

ΦΥΣΙΚΟΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΠΟΥ ΠΕΡΙΕΧΕΙ ΘΕΡΜΟΠΛΑΣΤΙΚΑ ΑΠΟΡΡΙΜΜΑΤΑ ΩΣ ΑΔΡΑΝΗ

Στ. Γκαβέλα, Χ. Χατζηφώτη, Ν. Χατζηφώτης, Β. Κασελούρη - Ρηγοπούλου
*Εργαστήριο Ανόργανης και Αναλυτικής Χημείας, Σχολή Χημικών Μηχανικών ΕΜΠ, Ηρώων
Πολυτεχνείου 9, 157 73 Ζωγράφου Αθήνα*

Σ. Κόλιας
*Εργαστήριο Οδοποιίας, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ, Ηρώων Πολυτεχνείου 9, 157 73
Ζωγράφου Αθήνα*

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Στην εργασία αυτή μελετάται η αξιοποίηση πλαστικών απορριμμάτων ως μέρος των αδρανών του σκυροδέματος. Το πολυμερές που εξετάστηκε ήταν πολυπροπυλένιο που προέρχεται από μηχανική ανακύκλωση βιομηχανικών απορριμμάτων. Σε όλα τα αδρανή (γαρμπίλι, άμμος και πολυμερές) έγινε κοκκομετρική ανάλυση και προσδιορισμός του ειδικού τους βάρους και της υδαταπορρόφησης τους. Παρασκευάστηκαν μίγματα που περιείχαν 0%, 7%, 12% και 20% κατ' όγκον αδρανών πολυπροπυλένιο. Προσδιορίστηκε η πυκνότητα του νωπού σκυροδέματος, η αντοχή σε θλίψη και κάμψη σε 7 και 28 ημέρες από την παρασκευή των μιγμάτων καθώς και προσδιορισμός του μέτρου ελαστικότητας και της επιφανειακής υδαταπορρόφησης.

Λέξεις κλειδιά: σκυρόδεμα, αδρανή, θερμοπλαστικά απορρίμματα

PHYSIKO - MECHANICAL PROPERTIES OF CONCRETE CONTAINING THERMOPLASTIC WASTES AS AGGREGATES

Gavela S., Hatzifoti C. Hatzifotis N, V. Kaselouri - Rigopoulou

Lab. of Inorganic and Analytical Chemistry, School of Chemical Engineers NTUA, 9 Iroon Polytechniou str., 157 73 Athens

Kolias S.

Highway Engineering Lab., School of Civil Engineers NTUA, 9 Iroon Polytechniou str. 157 73 Athens

ABSTRACT: The present research deals with the study of the use of thermoplastic wastes as a part of the conventional aggregates in concrete. The polymer used was industrial waste from polypropylene. Sieve analysis, specific gravity and water absorption tests were performed at all types of aggregates (sand, gravel and polymer). Mixes containing polypropylene at percentages 0, 7, 12 and 20% by volume of aggregates were made. Flexural and compressive strength, dynamic and static modulus of elasticity as well as initial surface absorption were determined at various ages.

Keywords: concrete, aggregates, thermoplastic wastes

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το ποσοστό των πλαστικών απορριμμάτων στο σύνολο των οικιακών απορριμμάτων είναι μεγάλο και συνεχώς αυξάνει. Σε κάθε χώρα η σύσταση των απορριμμάτων είναι διαφορετική, αφού αυτή επηρεάζεται από κοινωνικοοικονομικά χαρακτηριστικά, τα υπάρχοντα προγράμματα διαχείρισης απορριμμάτων κ.α., γενικά όμως η συμμετοχή των πλαστικών είναι μεγάλη. Την τελευταία δεκαετία γίνεται αξιοσημείωτη έρευνα στην αξιοποίηση διαφόρων ειδών απορριμμάτων ή βιομηχανικών παραπροϊόντων στο σκυρόδεμα το οποίο χρησιμοποιείται ευρέως και έχει μεγάλο χρόνο ζωής, πράγμα που σημαίνει ότι τα απορρίμματα απομακρύνονται για μια μεγάλη χρονική περίοδο. Επειδή η ποσότητα των φυσικών αδρανών που απαιτείται για την κατασκευή του σκυροδέματος είναι μεγάλη, τα περιβαλλοντικά οφέλη δεν σχετίζονται μόνο με την ασφαλή διάθεση των απορριμμάτων αλλά και με την μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που προκύπτουν από την εξαγωγή των φυσικών αδρανών που οδηγεί στην καταστροφή του φυσικού τοπίου. Η χρήση των πλαστικών ως αδρανών στο σκυρόδεμα πρέπει να γίνεται έτσι ώστε να μην προκαλείται έκπτωση των ιδιοτήτων του σκυροδέματος.

