

ΜΗΧΑΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΩΝ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΩΝ

Ιωάννα Παπαγιάννη

Καθηγήτρια, Εργαστήριο Δομικών Υλικών Α.Π.Θ.

Ελευθέριος Αναστασίου

Πολιτικός Μηχανικός MSc, Εργαστήριο Δομικών Υλικών Α.Π.Θ.

Λέξεις κλειδιά: Ινοπλισμένο σκυρόδεμα, μηχανικά χαρακτηριστικά, ενέργεια θραύσης

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Στο πλαίσιο της μελέτης της συμπεριφοράς του σκυροδέματος με ενσωμάτωση χαλύβδινων ινών στο ανάμιγμα ερευνήθηκε πειραματικά η ικανότητα τους να βελτιώσουν τόσο την πλαστιμότητα του, δηλαδή την ικανότητα του σκυροδέματος να παραμορφώνεται πριν από τη θραύση του, όσο και την κράτυνση, δηλαδή την ικανότητα του σκυροδέματος να φέρει φορτία και να παραμορφώνεται και μετά από τη θραύση του. Η έρευνα επικεντρώθηκε στη μέτρηση της ενέργειας που απορροφάται από σκυρόδεμα κατά τη θραύση με προσθήκη διάφορων ποσοστών ινών διαφορετικού μεγέθους. Από την πειραματική μελέτη προέκυψε ότι, για ένα μίγμα σκυροδέματος με ποιότητας 25 MPa, η προσθήκη ινών βελτιώνει κατά 10-30% τις μηχανικές αντοχές του και του προσδίδει αυξημένη πλαστιμότητα.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι ίνες ως οπλισμός του σκυροδέματος χρησιμοποιούνται με αυξημένη συχνότητα στις κατασκευές τις τελευταίες δεκαετίες (Mehta & Monteiro, 2006). Αυτό οφείλεται στο ότι εμποδίζουν την εξέλιξη της μικρορηγμάτωσης, προσδίδουν μεγαλύτερη πλαστιμότητα και βοηθούν στην αποφυγή τοπικών αστοχιών στο σκυρόδεμα. Στο εμπόριο διατίθεται μεγάλη ποικιλία ινών από διαφορετικά υλικά (μεταλλικές, συνθετικές, φυσικές ίνες) και με διαφορετικές διαστάσεις και διατομές. Για συνθέσεις σκυροδέματος, οι πιο διαδεδομένες είναι οι μεταλλικές ίνες λόγω της σχετικά μεγαλύτερης αντοχής τους και το ποσοστό εφαρμογής τους στο μίγμα κυμαίνεται σε ποσοστό από 0.5% έως 2% κ.ο., ανάλογα με τη μελέτη σύνθεσης. Είναι γνωστό επίσης ότι το ποσοστό προσθήκης ινών έχει ανώτατο όριο που καθορίζεται από το εργάσιμο του μίγματος, το οποίο μειώνεται με την αύξηση της προσθήκης ινών. Η αύξηση της

πλαστιμότητας του σκυροδέματος, ενός ψαθυρού υλικού, είναι πάντα ένα σημαντικό ζήτημα κατά το σχεδιασμό κατασκευών και η χρήση ινών είναι μια μέθοδος αντιμετώπισης του ζητήματος αυτού (Song & Hwang, 2004 και Taylor et al, 1997). Για τη βελτίωση της πλαστικής συμπεριφοράς συνηθισμένου σκυροδέματος υπάρχουν πολλές δυνατές επιλογές ινών, ανάλογα με τις ειδικές απαιτήσεις της εφαρμογής, και οι χαλύβδινες ίνες είναι μια συχνά εφαρμοζόμενη λύση (Mehta & Monteiro, 2006), λόγω και της ήδη ανεπτυγμένης τεχνογνωσίας σχετικά με την εισαγωγή χάλυβα σε μίγματα σκυροδέματος, αλλά και της εξοικείωσης των κατασκευαστών με το υλικό.

