

ΠΡΟΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΜΕΝΟΙ ΠΑΡΑΜΕΝΟΝΤΕΣ «ΤΣΙΜΕΝΤΟΤΥΠΟΙ» ΑΠΟ ΙΝΟΠΛΕΓΜΑΤΑ ΑΝΟΡΓΑΝΗΣ ΜΗΤΡΑΣ (IAM)

Ιωάννης Χ. Παπαντωνίου

*Πολιτικός Μηχανικός, M.Sc., υποψήφιος διδάκτορας Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών
Πανεπιστημίου Πατρών*

Κορίνα Γ. Παπανικολάου

*Λέκτορας, Εργαστήριο Μηχανικής & Τεχνολογίας Υλικών, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών
Πανεπιστημίου Πατρών.*

Λέξεις κλειδιά: παραμένοντες τύποι, ινοπλέγματα, τσιμεντοειδείς μήτρες

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Σκοπός της εργασίας είναι η παρουσίαση μίας συστηματικής, πειραματικής μελέτης δομικών στοιχείων σκυροδέματος χυτευμένων επί, ή εντός, παραμενόντων, προκατασκευασμένων τύπων αποτελούμενων από τσιμεντοειδείς μήτρες ενισχυμένες με πλέγματα (μη μεταλλικών) συνεχών ινών. Τα ινοπλέγματα ανόργανης μήτρας (IAM) αποτελούν την πιο πρόσφατη εξέλιξη στον τομέα των τσιμεντοειδών σύνθετων υλικών και αναμένεται να παρέχει λύσεις όπου απαιτούνται πολύ μικρά πάχη στοιχείων (ήτοι μικρό βάρος), περίπλοκες γεωμετρίες κελυφωτών κατασκευών, ή ανθεκτικότητα έναντι διάβρωσης. Η πειραματική διαδικασία περιελάμβανε τον έλεγχο στοιχείων τύπου πλακολωρίδας και υποστυλώματος.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σημαντικό ποσοστό του κόστους (αλλά και του χρόνου) ανέγερσης μίας κατασκευής, ακολουθώντας τις πρακτικές της επί τόπου δόμησης, αντιστοιχεί στην αγορά και συναρμογή των ξυλοτύπων (ή, σπανιότερα, μεταλλοτύπων / χαρτοτύπων). Η επαναχρησιμοποίηση των τύπων προκαλεί τη φθορά τους, με συνακόλουθο αποτέλεσμα την υποβάθμιση της ποιότητας των σκυροδετούμενων στοιχείων. Η χρήση προκατασκευασμένων τύπων, οι οποίοι δεν θα αφαιρούνται, αλλά θα παραμένουν στο έργο και θα λειτουργούν ως επιπλέον εξωτερικός οπλισμός και ως μέσο αύξησης της ανθεκτικότητας στο χρόνο των επιμέρους μελών του έργου, αποτελεί μία ενδιαφέρουσα προοπτική για τον κατασκευαστικό τομέα.

Μεταλλικοί παραμένοντες τύποι έχουν ήδη τύχει ευρείας εφαρμογής στο πεδίο των σύμμικτων κατασκευών. Ωστόσο, η ευπάθεια των μεταλλοτύπων

έναντι διάβρωσης οδήγησε σε κάποιες εφαρμογές την αντικατάστασή τους από ινοπλισμένα πολυμερή (ΙΟΠ). Οι Fardis & Khalili (1981) ήταν οι πρώτοι που διερεύνησαν τη συμπεριφορά κυλίνδρων ΙΟΠ πληρωμένων με άοπλο σκυρόδεμα, ενώ ακολούθησαν και άλλοι ερευνητές. Επί του παρόντος, πλήθος σύμμικτων καταστρωμάτων γεφυρών σχεδιάζονται και κατασκευάζονται από παραμένοντες τύπους ΙΟΠ. Η πτωχή συμπεριφορά των ΙΟΠ σε πυρκαϊά, όμως, ως αποτέλεσμα της υποβάθμισης των μηχανικών τους ιδιοτήτων σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες από τη θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσής τους, αλλά και το αυξημένο κόστος των ρητινών, υποδεικνύουν την ανάγκη διερεύνησης νέων υλικών με εφαρμογές και στον τομέα της μερικής προκατασκευής.

Η αντικατάσταση των οργανικών συνδετικών υλικών (πολυμερή) με ανόργανα (μικροσκυροδέματα, ή κονιάματα με βάση το τσιμέντο και χαμηλά ποσοστά πολυμερών) αποτελεί λύση για τα προαναφερθέντα προβλήματα, αρκεί οι «παραδοσιακοί» οπλισμοί που συνδυάζονται με ρητίνες (κυρίως υπό τη μορφή χύδην ινών), να αντικατασταθούν από πλέγματα ινών. Η αντικατάσταση αυτή είναι απαραίτητη, καθώς τα μικροσκυροδέματα (σκυροδέματα με μέγιστο κόκκο αδρανών μικρότερο των 10 mm) ή τα κονιάματα (με μέγιστο κόκκο αδρανών μικρότερο ή ίσο των 2 mm), λόγω του μεγαλύτερου κοκκώδους τους σε σχέση με τις ρητίνες, δεν έχουν τη δυνατότητα εμποτισμού των ινών. Με τη χρήση πλεγμάτων, η διασφάλιση της σύνθετης δράσης μήτρας – εγκλεισματος καθίσταται δυνατή μέσω μηχανικής αλληλεμπλοκής του συνδετικού μέσου με τις βροχίδες του πλέγματος. Το νέο αυτό σύνθετο υλικό συναντάται στην διεθνή ορολογία με τον όρο Textile Reinforced Concrete (TRC) και στην Ελληνική ως Ινοπλέγματα Ανόργανης Μήτρας (IAM). Τα ινοπλέγματα παράγονται με τις μεθόδους παραγωγής που εφαρμόζονται στην κλωστοϋφαντουργία, ενώ οι ίνες που χρησιμοποιούνται αποτελούνται κυρίως από γυαλί, άνθρακα, αραμίδιο και βασάλτη (RILEM, 2006).

