

# Πλάστιμο σκυρόδεμα από ασβεστούχα τέφρα και ίνες πολυπροπυλενίου II: μηχανική συμπεριφορά σε θλίψη και ογκομετρική σταθερότητα

## Ductile concrete with calcareous fly ash and polypropylene fibers II: compressive behavior and volumetric stability

Σουζάνα ΤΑΣΤΑΝΗ<sup>1</sup>, Μαρία ΒΕΝΕΤΗ<sup>2</sup>, Βασίλειος ΖΑΠΡΗΣ<sup>2</sup>

*Λέξεις κλειδιά: πλάστιμο σκυρόδεμα, τέφρα, ίνες, θλίψη, συρρίκνωση*

**ΠΕΡΙΛΗΨΗ:** Ως πλάστιμο σκυρόδεμα ορίζεται σύνθετο τσιμεντοειδές κονίαμα με σύνθεση από ανόργανα λεπτόκοκκα υλικά, μικρό λόγο νερού προς κονίες (τσιμέντο και τέφρα) και πλαστικές μικροΐνες (συνήθως 2% κ.ο.). Στην παρούσα εργασία αναλύονται ως προς την θλιπτική τους συμπεριφορά τέσσερις συνθέσεις με μεταβλητές την αταξινόμητη ελληνική ασβεστούχα τέφρα (2 και 3 φορές κατά βάρος τσιμέντου) και τις ίνες πολυπροπυλενίου (1.5 και 2% κατ' όγκο). Εξετάζεται η πειραματική απόκριση των υλικών σε συνήθη και προχωρημένη ηλικία, όπως και η ανθεκτικότητά τους σε κύκλους ψύξης – απόψυξης. Η θλιπτική συμπεριφορά τους περιγράφεται από ευρεία παραβολική σχέση τάσης – παραμόρφωσης ως συνέπεια της περίσφιγξης που παρέχουν οι ίνες έναντι διαστολής αποδίδοντας στο υλικό σημαντική ικανότητα παραμόρφωσης. Η τελευταία συναρτάται με την συνάφεια μεταξύ ινών-μήτρας. Ακολούθως διατυπώθηκε προσομοίωμα πρόβλεψης της θλιπτικής συμπεριφοράς λαμβάνοντας υπόψη α) την μεταβολή του φαινόμενου μέτρου Poisson καθώς συσσωρεύεται η βλάβη στο υλικό και β) ενεργειακή θεώρηση περί κατανάλωσης της ενέργειας συνάφειας στην μετά την αντοχή απόκριση. Επιπλέον μελετήθηκε πειραματικά η συστολή ξήρανσης μέσω πρωτότυπης ιδιοσυσκευής.

**ABSTRACT:** Strain Resilient Cementitious Composites (SRCC) made by Greek unclassified calcareous fly ash and polypropylene fibers are sustainable materials with adequate strength and high deformation capacity. They are experimentally studied in the present study in regards to their compressive response with parameters in the composition the fly ash and fibers contents. The mechanical characterization was assessed by testing cubes a) at 28<sup>th</sup> day from casting, b) after 34 freeze-thaw cycles and c) at age that coincides with the freeze-thaw cycling termination. A model was developed aiming to predict the response considering the Poisson ratio evolution and bond energy consumption as damage accumulates. The materials volumetric stability was measured at ambient conditions in a period of 6 months aiming to investigate the drying shrinkage effect.

<sup>1</sup> Επίκουρη Καθηγήτρια, Τμ. Πολιτικών Μηχανικών ΔΠΘ, Ξάνθη 67100, [stastani@civil.duth.gr](mailto:stastani@civil.duth.gr)

<sup>2</sup> Πολ. Μηχανικοί ΔΠΘ, Αρχιτέκτονες Μηχ. ΑΠΘ, [marivene@civil.duth.gr](mailto:marivene@civil.duth.gr), [vzapis@hotmail.com](mailto:vzapis@hotmail.com)

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα σύνθετα τσιμεντοειδή κονιάματα υψηλής ικανότητας σε παραμόρφωση (strain resilient cementitious composites, SRCCs), εν συντομία πλάστιμα σκυροδέματα, είναι μια κατηγορία των ECCs (Li, 1998) και προορίζονται για βιώσιμο σχεδιασμό κατασκευών. Για το σκοπό αυτό, η χρήση μεγάλης ποσότητας ιπτάμενης τέφρας από αποθέσεις αποβλήτων σταθμών παραγωγής ενέργειας μειώνει σημαντικά την εκμετάλλευση των φυσικών πόρων και το κόστος παραγωγής / εξόρυξης / θραύσης. Η ιπτάμενη τέφρα του μίγματος έχει διττή λειτουργία: ως συνδετικό υλικό (μερικό υποκατάστατο του τσιμέντου) και ως όγκος πλήρωσης (αντί για χονδρόκοκκα αδρανή). Η παρουσία υψηλού ογκομετρικού ποσοστού πλαστικών ινών στην σύνθεση προσδίδει στα υλικά μεγάλη ικανότητα παραμόρφωσης με αυξημένη αντίσταση έναντι ρηγμάτωσης. Η συμπεριφορά τους σε εφελκυσμό αποκλίνει από τα τυπικά ECCs καθώς η καμπύλη τάσης - παραμόρφωσης έχει παραβολικό σχήμα (έναντι της κράτυνσης που παρουσιάζουν τα ECCs). Μετά την πρώτη ρηγμάτωση παρατηρείται ήπια αύξηση μέχρι την αντοχή συνοδευόμενη από ήπια πτώση φορτίου (μέχρι 15% απώλεια αντοχής), με τα δύο αυτά στάδια να περικλείουν ευρύ φάσμα ανελαστικών παραμορφώσεων. Στο φάσμα αυτό συμβαίνει περιορισμένη ρηγμάτωση, με την αστοχία να επικεντρώνεται στην διεύρυνση μίας κρίσιμης ρωγμής. Αντιθέτως στα ECCs η ήπια κράτυνση συνοδεύεται από εξελισσόμενη πολυρηγμάτωση, ενώ κατά την σταθεροποίηση της ρηγμάτωσης συμβαίνει αστοχία του υλικού με διεύρυνση μίας κρίσιμης ρωγμής.

Γενικώς, η θλιπτική συμπεριφορά των σύνθετων τσιμεντοειδών κονιαμάτων περιγράφεται από ευρεία παραβολική σχέση τάσης – παραμόρφωσης ως συνέπεια της περίσφιγξης που παρέχουν οι ίνες έναντι διαστολής αποδίδοντας στο υλικό σημαντική ικανότητα παραμόρφωσης: π.χ. η παραμόρφωση στην θλιπτική αντοχή είναι 0.005 ή μεγαλύτερη (Georgiou and Pantazopoulou 2016, Zhou et al. 2015, Kesner et al. 2003) ενώ σε απομένουσα τάση 85% της αντοχής άνω του 0.008. Η ικανότητα παραμόρφωσης σε εφελκυσμό/θλίψη συναρτάται με την λειτουργία του μηχανισμού συνάφειας που αναπτύσσουν οι ίνες με το περιβάλλον υλικό: οι ίνες εξολκεύονται ή/και επιμηκύνονται στην θέση των ρωγμών αν η συνάφεια είναι αντίστοιχα ελεγχόμενη ή ισχυρή.