Η διαθεσιμότητα των ινών χάλυβα σε διάφορα μεγέθη και με διαφορετικά χαρακτηριστικά δημιουργεί την ανάγκη να επιλεγεί κατάλληλος τύπος ινών για την κάθε εφαρμογή και να βρεθεί το βέλτιστο ποσοστό εισαγωγής τους στο μίγμα του σκυροδέματος. Επίσης, πρέπει να ληφθεί υπόψη η επιρροή της εισαγωγής των ινών στις φυσικομηχανικές ιδιότητες τόσο του νωπού, όσο και του σκληρυμένου σκυροδέματος. Έτσι, μια παραμετρική διερεύνηση της εισαγωγής ινών χάλυβα στο σκυροδέμα που να εξετάζει διαφορετικές ονομαστικές διαστάσεις και διατομές ινών, καθώς και ποικίλα ποσοστά εισαγωγής τους στο μίγμα παρουσιάζει ενδιαφέρον για την πρακτική εφαρμογή.

Αντικείμενο της εργασίας είναι η σύγκριση σκυροδεμάτων με διαφορετικά ποσοστά ινών διαφορετικών διαστάσεων ως προς τις μηχανικές τους ιδιότητες (αντοχή σε θλίψη, διάρρηξη, κάμψη, στατικό και δυναμικό μέτρο ελαστικότητας) και ειδικότερα σχετικά με την απορρόφηση ενέργειας θραύσης, με τη χρήση και των τριών μεθόδων, κατά ASTM, RILEM και JSCE, ώστε να είναι δυνατή η σύγκριση των αποτελεσμάτων των μεθόδων και η καλύτερη εκτίμηση της συνεισφοράς των ινών.

2. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Σε μια προσπάθεια διερεύνησης των παραπάνω παραμέτρων έγινε σειρά εργαστηριακών μιγμάτων με παραμέτρους την ονομαστική διάσταση των ινών και το ποσοστό εισαγωγής τους στο μίγμα. Για την παρασκευή αυτών των μιγμάτων επιλέχθηκε μια σύνθεση για την παραγωγή ύφους σκυροδέματος, που θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή δαπέδων από σκυροδέμα (Πίνακας 1). Τα κύρια χαρακτηριστικά της παραπάνω σύνθεσης είναι σχετικά χαμηλή περιεκτικότητα τσιμέντου, χαμηλός λόγος N/T (0.40) –άρα και χαμηλή εργασιμότητα (<S1)– και μέγιστος κόκκος 16mm ώστε να διευκολύνεται η διασπορά των ινών. Χρησιμοποιήθηκαν άμμος ποταμού και θραυστά ασβεστολιθικά αδρανή ως λεπτόκοκκα και χονδρόκοκκα αδρανή, αντίστοιχα, και η σύνθεσή τους έγινε έτσι ώστε η κοκκομετρική καμπύλη να βρίσκεται στο κάτω μισό της υποζώνης Δ, σύμφωνα με τον ισχύοντα κανονισμό (ΚΤΣ, 1997).

Πίνακας 1. Τυπική σύνθεση για τις δοκιμαστικές συνθέσεις

Υλικό	Είδος	Περιεκτικότητα (kg/m ³)
Τσιμέντο	CEM I42.5N	300
Νερό		120
Άμμος	Ποταμού	410
Ρύζι	Θραυστό ασβεστολιθικό	811
Γαρμπίλι	Θραυστό ασβεστολιθικό	811
Υπερρυστοποιητής	GLENIUM 27	3*

*τροποποιείται ανά σύνθεση για την επίτευξη εργασιμότητας (10-20s Vebe)