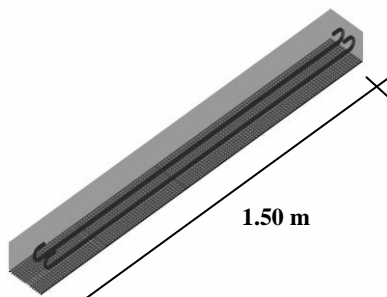
Στην παρούσα εργασία διερευνάται η συμπεριφορά σύμμικτων δομικών στοιχείων σκυροδέματος/IAM. Δύο τύποι στοιχείων ελέγχθησαν: (α) τύπου πλακολωρίδας και (β) τύπου υποστυλώματος. Πιο συγκεκριμένα, 22 δοκίμια τύπου πλακολωρίδας κατασκευάστηκαν και δοκιμάστηκαν σε κάμψη, ενώ 11 δοκίμια τύπου υποστυλώματος κατασκευάστηκαν και δοκιμάστηκαν υπό κεντρική θλίψη. Στα πλαίσια του πειραματικού προγράμματος διερευνήθηκαν οι ακόλουθες παράμετροι: η σύνθεση της ανόργανης μήτρας, το είδος των ινών (ίνες άνθρακα και υάλου), η επιρροή του προεμποτισμού (με ρητίνη) των κλώνων ινοπλέγματος, η γεωμετρία των πλεγμάτων (διάταξη κλώνων 0°/90°, ή +45°/-45°) και η τραχύτητα του υποστρώματος IAM. Η κατασκευή των δοκιμίων και η πειραματική τους διερεύνηση έλαβε χώρο στο Εργαστήριο Μηχανικής και Τεχνολογίας Υλικών του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Πατρών.

2. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

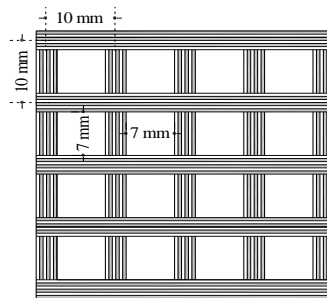
2.1 Δοκίμια τύπου πλακολωρίδας

Κατασκευάστηκαν 22 δοκίμια μήκους 1.5 m, πλάτους 150 mm και ύψους 100 mm (Εικ. 1). Η διαδικασία κατασκευής διεκρίθη σε δύο στάδια: στο πρώτο στάδιο έλαβε χώρα η παρασκευή του λεπτότοιχου στοιχείου IAM πάχους 12 mm, ενώ στο δεύτερο, η σκυροδέτηση (επί του στοιχείου IAM) του κυρίως τμήματος του δοκιμίου με συμβατικό σκυρόδεμα (οπλισμένο – 7 δοκίμια, ή άοπλο – 15 δοκίμια). Για τα δοκίμια με κυρίως τμήμα από ΟΣ, ο χαλύβδινος οπλισμός αποτελείτο από δύο ράβδους Φ8 (με όριο διαρροής 571.6 MPa και στατικό ύψος 75 mm). Η μόρφωση του λεπτότοιχου στοιχείου IAM ακολούθησε την παρακάτω διαδικασία: πάνω σε μοριοσανίδα διαστρώθηκε μια στρώση κονιάματος μήκους 1.5 m, πλάτους 150 mm και πάχους 6 mm, ενώ ακολούθησε η εφαρμογή του πλέγματος ινών (άνθρακα ή υάλου σε μία ή δύο στρώσεις και με γεωμετρία που δίνεται στην Εικ. 2) και η επικάλυψή του με την τελευταία στρώση κονιάματος πάχους 6 mm (Εικ. 3). Η τραχύτητα της επιφάνειας του λεπτότοιχου στοιχείου (λεία, ή αδρή) ήταν παράμετρος διερεύνησης. Όπου απαιτούνταν, η εκτράχυνση της άνω στρώσης του στοιχείου IAM (Εικ. 3), πραγματοποιούνταν με αυλάκωση της νωπής επιφάνειάς του. Η σκυροδέτηση του συμβατικού σκυροδέματος επί των στοιχείων IAM έγινε μετά την παρέλευση 28 ημερών από την παρασκευή των τελευταίων. Η μέση θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος ήταν ίση με 21.2 MPa.