Σκοπός της παρούσας μελέτης είναι η αποτελεσματική ενσωμάτωση της ελληνικής, αταξινόμητης ασβεστούχας ιπτάμενης τέφρας με χαμηλό άθροισμα πουζολανικών συστατικών (της τάξης του 50,5% σε σύγκριση με το υψηλότερο από 70% της τέφρας τύπου F) και υψηλή περιεκτικότητα σε ασβέστιο (CaO και CaOf συνολικά 55%) σε SRCC κατασκευασμένα με ίνες πολυπροπυλενίου. Οι παράμετροι που εξετάζονται είναι η περιεκτικότητα σε ιπτάμενη τέφρα (FA) (δύο και τρεις φορές το βάρος του τσιμέντου) και η ογκομετρική ποσότητα ινών πολυπροπυλενίου (PP) (0%, 1.5% και 2%). Το νέο υλικό διερευνάται πειραματικά σε σχέση με την θλιπτική απόκριση στις 28 ημέρες, σε κύκλους ψύξης / απόψυξης ( $\psi/a$ ) καθώς και σε μεταγενέστερη ηλικία που συμπίπτει με την λήξη του πρωτοκόλλου  $\psi/a$  (φάσεις φόρτισης) ώστε να διαφανεί η επίδραση του χρόνου στην μηχανική συμπεριφορά. Για τον σκοπό αυτό κατασκευάστηκαν ανά

παράμετρο και φάση φόρτισης τρεις κύβοι ακμής 100mm για εκτίμηση μέσης συμπεριφοράς. Για την πρόβλεψη της συμπεριφοράς των 28 ημερών διατυπώθηκε προσομοίωμα βάσει α) της μεταβολής του φαινομένου μέτρου Poisson καθώς συσσωρεύεται η βλάβη στο υλικό και β) ενεργειακής θεώρησης περί κατανάλωσης της ενέργειας συνάφειας στην μετά την αντοχή απόκριση. Επιπρόσθετα, μετρήθηκε η συστολή ξήρανσης των υπό μελέτη SRCCs μέσω κυλίνδρων χρησιμοποιώντας πρωτότυπη ιδιοσυσκευή.

## ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ

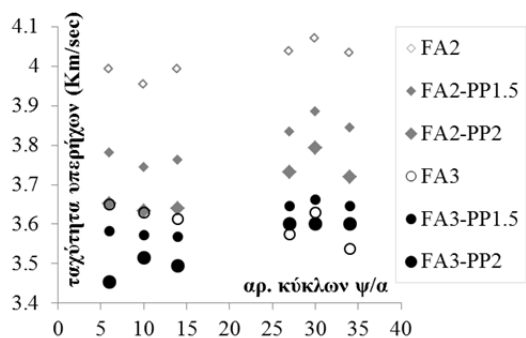
Με βάση τις επιλεγμένες μεταβλητές μελετήθηκαν έξι μείγματα (Πίνακας 1): τέσσερα πλάστιμα και δύο αναφοράς (χωρίς ίνες PP). Σε όλα τα μείγματα χρησιμοποιήθηκε τσιμέντο τύπου CEM I 52,5 N και ξερή λεπτόκοκκη πυριτική άμμος (100% διερχόμενα από κόσκινο βρόγχου 0.5 mm). Οι αναλογίες άμμου / τσιμέντου και νερού / κονιών (τσιμέντου και ιπτάμενης τέφρας) διατηρήθηκαν σταθερές (1.1 και 0.37 αντίστοιχα). Οι μικρο-ίνες πολυπροπυλενίου (από ThracePlastics) έχουν τα εξής χαρακτηριστικά: διάμετρος  $d_f=25\mu\text{m}$ , μήκος  $l_f=12\text{mm}$ , 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 SIKA Ελλάς, 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 ως ποσοστό κατά βάρους τσιμέντου και τέφρας.

Το πειραματικό πρόγραμμα περιελάμβανε μηχανική καταπόνηση κύβων ακμής 100 mm σε κεντρική θλίψη ως εξής: 1) 18 δοκίμια φορτίστηκαν σε ηλικία 28 ημερών από τη χύτευση (συντήρηση σε εργαστηριακό θάλαμο), 2) 18 δοκίμια φορτίστηκαν αφού προηγουμένως είχαν εκτεθεί σε κορεσμένη κατάσταση σε πρόγραμμα 34 κύκλων  $\psi/\alpha$  και 3) 18 δοκίμια φορτίστηκαν σε ηλικία που συμπίπτει με την λήξη του προγράμματος  $\psi/\alpha$ . Τα δοκίμια αυτά συντηρήθηκαν στον θάλαμο μέχρι την προηγούμενη της φόρτισης. Η διαδικασία  $\psi/\alpha$  ξεκίνησε την 28<sup>η</sup> μέρα και είχε ως εξής: τα δοκίμια τοποθετούνταν σε ψύξη στους  $-20^\circ\text{C}$  για 24 ώρες, στην συνέχεια παρέμεναν για 24 ώρες σε συνθήκες δωματίου βυθισμένα σε νερό (θερμοκρασία περί  $15^\circ\text{C}$ ). Περιστασιακά, και πριν την έναρξη της φάσης ψύξης, μετρούνταν εμμέσως η πυκνότητα των δοκιμίων με χρήση υπερήχων. Λαμβάνοντας υπόψη ότι ο χαμηλός λόγος νερού προς συνδετικό υλικό

**Πίνακας 1.** Αναλογίες μίξης (κ.β. του τσιμέντου) έξι συνθέσεων.

Όνομασία Μίξης	Τσ. C	I.T. FA/C	Άμμος S/C	Νερό w=W/C	$w^*=W/(C+FA)$	Ίνες PP (κ.ο. %)	HRWR (κ.β. %)
FA2						0.00	1.33
FA2-PP1.5		2.00		1.10		1.50	4.67
FA2-PP2	1.00		1.10		0.37	2.00	5.33
FA3						0.00	1.50
FA3-PP1.5		3.00		1.47		1.50	5.00
FA3-PP2						2.00	6.00

(0.37) οδηγεί σε περιορισμένο δίκτυο τριχοειδών πόρων και ότι το νερό παγώνει εντός αυτών υπό τους  $-12^\circ\text{C}$  ενώ εντός των πόρων γέλης υπό τους  $-78^\circ\text{C}$  (Yu et al. 2017), συνάγεται ότι μόνο η πρώτη



**Σχήμα 1.** Εξέλιξη ταχύτητας υπερήχων συναρτήσει κύκλων ψ/α των συνθέσεων.

κατηγορία πορώδους είναι υπεύθυνη για την επικείμενη βλάβη από ψ/α δεδομένου ότι το νερό κατά την αλλαγή φάσης μεταβάλλει τον όγκο του κατά 9%. Στο Σχ. 1 απεικονίζεται η μεταβολή της ταχύτητας υπερήχων αυξανόμενου του αριθμού κύκλων ψ/α. Παρατηρείται ότι, με εξαίρεση την σύνθεση FA3, συμβαίνει αύξηση του μεγέθους δηλώνοντας συνακόλουθη αύξηση της πυκνότητας, που στην συνέχεια, από την θραύση των δοκιμίων, πιστώνεται ως αύξηση της αντοχής (βλ. Σχ. 4-5).

