

Πλάστιμο σκυρόδεμα από ασβεστούχα τέφρα και ίνες πολυπροπυλενίου I: μηχανική συμπεριφορά σε εφελκυσμό

Ductile concrete with calcareous fly ash and polypropylene fibers I: tensile behavior

Σουζάνα ΤΑΣΤΑΝΗ¹, Ιωάννης ΣΑΒΒΙΔΗΣ²

Λέξεις κλειδιά: πλάστιμο σκυρόδεμα, τέφρα, ίνες, εφελκυσμός, θερμοκρασία

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: 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. Στην παρούσα εργασία μελετάται η απόκριση σε καμπτικό εφελκυσμό πρισμάτων με μεταβλητές στην σύνθεση μείξης: την αταξινόμητη ασβεστούχα τέφρα (2 και 3 φορές κατά βάρος τσιμέντου, εξ' ου και αειφόρα υλικά) και τις ίνες πολυπροπυλενίου (1.5 και 2% κατ' όγκο). Από συζυγή δοκίμια μελετάται επιπλέον η επιδείνωση του υλικού υπό αυξημένη θερμοκρασία, άνω του σημείου τήξης των ινών, καθώς και υπό κύκλους ψύξης/απόψυξης. Οι μετρήσεις φορτίου και βύθισης από δοκιμές κάμψης τριών και τεσσάρων σημείων αναλύονται αντιστρόφως με σκοπό την εκτίμηση της καταστατικής σχέσης εφελκυστικής τάσης – παραμόρφωσης. Ο μηχανισμός συνάφειας μήτρας-ινών καθορίζει καθολικά την εφελκυστική συμπεριφορά του υλικού (ικανότητα παραμόρφωσης και είδος της ρηγμάτωσης).

ABSTRACT: Strain Resilient Cementitious Composites (SRCC) made by Greek unclassified calcareous fly ash and polypropylene fibers are sustainable materials with adequate mechanical properties, appropriate for structural solutions. They are experimentally studied in the present study in regards to their flexural response with parameters in the composition the high fly ash (two and three times the cement weight) and fibers contents (1.5 and 2% per volume). Prisms were tested in three and four-point bending; accompanied coupons were subjected to elevated temperature (above the fiber's melting point) and under freeze-thaw before testing aiming to assess of materials' mechanical deterioration. The experimental results of load and deflection are inversely analyzed for the assessment of the tensile stress-strain law of these materials. Fiber-to-matrix bond controls the overall tensile response in regards to the strain resilience and the cracking pattern.

¹ Επίκουρη Καθηγήτρια, Τμ. Πολιτικών Μηχανικών ΔΠΘ, Ξάνθη 67100, stastani@civil.duth.gr

² Πολιτικός Μηχανικός ΔΠΘ, isavidiscivil@gmail.com

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο αειφόρος σχεδιασμός κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος (Ο.Σ.) προσανατολίζεται διεθνώς σε εναλλακτικά του σκυροδέματος δομικά υλικά όπου συμπληρωματικά με τον περιορισμό του κυριάρχου τσιμέντου γίνεται χρήση βιομηχανικών τεφρών σε υπερ-πολλαπλάσια μερίδια με διττή λειτουργία του συνδετικού υλικού –ως ασθενές τσιμέντο- και της πλήρωσης όγκων (αντί π.χ. αδρανών). Ωστόσο, ζητούμενο δεν είναι να αναπτυχθεί ένα ακόμη σκυρόδεμα ικανής θλιπτικής αντοχής που όμως να διατηρεί το τυπικό χαρακτηριστικό της χαμηλής εφελκυστικής αντοχής και της τάσης για ρηγμάτωση που αναπόφευκτα οδηγεί στη μείωση της ανθεκτικότητας και της ασφάλειας των κατασκευών στο χρόνο. Για την αποκατάσταση της ικανότητας ανάληψης φορτίων στα δομικά στοιχεία, μετά την έναρξη της εφελκυστικής ρηγμάτωσης, τοποθετούνται ράβδοι οπλισμού με πάχη επικάλυψης σκυροδέματος έως και 50mm ως μέτρο προστασίας έναντι διάβρωσης. Συνέπεια είναι η αύξηση της γεωμετρίας διατομής των δομικών στοιχείων καθώς και του ποσοστού όπλισης των ράβδων χωρίς να αξιοποιείται επαρκώς η ικανότητα παραμόρφωσης του χάλυβα (>0.07) δεδομένου ότι το σκυρόδεμα, ως ψαθυρό υλικό, δεν μπορεί να παραλάβει μεγάλες παραμορφώσεις (μόλις 0.00015 σε εφελκυσμό και 0.0035 σε θλίψη). Υπό αυτό το σκεπτικό ζητούμενο είναι το σκυρόδεμα να αποκτήσει συμβατή παραμορφωσιακή συμπεριφορά με αυτή του χάλυβα.

Στην κατεύθυνση βελτίωσης της εφελκυστικής συμπεριφοράς του σκυροδέματος (αντοχής και ικανότητας παραμόρφωσης) η έρευνα έχει στραφεί από τα τέλη του 90' (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 προέκυψαν τα σύνθετα τσιμεντοειδή, γνωστά διεθνώς ως Engineered Cementitious Composites. Τα ECCs, όντας πλάστιμα σκυροδέματα, έχουν τις αντοχές των συμβατικών σκυροδεμάτων σε θλίψη αλλά πολύ βελτιωμένη συμπεριφορά σε ικανότητα παραμόρφωσης: π.χ. η παραμόρφωση στην θλιπτική αντοχή είναι 0.005 ή μεγαλύτερη (Zhou et al. 2015, Georgiou and Pantazopoulou 2016, Tastani et al. 2017α,β) ενώ σε άμεσο εφελκυσμό μπορεί να φτάσει έως και 0.04 ως συνέπεια ελέγχου του μηχανισμού συνάφειας ίνας – μήτρας που επιφέρει εκτενέστερο δίκτυο μικρορηγμάτωσης.