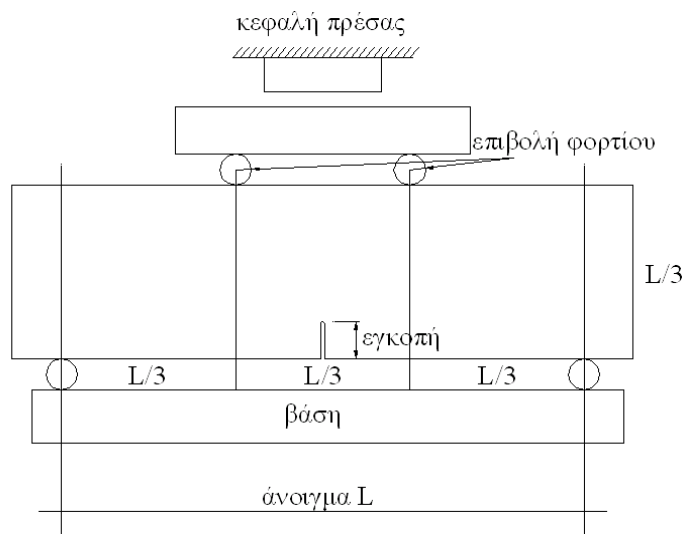
Συνολικά έγιναν τέσσερις διαφορετικές συνθέσεις με ίνες και μία χωρίς, όπως φαίνεται αναλυτικά στον Πίνακα 2. Σε όλες τις συνθέσεις χρησιμοποιήθηκε κατάλληλη ποσότητα υπερρυστοποιητή, ώστε να διατηρηθεί σταθερή η εργασιμότητα με την προσθήκη των ινών, η οποία μετρήθηκε με το χρόνο Vebe, μέθοδος κατάλληλη για ινοπλισμένα σκυροδέματα (Tattersall, 1991). Τα ποσοστά προσθήκης των ινών στα μίγματα ήταν 0.7% και 0.9% κ.ο. και οι διαστάσεις των ινών χάλυβα 30 mm (με πάχος 0.8 mm και λόγο μορφής 40) και 60 mm (με πάχος 1.0 mm και λόγο μορφής 60). Από τον συνδυασμό των παραπάνω προέκυψαν τέσσερις διαφορετικές συνθέσεις ινοπλισμένου σκυροδέματος. Παράχθηκε επίσης μία άοπλη σύνθεση σκυροδέματος με τα ίδια χαρακτηριστικά με σκοπό τη σύγκριση των ιδιοτήτων του με τα ινοπλισμένα σκυροδέματα. Στα δοκίμια που προέκυψαν από αυτές τις συνθέσεις ελέγχθηκαν εργαστηριακά, πέρα από τη δυσθραυστότητα, η αντοχή σε θλίψη, κάμψη και διάρρηξη, ενώ μετρήθηκε και το μέτρο ελαστικότητας.

Από κάθε σύνθεση παράχθηκαν τρία κυβικά δοκίμια ακμής 15 cm για τη μέτρηση της αντοχής σε θλίψη, τρία κυλινδρικά δοκίμια διαστάσεων 15x30 cm για τη μέτρηση της αντοχής σε διάρρηξη και του μέτρου ελαστικότητας, και τρία πρισματικά δοκίμια διαστάσεων 10x15x70 cm ή 15x15x70 cm για τη μέτρηση της αντοχής σε κάμψη και της ενέργειας θραύσης. Όλα τα δοκίμια συντηρήθηκαν για 28 ημέρες σε συνθήκες θερμοκρασίας 20°C και 95% υγρασίας και στη συνέχεια διενεργήθηκαν οι σχετικοί έλεγχοι.

Πίνακας 2. Περιεκτικότητα και τύπος ινών στις πειραματικές συνθέσεις

Σύνθεση	Περιεκτικότητα σε ίνες	Μήκος ινών	Εργασιμότητα κατά Vebe
A	-	-	12s
B-1	0.70 % κ.ο.	60 mm	16s
B-2	0.70 % κ.ο.	30 mm και 60 mm*	16s
Γ-1	0.90 % κ.ο.	60 mm	17s
Γ-2	0.90 % κ.ο.	30 mm και 60 mm*	17s