Για την μελέτη της συστολής ξήρανσης χρησιμοποιήθηκαν δύο τουλάχιστον κύλινδροι 100x200 mm (DxH) ανά σύνθεση. Οι κύλινδροι, μετά από 28 μέρες εντός θαλάμου ( $T=20^{\circ}\text{C}$ ,  $\text{RH}>95\%$ ), συντηρήθηκαν σε συνθήκες δωματίου, όπου για περίπου 6 μήνες (άνοιξη - καλοκαίρι) μετρούνταν τακτικά οι μεταβολές διαμέτρου και ύψους μέσω πρωτότυπης ιδιοσυσκευής και παχυμέτρου ακριβείας. Η ιδιοσυσκευή ήταν μεταλλικός κύλινδρος που έφερε περιμετρικά οπές σε ισαπέχοντα διαμετρικά επίπεδα. Τα δοκίμια σταθεροποιούνταν κεντρικά εντός της ιδιοσυσκευής και μετρούνταν η απόσταση μεταξύ της εξωτερικής επιφάνειας της ιδιοσυσκευής (σημείο αναφοράς) και της ελεύθερης επιφάνειας του δοκιμίου στην στάθμη των οπών  $\Delta D_{ij}$  ( $i=1,2,3,4$  για τέσσερα διαμήκη επίπεδα  $H_i$  και  $j=1,2,3$  για τις στάθμες των οπών, 0 η ελεύθερη επιφάνεια, Σχ. 2). Επιπλέον μετρούνταν τα ύψη  $H_i$  που διέρχονταν από τις θέσεις των οπών. Οι μετρήσεις των 28 ημερών θεωρούνται ως σημείο αναφοράς/έναρξης της συστολής ξήρανσης.

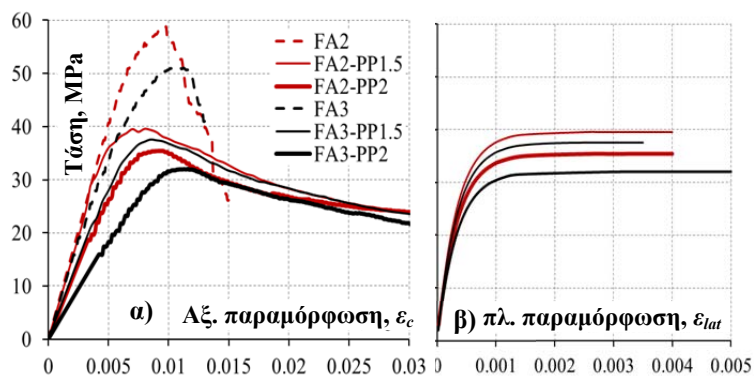
## ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Για την καταγραφή της αξονικής και πλευρικής παραμόρφωσης των κύβων χρησιμοποιήθηκαν αντίστοιχα LVDT και strain gauges επικολλημένα στο μέσον απέναντι πλευρών. Οι ακόλουθες καμπύλες τάσης - παραμόρφωσης είναι μέσες συμπεριφορές από τρία δοκίμια κάθε φορά.



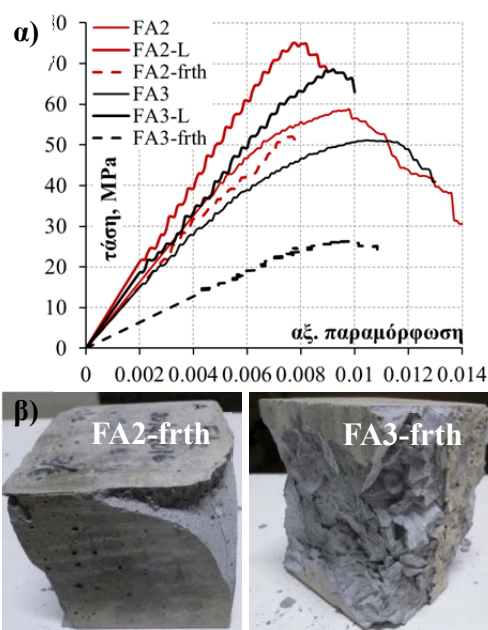
**Σχήμα 2.** Ιδιοσυσκευή για μέτρηση ογκομετρικής συστολής ξήρανσης και μητροϊκή απεικόνιση των δεικτών μέτρησης.

**Θλιπτική συμπεριφορά 28 ημερών (Σχ. 3):** Στις συνθέσεις χωρίς ίνες FAi, (δηλώνονται με διακεκομμένη γραμμή), η αύξηση του ποσοστού ιπτάμενης τέφρας είχε αρνητική επίδραση στη θλιπτική αντοχή (πτώση 20%) και στην ενδοτικότητα του υλικού (χαμηλότερο μέτρο ελαστικότητας στην FA3). Οι τάσεις αυτές παρατηρούνται και στις πλαστικές συνθέσεις και για τα δύο ποσοστά ιών PP (πάντα οι μαύρες καμπύλες που αναφέρονται στις μίξεις με FA3 βρίσκονται στα δεξιά των αντίστοιχων κόκκινων με FA2). Οι συνθέσεις με 2% PP (σύγκριση των παχύτερων γραμμών με τις διακεκομμένες) σημείωσαν τις μεγαλύτερες μειώσεις αντοχής (άνω του 35%) και μέτρου ελαστικότητας. Ανεξάρτητα του μεριδίου τέφρας η απόκριση των SRCs α) κοντά στην αντοχή φαίνεται να εξαρτάται αποκλειστικά από την συνάφεια ιών - μήτρας που είναι πλήρως ενεργή σε αυτό το στάδιο: υποθέτοντας ίδια αντοχή συνάφειας για όλες τις συνθέσεις, ένας λιγότερο δύσκαμπτος νόμος συνάφειας – ολίσθησης στην περίπτωση των FA3-PPj τοποθετεί τις καμπύλες τάσης – παραμόρφωσης στα δεξιά των αντίστοιχων FA2-PPj. β) Στο στάδιο μετά την αντοχή όπου η ρηγμάτωση διευρύνεται, η περίσφιγξη που παρέχουν οι ίνες ελέγχει την διόγκωση με συνέπεια οι φθιτοί κλάδοι των καμπυλών να συμπίπτουν για ίδια ποσοστά ιών. Ενδιαφέρον είναι ότι η πιο βιώσιμη μίξη FA3-PP1.5, από την άποψη του υποπροϊόντος, της ενέργειας μίξης και του υπερρευστοποιητή που απαιτήθηκαν για την ομοιόμορφη διασπορά των ιών, είχε παραπλήσια συμπεριφορά με την πιο ινοπλισμένη και τιμιεντούχα σύνθεση FA2-PP2. Σχετικώς με την πλευρική διόγκωση (Σχ. 3β), τα strain gages κατέγραψαν την απόκριση έως την αντοχή και αστόχησαν όταν η ρηγμάτωση έγινε εντονότερη κατά την έναρξη του φθιτού κλάδου.