Το συνδετικό (μητρικό) υλικό που χρησιμοποιήθηκε στο στοιχείο IAM ήταν ένα εμπορικό κονίαμα με βάση το τσιμέντο, τροποποιημένο με πολυμερή. Ο λόγος νερού προς τσιμεντοειδή υλικά ήταν ίσος με 0.23, ενώ η θλιπτική αντοχή και το μέτρο θραύσης του κονιάματος σε ηλικία 28 ημερών ήταν ίσα με 24 και 6.3 MPa, αντίστοιχα. Ο οπλισμός των στοιχείων IAM αποτελείτο από πλέγματα ινών άνθρακα και υάλου, οι ίνες των οποίων ήταν είτε προεμποτισμένες με πολυμερή, είτε όχι. Τα πλέγματα είχαν κοινή γεωμετρία, με τις ίνες τους ισομερώς κατανεμημένες σε δύο κάθετες μεταξύ τους διευθύνσεις. Η γραμμική πυκνότητα των πλεγμάτων υάλου και άνθρακα ήταν ίση με 2400 και 1600 tex (\equiv gr/km), αντίστοιχα. Οι ίνες άνθρακα είχαν μέτρο ελαστικότητας, εφελκυστική αντοχή και πυκνότητα ίσα με 225 GPa, 3800 MPa και 1.8 gr/cm³, αντίστοιχα. Οι ιδιότητες των ινών υάλου ήταν 70 GPa (μέτρο ελαστικότητας), 1600 MPa (εφελκυστική αντοχή) και 2.6 gr/cm³ (πυκνότητα).



Εικόνα 1: Δοκίμιο τύπου πλακολωρίδας



Εικόνα 2 Γεωμετρία πλέγματος

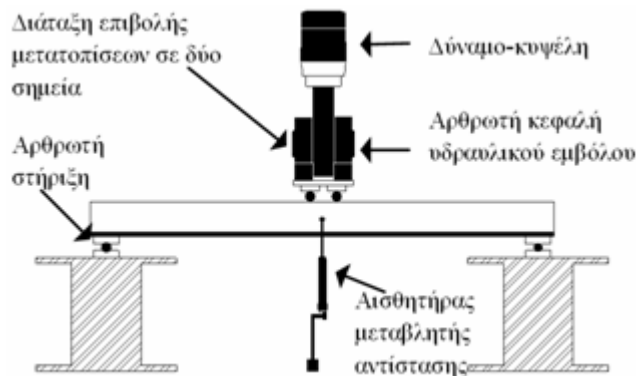


Εικόνα 3: Στάδια παρασκευής του στοιχείου IAM

Η βασική κωδική ονομασία των δοκιμίων είναι XF, όπου X ο αριθμός των στρώσεων πλέγματος (1, ή 2) και F το είδος των ινών του πλέγματος (C για τις ίνες άνθρακα και G για τις ίνες υάλου). Ο δείκτης «c» (όπου αναγράφεται) υποδηλώνει την εφαρμογή πλεγμάτων με προεμποτισμένες ίνες (απουσία του δείκτη συνεπάγεται μη εμποτισμένους κλώνους ινών), ενώ ο δείκτης «s» (όπου αναγράφεται) υποδηλώνει την ύπαρξη λείας άνω επιφάνειας στο στοιχείο IAM (απουσία του δείκτη συνεπάγεται τραχεία επιφάνεια). Η ένδειξη «S» συμπληρώνει την κωδική ονομασία δοκιμίων με κυρίως τμήμα από ΟΣ. Έτσι, κατασκευάστηκαν τα ακόλουθα δοκίμια: 1C, 2C, 1C_c, 2C_c, 1C_{cs}, 1CS, 2CS, 1C_s, 1G, 2G, 1G_c, 2G_c, 1G_{cs}, 1GS, 2GS και 1G_sS. Τα δοκίμια ελέγχου ήταν τρία: το δοκίμιο Con αποτελείτο αποκλειστικά από άοπλο σκυρόδεμα, το δοκίμιο Conm περιελάμβανε κυρίως τμήμα από άοπλο σκυρόδεμα χυτευμένου επί μίας επίσης άοπλης στρώσης κονιάματος πάχους 12 mm και το δοκίμιο ConS αποτελείτο εξ'όλοκλήρου από ΟΣ (έχοντα τις ίδιες λεπτομέρειες όπλισης με τα δοκίμια με κυρίως τμήμα από ΟΣ). Τέλος, την ομάδα των δοκιμίων συμπλήρωσαν

τα: GcG (με 2 στρώσεις πλέγματος ινών υάλου – ένα προεμποτισμένο και ένα μη), CGp (μία στρώση πλέγματος ινών άνθρακα και μία ινών υάλου με ενδιάμεσο πάχος ανόργανης μήτρας ίσο με 1 mm) και CGI (μία στρώση πλέγματος ινών άνθρακα και μία ινών υάλου με ενδιάμεσο πάχος ανόργανης μήτρας ίσο με 6 mm).

Τα δοκίμια υπεβλήθησαν σε μονοτονική δοκιμή κάμψης τεσσάρων σημείων, μέχρι την απώλεια της φέρουσας ικανότητάς τους. Οι δοκιμές διενεργήθηκαν 28 ημέρες από την σκυροδέτηση των δοκιμίων. Η δοκιμή έγινε υπό ελεγχόμενη μετατόπιση, με ρυθμό επιβολής μετακινήσεων ίσο με 0.016 mm/sec. Τα σημεία επιβολής των μετακινήσεων ισαπέχαν από το μέσον του δοκιμίου κατά 50 mm. Για την επιβολή των μετακινήσεων χρησιμοποιήθηκε υδραυλικό έμβολο MTS δυναμικότητας 500 kN (Εικ. 4). Η απόσταση μεταξύ των αρθρωτών στηρίξεων ήταν ίση με 1.40 m. Η μέτρηση της βύθισης στο μέσο του ανοίγματος του δοκιμίου έγινε μέσω ενός αισθητήρα μεταβλητής αντίστασης.