Ο συνδυασμός πλάστιμων σκυροδεμάτων με χαλύβδινο οπλισμό αλλάζει την φιλοσοφία σχεδιασμού: μη αμελώντας την συμβολή του σκυροδέματος στην ανάληψη εφελκυσμού (είτε από κάμψη είτε από διαγώνιο εφελκυσμό-διάτμηση) μειώνεται η γεωμετρία διατομής καθώς και η απαίτηση για διαμήκη/διατμητικό οπλισμό (Zhang et al. 2015, Georgiou and Pantazopoulou 2017). Ήδη ECCs έχουν χρησιμοποιηθεί σε έργα υποδομών σε περιοχές μεγάλης απαίτησης για οπλισμό ώστε να εξασφαλισθεί η αντισεισμική ακεραιότητα κόμβοι γεφυρών (π.χ. Seattle). Η ικανότητα εφελκυστικής παραμόρφωσης του πλάστιμου σκυροδέματος αποδίδεται επίσης σε υψηλή ενέργεια συνάφειας – ολίσθησης μεταξύ ράβδων και μήτρας προσομοιώνοντας συνθήκες καλά περισιγμένης

αγκύρωσης (Eleftheriou et al. 2017). Συνέπεια της παθητικής περίσφιγξης που εισάγει το πυκνό δίκτυο ινών είναι είτε η απαίτηση για μικρότερα αναπτύγματα είτε η ανάληψη μεγαλύτερης παραμόρφωσης από την ράβδο, που ωστόσο θα πρέπει να μπορεί να παραληφθεί από την θλιβόμενη ζώνη του καμπτόμενου στοιχείου. Παρά την πληθώρα ερευνητικών αποτελεσμάτων των τελευταίων ετών, σήμερα δεν υπάρχει ακόμη σχετικό κανονιστικό πλαίσιο που να υποστηρίζει τα πλάστιμα σκυροδέματα στο σχεδιασμό κατασκευών Ο.Σ.

Ο μεγαλύτερος όγκος ερευνητικών αποτελεσμάτων περί πλάστιμων σκυροδεμάτων αφορά σε συνθέσεις με ιπτάμενη τέφρα τύπου F (δηλ. με περιεκτικότητα σε SiO_2 , Al_2O_3 και $\text{Fe}_2\text{O}_3 > 70\%$ και $\text{CaO} < 10\%$) και ίνες πολυβινυλικής αλκοόλης (PVA) υψηλού μέτρου ελαστικότητας (40 - 70GPa). Η ελληνική ασβεστούχα ιπτάμενη τέφρα (με SiO_2 , Al_2O_3 και $\text{Fe}_2\text{O}_3 < 50\%$ και $\text{CaO} \sim 40\%$ και $\text{CaOf} \sim 10\%$) έχει μελετηθεί ελάχιστα ως συστατικό πλάστιμων σκυροδεμάτων (Tastani et al. 2017α,β): η όποια πρόιμη διόγκωση/ρηγμάτωση του κονιάματος λόγω της υψηλής περιεκτικότητας σε άσβεστο ελέγχεται μέσω της παθητικής περίσφιγξης που εισάγει το υψηλό ποσοστό των ινών. Η υψηλή αλκαλικότητα της μήτρα συνδυάστηκε με ανθεκτικές σε αλκαλικό περιβάλλον ίνες πολυπροπυλενίου (PP) χαμηλού μέτρου ελαστικότητας (~5GPa) αποδίδοντας τροποποιημένη ως προς τα ECCs συμπεριφορά σε εφελκυσμό: το σύνθετο υλικό συμπεριφέρεται γραμμικά ελαστικά μέχρι την ανάπτυξη της πρώτης ρωγμής, παρουσιάζει ήπια αύξηση φορτίου μέχρι την αντοχή ακολουθούμενη από ήπια πτώση, με τα δύο αυτά μετελαστικά στάδια να εκτείνονται αθροιστικά σε ένα ευρύ φάσμα παραμόρφωσης με περιορισμένο ωστόσο αριθμό ρωγμών.

Στην παρούσα εργασία μελετώνται τέσσερις συνθέσεις πλάστιμου σκυροδέματος με μεταβλητές την περιεκτικότητα σε ασβεστούχα ιπτάμενη τέφρα (δύο και τρεις φορές το βάρος του τσιμέντου) και το ογκομετρικό ποσοστό ινών PP (1.5 και 2%), ενώ διατηρήθηκαν σταθερά το μερίδιο της λεπτής άμμου και ο λόγος νερού προς τα λεπτόκοκκα της πάστας. Από τις τέσσερις συνθέσεις κατασκευάστηκαν πρίσματα 40x40x160 (mm) και δοκοί 60x70x370 (mm) το οποία φορτίστηκαν σε κάμψη τριών και τεσσάρων σημείων αντίστοιχα ώστε να μελετηθεί η επίδραση του στατικού συστήματος στην μηχανική συμπεριφορά του υλικού σε καμπτικό εφελκυσμό (δοκίμια αναφοράς). Επιπλέον, μελετάται η επίδραση της έκθεσης - προ φόρτισης - σε θερμοκρασία άνω του σημείου τήξης των ινών και σε κύκλους ψύξης/απόψυξης στην επιδείνωση της μηχανικής απόκρισης συζυγών δοκιμίων συγκριτικά με τα δοκίμια αναφοράς. Από κάθε σύνθεση και για κάθε τύπο δοκιμίου πραγματοποιήθηκαν τρεις δοκιμές. Βάσει αρχών μηχανικής και στατικής, με αντίστροφη ανάλυση των πειραματικών δεδομένων των δοκιμίων αναφοράς, επιδιώκεται η στάθμιση της καταστατικής σχέσης αξονικής εφελκυστικής τάσης – παραμόρφωσης των πλάστιμων σκυροδεμάτων.

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ

Υλικά: Χρησιμοποιήθηκε τσιμέντο CEM I 52.5 N προκειμένου η θλιπτική αντοχή των 28 ημερών να είναι ικανοποιητική δεδομένου ότι η τέφρα είναι ασθενής παράγοντας αντοχής σε αυτή την ηλικία. Η άμμος, πυριτικής σύστασης,

κοσκινίστηκε (100% διερχόμενα από κόσκινο βρόγχου 0.5mm) και εν συνεχεία ξηράνθηκε μέχρις σταθεροποίησης του βάρους της ώστε το θεωρητικό νερό μίξης να μην μεταβληθεί από υγρασία. Η ασβεστούχα ιπτάμενη τέφρα (παραχωρήθηκε από ΔΕΗ Πτολεμαΐδας) έχει χημική σύσταση όπως φαίνεται στον Πίνακα 1. Οι μικρο-ίνες πολυπροπυλενίου (από ThracePlastics) έχουν τα εξής χαρακτηριστικά: διάμετρος $d_f=25\mu\text{m}$, μήκος $\ell_f=12\text{mm}$, τάση και παραμόρφωση στην θραύση $f_{fu}=400\text{MPa}$, $\varepsilon_{fu}=0.25$, σημείο τήξης/ανάφλεξης $160/570^\circ\text{C}$. Ο υπερρυστοποιητής HRWR (από SIKΑ Ελλάδα, VISCOCRETE-ULTRA 200) διαφοροποιήθηκε ανά σύνθεση ως συνέπεια των διαφορετικών μηχανικών απαιτήσεων που εισάγουν στο μίγμα είτε η αυξημένη ποσότητα των λεπτόκοκκων είτε το αυξημένο κ.ο. ποσοστό των ινών PP. Προσδιορίστηκε δε κατά βάρους τσιμέντου και τέφρας. Οι τέσσερις αναλογίες μίξης αναλύονται στον Πίνακα 2. Η ονομασία *FAi-PPj* κάθε σύνθεσης έχει ως εξής: FA2 ή 3 δηλώνει το μερίδιο της τέφρας ως προς το τσιμέντο και PP1.5 ή 2 το ογκομετρικό ποσοστό των ινών.