**Σχήμα 3.** Θλιπτική συμπεριφορά 28 ημερών: α) τάση-αξονική παραμόρφωση και β) τάση - πλευρικής παραμόρφωση.

**Θλιπτική συμπεριφορά υπό έκθεση σε κύκλους ψ/α και σε μεταγενέστερη ηλικία (Σχ. 4-5):** Η συμπεριφορά στις 28 ημέρες των άοπλων συνθέσεων συγκρίνεται με τις αντίστοιχες της μεταγενέστερης ηλικίας (*Later*) και της έκθεσης σε κύκλους ψ/α (*freeze-thaw*) στο Σχ. 4α. Η αύξηση της τέφρας είχε αρνητική συνέπεια στην αντοχή και την ενδοτικότητα και στις δύο ηλικίες. Ωστόσο, οι δείκτες αυτοί βελτιώθηκαν σημαντικά στην μεταγενέστερη ηλικία. Η αστοχία των *L* δοκιμίων ήταν πιο απότομη (απουσία ήπια φθιτού κλάδου, Σχ. 4α). Η συμπεριφορά των *frth* δοκιμίων ήταν υποδεέστερη των δοκιμίων αναφοράς στις 28 ημέρες και η αστοχία στο εσωτερικό δεν ήταν η τυπική μορφή κλεψύδρας αλλά με σχηματισμό λεπίδων (Σχ. 4β). Η ευαισθησία της FA3 έναντι ψ/α επιβεβαιώνεται και από την μείωση της ταχύτητας υπερήχων (Σχ. 1).

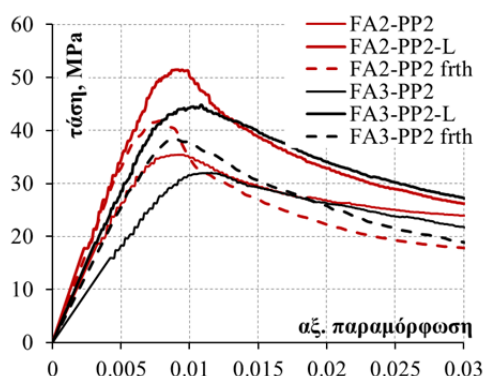
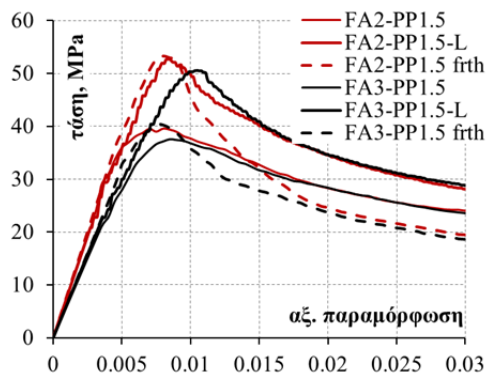


**Σχήμα 4.** α) Θλιπτική συμπεριφορά FAi σε όλες τις φάσεις. β) Αστοχία *frth* δοκ.

φόρτισης, αποδίδεται όπως και προηγουμένως στην συνάφεια ινών – μήτρας: η ίδια αντοχή συνάφειας συμβαίνει σε μεγαλύτερη τιμή ολίσθησης ινών στην περίπτωση με FA3 έναντι της FA2, με συνέπεια η καμπύλη της FA3-PP1.5 να τοποθετείται στα δεξιά της FA2-PP1.5. Αυτό εξηγεί γιατί στις δύο ηλικίες αυτά τα SRCCs είχαν παραπλήσια αύξηση σε αντοχή αλλά διαφορετική ενδοτικότητα. Για τις συνθέσεις με 2% PP (Σχ. 5) τα συμπεράσματα διαφοροποιούνται: η αρχική απόκριση μέχρι την αντοχή γίνεται λιγότερο ενδοτική με την ηλικία (δοκίμια *L*) ενώ η αύξηση της αντοχής είναι παραπλήσια (περίπου 47%) και για τα δύο μερίδια τέφρας. Η αντοχή της FA2 είναι υψηλότερη της FA3 μόλις κατά 4MPa και στις δύο ηλικίες. Τα δοκίμια ψ/α σημείωσαν μείωση αντοχής κατά 10MPa και 8MPa για FA2 και FA3 αντίστοιχα συγκριτικά με τις αντίστοιχες αντοχές των *L* δοκιμίων (εδώ συγκρίνονται τα FA2-PP2-*frth* με FA2-PP2-*L* και FA3-PP2-*frth* με FA3-PP2-*L* αντίστοιχα). Γενικώς μπορεί να ειπωθεί ότι η αύξηση σε FA μείωσε την αντοχή των SRCC (πιο προφανές στην περίπτωση των συνθέσεων με PP2) και αύξησε την ενδοτικότητα του υλικού ως συνέπεια του υψηλού ασβεστολιθικού παράγοντα στη σύσταση της τέφρας.

Συγκρίνοντας τα δύο διαγράμματα του Σχ. 5 (δηλαδή, με μεταβλητή μελέτης το ποσοστό των ινών) προκύπτει ότι: για τις συνθέσεις με FA2 (κόκκινες καμπύλες) των *L* δοκιμίων το ποσοστό των ινών δεν μετέβαλε την αντοχή, ούτε την απόκριση του φθιτού κλάδου. Ωστόσο η περίπτωση με PP2 φαίνεται να α) καθυστερεί την ανάπτυξη ισχυρότερων δεσμών στην μήτρα, διαδικασία που επιδρά στην ενδοτικότητα του υλικού συν τω χρόνω και β) επέδρασε αρνητικά

Η θλιπτική απόκριση των πλάστιμων συνθέσεων FAi-PPj για όλες τις φάσεις απεικονίζεται στο Σχ.5: τα δύο διαγράμματα παράχθηκαν με μεταβλητή την τέφρα για ένα ποσοστό ινών. Συμπεραίνεται ότι: για 1.5%PP, οι συνθέσεις με FA2 (με κόκκινο, Σχ. 5) είχαν παραπλήσια απόκριση μέχρι την αντοχή στις φάσεις *L* και *frth* (αντοχή περί 54MPa, υψηλότερη των 40MPa στις 28 ημέρες). Η έκθεση σε ψ/α επηρέασε τον φθιτό κλάδο διότι προφανώς επιδεινώθηκε ο μηχανισμός συνάφειας ως προς τον περιορισμό της διεύρυνσης των ρωγμών. Οι συνθέσεις με FA3 (μαύρες, Σχ. 5) παρουσίασαν παραπλήσια αύξηση αντοχής με τις FA2 στην μεταγενέστερη ηλικία (από 38 σε 50MPa), ωστόσο σε ψ/α διατήρησαν την αντοχή στο ίδιο επίπεδο με την ηλικία των 28 ημερών. Η απόκριση πλησίον της αντοχής, ανεξαρτήτως του μεριδίου τέφρας και της ηλικίας



Σχήμα 5. Θλιπτική συμπεριφορά των FAi - PPj και τυπική αστοχία.