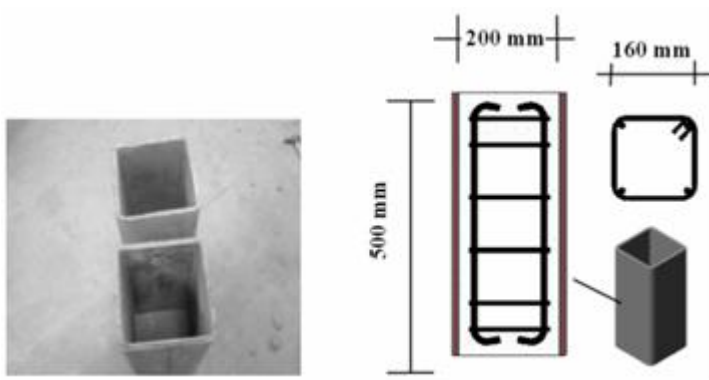


Εικόνα 4: Σκαρίφημα της πειραματικής διάταξης που χρησιμοποιήθηκε

2.2 Δοκίμια τύπου υποστρώματος

Κατασκευάστηκαν συνολικά 11 πρισματικά δοκίμια τύπου υποστρώματος, τετραγωνικής διατομής (224 x 224 mm) και ύψους 500 mm. Η γενική διαδικασία παραγωγής των δοκιμίων αυτών προσομοίαζε τη διαδικασία παραγωγής των δοκιμίων τύπου πλακολωρίδας. Αρχικά, κατασκευάστηκε το κοίλο λεπτότοιχο στοιχείο IAM πάχους 12 mm και ύψους 500 mm (Εικ.5), ενώ μετά από 28 ημέρες πληρώθηκε ο τύπος IAM από αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα. Ο οπλισμός του δοκιμίου ήταν ένας χαλύβδινος κλωβός συνιστώμενος από τέσσερις διαμήκειες ράβδους Φ12

(S500) και εγκάρσιους συνδετήρες Φ8, τοποθετημένους ανά 100 mm. (Εικ.6). Το στοιχείο IAM, οπλισμένο με μία στρώση πλέγματος στο μέσον του πάχους του, παρασκευάστηκε σε κλειστούς μεταλλότυπους. Το μήκος αγκύρωσης του πλέγματος ελήφθη ίσο με το μήκος της πλευράς του δοκιμίου. Το κονίαμα εισερχόταν στο κλειστό καλούπι υπό πίεση, μέσω αντλίας. Τα σύμμικτα στοιχεία παρέμειναν εντός θαλάμου συντήρησης (20°C, 99% RH) για διάστημα 28 ημερών πριν από τη δοκιμή τους.



Εικόνα 5: Τύπο IAM

Εικόνα 6: Σκαρίφημα στοιχείου

Σε αυτή την ομάδα δοκιμίων, έγινε χρήση δύο τύπων κονιαμάτων με προσθήκη ρευστοποιητή, για την επίτευξη αντλησιμότητας. Το πρώτο κονίαμα (κονίαμα I) ήταν πανομοιότυπο με εκείνο που εφαρμόστηκε στα δοκίμια τύπου πλακολωρίδας (θλιπτική αντοχή και μέτρο θραύσης σε 28 ημέρες ίσα με 23.1 MPa και 6.88 MPa, αντίστοιχα), ενώ το δεύτερο κονίαμα (κονίαμα B) ήταν μεγαλύτερης θλιπτικής αντοχής (51.7 MPa) και μικρότερου μέτρου θραύσης (2.50 MPa), σε σύγκριση με το πρώτο. Εκτός από τα πλέγματα με ορθογωνική διάταξη κλώνων, χρησιμοποιήθηκαν και πλέγματα προεμποτισμένων ινών άνθρακα και υάλου με διάταξη των κλώνων +45/-45° ως προς την οριζόντια διεύθυνση.

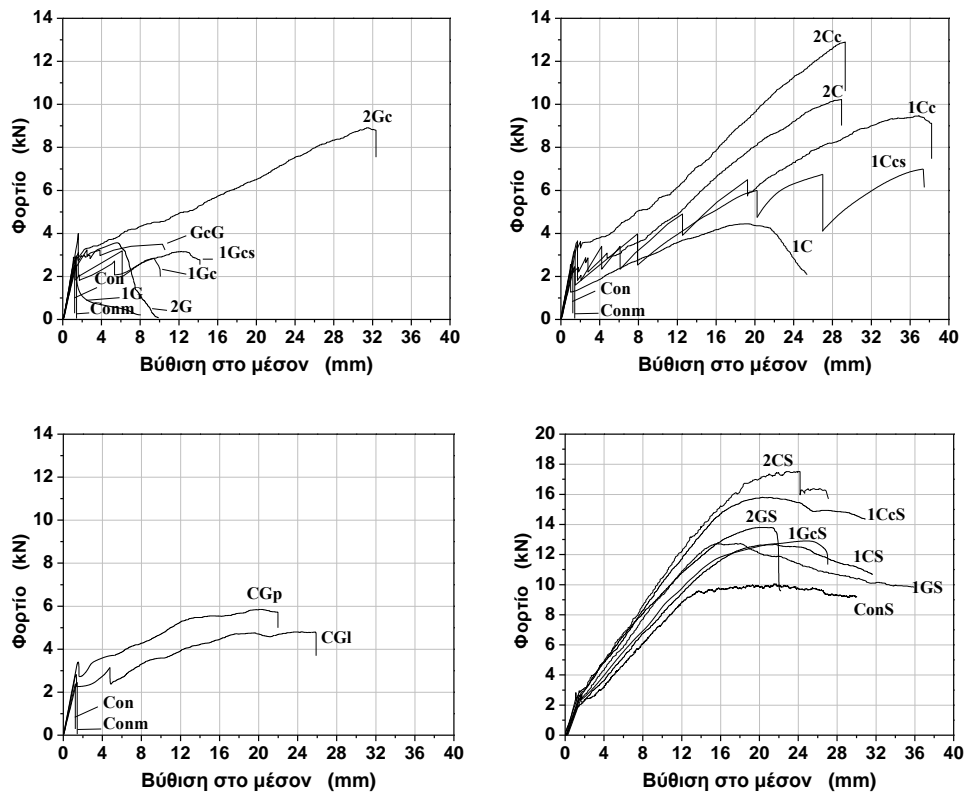
Η βασική κωδική ονομασία των δοκιμίων είναι MFX, όπου M ο τύπος του κονιαματος που χρησιμοποιήθηκε (I, ή B), F το είδος των ινών του πλέγματος (C για τις ίνες άνθρακα και G για τις ίνες υάλου) και X ο προσανατολισμός των κλώνων ως προς την οριζόντιο (90 για ορθογωνική διάταξη ινών, δηλ. 0°/90° και 45 για διάταξη +45°/-45°). Ο δείκτης «c» (όπου αναγράφεται) υποδηλώνει την εφαρμογή πλεγμάτων με προεμποτισμένες ίνες (απουσία του δείκτη συνεπάγεται μη εμποτισμένους κλώνους ινών). Έτσι, κατασκευάστηκαν τα ακόλουθα δοκίμια: BC90,