Πίνακας 1. Χημική σύσταση ιπτ. τέφρας.

Συστατικά	κ.β. %
SiO ₂	34.44
Al ₂ O ₃	11.75
Fe ₂ O ₃	4.34
CaO	38.45
MgO	3.81
SO ₃	4.72
Na ₂ O	0.42
K ₂ O (%)	1.25
P ₂ O ₅	0.25
TiO ₂	0.54
MnO	0.05
CaO _f (%)	15.6

Πίνακας 2. Αναλογίες μίξης (κ.β. του τσιμέντου) των τεσσάρων συνθέσεων.

Ονομασία Μίξης	Τσιμέντο (C)	Ιπτ. Τέφρα (FA/C)	Άμμος (S/C)	Νερό w=W/C	Νερό w*=W/(C+FA)	Ίνες PP (κ.ο. %)	HRWR (κ.β. %)
FA2-PP1.5		2.00		1.10		1.50	4.67
FA2-PP2	1.00		1.10		0.37	2.00	5.33
FA3-PP1.5		3.00		1.47		1.50	5.00
FA3-PP2						2.00	6.00

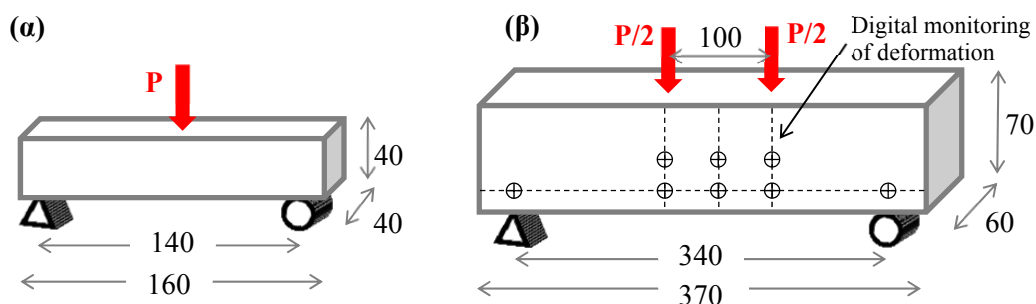
Τεχνική παρασκευής: Δεδομένου του πολύ χαμηλού υδατο-τσιμεντο-συντελεστή και του σημαντικού ογκομετρικού ποσοστού ινών, η ομοιόμορφη ανάμιξη των υλικών με την βέλτιστη διασπορά των ινών αποτελεί κρίσιμη σημασίας φάση του νοπού υλικού. Για να επιτευχθεί απαιτείται σημαντική ποσότητα ρυστοποιητή δεδομένης της λεπτότητας των υλικών αλλά και σημαντική ενέργεια ανάμιξης. Στο Σχήμα 1 φαίνονται στάδια της ανάμιξης των λεπτόκοκκων με νερό και το μεγαλύτερο μέρος του HRWR ώστε το μίγμα να



Σχήμα 1. (α-β) Ανάμιξη των λεπτόκοκκων και (γ) τελική κατάσταση (με ίνες).

περιέλθει σε ρευστή κατάσταση (αυξημένου ιξώδους, Σχ. 1α-β) καθώς και η επιθυμητή τελική κατάσταση της νωπής φάσης (Σχ. 1γ) όπου για να αποσοβηθούν οι δυνάμεις τριβής ινών - μήτρας απαιτείται επιπλέον HRWR.

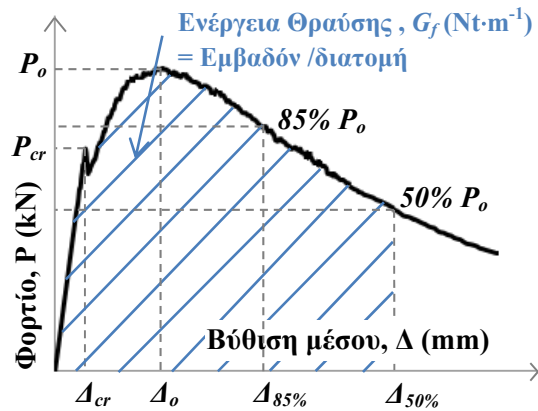
Δοκίμια: Συνολικά παρασκευάστηκαν 78 δοκίμια, εκ των οποίων 54 πρίσματα διαστάσεων (ύψος x πλάτος x μήκος, mm) 40x40x160 και 24 μικρές δοκοί γεωμετρίας 70x60x370 τα οποία φορτίστηκαν σε κάμψη τριών και τεσσάρων σημείων αντίστοιχα. Η διαφορά των δύο στατικών συστημάτων είναι ότι στην δεύτερη περίπτωση τίθεται σε μέγιστη ροπή χωρίς την επίδραση τέμνουσας μια περιοχή (στο Σχ. 2β, το διάστημα 100mm μεταξύ των σημείων επιβολής φορτίου) και όχι μία διατομή με συνέπεια να ενεργοποιείται υπό σταθερές εντατικές συνθήκες περισσότερος όγκος υλικού. Η διαφοροποίηση αυτή αναμένεται να επηρεάσει τόσο την εφελκυστική αντοχή όσο και την ικανότητα παραμόρφωσης του υλικού και την συνακόλουθη ενέργεια θραύσης. Τα δοκίμια παρέμειναν για έναν μήνα σε θάλαμο συντήρησης (20°C, 95%RH). Η πυκνότητα των συνθέσεων μετά το πέρας της συντήρησης βρέθηκε κατόπιν ζύγισης να κυμαίνεται πτωτικά από 2.02 έως 1.88 gr/cm³ αυξανόμενης της τέφρας και του ποσοστού των ινών. Από τα 54 πρίσματα, τα 18 θεωρήθηκαν αναφοράς (3 δοκίμια x 4 συνθέσεις με ίνες + 3 δοκίμια x 2 συνθέσεις χωρίς ίνες τύπου FA2 και FA3), 18 συζυγή δοκίμια εκτέθηκαν σε υψηλή θερμοκρασία 200°C (άνω του σημείου τήξης των ινών, 170°C) προ φόρτισης για διάστημα δύο ωρών και τα λοιπά 18 συζυγή τέθηκαν σε κατάσταση κορεσμού σε 34 κύκλους ψύξης / απόψυξης ($\pm 20^\circ\text{C}$, διάρκεια κύκλου 48 ώρες, πριν την φόρτιση τα δοκίμια ξηράνθηκαν στους 80°C). Από τα 24 δοκάρια, τα 12 (3 δοκίμια x 4 συνθέσεις με ίνες, λόγω μεγέθους δεν σκυροδετήθηκαν συνθέσεις χωρίς ίνες όπως συνέβη στα πρίσματα) θεωρήθηκαν αναφοράς και τα λοιπά 12 ως συζυγή εκτέθηκαν σε υψηλή θερμοκρασία 200°C προ φόρτισης για τρεις ώρες (η ψύξη / απόψυξη δεν μελετήθηκε λόγω περιορισμένης χωρητικότητας του θαλάμου ψύξης). Από οπτική επιθεώρηση των δοκιμίων μετά το πέρας την θέρμανσης και του προγράμματος ψύξης / απόψυξης δεν παρατηρήθηκαν επιφανειακές αλλοιώσεις ή ρηγματώσεις. Όλα τα δοκίμια φορτίστηκαν σε μεταγενέστερη ηλικία των 28 ημερών ώστε να σταθεροποιηθεί ο μηχανισμός συνάφειας μήτρας - ινών. Κατά την φόρτιση υπό καθεστώς ελεγχόμενης μετατόπισης του εμβόλου κατά 0.3mm/min έως την επίτευξη της αντοχής, καταγράφονταν ταυτόχρονα το επιβαλλόμενο φορτίο και η βύθιση μέσου μέσω LVDT για τα πρίσματα και η βύθιση σημείων επιβολής φόρτισης και μέσου μέσω LVDT και ψηφιακής κάμερας αντίστοιχα για τα δοκάρια (Σχήμα 2β).