Οι Al-Manaseer A.A. & Dalal T.R. (1997) χρησιμοποίησαν μηχανικά ανακυκλωμένους προφυλακτήρες αυτοκινήτων σε σκυρόδεμα και έδειξαν ότι αυτοί μπορούν να αντικαταστήσουν επιτυχώς ένα μέρος των συμβατικών αδρανών. Οι Ghaly A.M. & Gill M.S. (2004) κατέληξαν στα ίδια συμπεράσματα και επίσης προσπάθησαν να αναπτύξουν μια σχέση που συνδέει το ποσοστό του προστιθέμενου πολυμερούς με τη μείωση των θλιπτικών αντοχών ή του μέτρου ελαστικότητας του σκυροδέματος. Τα πολυμερή δεν αναπτύσσουν χημικούς δεσμούς με τον τσιμεντοπολτό και η συνάφειά τους δεν είναι τόσο καλή όσο αυτή των συμβατικών αδρανών. Βρέθηκε (Naik T.R. και Συνεργάτες 1996 & Soroushian P. και Συνεργάτες 1993) ότι η χημική κατεργασία υψηλής πυκνότητας πολυαιθυλενίου (HDPE) με διάλυμα HOC1 και NaOH ή με θείωση βελτιώνει την συνάφεια. Επίσης, αδρανή που κατασκευάστηκαν από τεμαχισμό ψυχθέντος τήγματος πλαστικών (μίγμα 85% πολυ(τερεφθαλικού αιθυλεστερά) και 15% πολυαιθυλένιο και πολυπροπυλένιο) προτάθηκαν ως αντικατάσταση των συμβατικών αδρανών για ελαφροσκυρόδεμα (Koide H. και Συνεργάτες 2002) με οικονομικά και περιβαλλοντικά οφέλη. Άλλα εναλλακτικά αδρανή που έχουν εξεταστεί είναι ανακυκλωμένα λάστιχα αυτοκινήτων (Raghavan D. και Συνεργάτες 1998) και θερμοσκυρηνόμενα πολυμερή (Ziara M.M και Συνεργάτες 2002).

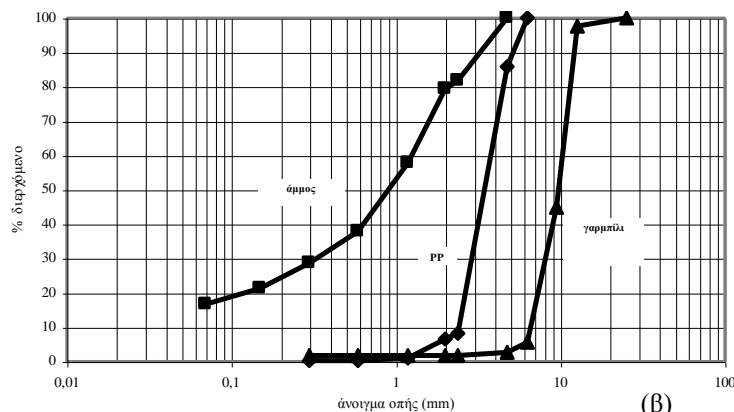
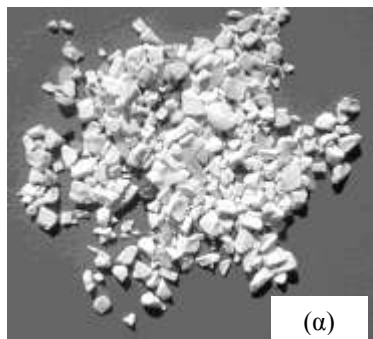
Στόχος της παρούσας εργασίας είναι να διερευνηθεί η αξιοποίηση των θερμοπλαστικών απορριμμάτων ως αδρανών στο σκυρόδεμα μελετώντας τις μηχανικές τους ιδιότητες, την επιφανειακή τους υδαταπορρόφηση, τον μηχανισμό θραύσης και την μορφολογία της διεπιφάνειας ανάμεσα στα πολυμερή και τον τσιμεντοπολτό.