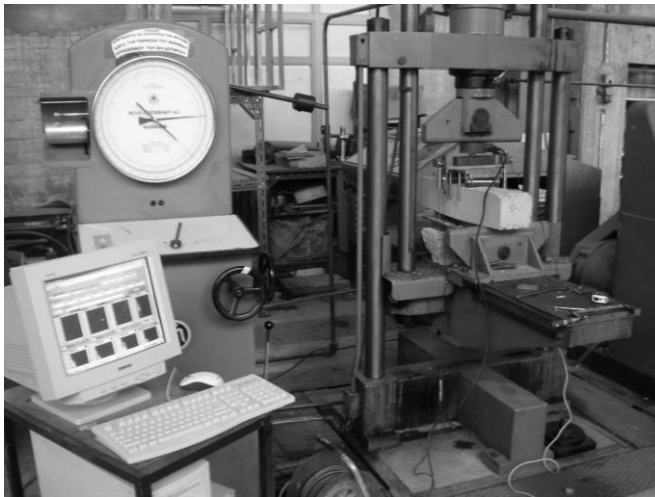
*χρησιμοποιήθηκαν 50% ίνες μήκους 30 mm και 50% ίνες μήκους 60 mm



Εικόνα 1. Διάταξη μέτρησης ενέργειας θραύσης

Ο υπολογισμός της ενέργειας θραύσης έγινε στη διάταξη ελέγχου αντοχής σε κάμψη (third-point loading). Στα δοκίμια δημιουργήθηκε εγκοπή στο μέσο του ανοίγματος μεταξύ των στηρίξεων (Εικόνα 1), ώστε να επέλθει μέγιστη παραμόρφωση και θραύση σε ελεγχόμενο σημείο (Hillerborg, 1985 και Lee & Barr, 2003).

Η παραμόρφωση του δοκιμίου μετρήθηκε με τη βοήθεια ηλεκτρονικού παραμορφωσίμετρου (LVDT) και αντίστοιχου καταγραφικού σε Η/Υ (Εικόνα 2).



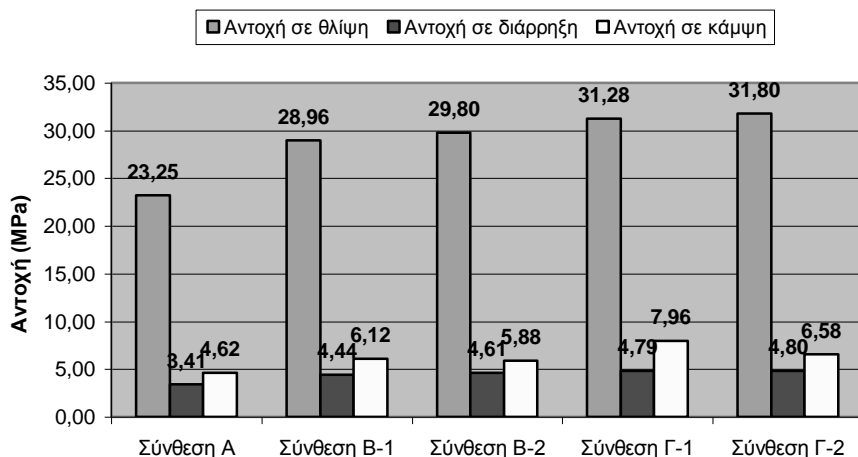
Εικόνα 2. Διάταξη μέτρησης ενέργειας θραύσης

Η ενέργεια θραύσης υπολογίστηκε με τρεις διαφορετικές μεθόδους:

- Με τροποποίηση της μεθόδου 50-FMC της RILEM για τον υπολογισμό της ενέργειας πρώτης θραύσης G_f , που εφαρμόζεται και σε άοπλα δοκίμια, αφού αφορά τη συμπεριφορά του σκυροδέματος μέχρι την πρώτη του θραύση (RILEM, 1985).
- Την προδιαγραφή ASTM C1018-94, όπου υπολογίζονται οι δείκτες δυσθραυστότητας I_5 και I_{10} και ο δείκτης απομένουσας αντοχής $R_{5,10}$, που περιγράφουν τη συμπεριφορά του ινοπλισμένου σκυροδέματος μετά τη θραύση του (ASTM, 1994).
- Την προδιαγραφή JCI-SF4 της JSCE, όπου υπολογίζονται οι δείκτες f_c και R_e που περιγράφουν την ισοδύναμη καμπτική αντοχή και το ισοδύναμο ποσοστό της καμπτικής αντοχής, αντίστοιχα, για παραμόρφωση ίση με το 1/150 του ανοίγματος μεταξύ των θέσεων στήριξης του δοκιμίου (JSCE, 1984).