Σχήμα 2. Γεωμετρία και στατικό σύστημα α) πρισμάτων και β) δοκών.

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Διαχείριση μετρήσεων: Τα πειραματικά αποτελέσματα παρουσιάζονται ως διαγράμματα μέσου επιβαλλόμενου φορτίου-βύθισης στο μέσον ανά σύνθεση. Το μέσο φορτίο προκύπτει ως η μέση τιμή των τριών τιμών φορτίου των σχετικών δοκιμών για κάθε στάθμη βύθισης (με βήμα βύθισης 0.01mm). Από την μέση καμπύλη συμπεριφοράς κάθε σύνθεσης α) ποσοτικοποιείται η ενέργεια θραύσης G_f ως ο λόγος του εμβαδού που περικλείεται μεταξύ των καμπύλης φορτίου – βύθισης και του οριζοντίου άξονα μέχρι απομένουσα



Σχήμα 3. Δείκτες καμπτικής εφελκυστικής συμπεριφοράς.

αντίσταση 50% του φορτίου αντοχής P_o προς το εμβαδόν της διατομής του δοκιμίου (Εξ. 1α) και β) αναγνωρίζονται τρία στάδια συμπεριφοράς (Σχήμα 3):

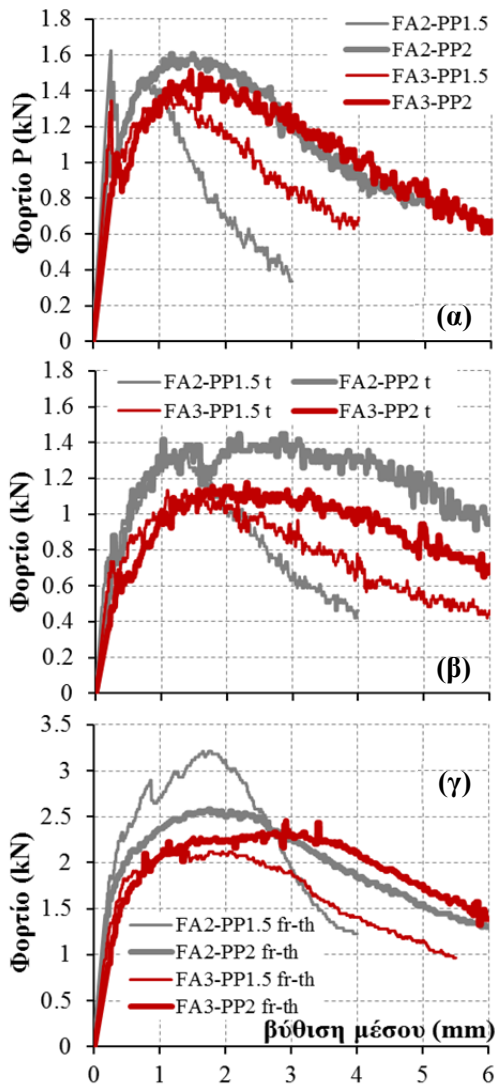
- πρώτης ρηγμάτωσης (Δ_{cr} , P_{cr}) όπου συμβαίνει στιγμιαία υποβίβαση του φορτίου και στην συνέχεια σταδιακή ανάκτηση με την ενεργοποίηση σε εφελκυσμό των ινών που αντιστέκονται στην διεύρυνση της ρωγμής,
- αντοχής (Δ_o , P_o), στην στάθμη του μεγίστου φορτίου κατά την ανελαστική απόκριση απ' όπου ορίζεται η σχετική πλαστιμότητα βυθίσεων $\mu_o = \Delta_o / \Delta_{cr}$,
- και απομένουσας αντίστασης ($\Delta_{85\%}$, $P_{85\%}$) όταν η πτώση του φορτίου είναι 15% του φορτίου αντοχής και πλέον έχει συμβεί επικέντρωση της βλάβης στην διεύρυνση μίας κρίσιμης ρωγμής (η πλαστιμότητα είναι $\mu_{85\%} = \Delta_{85\%} / \Delta_{cr}$).

Η καμπτική, ελαστική αντοχή $f_{fl,cr}$ κάθε σύνθεσης αντιστοιχεί στην λήξη του σταδίου πρώτης ρηγμάτωσης, προκύπτει για κάθε στατικό σύστημα από ελαστική ανάλυση και δίδεται από την Εξ. (1β) (π.χ., $f_{fl,cr} = [M_{cr}/I] \cdot 0.5h$, όπου $M_{cr} = P_{cr}L_s/2$, $I = bh^3/12$ με $L_{s,prism} = 70\text{mm}$ και $L_{s,beam} = 120\text{mm}$).

$$(a): f_{fl,cr} = P_{cr} \frac{3L_s}{bh^2} \text{ (MPa)} \quad (\beta): G_f = \frac{1}{bd} \cdot \int_{\Delta_{cr}}^{\Delta_{50\%}} P(\Delta) d\Delta \text{ (Nt} \cdot \text{m}^{-1}) \quad (1)$$