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν ήταν τσιμέντο τύπου Π 42.5, ασβεστολιθικά θραυστά αδρανή (άμμος και γαρμπίλι), πολυπροπυλένιο (PP) που προέρχεται από μηχανική ανακύκλωση βιομηχανικών απορριμμάτων (Σχ. 1α) και νερό βρύσης. Σε όλα τα αδρανή (γαρμπίλι, άμμος και πολυμερές) έγινε κοκκομετρική ανάλυση και προσδιορισμός του ειδικού τους βάρους και της υδαταπορρόφησής τους. Τα αποτελέσματα φαίνονται στο Σχήμα 1β και στον Πίνακα 1.

Πίνακας 1. Φυσικές ιδιότητες αδρανών.

Υλικό	πυκνότητα (kg/m ³)	υδαταπορρόφηση (%)
Γαρμπίλι	2680	0.92
Άμμος	2620	1.75
PP	1020	0.00



Σχήμα 1. (α) πολυπροπυλένιο που προέρχεται από μηχανική ανακύκλωση βιομηχανικών απορριμμάτων (β) κοκκομετρική διαβάθμιση των χρησιμοποιηθέντων αδρανών.

Παρασκευάστηκαν μίγματα που περιείχαν πολυπροπυλένιο σε ποσοστό 0%, 7%, 12% και 20% κατ' όγκον αδρανών με λόγο νερό προς τσιμέντο 0.6. Στον Πίνακα 2 παρουσιάζονται οι αναλογίες των μιγμάτων.

Πίνακας 2. Αναλογίες μιγμάτων.

Συστατικό	Κατ' όγκον αντικατάσταση συμβατικών αδρανών (%)			
	0	7	12	20
Νερό (kg/m ³)	205	205	205	205
Τσιμέντο (kg/m ³)	350	350	350	350
Άμμος (kg/m ³)	876	754	666	526
Γαρμπίλι (kg/m ³)	896	896	896	896
PP (kg/m ³)	-	48	86	136

Από κάθε μίγμα κατασκευάστηκαν έξι πρισματικά δοκίμια διαστάσεων 70mm×70mm×280mm, τρία κυλινδρικά δοκίμια διαστάσεων 100mm×200mm. Έγινε προσδιορισμός της πυκνότητας νεπού σκυροδέματος για όλα τα μίγματα. Μετά από 24h από την κατασκευή τους τα δοκίμια ξεκαλουπώθηκαν και τοποθετήθηκαν σε θάλαμο σταθερών συνθηκών θερμοκρασίας και υγρασίας (20°C και RH>95%). Μετά από παρέλευση 7 και 28 ημερών από την κατασκευή των πρισματικών δοκιμίων έγινε προσδιορισμός την αντοχής τους σε κάμψη και θλίψη (με την μέθοδο του ισοδύναμου κύβου) και του δυναμικού μέτρου ελαστικότητας. Το δυναμικό μέτρο ελαστικότητας υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$E_d = 4 \cdot 10^{-15} \cdot n^2 \cdot L^2 \cdot p \quad (1)$$

όπου n = η θεμελιώδης συχνότητα συντονισμού (Hz), L = το μήκος του δοκιμίου (m) και p = η πυκνότητα του δοκιμίου (kg/m³).

Η θεμελιώδης συχνότητα συντονισμού προσδιορίζεται με την μέθοδο που περιγράφεται στο πρότυπο ASTM C215-91. Το στατικό μέτρο ελαστικότητας και οι καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης εξήχθηκαν από μετρήσεις στους τρεις κυλίνδρους 28 ημέρες από την παρασκευή τους.