BCc45, IC90, ICc45, BG90, BGc90, BGc45, IG90, IGc90, IGc45. Το δοκίμιο ελέγχου (Con) ήταν τετραγωνικής διατομής (248 x 248 mm). Τα δοκίμια υπεβλήθησαν σε δοκιμή θλίψης σε ηλικία 28 ημερών με ρυθμό επιβολής μετατοπίσεων ίσο με 0.035 mm/sec. Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν σε μηχανή δυναμικότητας 4000 kN.

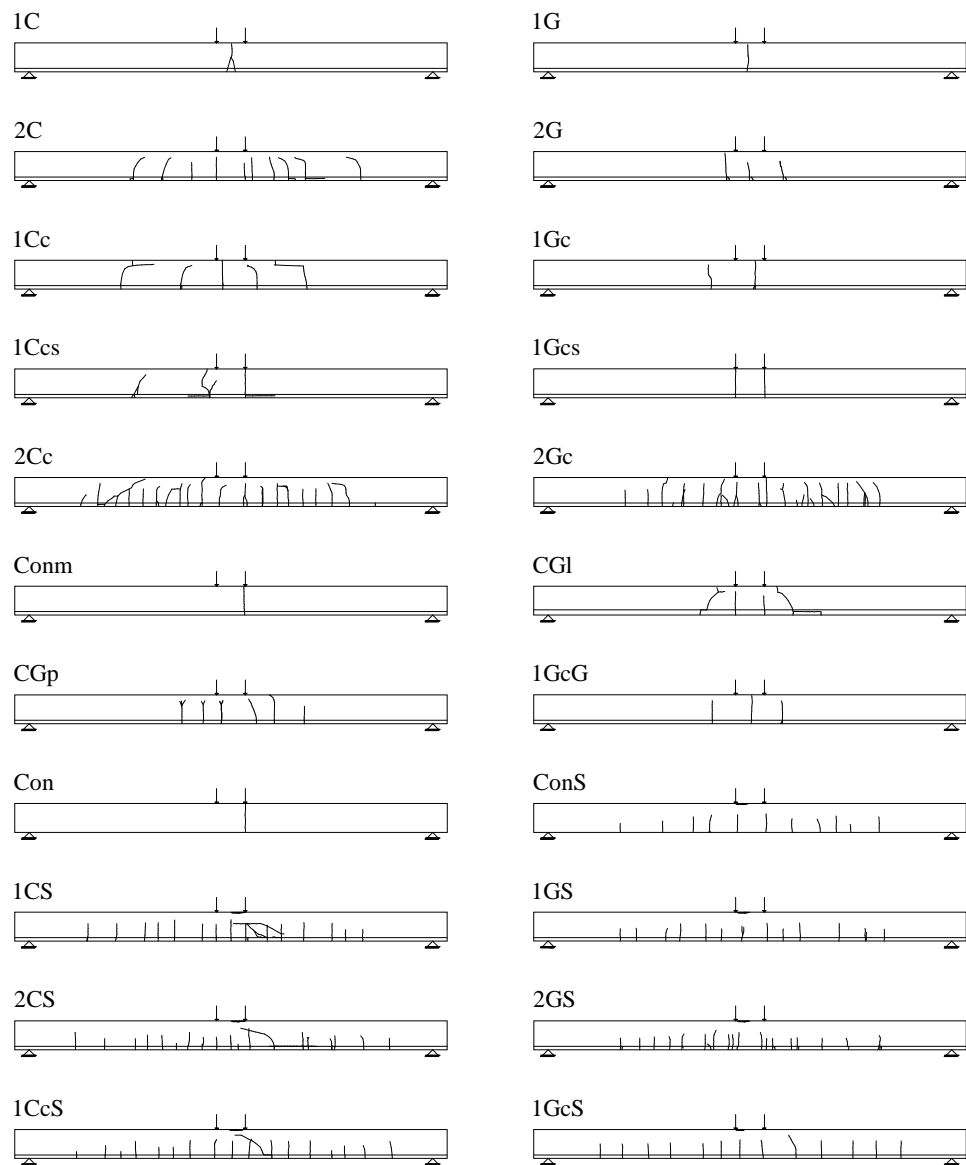
3. ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ-ΣΧΟΛΙΑ

3.1 Δοκίμια τύπου πλακολωρίδας

Τα διαγράμματα φορτίου-βύθισης στο μέσον του δοκιμίου, για κάθε δοκιμή, δίνονται στην Εικόνα 7. Σκαριφήματα των ρηγματωμένων δοκιμίων κατά την στιγμή της αστοχίας τους παρουσιάζονται στην Εικόνα 8.