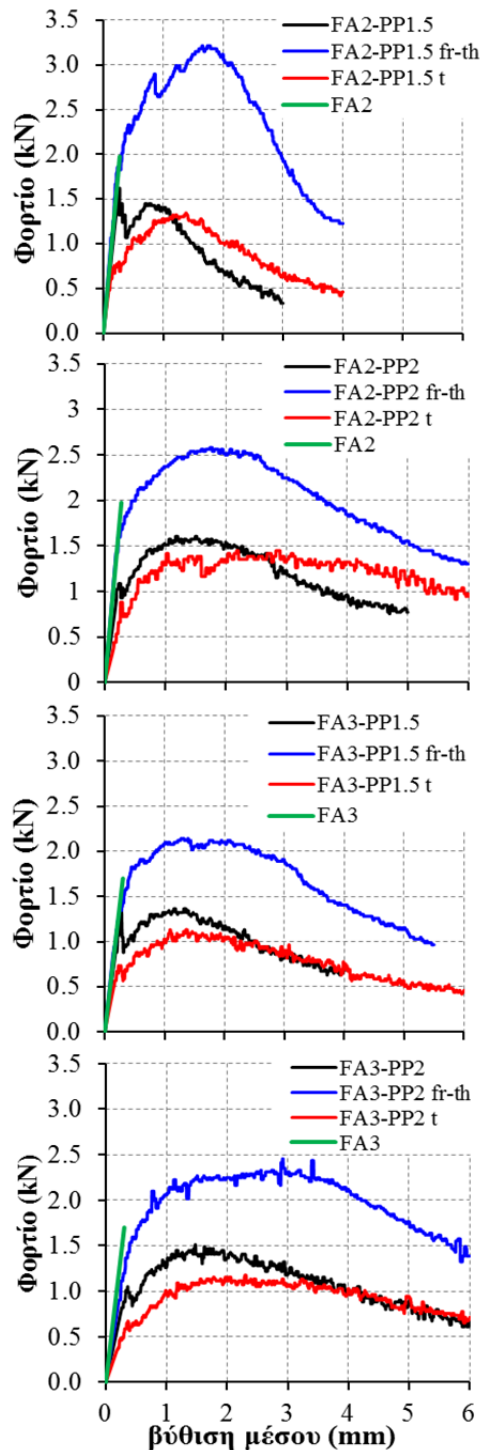
Πρίσματα: Τα πρίσματα αναφοράς κατά την φόρτισή τους ανέπτυξαν μόνο μία ρωγμή κοντά στην θέση της μέγιστης ροπής. Αντιθέτως, τα πρίσματα που υπέστησαν έκθεση είτε σε θερμοκρασία είτε σε κύκλους ψύξης / απόψυξης (Ψ/Δ) ανέπτυξαν περισσότερες από δύο ρωγμές, συνήθως εκατέρωθεν της κρίσιμης διατομής μέγιστης έντασης. Στο Σχήμα 4 παρουσιάζονται συγκριτικά οι μέσες καμπύλες φορτίου – βύθισης μέσου των πρισμάτων αναφοράς (α), έκθεσης σε υψηλή θερμοκρασία (β) και σε κύκλους ψύξης απόψυξης (γ), όπου με φαιό και κόκκινο χρώμα απεικονίζονται οι συνθέσεις με δύο και τρία μερίδια τέφρας αντίστοιχα (το πάχος της γραμμής συναρτάται με την αύξηση του σπλισμού PP). Από το Σχήμα 4(α) προκύπτει ότι η πιο βιώσιμη σύνθεση FA3-PP2 είναι ισοδύναμη της πιο τιμμεντούχας FA2-PP2 σε όλα τα στάδια συμπεριφοράς, ενώ

υποδεέστερη όλων από την άποψη της πλαστιμότητας και ενέργειας θραύσης



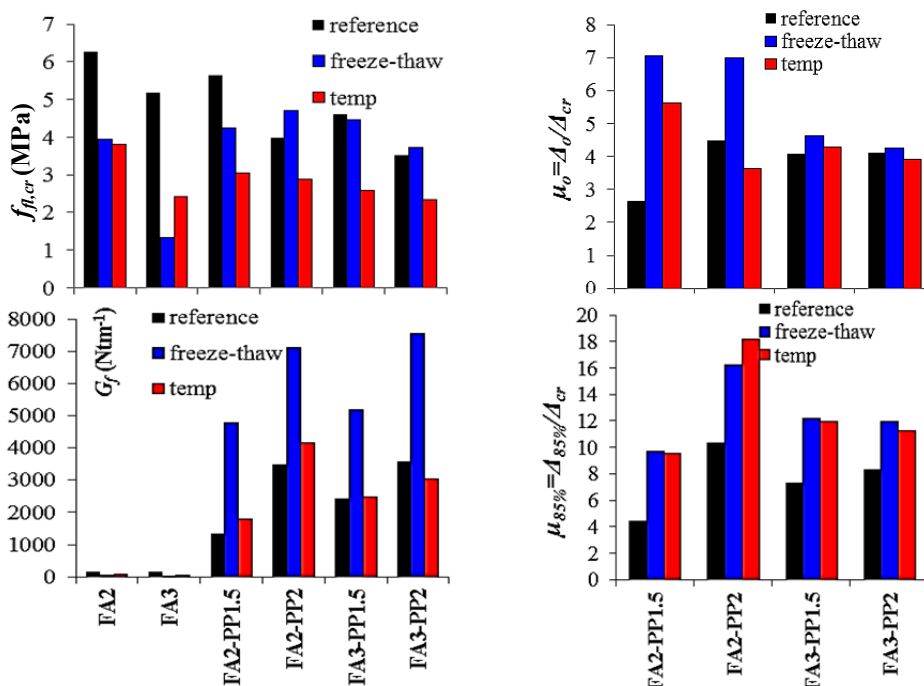
Σχήμα 4. Καμπτική απόκριση πρισμάτων: (α) αναφοράς, (β) έκθεσης σε θερμοκρασία - *t* και (γ) έκθεσης σε κύκλους νύξης/απόψυξης - *fr-th*.

Σχήμα 5. Συγκριτική καμπτική απόκριση πρισμάτων ανά σύνθεση για τις τρεις καταστάσεις (αναφοράς, *t* και *fr-th*).



είναι η FA2-PP1.5 εξαιτίας του χαμηλότερου % ινών (βλ. και Σχ. 6). Το ποσοστό των ινών επηρέασε το φορτίο πρώτης ρηγμάτωσης: για ίνες PP 1.5% το μέγεθος του P_{cr} ήταν ισοδύναμο του P_o ενώ για 2% ήταν σαφώς μικρότερο (βλ. Σχ. 5). Όλες οι συνθέσεις ανέπτυξαν παραπλήσιο φορτίο αντοχής ($P_o \approx 1.5\text{kN}$, Σχ. 5).