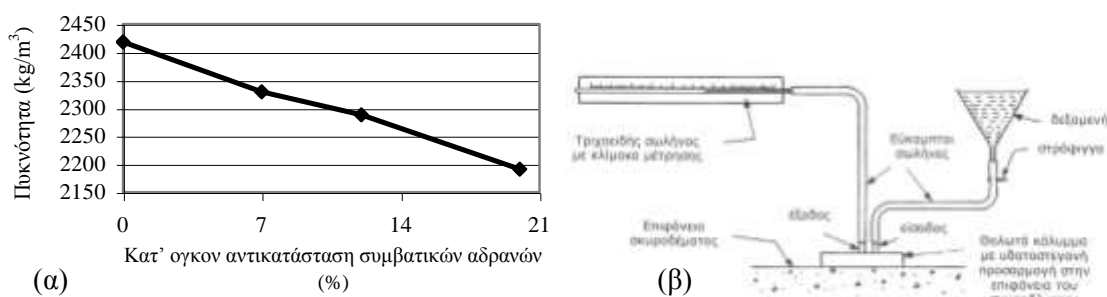
Ο ρυθμός επιφανειακής υδαταπορρόφησης προσδιορίστηκε από μετρήσεις στα τρία κυβικά δοκίμια 28 ημέρες από την παρασκευή τους. Επειδή η επιφάνεια όλων των δοκιμίων πριν την δοκιμή πρέπει να βρίσκεται στην ίδια κατάσταση υγρασίας, τα δοκίμια τοποθετούνταν στους 60°C για 24h και αμέσως μετά ακολουθούσε η δοκιμή. Η διάταξη της συσκευής που χρησιμοποιήθηκε για τον προσδιορισμό του ρυθμού της επιφανειακής υδαταπορρόφησης φαίνεται στο Σχήμα 2β. Ως ρυθμός επιφανειακής υδαταπορρόφησης στο σκυρόδεμα ορίζεται ο ρυθμός εισροής του νερού στο σκυρόδεμα ανά μονάδα επιφάνειας σε ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα από την έναρξη της δοκιμής σε συνθήκες σταθερής υδραυλικής πίεσης και θερμοκρασίας. Η συσκευή αποτελείται από ένα θολωτό κάλυμμα το οποίο προσαρμόζεται σταθερά στην επιφάνεια του δοκιμίου. Ένας λαστιχένιος δακτύλιος εξασφαλίζει την στεγανότητα. Σε ύψος 200mm από την επιφάνεια του δοκιμίου είναι προσαρμοσμένη μία δεξαμενή νερού που τροφοδοτεί το θολωτό κάλυμμα μέσω του σωλήνα εισόδου ο οποίος έχει μία στρόφιγγα που μπορεί να διακόπτει την παροχή. Ο σωλήνας εξόδου συνδέεται με ένα οριζόντιο τριχοειδή σωλήνα. Αφού τοποθετηθεί το θολωτό κάλυμμα στην επιφάνεια του δοκιμίου, η δεξαμενή τροφοδοτείται με νερό έως ότου ο θόλος και ο τριχοειδής σωλήνας πληρωθούν. Σε 10, 30 και 60min από την έναρξη της δοκιμής διακόπτεται διαδοχικά η παροχή του νερού με την στρόφιγγα. Η ποσότητα νερού που απορροφείται από την επιφάνεια του δοκιμίου ισοδυναμεί με την μετατόπιση του μηνίσκου στο τριχοειδή σωλήνα. Ο ρυθμός επιφανειακής απορρόφησης σε ml/(m²/s) υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$f = \frac{60}{t} \cdot D \cdot 0.01 \quad (2)$$

όπου D = ο αριθμός των υποδιαιρέσεων του τριχοειδούς σωλήνα και t = ο χρόνος που κάνει ο μηνίσκος για να διανύσει την απόσταση D.

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Πυκνότητα ναπού σκυροδέματος



Σχήμα 2. (α) Πυκνότητα ναπού σκυροδέματος, (β) διάταξη δοκιμής επιφανειακής υδαταπορρόφησης

Η πυκνότητα των μιγμάτων με 0, 7, 12 και 20% κ.ο. αδρανών φαίνεται στο Σχήμα 2α. Η πυκνότητα μειώνεται καθώς αυξάνει το ποσοστό του πολυμερούς στο μίγμα. Αυτή η μείωση αποδίδεται στην μικρότερη πυκνότητα του πολυμερούς σε σχέση με αυτή των συμβατικών αδρανών.