(Archontas et al, 2013) καθώς μειώνουν τον όγκο της τσιμεντούχας πάστας ( $V_p$  στην περίπτωση της άοπλης σύνθεσης και  $V_p - V_f$  στην περίπτωση των SRCC, όπου  $V_f$  είναι ο όγκος των ινών). Προς αυτή την κατεύθυνση, λαμβάνοντας υπόψη τον αριθμό των ινών  $N_I$  ανά μονάδα επιφάνειας σκυροδέματος ως  $N_I = aV_f/A_f$  (Soroshian and Lee, 1990) όπου  $a$  είναι ο συντελεστής προσανατολισμού ( $=0.6$ ) και  $A_f$  το εμβαδόν διατομής μίας ίνας, η αντοχή των SRCC μπορεί να προσδιοριστεί με βάση την αντοχή των άοπλων συνθέσεων  $f_{cl}$  ως εξής:

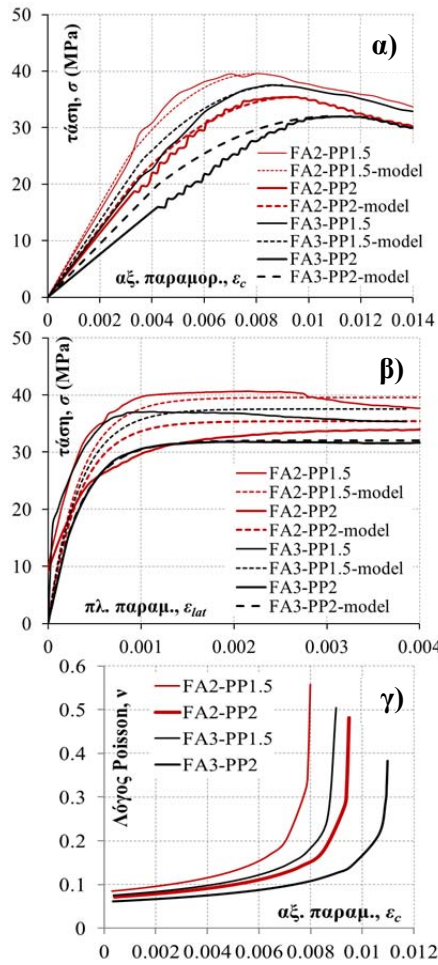
$$f_c(V) = f_{cl} - 0.6V/A_f \quad (1)$$

Οι αναλυτικές τιμές αντοχής των SRCC ( $f_c^{pre}$ ) βάσει της Εξ. (1) δίδονται στον Πίν. 2 και συμφωνούν με τις αντίστοιχες πειραματικές ( $f_c^{exp}$ ). Οι Georgiou and Pantazopoulou (2016) υιοθέτησαν την παραβολή του Hognestad (Εξ. 2) για την περιγραφή του ανιόντα κλάδου  $\sigma - \epsilon_c$  των ECCs, όπως δίδεται από την Εξ. (2).

στην αντίσταση των δοκιμών  $frth$  (τα δοκίμια με PP2 σημείωσαν μείωση αντοχής κατά 10MPa μεταξύ των  $L$  και  $frth$ , ενώ τα αντίστοιχα με PP1.5 καμία). Οι συνθέσεις με FA3 (μαύρες καμπύλες) ήταν πιο ευαίσθητες στο ποσοστό ινών αναπτύσσοντας χαμηλότερη αντοχή με αύξηση του PP και στις δύο ηλικίες. Η έκθεση σε ψ/α μείωσε την αντοχή στο επίπεδο της σύνθεσης FA2-PP2frth. Σημείωση: κατά την λήξη του προγράμματος ψ/α οι συνθέσεις με PP2 είχαν άθικτη εξωτερική επιφάνεια ενώ με PP1.5 είχαν μικρο-ρηγματωθεί.

## ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ ΣΕ ΘΛΙΨΗ

**Ανιόντας κλάδος:** Από τα πειραματικά αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν μέχρι τώρα προκύπτει ότι οι ίνες PP σε υψηλά ποσοστά περιορίζουν την αντοχή και την ακαμψία συγκριτικά σε τις άοπλες συνθέσεις, προς όφελος ωστόσο την ικανότητας παραμόρφωσης. Η πρόβλεψη της αντοχής των SRCCs δεν μπορεί να βασιστεί στα συνήθη προσομοιώματα περίσφιγξης βάσει των οποίων οι ίνες συμβάλουν στην αύξηση της αντοχής των άοπλων μητρών, αντίθετα θα πρέπει να βασιστεί στην αντίληψη ότι η αντοχή εξαρτάται κυρίως από τα συμπαγή τσιμεντοειδή παράγωγα και όχι από τις ίνες που προκαλούν ασυνέχεια της συμπαγούς τσιμεντοειδούς φάσης



**Σχήμα 6.** Θλιπτική  $\sigma$  ως προς α)  $\varepsilon_c$  & πρόβλεψη, Εξ. (2), β)  $\varepsilon_{lat}$  & πρόβλεψη, Εξ. (3). γ) Αναλυτική  $\nu - \varepsilon_c$  μέχρι  $\varepsilon_{co}$ . φορτίο αυξάνει ραγδαία, σε τιμές μεγαλύτερες της μονάδας. Εφαρμόζοντας αντίστροφη ανάλυση των πειραματικών τους δεδομένων, προκύπτει η Εξ. (4β) μεταξύ  $\nu - \varepsilon_c$ .

$$\varepsilon_c \leq \varepsilon_{co} : \nu(\varepsilon_c) = -\frac{1}{1500\varepsilon_c} \ln\left(1 - \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{co}}\right) \quad (4a), \quad \varepsilon_c > \varepsilon_{co} : \nu(\varepsilon_c) = \nu_o - \ln\left(\frac{\varepsilon_{co}}{\varepsilon_c}\right) \quad (4b)$$

**Πίνακας 2.** Εκτιμώμενη -βάσει Εξ. (1)- και πειραματική θλιπτική αντοχή των SRCCs.

FA2	FA2-PP1.5			FA2-PP2			FA3	FA3-PP1.5			FA3-PP2		
	$f_{cl}$	$f_c^{exp}$	$\varepsilon_{co}^{exp}$	$f_c^{pred}$	$f_c^{exp}$	$\varepsilon_{co}^{exp}$		$f_c^{pred}$	$f_{cl}$	$f_c^{exp}$	$\varepsilon_{co}^{exp}$	$f_c^{pred}$	$f_c^{exp}$
58.8	39.6	0.008	40.4	35.4	0.0095	34.3	50	37.6	0.009	31.7	32.0	0.011	25.5

$$\sigma(\varepsilon_c) = f_c \cdot \left[ 2\varepsilon_c / \varepsilon_{co} - (\varepsilon_c / \varepsilon_{co})^2 \right], \quad \varepsilon_c \leq \varepsilon_{co} \quad (2)$$

Στην Εξ. (2),  $\varepsilon_{co}$  είναι η παραμόρφωση στην αντοχή  $f_c$ . Συγκρίνοντας την Εξ. (2) με τα πειραματικά αποτελέσματα, η πρόβλεψη θεωρείται ικανοποιητική (Σχ. 6α). Για την πρόβλεψη της πειραματικής εγκάρσιας παραμόρφωσης μέχρι την αντοχή (συνεχείς καμπύλες, Σχ. 6β) προτείνεται η Εξ. (3), η οποία συσχετίζει την  $\varepsilon_{lat}$  με την αξονική τάση  $\sigma$  (διακεκομμένες καμπύλες, Σχ. 6β).

$$\sigma(\varepsilon_{lat}) = f_c \cdot (1 - e^{-3000\varepsilon_{lat}}) \quad (3)$$