Η έκθεση σε υψηλή θερμοκρασία (Σχ. 4β) τροποποίησε την συμπεριφορά ως προς την πρόκληση μη διακριτής φάσης πρώτης ρηγμάτωσης (δεν συμβαίνει απότομη πτώση φορτίου) ενώ επιδείνωσε την αντοχή σε όλες τις περιπτώσεις (μεγαλύτερη μείωση της αντοχής στις συνθέσεις με FA3). Η εκτενέστερη ρηγμάτωση των εκτεθειμένων δοκιμίων, όπως προαναφέρθηκε, αποτυπώθηκε ως αύξηση της πλαστιμότητας (με έμφαση στην περίπτωση FA2-PP2-t). Τα ανωτέρω μπορούν να διαφανούν και από το Σχ. 5 συγκρίνοντας τις μαύρες καμπύλες αναφοράς με τις κόκκινες που αντιστοιχούν σε έκθεση σε θερμοκρασία. Τα δοκίμια που εκτέθηκαν σε Ψ/Α επέδειξαν εμφανή βελτίωση της αντοχής (έως και διπλασιασμό, Σχ. 5) ως συνέπεια της συντήρησης σε συνθήκες κορεσμού, ώστε το πορώδες να θεωρείται πλήρες νερού. Το στάδιο πρώτης ρηγμάτωσης με πτώση φορτίου δεν συνέβη και σε αυτή την περίπτωση έκθεσης. Συγκρίνοντας τα Σχ. 4(α) – (γ) παρατηρείται και πάλι ότι η πιο βιώσιμη σύνθεση FA3-PP2 είναι ισοδύναμη της πιο τιμεντούχας FA2-PP2 (αυτό δεν συμβαίνει στην περίπτωση της έκθεσης σε θερμοκρασία όπου η FA3-PP2 υπολείπεται της FA2-PP2). Ενδιαφέρον είναι το γεγονός ότι η έκθεση σε Ψ/Α των συνθέσεων FA3 με ίνες άλλαξε την απόκριση από παραβολική σε πλαστική (3^ο και 4^ο διάγραμμα του Σχ. 5). Στο Σχ. 6 συνοψίζονται οι διάφοροι δείκτες συμπεριφοράς, με πιο θεαματικό

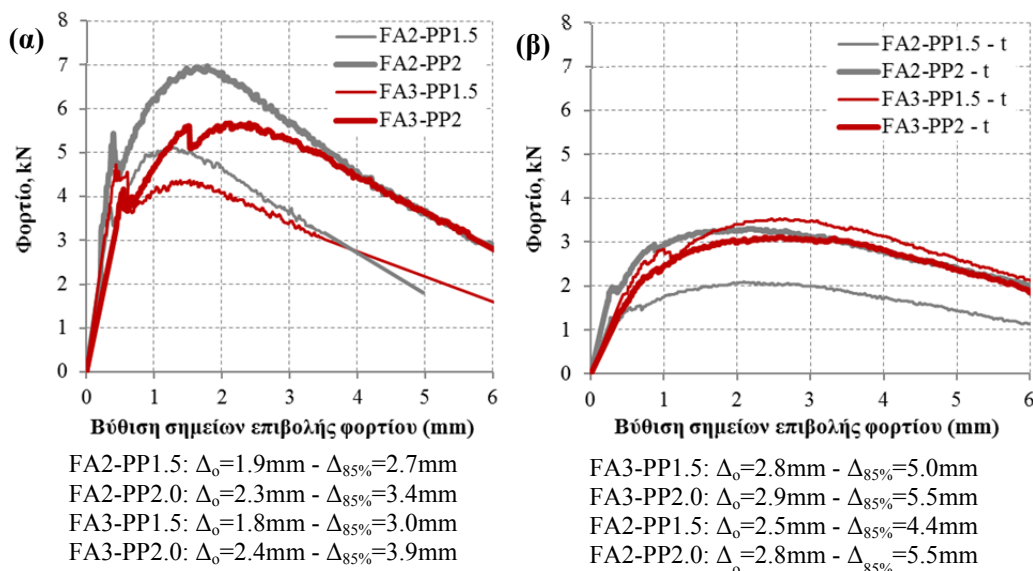


Σχήμα 6. Συγκριτική απεικόνιση δεικτών συμπεριφοράς ($f_{ft,cr}$, G_f , μ_o , $\mu_{85\%}$) για όλες τις συνθέσεις στις τρεις συνθήκες: αναφοράς, έκθεσης σε θερμοκρασία και Ψ/Α.

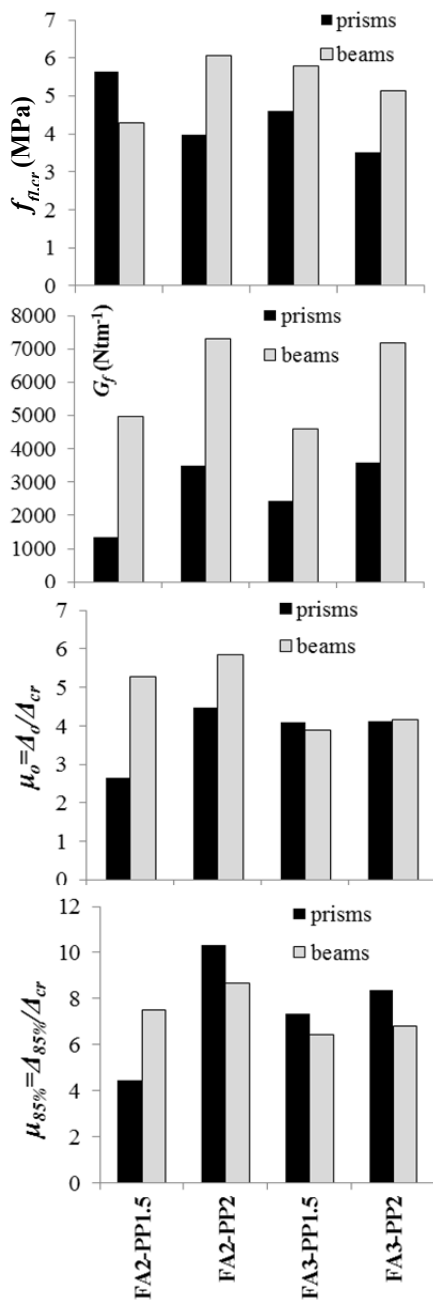
αυτών της ενέργειας θραύσης συγκριτικά με τις άοπλες συνθέσεις. Το P_{cr} (ή $f_{fi,cr}$) όπου δεν συμβαίνει πτώση φορτίου εντοπίζεται στην θέση αλλαγής δυσκαμψίας.

Δοκοί: Τα δοκάρια αναφοράς κατά την φόρτισή τους ανέπτυξαν μία ρωγμή στο διάστημα σταθερής ροπής παρά το γεγονός ότι περιοχή και όχι μία διατομή τίθεται σε μέγιστη ένταση. Αιτία είναι ο ισχυρός μηχανισμός συνάφειας ινών – μήτρας με συνέπεια να υπερσκελιζόταν η ολίσθηση έναντι της επιμήκυνσης των ινών στην κρίσιμη διατομή αποδίδοντας μεγάλο εύρος ρωγμής. Τα ανωτέρω αποκωδικοποιούνται στα διαγράμματα φορτίου – βύθισης (Σχ. 7α) από την μία πτώση φορτίου και την παραβολική μορφή αντίστοιχα. Τα δοκίμια έκθεσης σε υψηλή θερμοκρασία (για τρεις ώρες στους 200°C) ανέπτυξαν τουλάχιστον δύο ρωγμές στο διάστημα σταθερής ροπής, η δημιουργία των οποίων σηματοδότησε μικρή έως αμελητέα πτώση φορτίου και ευρύτερη παραβολική μορφή στα αντίστοιχα διαγράμματα (Σχ. 7β). Σημειώνεται ότι από επιθεώρηση των χειλιών της ρωγμής αστοχίας διαπιστώθηκε εξάλειψη ινών πλησίον των ελεύθερων επιφανειών των δοκιμίων όλων των συνθέσεων.