Δυναμικό μέτρο ελαστικότητας

Το δυναμικό μέτρο ελαστικότητας μειώνεται καθώς αυξάνει το ποσοστό του πολυμερούς στο μίγμα καθιστώντας το υλικό πιο όλκιμο, δηλαδή το δοκίμιο σκυροδέματος γίνεται περισσότερο παραμορφώσιμο. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.

Πίνακας 3. Δυναμικό μέτρο ελαστικότητας και αντοχή σε κάμψη και θλίψη

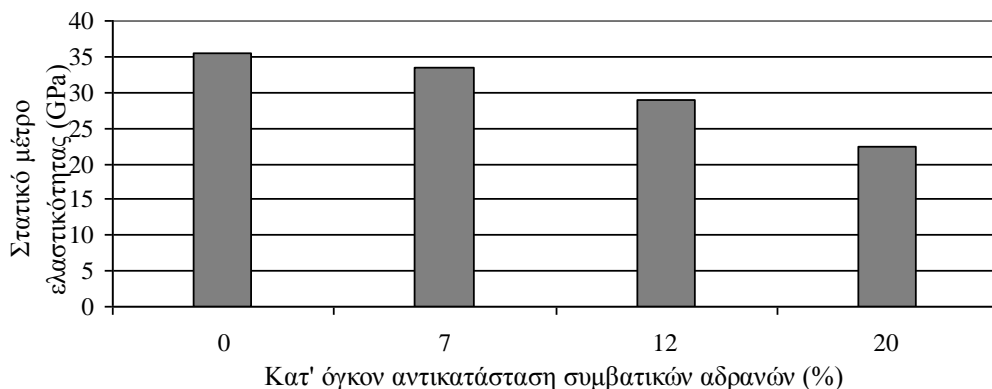
Κατ' όγκον αντικατάσταση συμβατικών αδρανών (%)	Δυναμικό μέτρο ελαστικότητας (GPa)		Αντοχή σε κάμψη (MPa)		Αντοχή σε θλίψη (MPa)	
	7 ημέρες	28 ημέρες	7 ημέρες	28 ημέρες	7 ημέρες	28 ημέρες
0	39.50	42.07	5.20	5.40	38.20	45.36
7	36.58	38.97	4.43	4.89	35.34	42.60
12	32.74	34.30	3.93	4.54	32.71	37.49
20	27.19	29.74	3.87	3.94	28.53	34.10

Αντοχή σε κάμψη και θλίψη

Τα αποτελέσματα των δοκιμών αντοχής σε θλίψη και κάμψη παρουσιάζονται στον Πίνακα 3. Υπάρχει μια μείωση της αντοχής σε θλίψη και κάμψη όταν αυξάνει το ποσοστό του πολυμερούς στο μίγμα. Η μείωση της αντοχής αποδίδεται αφενός στην μικρότερη αντοχή του πολυμερούς σε σχέση με αυτή των συμβατικών αδρανών και αφετέρου στην σχετικά ασθενέστερη συνάφεια μεταξύ του πολυμερούς και του τσιμεντοπολτού από ότι αυτή των συμβατικών αδρανών και του τσιμεντοπολτού. Η μείωση της αντοχής δεν είναι κατ' ανάγκη πρόβλημα γιατί συνδυάζεται και με μείωση του μέτρου ελαστικότητας το οποίο σημαίνει και μείωση των αναπτυσσόμενων τάσεων. Η κρίσιμότητα μιας εντατικής κατάστασης εξαρτάται από το περιθώριο αντοχής που υπάρχει, δηλαδή από τη διαφορά αντοχής – αναπτυσσόμενης τάσης. Όταν η διαφορά αυτή τείνει να μηδενιστεί (η αναπτυσσόμενη τάση προσεγγίζει σε τιμή την αντοχή), τότε η κατάσταση είναι κρίσιμη με αποτέλεσμα την θραύση της κατασκευής.