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Από τις δοκιμές που διενεργήθηκαν στα δοκίμια των δοκιμαστικών συνθέσεων προέκυψαν η αντοχή σε θλίψη, η αντοχή σε διάρρηξη και η αντοχή σε κάμψη, όπως αυτές παρουσιάζονται στην Εικόνα 3. Επίσης, μετρήθηκαν η πυκνότητα, το στατικό και το δυναμικό μέτρο ελαστικότητας των συνθέσεων και παρουσιάζονται στον Πίνακα 3. Το στατικό μέτρο ελαστικότητας υπολογίστηκε μετρώντας την παραμόρφωση κατά τη διεξαγωγή του έλεγχου αντοχής σε θλίψη σε κυλινδρικό δοκίμιο, και εξάγοντας το διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων. Το δυναμικό μέτρο ελαστικότητας υπολογίστηκε έμμεσα με τη χρήση σονόμετρου.



Εικόνα 3. Μηχανικές αντοχές δοκιμαστικών συνθέσεων

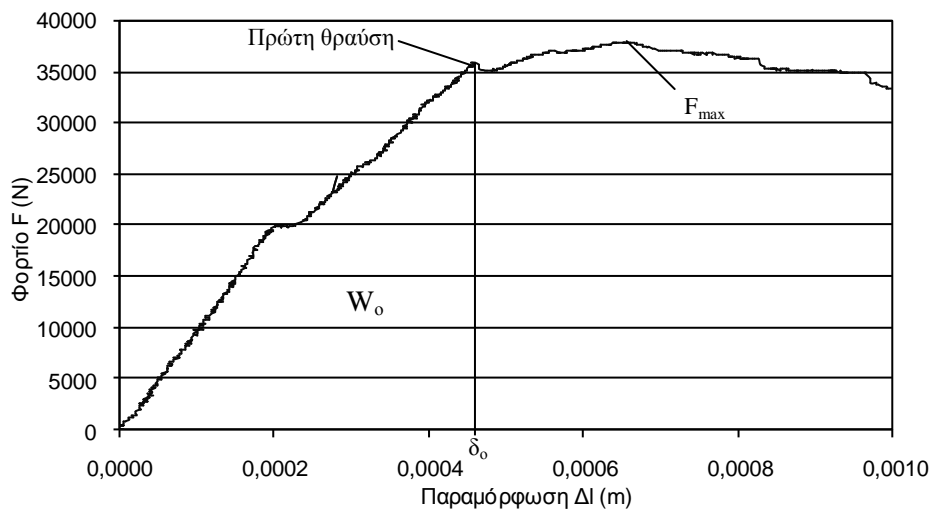
Πίνακας 3. Άλλες φυσικές και μηχανικές αντοχές δοκιμαστικών συνθέσεων

Σύνθεση	Ίνες	Πυκνότητα (kg/m ³)	Στατικό μέτρο ελαστικότητας (GPa)	Δυναμικό μέτρο ελαστικότητας (GPa)
A	-	2378	31.0	42.5
B-1	0.7% 60mm	2412	31.1	43.7
B-2	0.7% 30+60mm	2375	31.6	43.6
Γ-1	0.9% 60mm	2426	32.2	46.8
Γ-2	0.9% 30+60mm	2494	34.6	49.3

3.1 Ενέργεια πρώτης θραύσης κατά τροποποιημένη μέθοδο RILEM

Για τον υπολογισμό της ενέργειας θραύσης από τον έλεγχο αντοχής σε κάμψη χρησιμοποιείται το διάγραμμα φορτίου-παραμόρφωσης και η επεξεργασία των δεδομένων ποικίλλει ανάλογα με τη μέθοδο υπολογισμού.

Υπολογίζοντας την ενέργεια μέχρι την πρώτη θραύση τόσο για το άοπλο όσο και για τα ινοπλισμένα δοκίμια, μπορούμε να έχουμε μια σύγκριση της πλαστιμότητας των άοπλων και των ινοπλισμένων δοκιμίων και μια εικόνα της συνεισφοράς των ινών σε αυτή.