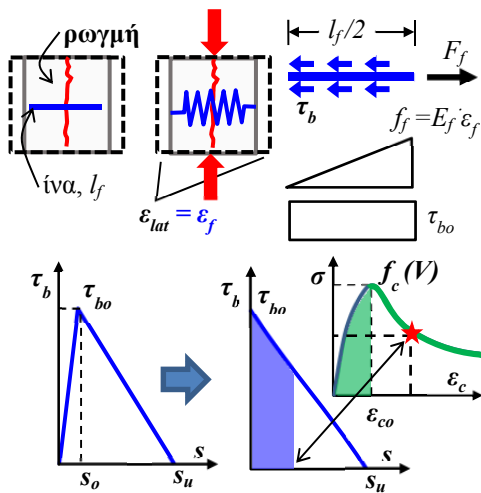
Μέσω των Εξ. (2-3), για δεδομένη τάση  $\sigma$  υπολογίζονται οι παραμορφώσεις  $\varepsilon_c$  και  $\varepsilon_{lat}$ , ορίζοντας έτσι το αντίστοιχο φαινόμενο λόγο Poisson,  $\nu = \varepsilon_{lat} / \varepsilon_c$ . Εναλλακτικά, συνδυάζοντας τις Εξ. (2-3) με  $\nu = \varepsilon_{lat} / \varepsilon_c$  προκύπτει άμεση συσχέτιση μεταξύ  $\nu$  και  $\varepsilon_c$  [Εξ. (4α)]. Το Σχ. 3γ δηλώνει την έντονη αύξηση της διόγκωσης του υλικού καθώς το αξονικό φορτίο πλησιάζει στο μέγιστο. Ο φαινόμενος λόγος Poisson στην αντοχή πλησιάζει το όριο  $\nu_o = 0.5$  (εξάιρεση η σύνθεση FA3-PP2 με  $\nu_o = 0.4$ ).

Για την απόκριση της εγκάρσιας παραμόρφωσης μετά το μέγιστο φορτίο δεν υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα από την παρούσα πειραματική μελέτη (αστοχία των strain gages). Ωστόσο, από Georgiou and Pantazopoulou (2016), φαίνεται ότι ο φαινόμενος λόγος Poisson  $\nu$  μετά το μέγιστο



**Φθιτός κλάδος:** Στα SRCCs, οι ίνες PP αυξάνουν σημαντικά την ικανότητα σε ανελαστική παραμόρφωση επιβραδύνοντας τον ρυθμό μείωσης της αντοχής. Η ικανότητα του σκυροδέματος να απορροφά ενέργεια κατά την παραμόρφωση ποσοτικοποιείται από την περιοχή που περικλείεται μεταξύ του φθιτού κλάδου  $\sigma-\varepsilon_c$  και του οριζόντιου άξονα των  $\varepsilon_c$ . Για την πρόβλεψη της τάσης  $\sigma$  μετά την αντοχή θεωρείται ότι η απορροφούμενη ενέργεια θραύσης ελέγχεται από τον μηχανισμό συνάφειας ινών-μήτρας. Στο προτεινόμενο προσομοίωμα υιοθετείται θεώρηση περί κατανάλωσης ενέργειας συνάφειας ως εξής:

ι) Στη θλιπτική αντοχή η τάση συνάφειας γίνεται μέγιστη  $\tau_{bo}$ . Οι Takashima et al. (2003) αναφέρουν μέση αντοχή συνάφειας ινών PP 0.4 MPa, ωστόσο σε οποιοδήποτε σύστημα αγκύρωσης οι Tastani and Pantazopoulou (2013) απέδειξαν ότι η εγγενής αντοχή  $\tau_{bo}$  είναι υψηλότερη της μέσης τιμής που υπολογίζεται στο



μέγιστο φορτίο ως συνέπεια του βαθμού αποκόλλησης της ίνας στην έναρξη της αγκύρωσης. Η αντίστοιχη της  $\tau_{bo}$  ολίσθηση  $s_o$  (Σχ. 7) εκτιμάται ως το ολοκλήρωμα της κατανομής παραμόρφωσης της ίνας  $\varepsilon_f$  στο μήκος αγκύρωσης (λαμβάνεται εδώ  $L_b=l_f/2$ ). Θεωρώντας ότι η πλευρική παραμόρφωση που ανέπτυξε το δοκίμιο  $\varepsilon_{lat}$  είναι ίση της  $\varepsilon_f$ , αφού οι ίνες ελέγχουν την διεύρυνση των κατακορύφων ρωγμών, προκύπτει ότι  $s_o=1/2 \cdot l_f/2 \cdot \varepsilon_{lat}$ . Ανακαλώντας ότι  $\varepsilon_{lat}=\nu_o \cdot \varepsilon_{co}$ , για  $l_f=12mm$ ,  $\nu_o=0.5$  και  $\varepsilon_{co}=0.01$  (μέση τιμή της  $\varepsilon_{co}^{exp}$  από Πιν. 2) προκύπτει  $s_o=0.015mm$ . Η τιμή  $s_u$  για μηδενισμό συνάφειας με εξόλκευση ινών χωρίς θραύση είναι 1-2mm και εξαρτάται από το  $l_f$  ινών (Takashima et al. 2003).

**Σχήμα 7.** Ο μηχανισμός συνάφειας ίνας - μήτρας και ο θεωρούμενος νόμος  $\tau_b - s$ .

ιι) Η θλιπτική ενέργεια που συσσωρεύεται μέχρι την αντοχή (πράσινη περιοχή κάτω από την  $\sigma-\varepsilon_c$  ολοκληρωμένη στον όγκο κύβου ακμής  $b$ , Σχ. 7) υπολογίζεται:

$$U_c = b^3 \int_0^{\varepsilon_{co}} \sigma(\varepsilon_c) d\varepsilon_c = b^3 \cdot f_c \int_0^{\varepsilon_{co}} \left[ 2 \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{co}} - \left( \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{co}} \right)^2 \right] d\varepsilon_c = \frac{2}{3} b^3 \cdot \varepsilon_{co} \cdot f_c \quad (5)$$

Η ενέργεια συνάφειας που καταναλώνεται μέχρι την θλιπτική αντοχή είναι η περιοχή κάτω από την σχέση  $\tau_b-s$  μέχρι  $s_o$  ολοκληρωμένη στην περιφέρεια του  $L_b$ :

$$U_{bo} = \frac{0.6V}{V_f} b^3 \left( \int_0^{L_b} \int_0^{s_o} \tau(s) ds \right) \pi d_f dx = \frac{0.6V}{\pi d_f^2 l_f / 4} b^3 \frac{\pi d_f l_f}{2} \frac{1}{2} s_o \tau_o = 0.6V b^3 \frac{s_o}{d_f} \tau_o \quad (6)$$

Μετά το μέγιστο θλιπτικό φορτίο η συσχετιζόμενη καταναλωθείσα ενέργεια συνάφειας επισημαίνεται από την μπλε περιοχή στον απλοποιημένο νόμο

συνάφειας – ολίσθησης του Σχ. 7 και δίνεται από τη Εξ. (7). (Η ολίσθηση είναι  $s=1/2 \cdot l_f/2 \cdot \varepsilon_f$  όπου  $\varepsilon_f = \varepsilon_{lat} = \nu \cdot \varepsilon_c$  με  $\nu$  από την Εξ. (4β), συνεπώς  $s = l_f/4 \cdot \nu \cdot \varepsilon_c$ ).

