

Υψηλής ποιότητας σκυρόδεμα δαπέδων με αδρανή σκωρίας και ίνες

Ι. Παπαγιάννη, Μ. Παπαχριστοφόρου, Γ. Στρατής, Κ. Ζωγράφος

Εργαστήριο Δομικών Υλικών, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών ΑΠΘ, 54124 Θεσσαλονίκη

Λέξεις κλειδιά: ινοπλισμένο σκυρόδεμα, αδρανή σκωρίας, δυσθραυστότητα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Η εργασία αυτή εντάσσεται στο πλαίσιο της ερευνητικής κατεύθυνσης που έχει αναπτυχθεί στο Εργαστήριο Δομικών Υλικών του Α.Π.Θ. σχετικά με τη χρήση εναλλακτικών υλικών στην κατασκευή έργων υποδομής.

Στην εργασία αυτή προσδιορίστηκαν πειραματικά τα μηχανικά χαρακτηριστικά μιγμάτων σκυροδέματος με χρήση βιομηχανικών στερεών καταλοίπων ως αδρανή. Ως αδρανή χρησιμοποιήθηκαν (εκτός από τα συνήθη ασβεστολιθικά), αποκαμιεύματα σκωρίας της εταιρίας ΑΕΙΦΟΡΟΥ Α.Ε. σε κλάσματα κοκκομετρίας 0-4mm, 4-8mm, 8-16mm. Παράμετροι για τον σχεδιασμό των μιγμάτων ήταν:

- Η χρήση αδρανών σκωρίας (αποκαμιεύματα) σε αντικατάσταση των συμβατικών αδρανών.
- Η χρήση μεταλλικών ινών οπλισμού στο σκυρόδεμα για την αύξηση της δυσθραυστότητας του.

Στόχος είναι να διερευνηθεί, αν είναι δυνατή η χρήση των σκωριών για την παρασκευή σκυροδεμάτων οδοστρωσίας ή άλλων δαπέδων (pavement) με την τεχνική του κυλινδρούμενου σκυροδέματος.

Συνολικά ελέγχθηκε ένας αριθμός 150 περίπου δοκιμίων που παράχθηκαν στα Εργαστήρια του Α.Π.Θ. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι είναι δυνατό να επιτευχθεί σκυρόδεμα υψηλού οικολογικού προφίλ αντοχής 48 MPa με αντίστοιχη, εφελκυστική αντοχή σε διάρρηξη 4 MPa, σε κάμψη 9,9 MPa που αποτελεί ένα πολύ οικονομικό σκυρόδεμα ικανοποιητικής αντοχής και τεχνικών χαρακτηριστικών που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για μια σειρά έργων υποδομής όπως δάπεδα, οδοστρώματα, υποστρώσεις τούνελ, πίστες αεροδρομίων κ.ά.

High quality pavement concrete with steel slag aggregates and steel fibers

I. Papayianni, M. Papachristoforou, G. Stratis, K. Zografos

Lab. of Building Materials, Civil Engineering Department AUTH, 54124 Thessaloniki

Keywords: steel fiber-reinforced concrete, steel slag aggregates, flexural toughness

ABSTRACT: This work is part of the research direction that has grown in the Laboratory of Building Materials AUTH on the use of alternative materials in construction of infrastructure projects.

The mechanical characteristics of concrete mixtures with solid industrial waste as aggregates were defined experimentally. Steel slag, provided by AEIFOROS A.E., were used (apart from the usual limestone aggregates) as aggregate in gradation 0-4mm, 4-8mm, 8-16mm, 16-31,5mm. The parameters for the designing of the mixtures were:

- The use of slag aggregates in replacement of conventional aggregates.
- The use of steel fibers in concrete to increase the flexural toughness

The target was to investigate the suitability of slag (as aggregate) for the production of road-pavement concrete or other concrete pavement with the roller-compacted method.