Εικόνα 7: Διάγραμμα φορτίου-βύθισης στο μέσον για τα δοκίμια τύπου πλακολωρίδας



Εικόνα 8: Σκαριφήματα ρηγματωμένων δοκιμίων τύπου πλακολωρίδας κατά την αστοχία

Όλα τα δοκίμια παρουσίασαν μεγαλύτερο φορτίο αστοχίας σε σχέση με τα δοκίμια ελέγχου (τα δοκίμια Con και Conm δεν παρουσίασαν διαφορές).

Στα δοκίμια με κυρίως τμήμα από άοπλο σκυρόδεμα και τύπους IAM με μη επικαλυμμένους κλώνους ινών άνθρακα, η σταδιακή αστοχία οφειλόταν στην σταδιακή εξόλκευση των κλώνων από την ανόργανη μήτρα, ενώ στα ομόλογα αυτών δοκίμια με πλέγματα ινών υάλου η αστοχία αποδίδεται στη βλάβη των μεμονωμένων (περιφερειακών) ινών στα άκρα των ρωγμών. Στην ίδια ομάδα δοκιμίων (δηλ. με άοπλο κυρίως τμήμα), η αύξηση του ποσοστού ινών αλλά και ο προεμποτισμός τους δημιούργησαν μια πυκνή εικόνα ρηγμάτωσης, δείγμα της ομοιομορφίας των τάσεων στο στοιχείο IAM και της υψηλής ικανότητας μεταφοράς τάσεων μεταξύ κονιάματος και κλώνων. Ενδεικτικό του γεγονότος αυτού είναι ότι το δοκίμιο 2Cc αστόχησε διατμητικά. Η ύπαρξη της λείας διεπιφάνειας δεν διαφοροποίησε σημαντικά την συμπεριφορά των δοκιμίων τόσο για τα δοκίμια με πλέγματα ινών άνθρακα όσο και για τα δοκίμια με πλέγματα ινών υάλου, γεγονός που προδίδει την υψηλή ικανότητα πρόσφυσης του στοιχείου IAM στο σκυρόδεμα. Επίσης, παρατηρώντας την συμπεριφορά των δοκιμίων CGp και CGI παρατηρήθηκε ότι η αύξηση του πάχους της στρώσης της ανόργανης μήτρας μεταξύ των στρώσεων των πλεγμάτων οπλισμού δεν επηρέασε ιδιαίτερα την συμπεριφορά των δοκιμίων.

Το αίτιο αστοχίας όλων των δοκιμίων με κυρίως τμήμα από ΟΣ ήταν η σύνθλιψη του σκυροδέματος στη θλιβόμενη ζώνη. Η παρουσία του χαλύβδινου οπλισμού οδήγησε σε μεγάλο πλήθος ρωγμών με μικρό εύρος, γεγονός που βελτίωσε τις συνθήκες συνάφειας μεταξύ πλέγματος και ανόργανης μήτρας (Voss & Hegger, 2006). Σε αυτή την ομάδα δοκιμίων, η ποσοστιαία αύξηση της ροπής αστοχίας λόγω της αύξησης του ποσοστού των ινών και του προεμποτισμού τους ήταν μικρότερη σε σχέση με τα δοκίμια με κυρίως τμήμα από άοπλο σκυρόδεμα. Η ποσοτικοποιημένη επίδραση του ποσοστού ινών και του προεμποτισμού τους, για όλα τα δοκίμια, δίνεται στους Πίνακες 1 και 2, αντίστοιχα.

Μέσω μίας διαδικασίας ανάλυσης διατομής, υπολογίστηκαν οι θεωρητικές τιμές των ροπών αστοχίας για όλα τα δοκίμια, θεωρώντας ομοιόμορφη κατανομή τάσεων στους κλώνους (ίδια η τιμή της τάσης για όλους τους κλώνους σε μία στάθμη και για όλες τις ίνες ανά κλώνο) και πλήρη συνεργασία μεταξύ του στοιχείου IAM και του σκυροδέματος. Η ανάλυση υπέθετε αστοχία είτε λόγω θραύσης των οπλισμών (ίνες ή/και χάλυβας), είτε λόγω σύνθλιψης του σκυροδέματος στην ανώτατη θλιβόμενη ίνα. Απεδείχθη ότι όλες οι πειραματικά προκύπτουσες τιμές των ροπών αστοχίας ήταν από ελάχιστα (δοκίμια με κυρίως τμήμα από ΟΣ και δοκίμια με προεμποτισμένα πλέγματα ανεξάρτητα ύπαρξης ή μη χαλύβδινου οπλισμού), έως σημαντικά (δοκίμια με μη προεμποτισμένα πλέγματα) μικρότερες από τις θεωρητικές. Ο κυριότερος λόγος της μη πλήρους εκμετάλλευσης των ιδιοτήτων των ινών σε δοκίμια με μη προεμποτισμένα πλέγματα αποδίδεται στην ανομοιογενή κατανομή της έντασης μεταξύ των