$$U_b = \frac{0.6Vb^3}{V_f} \int_0^{L_b} \left( \int_0^{s_0} \tau(s) ds \right) \pi d_f dx = 0.6Vb^3 \frac{l_f}{4d_f} \nu \varepsilon_c \left[ \frac{\tau_o}{s_u} \left( s_u - \frac{l_f}{4} \nu \varepsilon_c \right) + \tau_o \right] \quad (7)$$

Η συνολική καταναλωθείσα ενέργεια συνάφειας είναι το άθροισμα των Εξ. (6-7) και δίδεται από την Εξ. (8).

$$U_{b,tot} = U_{bo} + U_b = 0.6Vb^3 \cdot \left( \frac{l_f}{4d_f} \cdot \nu \cdot \varepsilon_c \cdot \left[ \frac{\tau_o}{s_u} \left( s_u - \frac{l_f}{4} \nu \cdot \varepsilon_c \right) + \tau_o \right] + \frac{s_o}{d_f} \tau_o \right) \quad (8)$$

iii) Η απομένουσα θλιπτική τάση  $\sigma$  για αξονική παραμόρφωση  $\varepsilon > \varepsilon_{co}$  υπολογίζεται θεωρώντας ότι η συνολική καταναλωθείσα ενέργεια συνάφειας απομειώνει το απόθεμα της συσσωρευμένης ενέργειας θραύσης μέχρι την αντοχή. Το ανωτέρω περιγράφει η σχέση  $\sigma(\varepsilon_c) = f_c \cdot (1 - U_{b,tot}/U_c)$ , όπου αντικαθιστώντας με τις Εξ. (5, 8):

$$\sigma(\varepsilon_c) = f_c \left( 1 - 0.6V \left( \frac{l_f}{4d_f} \nu \varepsilon_c \left[ \frac{\tau_o}{s_u} \left( s_u - \frac{l_f}{4} \nu \varepsilon_c \right) + \tau_o \right] + \frac{s_o}{d_f} \tau_o \right) / 0.67 \varepsilon_{co} f_c \right) \quad (9)$$

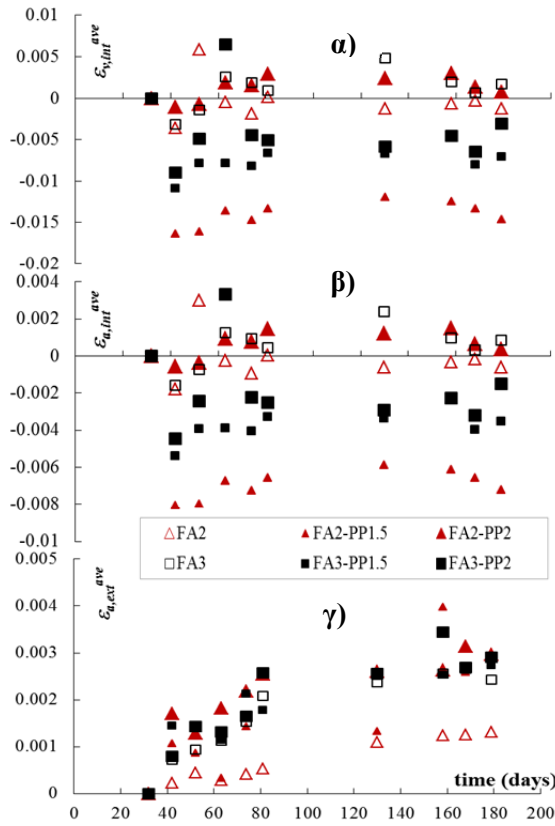
Η διαδικασία που περιγράφηκε υλοποιείται με χρήση κοινού νόμου  $\tau$ - $s$  για τα τέσσερα SRCC (με  $s_u = 1\text{mm}$  και  $\tau_{bo} = 0.7\text{MPa}$ ). Η αναλυτική τιμή της απομένουσας τάσης  $\sigma(\varepsilon_c)^{pred}$  σε διάφορες τιμές του  $\varepsilon_c$ , προσεγγίζει ικανοποιητικά τις πειραματικές τιμές  $\sigma(\varepsilon_c)^{exp}$ , όπως φαίνεται στον Πιν. 3.

**Πίνακας 3.** Εκτίμηση θλιπτικής τάσης φθιτού κλάδου (ενεργειακή θεώρηση).

	FA2-PP1.5		FA2-PP2		FA3-PP1.5		FA3-PP2	
$\varepsilon_c$	$\sigma^{exp}(\varepsilon_c)$	$\sigma^{pred}(\varepsilon_c)$	$\sigma^{exp}(\varepsilon_c)$	$\sigma^{pred}(\varepsilon_c)$	$\sigma^{exp}(\varepsilon_c)$	$\sigma^{pred}(\varepsilon_c)$	$\sigma^{exp}(\varepsilon_c)$	$\sigma^{pred}(\varepsilon_c)$
0.015	32.0	34.1	29.7	30.1	31.4	33.2	30.0	28.1
0.020	28.3	30.9	26.8	26.7	28.0	30.7	25.0	25.5
0.03	24.0	23.8	26.2	19.2	23.5	25.1	21.8	19.8

## ΣΥΣΤΟΛΗ ΞΗΡΑΝΣΗΣ ΤΩΝ SRCCs

Η ασβεστούχα ιπτάμενη τέφρα χαρακτηρίζεται από υψηλό ποσοστό ασβέστη στη σύνθεσή της (CaO 38.5% και CaO<sub>f</sub> 15.5%) με συνέπεια την ευπάθεια των συνθέσεων σε απώλεια νερού σε πρώιμη ηλικία με συνακόλουθη ρηγμάτωση. Η απώλεια της υγρασίας προκαλείται λόγω της ενυδάτωσης του CaO και της εξάτμισης με αποτέλεσμα να αναπτύσσονται αρνητικές τριχοειδείς πιέσεις στη τσιμεντοειδή μήτρα και επακόλουθο την δημιουργία εσωτερικών θλιπτικών παραμορφώσεων. Λαμβάνοντας υπόψη ότι ο πυρήνας του δοκιμίου παρέχει περίσφιξη, αυτές οι παραμορφώσεις έχουν ως αποτέλεσμα τάσεις εφελκυσμού, που αν υπερβούν την εφελκυστική αντοχή προκαλούνται ρωγμές σε σκυροδέματα με ανεπαρκώς ανεπτυγμένη αντοχή (Banthia and Gupta 2006). Επισημαίνεται ότι



**Σχήμα 8.** Η συν τω χρόνω παραμ. συστολής ξήρανσης: α)  $\varepsilon_{v,int}^{ave}$ , β)  $\varepsilon_{a,int}^{ave}$  και γ)  $\varepsilon_{v,ext}^{ave}$ .

οι συνθέσεις με υψηλά ποσοστά τέφρας αναπτύσσουν αντοχή παρουσία  $CO_2$  (εκτός θαλάμου συντήρησης) ενώ με τσιμέντο σε κορεσμένες συνθήκες (εντός θαλάμου). Η ευαίσθητη δομή των FA2/3 σε ρηγματώσεις αποδείχθηκε με ανάπτυξη καθ' ύψους των κυλίνδρων μίας ρωγμής. Αντιθέτως, οι ινοπλισμένες συνθέσεις FAi-PPj δεν ανέπτυξαν ρωγμές παραλαμβάνοντας αποτελεσματικά τις εφελκυστικές τάσεις.