Totally a number of 150 specimens were examined which were produced at the Laboratory of Aristotle University of Thessaloniki. The results showed that it is possible to produce concrete of high ecological profile with the following characteristics: Compressive strength: 48MPa, Split tensile strength: 4MPa, Flexural strength: 9,9MPa. This means that a low-cost concrete of adequate strength level and good technical characteristics can be applied in many infrastructure projects as industrial pavements, road pavements, tunnel sub-bases, airport pavements etc.

1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η σκωρία είναι ένα παραπροϊόν της μεταλλουργικής βιομηχανίας. Προκύπτει από την τήξη σε κατάλληλο κλίβανο ακατέργαστων υλικών, τα οποία χρησιμοποιούνται για την παραγωγή οικοδομικού χάλυβα. Η χημική της σύσταση, η δομή και οι ιδιότητες της παρουσιάζουν μεγάλη ποικιλία. Η ποικιλία αυτή εξαρτάται από το αν αυτή είναι σιδηρούχα ή μη-σιδηρούχα και από την πρώτη ύλη (scrap). Σύμφωνα με την American Society for Testing Materials (ASTM), η σκωρία ορίζεται ως ένα μη μεταλλικό προϊόν που αποτελείται κυρίως από πυριτικές ενώσεις του ασβεστίου ενωμένες με τηγμένα οξείδια σιδήρου, αλουμινίου, μαγγανίου, ασβεστίου και μαγνησίου και παράγεται ταυτόχρονα με τον χάλυβα μέσα σε κλίβανο. Τα τελευταία χρόνια, οι σκωρίες χρησιμοποιούνται και ως αδρανή και ως κονίες σε κατασκευές ειδικών απαιτήσεων. Στην Ευρώπη κάθε χρόνο παράγονται περίπου 12 εκατομμύρια τόνοι σκωρίας (Motz H., Geiseler J., 2001). Μετά από εντατική έρευνα των τελευταίων 30 ετών, σήμερα το 90% της παραγόμενης ποσότητας σκωριών χρησιμοποιείται σε ποικίλες εφαρμογές. Όμως παραμένει ένα 10% που αποτίθεται στο περιβάλλον (Φωτεινή Κεχαγιά, 2004). Βασικό πλεονέκτημα της χρήσης των σκωριών είναι η εξοικονόμηση των φυσικών αδρανών και η διατήρηση του φυσικού κεφαλαίου. Επίσης η χρήση τους αποτρέπει τις περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις της χερσαίας απόθεσης όπως είναι η κατάληψη των εκτάσεων της γης και ο αποκλεισμός τους από άλλες χρήσεις, η δημιουργία σκόνης, η αισθητική ρύπανση και η ρύπανση υπόγειων και επιφανειακών υδάτων. Τελικά η διάθεση της σκωρίας στο σκυρόδεμα όπου δεσμεύεται χημικά φαίνεται σαφώς καλύτερη λύση από την ταφή της που εφαρμόζεται σήμερα.

Όσον αφορά την προσθήκη ινών στο σκυρόδεμα, είναι ικανή να βελτιώσει κάποια από τα μειονεκτήματα του άοπλου σκυροδέματος όπως είναι η χαμηλή εφελκυστική αντοχή, η ψαθυρότητα, η συστολή ξήρανσης και η διαπερατότητα. Οι ίνες σε τρισδιάστατη διασπορά μέσα στην μάζα του σκυροδέματος σταματούν την εξέλιξη των ήδη δημιουργημένων ρωγμών επιτρέποντας ταυτόχρονα να μεταδίδονται εφελκυστικές τάσεις από επιφάνεια σε επιφάνεια της ρωγμής, δρώντας έτσι ως γέφυρες «συρραφής». Έτσι οι ρωγμές εμποδίζονται σημαντικά στη διάδοση τους μέχρι τη μέγιστη τάση οπότε προκύπτει η αστοχία είτε από τη σύγχρονη διαρροή των ινών και του υλικού είτε από αστοχία του δεσμού στην διεπιφάνεια ίνας-υλικού. Μειονεκτήματα της χρήσης των ινών είναι η πιθανή ανομοιόμορφη κατανομή τους στη μάζα του σκυροδέματος και η μείωση της εργασιμότητας του νωπού σκυροδέματος.

2.ΕΛΕΓΧΟΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ

2.1 Υλικά

Οι σκωρίες που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία προέρχονται από την εταιρία ΑΕΙΦΟΡΟΣ Α.Ε και η καταλληλότητα τους ως αδρανή σκυροδέματος έχει ελεγχθεί από το Εργαστήριο Δομικών Υλικών Α.Π.Θ. κατά τα προηγούμενα έτη βάσει του κανονισμού EN12620. Χρησιμοποιήθηκαν τα εξής κλάσματα αδρανών: σκωρία σε κλάσματα 0-4mm, 4-8mm και 8-16mm με ειδικό βάρος 3.33 t/m³, και θραυστά ασβεστολιθικά αδρανή σε κλάσματα 0-4mm, 4-8mm και 8-16mm με ειδικό βάρος 2,65 t/m³.

Οι ίνες που χρησιμοποιήθηκαν έχουν μήκος 3cm και λόγο μορφής 40. Χρησιμοποιήθηκαν επίσης χαλύβδινες ίνες τύπου "σκουλήκι", μήκους 2.5cm με λόγο μορφής 25.

Το τσιμέντο είναι τύπου CEM IV32,5. Τέλος για βελτίωση της εργασιμότητας χρησιμοποιήθηκε ρευστοποιητής τύπου Glenium 21. Στο Σχήμα 1 φαίνονται τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν.



Σχήμα 1. Υλικά που χρησιμοποιήθηκαν

2.2 Σύνθεση μιγμάτων

Για τη σύνθεση των μιγμάτων έγινε κοκκομετρική ανάλυση όλων των διαθέσιμων κλασμάτων αδρανών και στη συνέχεια υπολογισμός των ποσοστών του κάθε κλάσματος στο μίγμα. Στις συνθέσεις με αδρανή σκωρίας, λόγω της χαμηλής περιεκτικότητας σε λεπτόκοκκο υλικό, χρησιμοποιήθηκε ασβεστολιθική άμμος για εξομάλυνση της κοκκομετρικής καμπύλης του μίγματος που επιλέχθηκε έτσι ώστε να βρίσκεται στο κάτω μισό της περιοχής Δ του νομογραφήματος του Κ.Τ.Σ. Για όλες τις δοκιμαστικές συνθέσεις επιλέχθηκε μέγιστος κόκκος 16mm, λόγος νερού προς τσιμέντο 0,50 και ποσότητα τσιμέντου 300 kg/m³. Το ποσοστό των ιών για τις ινοπλισμένες συνθέσεις ήταν 0,9%κ.ο. του μίγματος. Για την ινοπλισμένη σύνθεση με αδρανή σκωρίας έγιναν άλλες δύο συνθέσεις με αλλαγές στο λόγο νερού προς τσιμέντο και στο ποσοστό ιών (ΣΙα, ΣΙβ). Χρησιμοποιήθηκε ρευστοποιητής σε ποσοστό 0,5 ως 0,75% κ.β. τσιμέντου έτσι ώστε η εργασιμότητα σύμφωνα με τη δοκιμή Vebe να είναι μεταξύ 6 και 12 sec. Στον Πίνακα 1 φαίνεται ο αριθμός των συνθέσεων και η ποσότητα των υλικών σε 1m³ και στον Πίνακα 2 κάποιες από τις παραμέτρους τους.

