του συνολικού όγκου των αδρανών) και τη χαμηλή θλιπτική αντοχή του απερίσφιγκτου σκυροδέματος (έως και 7.1 MPa), η περίσφιγξη με 4 στρώσεις ΙΟΠ αραμιδίου ή άνθρακα αυξάνει σημαντικά την πλευρική παραμόρφωση εκτός από τη θλιπτική παραμόρφωση και μπορεί εν τέλει να οδηγήσει σε σκυρόδεμα υψηλής αντοχής με πολύ υψηλή ικανότητα θλιπτικής παραμόρφωσης με ποικίλες δυνατές εφαρμογές. Συγκεκριμένα, 4 στρώσεις ΙΟΠ αραμιδίου οδήγησαν σε θλιπτική αντοχή περίπου ίση με 95 MPa και αξονική παραμόρφωση ίση με 6.4%.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

ASTM Standard C136, Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates, ASTM International, West Conshohocken, PA, DOI: 10.1520/C0136-06, www.astm.org. (2006)

Business T. Global tire sales to grow 4.3% per year, Tire Business, 1/17/2014 (2014)

Directive (EC) 98/2008 of the European Parliament and of the Council of 19 November 2008 on waste and replacing certain Directives, OJ L312/3 (2008)

R. Garcia, K. Pilakoutas, I. Hajirasouliha, M. Guadagnini, N. Kyriakides and M. A. Ciupala, “Seismic retrofitting of RC buildings using CFRP and post-tensioned metal straps: shake table tests”. Bulletin of Earthquake Engineering, (2015) 1-27

P. Papastergiou, “A confinement model for concrete wrapped or pretensioned with FRP”, PhD Thesis, Department of Civil and Structural Engineering, The University of Sheffield, Sheffield (2010)

S. Raffoul, R. Garcia, K. Pilakoutas, M. Guadagnini and N. F. Medina, “Optimisation of rubberised concrete with high rubber content: An experimental investigation”. Construction and Building Materials, Vol.124, (2016) 391-404

S. Raffoul, R. Garcia, D. Escolano-Margarit, M. Guadagnini, I. Hajirasouliha and K. Pilakoutas, “Behaviour of unconfined and FRP-confined rubberised concrete in axial compression”. Construction and Building Materials, Vol.147, (2017) 388-397