Στατικό μέτρο ελαστικότητας

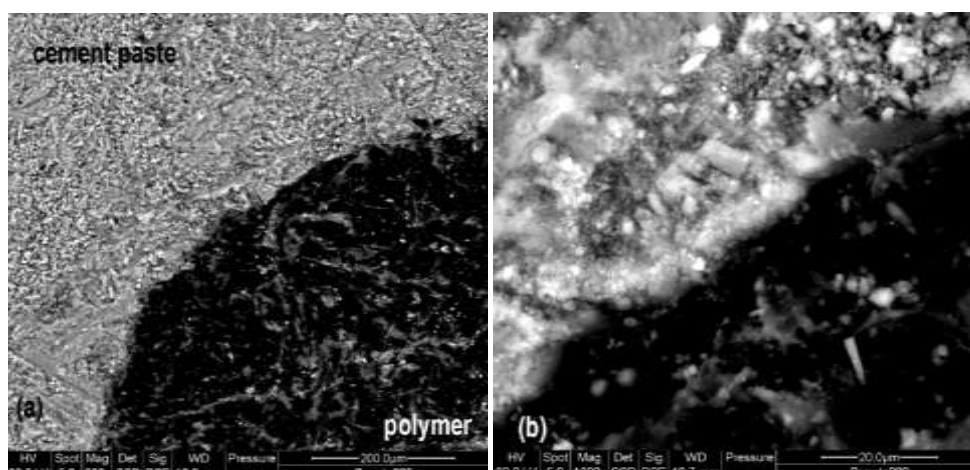
Το στατικό μέτρο ελαστικότητας σκυροδέματος που περιέχει 0, 7, 12 και 20% πολυμερές παρουσιάζεται στο Σχήμα 3. Το στατικό μέτρο ελαστικότητας μειώνεται καθώς το ποσοστό του πολυμερούς στο μίγμα αυξάνει. Κυμαίνεται από 35.52GPa για το μίγμα αναφοράς (0% PP) μέχρι 22.46GPa για το μίγμα που περιέχει 20% κ.ο. αδρανών PP. Η μείωση αυτή οφείλεται στο ότι το πολυμερές που προστίθεται έχει μικρότερο μέτρο ελαστικότητας από τα συμβατικά αδρανή. Όπως ήταν αναμενόμενο, ο λόγος στατικού μέτρου ελαστικότητας προς δυναμικό μέτρο ελαστικότητας είναι μικρότερος της μονάδας για όλα τα ποσοστά αντικατάστασης συμβατικών αδρανών.