Πίνακας 1. kg υλικών σε 1m³

Υλικά/Σύνθεση	A	AI	AIS	Σ	ΣI	ΣΙΣ	ΣIα	ΣIβ
Τσιμέντο CEM IV32,5	300	300	300	300	300	300	300	300
Νερό	150	150	150	150	150	150	165	165
Ασβεστολιθική άμμος	892	892	892	694	694	694	694	694
Ασβεστολιθικό ρύζι	495	495	495	-	-	-	-	-
Ασβεστολιθικό γαρμπίλι	595	595	595	-	-	-	-	-
Άμμος σκωρίας	-	-	-	239	239	239	239	239
Ρύζι σκωρίας	-	-	-	683	683	683	683	683
Γαρμπίλι σκωρίας	-	-	-	659	659	659	659	659
Ίνες l=3cm	-	70,8	-	-	70,8	-	70,8	88,6
Ίνες σκουλήκι l=2,5cm	-	-	70,8	-	-	70,8	-	-
Ρευστοποιητής	1,5	1,5	2,25	2,25	2,25	2,25	2,25	2,25
Σύνολο	2433	2504	2505	2727	2798	2798	2813	2830

Πίνακας 2. Παράμετροι συνθέσεων

Σύνθεση	A	AI	AIS	Σ	ΣI	ΣIS	ΣIα	ΣIβ
Λόγος N/T	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,55	0,55
Ποσοστό ινών % κ.ο.	-	0,9	0,9	-	0,9	0,9	0,9	1,13
Ποσοστό ρευστοποιητή %	0,50	0,50	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75
Χρόνος VEBE (sec)	9	6	9	11	11	12	6	6

Από τον Πίνακα 1. φαίνεται ότι με την αντικατάσταση των ασβεστολιθικών αδρανών με σκωρίες προκύπτει σκυρόδεμα μεγαλύτερου ειδικού βάρους (περίπου 2,8 t/m³). Από τον Πίνακα 2. παρατηρείται μια μείωση της εργασιμότητας παρόλο που η ποσότητα του ρευστοποιητή αυξάνεται. Η προσθήκη των ινών l=3cm δεν είχε επίδραση στην εργασιμότητα ενώ αντίθετα οι ίνες τύπου "σκουλήκι" μειώνουν την εργασιμότητα αφού οι συνθέσεις AIS και ΣIS έχουν μεγαλύτερο χρόνο Vebe. Η αύξηση του λόγου N/T σε 0,55 μειώνει σημαντικά το χρόνο Vebe σε 6 sec (σύνθεση ΣIα) ακόμα και όταν αυξάνεται το ποσοστό ινών από 0,9 σε 1,13% (σύνθεση ΣIβ).

2.3 Σκυροδέτηση και συντήρηση δοκιμίων

Για κάθε σύνθεση παράχθηκαν κυβικά δοκίμια 15x15x15cm για τον έλεγχο αντοχής σε θλίψη, κυλινδρικά δοκίμια 30x15cm στα οποία ελέγχθηκε η αντοχή σε θλίψη και διάρρηξη και πρισματικά 10x10x40cm στα οποία ελέγχθηκε η αντοχή σε κάμψη. Οι μήτρες με το νωπό σκυρόδεμα τοποθετήθηκαν σε θάλαμο συντήρησης με συγκεκριμένες συνθήκες υγρασίας και θερμοκρασίας (20°C, 95% υγρασία, Κ.Τ.Σ.-97). Μετά από 24 ώρες πραγματοποιήθηκε το ξεκαλούπωμα και τα δοκίμια παρέμειναν στο θάλαμο μέχρι να συμπληρωθούν 28 ημέρες από τη σκυροδέτηση τους προκειμένου να αποκτήσουν την απαιτούμενη αντοχή.

2.4 Αντοχή σε θλίψη, διάρρηξη, κάμψη

Τα αποτελέσματα των δοκιμών σε θλίψη κυλινδρικού και κυβικού δοκιμίου, διάρρηξη και κάμψη φαίνονται στον Πίνακα 3.