Εικόνα 4. Διάγραμμα φορτίου-παραμόρφωσης για τον υπολογισμό της ενέργειας θραύσης κατά RILEM

Έτσι, από το διάγραμμα φορτίου-παραμόρφωσης βρίσκεται η θέση της πρώτης θραύσης –η οποία μπορεί να διαφέρει από το μέγιστο φορτίο F_{\max} – και υπολογίζεται το έργο μέχρι την πρώτη θραύση W_o (Εικόνα 4). Στη συνέχεια υπολογίζεται η ενέργεια πρώτης θραύσης G_f από τον παρακάτω τύπο:

$$G_f = (W_o + mg\delta_o)/A_{lig} \quad (\text{N/m}) \quad (1)$$

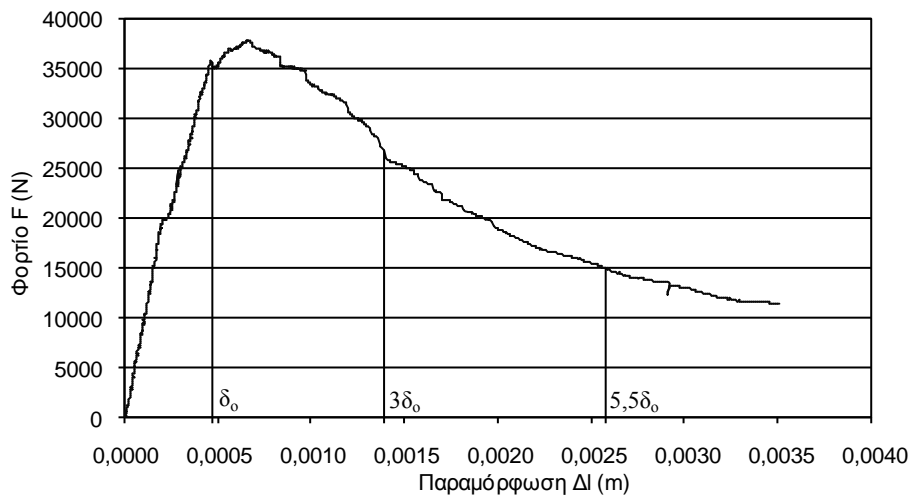
όπου W_o = η επιφάνεια σύμφωνα με την Εικόνα 4 (N/m), m = το βάρος που ακολουθεί το δοκίμιο μέχρι τη θραύση του (kg), δ_o = η παραμόρφωση μέχρι την πρώτη θραύση (m), g = η επιτάχυνση της βαρύτητας (9.81 m/s^2) και A_{lig} = η επιφάνεια θραύσης (m^2).

Τα αποτελέσματα παρατίθενται στον Πίνακα 4.

3.2 Δείκτες δυσθραυστότητας κατά ASTM

Για τον υπολογισμό των δεικτών δυσθραυστότητας I_5 και I_{10} κατά ASTM προσδιορίζονται στο διάγραμμα φορτίου βύθισης η παραμόρφωση κατά την πρώτη θραύση δ_o , όπως και οι παραμορφώσεις που αντιστοιχούν σε $3\delta_o$ και $5.5\delta_o$. Αν W_o , W_3 και $W_{5.5}$ είναι το εμβαδό μεταξύ της καμπύλης και του άξονα των X για τις παραμορφώσεις δ_o , $3\delta_o$ και $5.5\delta_o$, αντίστοιχα, τότε ο δείκτης I_5 δίνεται από το λόγο W_3/W_o και ο δείκτης I_{10} από το λόγο $W_{5.5}/W_o$. Η απομένουσα αντοχή $R_{5,10}$ δίνεται από τη σχέση $R_{5,10}=20(I_{10}-I_5)$.