περιφερειακών και των εσωτερικών ιών των κλώνων, που οφείλεται στην αδυναμία εισχώρησης της ανόργανης μήτρας στο εσωτερικό των κλώνων. Αποτέλεσμα αυτού ήταν και η τηλεσκοπικής μορφής ολίσθηση των ιών άνθρακα και η πρόωρη θραύση των περιφερειακών ιών υάλου. Αν ο λόγος της πειραματικής προς τη θεωρητική ροπή αστοχίας ληφθεί ως ένα «συντελεστής αποτελεσματικότητας» των πλεγμάτων, τότε ο συντελεστής αυτός λαμβάνει τιμές πλησίον της μονάδας για όλα τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν πειραματικά, πλην της περίπτωσης χρήσης μη προεμποτισμένων ινοπλεγμάτων. Σε αυτή την περίπτωση, οι συντελεστές αποτελεσματικότητας (Σ.Α.) εξαρτώνται από το είδος και το ποσοστό των ιών [Σ.Α. = 0.32 (1C), 0.56 (2C), 0.41 (1G – αμφισβητούμενο αποτέλεσμα λόγω πρόωρης θραύσης), 0.29 (2G)].

Πίνακας 1. Επίδραση του ποσοστού ιών στον τύπο IAM.

| Σύγκριση μεταξύ δοκιμίων | % Ποσοστιαία μεταβολή | |
|---|-----------------------|---------|
| | Φορτίο | Βύθιση |
| Κυρίως τμήμα δοκιμίων από άοπλο σκυρόδεμα | | |
| Μη προεμποτισμένα ινοπλέγματα άνθρακα 1C↔2C | 129.9 | 49.1 |
| Προεμποτισμένα ινοπλέγματα άνθρακα 1Cc↔2Cc | 36.1 | -20.9 * |
| Μη προεμποτισμένα ινοπλέγματα υάλου 1G↔2G | 42.9 | 354.9 |
| Προεμποτισμένα ινοπλέγματα υάλου 1Gc↔2Gc | 212.6 | 235.6 |
| Κυρίως τμήμα δοκιμίων από οπλισμένο σκυρόδεμα | | |
| Μη προεμποτισμένα ινοπλέγματα άνθρακα 1CS↔2CS | 22.7 | 14.3 |
| Μη προεμποτισμένα ινοπλέγματα υάλου 1GS↔2GS | 8.3 | 16.2 |

* Διατμητική αστοχία

Πίνακας 2. Επίδραση του προεμποτισμού των ινοπλεγμάτων με ρητίνη.

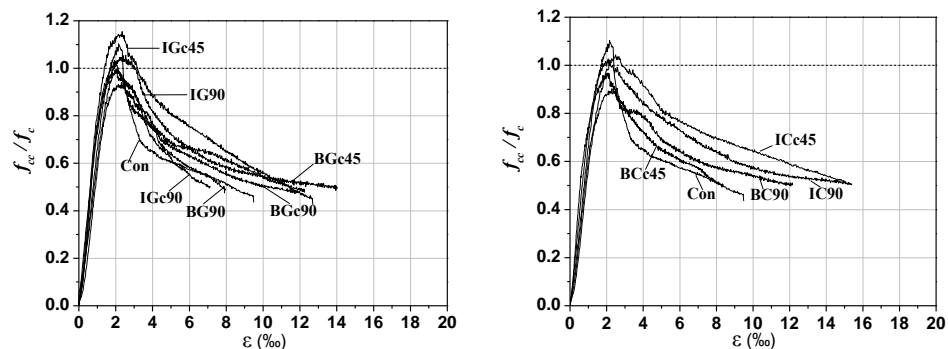
| Σύγκριση μεταξύ δοκιμίων | % Ποσοστιαία μεταβολή | |
|--|-----------------------|--------|
| | Φορτίο | Βύθιση |
| Κυρίως τμήμα δοκιμίων από άοπλο σκυρόδεμα | | |
| Ινοπλέγματα άνθρακα ($\rho_f = 1.03\%$) 1C↔1Cc | 112.9 | 89.9 |
| Ινοπλέγματα άνθρακα ($\rho_f = 2.06\%$) 2C↔2Cc | 26.0 | 0.8 |
| Ινοπλέγματα υάλου ($\rho_f = 0.98\%$) 1G↔1Gc | 13.1 | 672.1 |
| Ινοπλέγματα υάλου ($\rho_f = 1.96\%$) 2G↔2Gc | 147.5 | 469.7 |
| Κυρίως τμήμα δοκιμίων από οπλισμένο σκυρόδεμα | | |
| Ινοπλέγματα άνθρακα 1CS↔1CcS | 10.7 | 0.0 |
| Ινοπλέγματα υάλου 1GS↔1GcS | 1.5 | 40.9 |