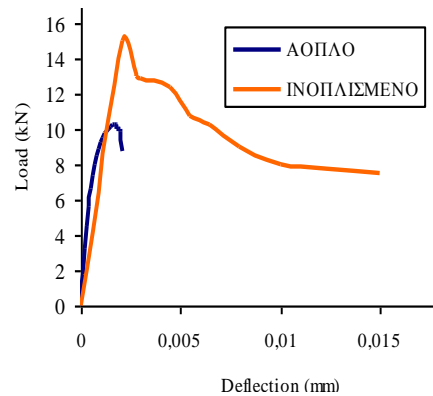
Πίνακας 3. Ανάπτυξη αντοχών

	ANTOXES (MPa)			
	Θλίψη Κύλινδροι	Θλίψη Κύβοι	ΔΙΑΡΡΗΞΗ	ΚΑΜΨΗ
A	29,9	38,2	3,2	6,8
AI	26,7	32,2	3,3	6,8
AIS	27,8	38,1	2,9	6,8
Σ	41,7	57,6	4,5	8,7
ΣI	49,8	59,5	5	8,6
ΣIS	39,4	50,1	4,2	8,3
ΣIα	38,5	47,8	4	9,9
ΣIβ	40,2	46,4	4,7	9,7

Η προσθήκη σκωριών βελτιώνει σημαντικά όλα τα μηχανικά χαρακτηριστικά του σκυροδέματος και ιδιαίτερα τη θλιπτική αντοχή όπου η αύξηση είναι περίπου 20 MPa (σύγκριση A-Σ). Οι ίνες l=3cm δεν προσδίδουν κάποια αύξηση στις αντοχές ενώ οι τύπου "σκουλήκι" έχουν καθόλου ή και αρνητική επίδραση.

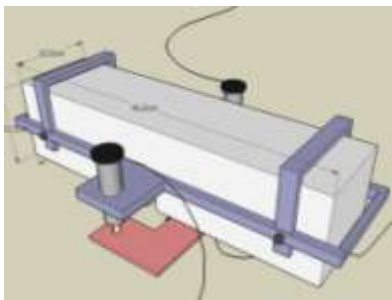
2.5 Απορρόφηση ενέργειας στη δοκιμή κάμψης

Η συμπεριφορά του σκυροδέματος σε κάμψη είναι τελείως διαφορετική με την προσθήκη ινών. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2, το άοπλο σκυροδέμα μετά την πρώτη ρωγμή αστοχεί ενώ το ινοπλισμένο συνεχίζει να παραλαμβάνει φορτία με αύξηση της παραμόρφωσης.

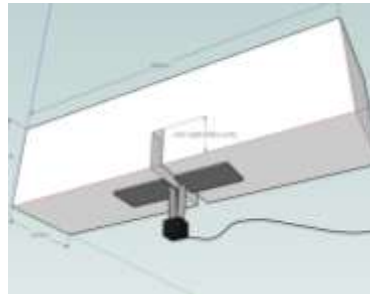


Σχήμα 2. Τυπικό διάγραμμα φορτίου-παραμόρφωσης άοπλου και ινοπλισμένου σκυροδέματος

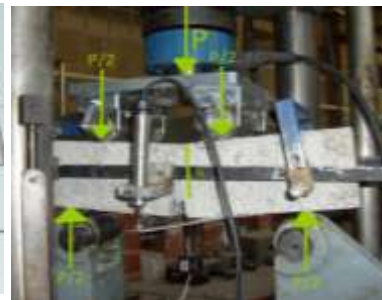
Στις ινοπλισμένες συνθέσεις πριν από τη δοκιμή στη μέση του ανοίγματος κάθε δοκιμίου ανοίχθηκε με τροχό ένα αυλάκι ώστε να εξασφαλιστεί ότι η θραύση θα γίνει σε εκείνο το σημείο. Το εφελκυστικό φορτίο μετρήθηκε με ηλεκτρονικό δυναμόμετρο (load cell) μέγιστου φορτίου 100 kN και οι εγκάρσιες παραμορφώσεις με δυο γραμμικά ηλεκτρονικά μηκυνσιόμετρα (LVDTs) τα οποία προσαρμόστηκαν δεξιά και αριστερά του δοκιμίου με κατάλληλη διάταξη (Σχήμα 3.). Επίσης μετρήθηκε και η εξέλιξη του ανοίγματος που είχε δημιουργηθεί πιο πριν με τον τροχό στην κάτω παρειά του δοκιμίου πάλι με ηλεκτρονικό μηκυνσιόμετρο (Σχήμα 4.). Οι τιμές του φορτίου και των παραμορφώσεων καταγράφηκαν ηλεκτρονικά με συχνότητα 5 τιμές /sec. Στο Σχήμα 5. φαίνεται η διάταξη φόρτισης.