Στο Σχήμα 7 παρουσιάζονται διαγράμματα φορτίου – βύθισης των σημείων επιβολής φορτίου όπου η καταγραφή ήταν συνεχής και όχι βύθισης μέσου όπου η καταγραφή έγινε με ψηφιακή κάμερα ανά τακτά διαστήματα. Ωστόσο κάτω από τα σχετικά διαγράμματα αναγράφονται οι τιμές βύθισης μέσου στα στάδια αντοχής και απομένουσας αντίστασης (οι προκύπτουσες καμπύλες φορτίου – βύθισης μέσου είναι εκτενέστερες ως προς τον οριζόντιο άξονα). Συγκρίνοντας τις συνθέσεις βάσει των ιστορικών φόρτισης (Σχ. 7α) και των δεικτών συμπεριφοράς (στο Σχ. 8 βλ. τις γκρι στήλες, οι υπολογισμοί έγιναν με χρήση βυθίσεων μέσου) προκύπτει ότι η FA2-PP2 είναι ισχυρότερη από την άποψη της αντοχής και των δεικτών πλαστιμότητας $\mu_o - \mu_{85\%}$ σε σχέση με την FA3-PP2. Ωστόσο οι ενέργειες θραύσης των δύο συνθέσεων είναι παραπλήσιες (για βύθιση



Σχήμα 7. Καμπυτική απόκριση δοκών (α) αναφοράς και (β) έκθεσης σε θερμοκρασία – t.



Σχήμα 8. Συγκριτική απεικόνιση δεικτών συμπεριφοράς ($f_{f,cr}$, G_f , μ_o , $\mu_{85\%}$) πρισμάτων και δοκών αναφοράς για όλες τις συνθέσεις.

σχέσης ροπής - καμπυλότητας βάσει της Αρχής Δυνατών Έργων,

μέσου στο 50% P_o) διότι μετελαστικά η σύνθεση FA3-PP2 έχει ηπιότερη πτώση φορτίου από την FA2-PP2. Η έκθεση σε θερμοκρασία (Σχ. 7β) προκάλεσε πτώση αντοχής από 40 έως 60% αυξάνοντας όμως σημαντικά την πλαστιμότητα των συνθέσεων (πολύ ήπια πτώση φορτίου).

Η επίδραση του στατικού συστήματος στην καμπτική απόκριση

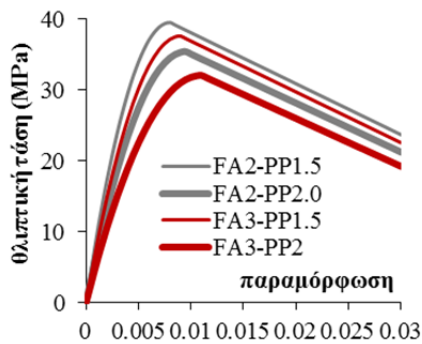
Η σύγκριση των δεικτών συμπεριφοράς μεταξύ των δύο τύπων συζητείται με αναφορά στο Σχ. 8: τα πρίσματα σε κάμψη τριών σημείων (prisms) δηλώνονται με μαύρο χρώμα και τα δοκάρια (beams) σε κάμψη τεσσάρων σημείων με γκρι. Η σύγκριση αφορά μόνο τα δοκίμια αναφοράς και όχι έκθεσης. Συμπεραίνεται ότι:

- η ελαστική αντοχή, $f_{f,cr}$, είναι μεγαλύτερη στα δοκάρια για την πλειονότητα των πλάστιμων συνθέσεων ως συνέπεια της απουσίας τέμνουσας στο διάστημα σταθερής ροπής ή/και φαινομένου κλίμακας διατομής,
- η ενέργεια θραύσης, G_f , είναι μεγαλύτερη στα δοκάρια εξαιτίας του ότι ενεργοποιείται περισσότερο υλικό σε μέγιστη ένταση (και όχι μία διατομή στην περίπτωση των πρισμάτων) - παρατηρείται ότι οι συνθέσεις με 2% PP, έχουν ίδιο μέγεθος ανά στατικό σύστημα,
- η ικανότητα παραμόρφωσης των δοκών στο στάδιο αντοχής, μ_o , είναι ίση ή μεγαλύτερη αυτής των πρισμάτων, συμπεριφορά που αντιστρέφεται στο στάδιο της αστοχίας, $\mu_{85\%}$.

ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΗ ΣΧΕΣΗ ΣΕ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟ

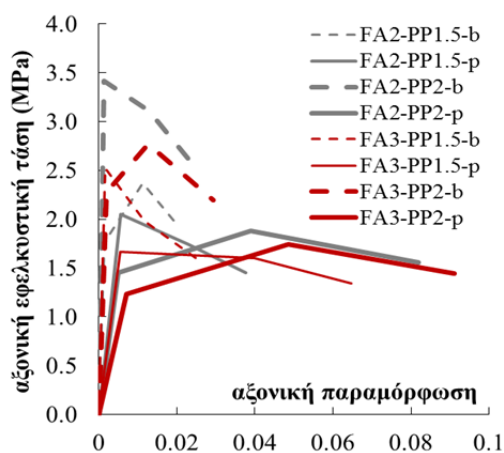
Ο αλγόριθμος προσδιορισμού της καταστατικής σχέσης άμεσης εφελκυστικής τάσης - παραμόρφωσης των τεσσάρων πλάστιμων σκυροδεμάτων περιλαμβάνει:

- την εκτίμηση από το διάγραμμα φορτίου - βύθισης μέσου κάθε πειράματος της



Σχήμα 9. Νόμος σε θλίψη των FA_iPP_j .