3.2 Δοκίμια τύπου υποστρώματος

Όλα τα δοκίμια με παραμένοντες τύπους IAM παρουσίασαν κοινή συμπεριφορά. Κατακόρυφες ρηγματώσεις και εκτινάξεις μικρών τμημάτων των τύπων ήταν εμφανείς από τα πρώτα στάδια της φόρτισης, με αποτέλεσμα τα στοιχεία IAM να συνεισφέρουν ελάχιστα στην ανάληψη του κατακόρυφου φορτίου. Κατά την εξέλιξη της δοκιμής και μέχρι την επίτευξη της αντοχής των δοκιμίων, το εύρος των κατακορύφων ρωγμών αυξανόταν (ιδιαίτερα στις ακμές των δοκιμίων, όπου υπήρχαν συγκεντρώσεις τάσεων) και επέρχεται τοπικός λυγισμός των IAM, με αποτέλεσμα την αποφλοιώση της εξωτερικής στρώσης κονιάματος. Η ενεργοποίηση των ινοπλεγμάτων έλαβε χώρα κυρίως μετά την επίτευξη της αντοχής των δοκιμίων, οδηγώντας σε μείωση του ρυθμού υποβάθμισης της φέρουσας ικανότητάς τους, σε σύγκριση με το δοκίμιο ελέγχου. Σε προχωρημένο στάδιο της δοκιμής (μείωση της φέρουσας ικανότητας των δοκιμίων τουλάχιστον ίση με 50%) σημειώθηκε λυγισμός των κατακορύφων ράβδων και σταδιακή θραύση των κλώνων στη θέση του λυγισμού, λόγω εμβολισμού, με αποτέλεσμα την πλήρη αποδιοργάνωση των δοκιμίων και τον τερματισμό των δοκιμών.

Οι καμπύλες ανηγμένης τάσης – αξονικής παραμόρφωσης για τα δοκίμια τύπου υποστρώματος παρουσιάζονται στην Εικόνα 9. Η ανηγμένη τάση ορίζεται ως ο λόγος της θλιπτικής τάσης των δοκιμίων, f_{cc} , προς την θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος, f_c (το κάθε δοκίμιο είχε πληρωθεί με σκυρόδεμα ελαφρώς διαφορετικής θλιπτικής αντοχής, με μέση τιμή ίση με 21 MPa). Σημειώνεται ότι τα δοκίμια σε τύπους IAM με κονίαμα Β παρουσίαζαν ρηγματώσεις, λόγω συστολής ξήρανσης, προ της διεξαγωγής των δοκιμών. Τα δοκίμια αυτά αστόχησαν σε τιμές ανηγμένης τάσης από 10% έως 18% μικρότερες, σε σύγκριση με το δοκίμιο ελέγχου. Τα δοκίμια σε τύπους IAM με κονίαμα Ι είχαν καλύτερη απόκριση από τα ομόλογά τους, αλλά και αυτά υπολείποντο σε όρους μέγιστης ανηγμένης τάσης (πλην ενός) από το δοκίμιο ελέγχου (κατά μία μέση τιμή ίση με 6%). Το γεγονός αυτό αποδίδεται στον πρόωρο λυγισμό του στοιχείου IAM. Αύξηση της θλιπτικής αντοχής του μητρικού υλικού του στοιχείου IAM, έλεγχος των ρηγματώσεων λόγω συστολής ξήρανσης (π.χ. με την προσθήκη ινών στο κονίαμα) και κατάλληλη διαμόρφωση της εσωτερικής του επιφάνειας (εν είδη διατμητικών συνδέσμων με τον πυρήνα από ΟΣ), προτείνονται ως μέτρα για την αύξηση της φέρουσας ικανότητας των υπό μελέτη σύμμικτων στοιχείων. Τονίζεται ότι ζητούμενο του σχεδιασμού τύπων IAM για χρήση σε κατακόρυφα στοιχεία δεν είναι η αύξηση της φέρουσας ικανότητας των σύμμικτων στοιχείων σε σύγκριση με τα μονολιθικά. Το βασικότερο πλεονέκτημα της απόκρισης των σύμμικτων στοιχείων IAM/ΟΣ, σε σύγκριση με μονολιθικά στοιχεία, έγκειται στην αυξημένη παραμορφωσιμότητα των πρώτων. Στη συγκεκριμένη πειραματική

διερεύνηση (αν και έχει γίνει χρήση χαμηλών ποσοστών οπλισμού στα ινοπλέγματα), αυτό καταδεικνύεται από το γεγονός ότι οι λόγοι των παραμορφώσεων που αντιστοιχούν στην αντοχή των δοκιμίων, προς τις παραμορφώσεις που αντιστοιχούν στο ίδιο ποσοστό πτώσης της αντοχής τους (π.χ. στο 80% της ανηγμένης φέρουσας ικανότητάς τους) είναι κατά 25% έως 75% μεγαλύτεροι για τα σύμμικτα δοκίμια, σε σύγκριση με το δοκίμιο ελέγχου.



Εικόνα 9: Διάγραμμα ανηγμένης τάσης-αξονικής παραμόρφωσης

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η πειραματική διερεύνηση που παρουσιάστηκε στην παρούσα εργασία παρέχει χρήσιμες πληροφορίες σχετικά με την απόκριση σύμμικτων στοιχείων σκυροδέματος / IAM και αποτελεί το πρώτο βήμα για τη διεξαγωγή αντίστοιχων δοκιμών μεγάλης κλίμακας. Ακόμη και μικρής δυστένειας ινοπλέγματα απέφεραν ικανοποιητικά αποτελέσματα.

5. ΑΝΑΦΟΡΕΣ

RILEM Technical Committee 201, “Textile Reinforced Concrete”, State of the Art Report (2006), RILEM Publications Press

Voss, S., Hegger, J., “Dimensioning of textile reinforced concrete structures”, in Proceedings of the 1st International RILEM Symposium Textile Reinforced Concrete (Aachen, Germany, Sep 9-14, 2006), RILEM Publications Press, 151-160