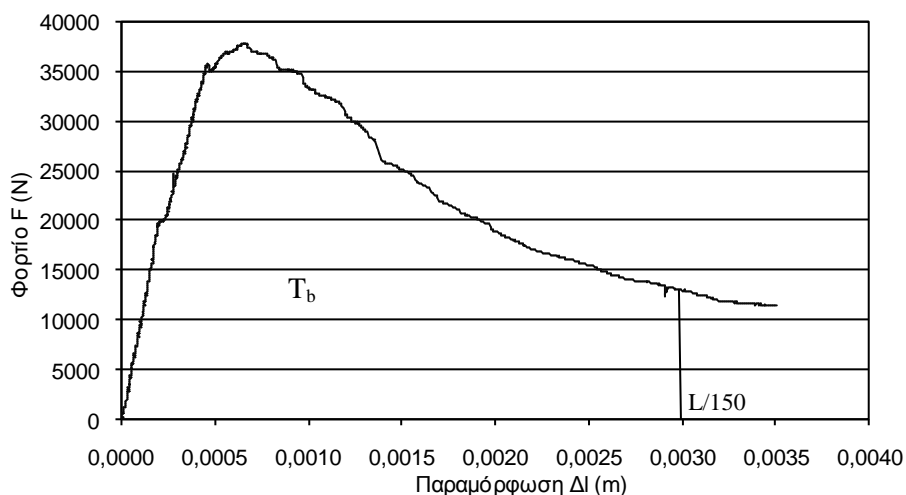
Τα αποτελέσματα των μετρήσεων δίνονται στον Πίνακα 4.



Εικόνα 5. Διάγραμμα φορτίου-παραμόρφωσης για τον υπολογισμό των δεικτών δυσθραυστότητας κατά ASTM

3.3 Ισοδύναμη καμπτική αντοχή κατά JSCE

Για την εκτίμηση της ενέργειας θραύσης ο ιαπωνικός κανονισμός προτείνει τον υπολογισμό από το διάγραμμα φορτίου-παραμόρφωσης του εμβადού T_b , που αντιστοιχεί στο έργο που παράγεται για την παραμόρφωση του δοκιμίου κατά το 1/150 του ελεύθερου ανοίγματος L του δοκιμίου. Στην περίπτωση μας το L ισούται με 450 mm, οπότε η ζητούμενη παραμόρφωση ισούται με 3 mm (Εικόνα 6).



Εικόνα 6. Διάγραμμα φορτίου-παραμόρφωσης για τον υπολογισμό της ισοδύναμης καμπτικής αντοχής κατά JSCE

Η ισοδύναμη καμπτική αντοχή δίνεται από τον τύπο:

$$f_{e,3} = T_b L / \delta_{tb} b h^2 \text{ (MPa)} \quad (2)$$

όπου T_b = η επιφάνεια σύμφωνα με την Εικόνα 5 (Nmm), L = το ελεύθερο άνοιγμα μεταξύ των στηρίξεων (mm), δ_{tb} = το 1/150 του L (mm), b = το πλάτος του δοκιμίου (mm) και h = το ύψος του δοκιμίου (mm).

Επίσης υπολογίζεται το ισοδύναμο ποσοστό της καμπτικής αντοχής $R_{e,3}$ από τον τύπο:

$$R_{e,3} = f_{e,3} / f_{ct} \cdot 100 \text{ (%) } \quad (3)$$

όπου $f_{e,3}$ = η ισοδύναμη καμπτική αντοχή (MPa) και f_{ct} = η καμπτική αντοχή του σκυροδέματος (MPa).

Τα αποτελέσματα παρατίθενται επίσης στον Πίνακα 4.

Πίνακας 4. Αποτελέσματα υπολογισμού ενέργειας θραύσης

α/α	Ίνες	RILEM	ASTM			JSCE	R _{e,3}
		G _f (N/m)	I ₅	I ₁₀	R _{10.5}	f _{e,3} (MPa)	
A	άοπλο	114.2	-	-	-	-	-
B-1	ίνες 60mm 0.70%	452.5	4.14	6.97	56.74	3.48	61%
B-2	ίνες 30+60mm 0.70%	461.2	4.72	7.62	57.94	3.41	58%
Γ-1	ίνες 60mm 0.90%	490.2	4.20	6.90	54.09	3.80	48%
Γ-2	ίνες 30+60mm 0.90%	482.6	4.43	7.06	52.57	4.10	62%

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η εισαγωγή ινών χάλυβα σε ένα μίγμα σκυροδέματος μειώνει εμφανώς την εργασιμότητά του, κάτι που είναι αναμενόμενο λόγω της δυσχέρειας στην κατανομή των ινών στον ιστό του σκυροδέματος. Ταυτόχρονα, η εισαγωγή ινών σε ποσοστό από 0.7% έως 0.9% κ.ο. του μίγματος φαίνεται να αυξάνει την αντοχή του σκυροδέματος από 25% έως 36%, αντίστοιχα, και η αντοχή αυξάνει, όσο αυξάνει το ποσοστό των ινών στο μίγμα.