Ο ορισμός της παραμόρφωσης του υλικού λόγω συστολής ξήρανσης βασίστηκε σε μετρήσεις ύψους ( $H_i$ ,  $i=1, 2, 3, 4$ ) και μεταβολές της διαμέτρου ( $\Delta D_{i,j}$ ,  $j=0,1,2,3$ ), όπως στο Σχ. 2. Η μέση παραμόρφωση  $\varepsilon^{ave}$  ορίστηκε ως: α) εσωτερική ογκομετρική παραμόρφωση  $\varepsilon_{v,int}^{ave}$  (Σχ. 8α) λαμβάνοντας υπόψη τα δεδομένα  $\Delta D_{i,j}$ ,  $j=1,2,3$  [εξαιρέθηκαν οι μετρήσεις άνω ελεύθερης επιφάνειας  $\Delta D_{i,0}$ , ενώ το ύψος του εσωτερικού κυλίνδρου ελήφθη σταθερό  $H_{int}$ , Εξ. (10)],

$$\varepsilon_{v,int}^{ave} = (V_{28} - V_t) / V_{28} \quad ; \quad V_{t,int}^{ave} = \pi [(D_{mold} - \Delta D_{i,j})^{ave}]^2 H_{int} / 4 \quad (10)$$

β-1) ως παραμόρφωση εσωτερικής επιφάνειας  $\varepsilon_{a,int}^{ave}$  (Σχ. 8β) λαμβάνοντας υπόψη μόνο τα δεδομένα  $\Delta D_{i,j}$ ,  $j=1,2,3$  [Εξ. (11)], και β-2) ως παραμόρφωση εξωτερικής επιφάνειας  $\varepsilon_{a,ext}^{ave}$  (Σχ. 8γ) με χρήση μόνο των μετρήσεων  $\Delta D_{i,0}$  [Εξ. (11)]. Επισημαίνεται ότι  $V_{28}$  και  $D_{28}$  είναι οι αρχικές τιμές των αντίστοιχων τιμών.

$$\varepsilon_{a,int/ext}^{ave} = (D_{28} - D_t) / D_{28} \quad ; \quad D_{t,int/ext}^{ave} = (D_{mold} - \Delta D_{i,j})^{ave} \quad (11)$$

Οι θετικές τιμές οιαδήποτε  $\varepsilon^{ave}$  δηλώνουν συστολή ενώ οι αρνητικές διαστολή. Μεταξύ όλων των παραμορφώσεων, η παραμόρφωση της εξωτερικής επιφάνειας  $\varepsilon_{a,ext}^{ave}$  (Σχ. 8γ) παρουσιάζει μια αυξημένη τάση συστολής με το χρόνο για όλες τις μίξεις από 0 έως 0.003. Η  $\varepsilon_{a,ext}^{ave}$  αποδόθηκε ως ρωγμή στις μίξεις αναφοράς, εύρους ίσο με  $\pi D_{o\varepsilon a,ext}^{ave} = 0.94$  mm ενώ στις μίξεις SRCC παραλήφθηκε από το δίκτυο ιών χωρίς ορατές ρηγματώσεις. Αντίθετα, η παραμόρφωση  $\varepsilon_{a,int}^{ave}$  είναι κυρίως διασταλτική (Σχ. 8β) με πιο έντονη στην περίπτωση του χαμηλότερου ποσοστού ιών (-0,007 για FA2-PP1.5 και -0.004 για FA3-PP1.5 σε σύγκριση με

τη σχεδόν μηδενική για FA2-PP2.0 και -0.003 για FA3-PP2.0). Η παραμόρφωση  $\varepsilon_{v,int}^{ave}$  (Σχ. 8α) συμπεριφέρεται ομοιότροπως με την  $\varepsilon_{a,int}^{ave}$  έχοντας όμως υψηλότερες τιμές (-0.014 για FA2-PP1.5 και -0.008 για FA3-PP1.5 σε σύγκριση με τη σχεδόν μηδενική για FA2-PP2.0 και -0.005 για FA3-PP2.0).

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η χρήση ασβεστούχας ιπτάμενης τέφρας σε τσιμεντοειδή κονιάματα με ίνες πολυπροπυλενίου υψηλής ικανότητας σε παραμόρφωσης διερευνήθηκε πειραματικά και αναλυτικά σχετικώς με την θλιπτική απόκριση στις 28 ημέρες και σε μεταγενέστερη ηλικία, καθώς και υπό έκθεση σε κύκλους ψ/α. Επιπλέον μετρήθηκε η συστολή ξήρανσης μέσω πρότυπης ιδιοσυσκευής. Η αύξηση της τέφρας προφανώς μειώνει την θλιπτική αντοχή των SRCC (πιο έντονα στα μείγματα με 2% ίνες) και αυξάνει την ενδοτικότητα ως αποτέλεσμα της υψηλότερης ασβέστου στη σύνθεση. Προτείνεται προσομοίωμα για την εκτίμηση της θλιπτικής απόκρισης των SRCC στις 28 ημέρες συνδυάζοντας τις ιδιότητες των ινών και της ενέργειας που καταναλώνεται κατά την ενεργοποίηση του μηχανισμού συνάφειας ίνας - μήτρας. Η παραμόρφωση του υλικού λόγω συρρίκνωσης της εξωτερικής επιφάνειας είναι σημαντική: προκαλεί ρηγμάτωση στις μίξεις αναφοράς ενώ στις μίξεις SRCC παραλαμβάνεται από το δίκτυο ινών.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Archontas, N., Balopoulos, V., Pantazopoulou, S. J., “A Discrete Model for the Structure and Strength of Cementitious Materials”, in Procs. 10<sup>th</sup> HSTAM Int. Congress on Mechanics, Chania, Crete, Greece (2013)
- Banthia, N., Gupta R., “Influence of polypropylene fiber geometry on plastic shrinkage cracking in concrete”. Cement and Concrete Research, Vol 36, No 7 (2006) 1263-1267
- Georgiou A.V., Pantazopoulou S.J., “Effect of fiber length and surface characteristics on the mechanical properties of cementitious composites”. Constr. & Building Materials, Vol 125 (2016) 1216–1228
- Kesner, K.E., Billington, S.L., and Douglas, K.S., “Cyclic Response of Highly Ductile Fiber-Reinforced Cement-Based Composites.” ACI Materials Journal, Vol 100, No 5 (2003) 381-390
- 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
- Soroushian P. and Lee C.D., “Distribution and Orientation of Fibers in Steel Fiber Reinforced Concrete”. ACI Materials Journal, Vol 87, No 5 (1990) 433-439
- Takashima, H., Miyagai, K., Hashida, T., Li, V.C., “A design approach for the mechanical properties of polypropylene discontinuous fiber reinforced cementitious composites by extrusion molding”. Eng. Fract. Mech., Vol 70, No 7-8 (2003) 853–870.
- Tastani S.P., Pantazopoulou S.J., “Reinforcement and concrete bond: state determination along the development length”. ASCE J. Str. Eng. Vol 139, No 9 (2013) 1567-1581
- Yu H., Ma H., Yan K., “Equation for determining freeze-thaw fatigue damage in concrete & a model for predicting service life.” Constr. Bild. M., Vol 137 (2017) 104–116.
- 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)