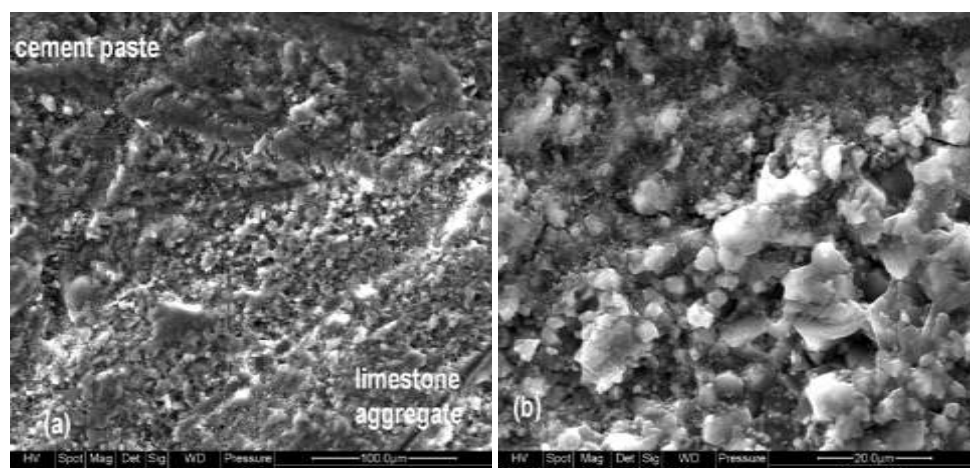
Σχήμα 3. Στατικό μέτρο ελαστικότητας

Μελέτη της διεπιφάνειας ανάμεσα στα πλαστικά αδρανή και τον τσιμεντοπολτό

Η συνάφεια ανάμεσα στα πολυμερή και τον τσιμεντοπολτό αναμένεται να είναι ασθενέστερη από αυτή ανάμεσα στα συμβατικά αδρανή και τον τσιμεντοπολτό. Και αυτό εξαιτίας του γεγονότος ότι καλύτερη συνάφεια συνήθως επιτυγχάνεται με τραχύτερες επιφάνειες αδρανών και με πορώδη αδρανή. Δοκίμια από όλα τα μίγματα και στις δύο ηλικίες (7 και 28 ημέρες) εξετάστηκαν συστηματικά με Ηλεκτρονική Μικροσκοπία Σάρωσης (SEM). Παρατηρήθηκε ότι η διεπιφάνεια ανάμεσα στα πολυμερή και τον τσιμεντοπολτό είναι αρκετά πυκνή, χωρίς μικρορωγμές και με μια σχετικά καλή συνάφεια. Μία τυπική μικροδομή μιας τέτοιας διεπιφάνειας παρουσιάζεται στην μικροφωτογραφία του Σχήματος 4, ενός δείγματος ηλικίας 28 ημερών. Για σύγκριση, μια τυπική μικροφωτογραφία SEM διεπιφάνειας ανάμεσα σε συμβατικό αδρανές και τσιμεντοπολτό παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.



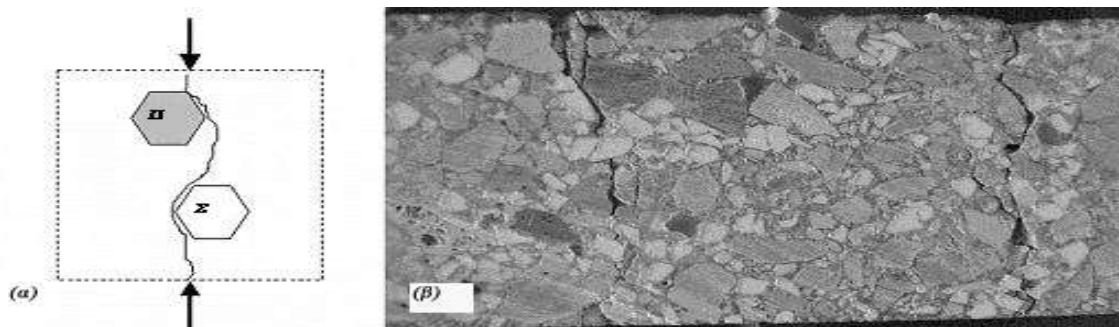
Σχήμα 4. Μικροφωτογραφίες SEM της διεπιφάνειας ανάμεσα σε πλαστικό αδρανές και τσιμεντοπολτό (a) x200, (b) x1600.



Σχήμα 5. Μικροφωτογραφίες SEM της διεπιφάνειας ανάμεσα σε συμβατικό αδρανές και τσιμεντοπολτό (a) x400, (b) x1600.

Μηχανισμός θραύσης

Η παρατήρηση των τομών των δοκιμών που υπέστησαν δοκιμή αντοχής σε θλίψη έδειξε ότι οι ρωγμές δεν διέρχονται δια μέσου του πολυμερούς αλλά περνούν από την διεπιφάνεια του πολυμερούς και του τσιμεντοπολτού όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.



Σχήμα 6. (α) Μοντέλο μηχανισμού θραύσης (με Π συμβολίζεται το πολυμερές και με Σ το συμβατικό αδρανές), (β) τομή δοκίμιου μετά από δοκιμή αντοχής σε θλίψη.

Επιφανειακή υδαταπορρόφηση

Τα αποτελέσματα της δοκιμής επιφανειακής υδαταπορρόφησης παρουσιάζονται στον Πίνακα 4. Προσδιορίστηκε ο ρυθμός επιφανειακής απορρόφησης 10, 30 και 60min από την έναρξη της δοκιμής (f_{10} , f_{30} , f_{60}). Παρατηρείται μία ένδειξη αύξησης του ρυθμού επιφανειακής υδαταπορρόφησης καθώς αυξάνει το ποσοστό του πολυμερούς στο μίγμα και αυτό αποδίδεται στη σχετικά μειωμένη συνάφεια του τσιμεντοπολτού με το πολυμερές. Επίσης παρατηρείται ότι όσο αυξάνει η διάρκεια της μέτρησης ο ρυθμός απορρόφησης ελαττώνεται, κάτι το οποίο ήταν αναμενόμενο, αφού τα διάκενα του υλικού πληρώνονται από τα μόρια του νερού.