Σχήμα 3.



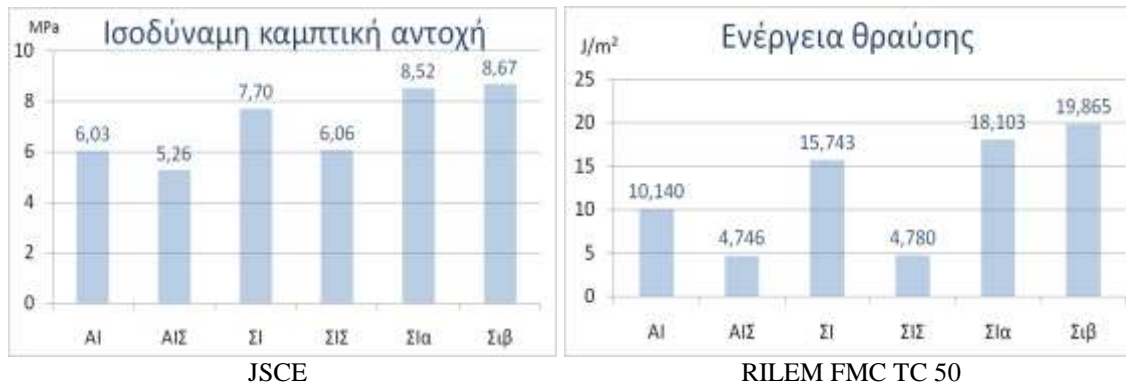
Σχήμα 4.



Σχήμα 5.

Χρησιμοποιήθηκαν οι παρακάτω κανονισμοί για την εκτίμηση της ικανότητας παραμόρφωσης :

1. Έλεγχος αντοχής σε κάμψη βάσει JSCE (Japan Society of Engineers). Υπολογίστηκε η ισοδύναμη καμπτική αντοχή f_c .
2. Έλεγχος αντοχής σε κάμψη βάσει RILEM FMC (Fracture Mechanics of Concrete) TC 50. Υπολογίστηκε η ενέργεια θραύσης G_f .



Σχήμα 6. Ισοδύναμη καμπτική αντοχή και ενέργεια θραύσης

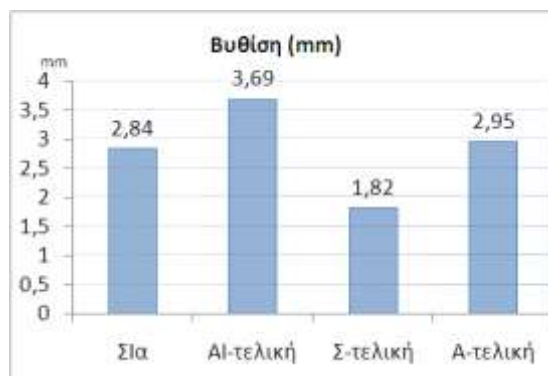
Η προσθήκη σκωριών βελτιώνει την ισοδύναμη καμπτική αντοχή και την ενέργεια θραύσης. Οι ίνες $l=3\text{cm}$ δείχνουν να συνεργάζονται καλύτερα και με τους δυο τύπους αδρανών από τις ίνες "σκουλήκι" (AIΣ, ΣIΣ). Τις καλύτερες τιμές δίνει η σύνθεση ΣIα η οποία έχει αυξημένο λόγο νερού/τσιμέντο (0,55) και μεγαλύτερο ποσοστό ινών (1,13%).