Επίσης, φαίνεται ότι η εισαγωγή ινών αυξάνει σημαντικά την πλαστιμότητα του σκυροδέματος, όπως φαίνεται και από τη σύγκριση των τιμών ενέργειας πρώτης θραύσης G_f για τα άοπλα και τα ινοπλισμένα σκυροδέματα (οι τιμές της ενέργειας θραύσης για τα ινοπλισμένα σκυροδέματα είναι περίπου τέσσερις φορές μεγαλύτερες σε σχέση με τις αντίστοιχες τιμές για τα άοπλα σκυροδέματα).

Όσον αφορά στη συνεισφορά του ποσοστού προσθήκης ινών και του μεγέθους των ινών στην πλαστιμότητα φαίνεται ότι η μέθοδος κατά ASTM δίνει ότι τα μίγματα με δύο είδη ινών (30 και 60 mm) εμφανίζουν ελαφρώς καλύτερη πλαστιμότητα στο σκυρόδεμα άσχετα με τη συνολική περιεκτικότητά τους στο μίγμα (0.7 και 0.9%). Οι μέθοδοι κατά RILEM και JSCE καταδεικνύουν ότι τα μίγματα με μεγαλύτερο ποσοστό ινών είναι καλύτερης πλαστιμότητας. Η συνεισφορά του διαφορετικού μεγέθους ινών εμφανίζεται ευνοϊκή στην περίπτωση του ποσοστού 0.7% και αρνητική ως προς την πλαστιμότητα στην περίπτωση του ποσοστού 0.9%.

Λόγω των σχετικά μικρών διαφορών στα αποτελέσματα σχετικά με τη συνεισφορά στη πλαστιμότητα διαφορετικού μεγέθους ινών φρονούμε ότι απαιτείται περαιτέρω διερεύνηση με μεγαλύτερες αποκλίσεις στα ποσοστά των ινών διάφορου μεγέθους στο μίγμα, ώστε να προσδιοριστεί σαφώς η επιρροή τους στην πλαστιμότητα του σκυροδέματος.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

ASTM Standard Test Method for Flexural Toughness and First-Crack Strength of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam With Third-Point Loading), ASTM C1018-94 (1994)

Hillerborg, A. "The theoretical basis of a method to determine the fracture energy G_F of concrete". *Materials and Structures*, Vol. 18, No 106 (1985) 291-296

JSCE Method of tests for flexural strength and flexural toughness of fibre reinforced concrete, JCI-SF4 (1984)

Lee, M.K. & Barr, B.I.G., "Strength and fracture properties of industrially prepared steel fibre reinforced concrete". *Cement and Concrete Composites*, Vol. 25, No 3 (2003) 321-332

Mehta, P.K. & Monteiro P., "Concrete: Microstructure, Properties, and Materials (Third Edition)". McGraw-Hill, New York (2006), 502-503

RILEM Draft Recommendation 50-FMC committee "Fracture mechanics of concrete", *Materials and Structures*, Vol. 18, No. 106 (1985) 285– 290

Song, P.S. & Hwang, S., "Mechanical properties of high-strength steel-fiber reinforced concrete". *Construction and Building Materials*, Vol. 18, No 9 (2004) 669-673

Tattersall, G.H. "Workability and quality control of concrete". E&FN Spon, London (1991) 170

Taylor, M., Lydon, F.D. & Barr, B.I.G., "Toughness Measurements on Steel Fibre-reinforced High Strength Concrete". *Cement and Concrete Composites*, Vol. 19, No 4 (1997) 329-340

Κανονισμός Τεχνολογίας Σκυροδέματος, ΚΤΣ-97 (1997)