Πίνακας 4. Αποτελέσματα δοκιμής επιφανειακής υδαταπορρόφησης (28 ημέρες)

Κατ' ογκον αντικατάσταση συμβατικών αδρανών (%)	f_{10} (ml/(m ² /s))	f_{30} (ml/(m ² /s))	f_{60} (ml/(m ² /s))
0	0.138	0.083	0.061
7	0.226	0.135	0.097
12	0.310	0.168	0.121
20	0.284	0.193	0.155

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η αντικατάσταση μέρους των συμβατικών αδρανών από το εξετασθέν πολυμερές έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της πυκνότητας του σκυροδέματος και τη μείωση του δυναμικού και στατικού μέτρου ελαστικότητας. Η μείωση αυτή αποδίδεται στις διαφορετικές ιδιότητες του πολυμερούς σε σχέση με τα συμβατικά αδρανή. Παρατηρείται μικρή μείωση των αντοχών που αποδίδεται στην μικρότερη αντοχή του πολυμερούς και στην μικρότερη συνάφειά του με τον τσιμεντοπολτό. Σε συνδυασμό με το γεγονός ότι το υλικό είναι πιο παραμορφώσιμο η μείωση της αντοχής δεν είναι κατ' ανάγκη πρόβλημα. Τέλος παρατηρείται ένδειξη αύξησης του ρυθμού επιφανειακής απορρόφησης καθώς αυξάνει το ποσοστό του πολυμερούς στο μίγμα. Η μελέτη με Ηλεκτρονική Μικροσκοπία Σάρωσης έδειξε ότι η δομή της διεπιφάνειας τσιμεντοπολτού – πολυμερούς είναι λιγότερο συμπαγής σε σχέση με τη διεπιφάνεια τσιμεντοπολτού – συμβατικού αδρανούς, αλλά παρουσιάζει εικόνα σχετικά καλής συνάφειας με έλλειψη μικρορωγμών.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Ευχαριστίες απευθύνονται: Στην εταιρία ΑΓΕΤ Ηρακλής για την προμήθεια του τσιμέντου, στα λατομεία ΧΑΛΥΨ για την προμήθεια των ασβεστολιθικών αδρανών, την βιομηχανία πλαστικών «Παβιπλαστ» (Πάτρα) για την προμήθεια του πολυμερούς και στο εργαστήριο της Ένωσης Τσιμεντοβιομηχανιών Ελλάδος όπου έγιναν οι μηχανικές δοκιμές.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Al-Manaseer A.A. & Dalal T.R. 1997. Concrete containing plastic aggregates. *Concrete International*. Vol 19 (8): 47-52.
2. Ghaly A.M. & Gill M.S. 2004. Compression and deformation performance of concrete containing postconsumer plastics. *Journal of materials in civil engineering*. Vol 16 (4): 289-296.
3. Koide H., Tomon M., Sasaki T. 2002. Investigation of the use of waste plastic as an aggregate for lightweight concrete. *Sustainable concrete construction, Proceedings of the international conference held at Dundee, UK*: 177-185.
4. Naik T.R., Singh S.S., Huber C.O., Brodersen B.S. 1996. Use of post-consumer waste plastics in cement-based composites. *Cement and concrete research*. Vol 26 (10): 1489-1492.
5. Raghavan D., Huynh H., Ferraris C. F. 1998. Workability, mechanical properties, and chemical stability of a recycled tyre rubber – filled cementitious composite. *Journal of materials science*. Vol 33: 1745-1752.
6. Soroushian P., Alhozaimy A., Eldarwish A.I. 1993. Recycling of plastics in concrete to enhance toughness characteristics and resistance to shrinkage cracking. *Proceedings of the symposium on recovery and effective reuse of discarded materials and by-products for construction of highway facilities*. Colorado: 5.41-5.53.
7. Ziara M.M., Dweik H.S., Hadidoun M.S. 2002. Engineering properties of concrete made with ground melamine – formaldehyde thermosetting plastics as sand replacement. *Proceedings of the 6th international conference on concrete technology for developing countries*. Jordan: 233-242.