2.6 Αντοχή σε απότριψη

Ο έλεγχος της αντοχής σε απότριψη (ASTM C779) έγινε σε πλάκες διαστάσεων $40 \times 40 \times 10 \text{ cm}$. Μετρήθηκε το βάθος αυλάκωσης που δημιουργεί η μηχανή απότριψης μετά από λειτουργία 15 λεπτών σε δυο δοκίμια από κάθε σύνθεση. Από τα αποτελέσματα των παραπάνω μετρήσεων σε θλίψη, διάρρηξη και κάμψη, από τις συνθέσεις με σκωρίες επιλέχθηκε η σύνθεση ΣIα λόγω της καλύτερης εργασιμότητας, ικανοποιητικών αντοχών και πολύ καλής συμπεριφοράς στους ελέγχους δυσθραυστότητας σε κάμψη. Για καλύτερη σύγκριση παρήχθησαν άλλες τρεις παραλλαγές των συνθέσεων A, AI και Σ με αλλαγή στο λόγο $N/T=0,55$ με τις παρακάτω παραμέτρους:

- A → A-τελική με λόγο $N/T=0,55$
- AI → AI-τελική με λόγο $N/T=0,55$ και ποσοστό ινών $l=3\text{cm}$ 0,9% κ.ο.
- Σ → Σ-τελική με λόγο $N/T=0,55$

Τα αποτελέσματα της δοκιμής σε απότριψη φαίνονται στο Σχήμα 7. Μικρότερη βύθιση είχε η σύνθεση Σ-τελική με αδρανή σκωρίας.



Σχήμα 7. Μέσος όρος βύθισης για κάθε σύνθεση

3. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα σκυροδέματα με αδρανή σκωρίας πλεονεκτούν στις μηχανικές αντοχές σε σύγκριση με τα αντίστοιχα με ασβεστολιθικά όπως προκύπτει από όλους τους καταστροφικούς ελέγχους που πραγματοποιήθηκαν. Έχουν μεγαλύτερο ειδικό βάρος ενώ στα αρνητικά συγκαταλέγεται η μείωση της εργασιμότητας του νωπού σκυροδέματος. Το τελευταίο πάντως διορθώνεται καθώς μια αύξηση του λόγου νερό/τσιμέντο αυξάνει την εργασιμότητα διατηρώντας συγχρόνως τις αντοχές σε υψηλότερα επίπεδα από αυτές των συνθέσεων με ασβεστολιθικά αδρανή. Οι ίνες $l=3\text{cm}$ συνεργάζονται πολύ καλά και με τους δυο τύπους αδρανών. Δεν προσδίδουν κάποια αύξηση στις αντοχές αλλά λειτουργούν στη δοκιμή κάμψης όπου συνεχίζουν να παραλαμβάνουν φορτίο μετά την πρώτη ρωγμή του σκυροδέματος. Στον Πίνακα 4. παρατίθενται τα αποτελέσματα της σύνθεσης ΣΙ με αδρανή σκωρίας και ίνες που έδωσε τις μεγαλύτερες αντοχές και συγκρίνονται με αυτά της ΑΙ με ασβεστολιθικά αδρανή και ίνες.

Πίνακας 4. Μηχανικά χαρακτηριστικά σύνθεσης ΣΙ και μεταβολή σε σχέση με αυτά της ΑΙ

	ΣΙ	ΑΙ	Μεταβολή %
Θλιπτική αντοχή κύβου (MPa)	59,5	32,2	+60
Αντοχή σε διάρρηξη (MPa)	5,0	3,3	+52
Αντοχή σε κάμψη (MPa)	8,6	6,8	+26
Ισοδύναμη καμπτική αντοχή (MPa)	7,7	6,03	+28
Ενέργεια θραύσης (J/m)	15,743	10,140	+55

4. ΑΝΑΦΟΡΕΣ

1. Motz H., Geiseler J., (2001). "Products of steel slags, an opportunity to save natural resources." Waste Management 21, pp.285-293.
2. Φωτεινή Κεχαγιά, (2004). "Χρήση σκωριών χαλυβουργίας σε κατασκευές οδοστρωμάτων". Πρακτικά ημερίδας για την χρήση Βιομηχανικών Παραπροϊόντων στην Οδοποιία.