Ως δεδομένα του αλγορίθμου λαμβάνονται η καταστατική σχέση του υλικού σε θλίψη (Σχ. 9, προέκυψε από θραύση κύβων από τις ίδιες σκυροδετήσεις, Tastani et al. 2017α,β) και η μορφή της καταστατικής σχέσης σε αξονικό εφελκυσμό για την οποία αναζητούνται τα μεγέθη τάσης και παραμόρφωσης. Ως τέτοια θεωρείται τεθλασμένη γραμμή με τρεις διακριτές ευθείες/στάδια: πρώτης ρηγμάτωσης (σημεία 0,0 και ϵ_{cr} , $f_{t,cr}$), τμήμα αντοχής (ϵ_{cr} , $f_{t,cr}$ και ϵ_o , $f_{t,o}$) και τμήμα απομένουσας αντίστασης (ϵ_o , $f_{t,o}$ και $\epsilon_{85\%}$, $85\%f_{t,o}$). Οι εξισώσεις που περιγράφουν τον ανωτέρω αλγόριθμο μπορούν να αναζητηθούν στην διπλωματική εργασία του Σαββίδη Ι. (2017). Σημειώνεται ότι η αναζήτηση της καταστατικής σχέσης σε εφελκυσμό γίνεται ξεχωριστά για τα δύο στατικά συστήματα ώστε να διαφανεί η επίδραση που αυτά έχουν στην μηχανική ιδιότητα. Η ανάλυση αφορά μόνο τα δοκίμια αναφοράς (χωρίς έκθεση σε θερμοκρασία ή κύκλους ψύξης / απόψυξης). Στο στάδιο της απομένουσας αντίστασης, η ανάλυση έδωσε ύψη θλιβόμενης ζώνης παραπλήσια των μεγεθών που μετρήθηκαν με χρήση ψηφιακής μηχανής (θεωρήθηκε ότι σχηματίζεται περί της ρωγμής πλαστική άρθρωση μήκους $0.5h$, όπου h το ύψος της διατομής).



Σχήμα 10. Αναλυτικές σχέσεις εφελκυσμού για τα δύο στατικά συστήματα.

β) την ανάλυση διατομής με θεώρηση της Αρχής Επιπεδότητας των Διατομών, από την οποία προκύπτει η συσχέτιση της καμπυλότητας με τις παραμορφώσεις των ακραίων ινών της διατομής στα τρία στάδια απόκρισης του υλικού. Η ανάλυση γίνεται υπό τη συνθήκη ότι η παραμόρφωση των ακραίων ινών της διατομής δεν υπερβαίνει τα όρια που επιβάλλονται τόσο από την ικανότητα θλιπτικής παραμόρφωσης (στο 85% της θλιπτικής αντοχής, Σχ. 9) όσο και από το όριο θραύσης των ινών PP ($\epsilon_{fu}=0.25$).

Στο Σχήμα 10 απεικονίζονται οι προκύπτουσες καταστατικές σχέσεις των συνθέσεων για τα δύο στατικά συστήματα. Συνάγεται ότι τα πρίσματα (δείκτης p και συνεχείς τεθλασμένες) έδωσαν ευρύτερο νόμο υλικού και μικρότερη αντοχή συγκριτικά με τα δοκάρια (δείκτης b και διακεκομμένες τεθλασμένες) ακολουθώντας πιστά την πειραματική συμπεριφορά. Ο αξονικός εφελκυσμός είναι ασθενέστερος του καμπτικού ως προς την αντοχή κατά περίπου 50% και συναρτάται με το μέγεθος της διατομής (fib MC2010). Για τις πιο πλαστικές συνθέσεις (με PP2) μπορεί να θεωρηθεί με ασφάλεια ότι η εφελκυστική τους αντοχή είναι

της τάξης των 2.4-2.8MPa (μέση τιμή δομικών συστημάτων) ενώ η ικανότητα παραμόρφωσης στην απομένουσα αντίσταση λαμβάνεται συντηρητικά από την περίπτωση των δοκών κάμψης τεσσάρων σημείων, της τάξης του 0.03.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Παρουσιάζονται αποτελέσματα πειραματικής διερεύνησης πλάστιμων σκυροδεμάτων σε καμπτικό εφελκυσμό. Η συμβολή της εργασίας αφορά την χρήση εγχώριας ασβεστούχας ιπτάμενης τέφρας σε συνδυασμό με υδρόφοβες ίνες πολυπροπυλενίου, συστατικά που δεν έχουν μελετηθεί σε αυτή την κατηγορία σκυροδεμάτων. Πέραν των δοκιμών αναφοράς, συζυγή δοκίμια εκτέθηκαν πριν την φόρτιση σε υψηλή θερμοκρασία και σε κύκλους ψύξης/απόψυξης. Από συγκριτική διερεύνηση δεικτών συμπεριφοράς προέκυψε ότι η σύνθεση με τα μέγιστα μερίδια τέφρας (τριπλάσια του τσιμέντου) και ινών (2%) είναι ένα βιώσιμο, πλάστιμο σκυρόδεμα με ικανοποιητικά μεγέθη εφελκυστικής απόκρισης (αντοχής >2.5MPa και ικανότητας παραμόρφωσης έως και 0.03) όπως προέκυψαν από αντίστροφη ανάλυση των πειραματικών μετρήσεων.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Για την δωρεά των υλικών: SIKA HELLAS, Πλαστικά Θράκης, ΔΕΗ Πτολεμαΐδας.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Eleftheriou T., Tastani S.P., Pantazopoulou S.J. (2017). “Development of reinforcing bars in SRCC matrix: modelling and interpretation”, ASCE J. of Str. Engng, Vol 143, No 9.
- 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) 1216–1228.
- Georgiou A.V., Pantazopoulou S.J., «Behavior of Strain Hardening Cementitious Composites in Flexure/Shear». J. of Materials in Civil Engng, Vol.29 No. 10 (2017).
- International Federation for Concrete, Bulletin No. 65, (2010). fib Model Code for Concrete Structures 2010 (fib MC2010). Pubs. Ernst & Sohn, ISBN: 978-3-433-03061-5.
- Li, V.C., “Engineered Cementitious Composites – Tailored Composites with Micromechanical Modelling”, in Procs. Fiber-Reinforced Concrete: Present and the Future (Canada Montreal, 1998), eds N. Banthia et al., pp. 64-97.
- Tastani S., Ntampali E., Savvidis I., Veneti M., Zapis V. “Strain Resilient Cementitious Composites of unclassified calcareous fly ash and PP fibers: performance by also considering durability effects”, in Procs. 4th Int. Conf. on Strain-Hardening Cement-based Composites (Dresden Germany September 18-20, 2017α), V. Mechtcherine et al. (eds.).
- Tastani S., Veneti M., Zapis V. (2017β), “Strain resilient cementitious composites: compressive response and volumetric stability”, in Procs.2nd Int. RILEM/COST Conf. on Early Age Cracking and Serviceability in Cement-based Materials and Structures - EAC2, 12–14 September 2017, ULB-VUB, Brussels, Belgium.
- 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, Vol. 86 (2015) 146–156.
- Zhou, J., Pan, J., and Leung C.K.Y. “Mechanical Behavior of Fiber-Reinforced Engineered Cementitious Composites in Uniaxial Compression”. ASCE J. of Materials in Civil Engineering, Vol. 27, No. 1 (2015), DOI 04014111.
- Σαββίδης Ι. Διπλωματική Εργασία “Πειραματική μελέτη πλάστιμων σκυροδεμάτων: Η επίδραση της περιεκτικότητας ινών πολυπροπυλενίου”, Τμ. Πολ. Μηχ. ΔΠΘ, 2017.