

Μηχανικές Ιδιότητες Σκυροδεμάτων με Ανακυκλωμένα Αδρανή

Mechanical Properties of Recycled Aggregate Concrete

Ελισσάβετ ΣΑΒΒΙΔΟΥ¹, Κων/νος ΧΑΛΙΟΡΗΣ², Αθηνά ΣΑΒΒΑ³

Λέξεις κλειδιά: Ανακυκλωμένα αδρανή σκυροδέματος, Ανακυκλωμένα σκυροδέματα, Θλιπτική αντοχή, Εφελκυστική αντοχή, Διατμητική αντοχή, Μέτρο ελαστικότητας, Τάσεις – παραμορφώσεις.

Keywords: Recycled concrete aggregate, Recycled aggregate concrete, Compressive strength, Splitting strength, Shear strength, Modulus of elasticity, Stress- strain curves.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Στα πλαίσια της αειφόρου ανάπτυξης, μια εναλλακτική λύση τόσο για τους φυσικούς πόρους, όσο και για τους χώρους ταφής των μπαζών είναι η ανακύκλωση και η χρήση του σκυροδέματος, που προκύπτει από οικοδομικά απορρίμματα και κατεδαφίσεις. Αυτό το «απόβλητο» σκυρόδεμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως αδρανές και, επομένως, το σκυρόδεμα με τέτοια ανακυκλωμένα αδρανή αποτελεί υλικό φιλικό προς το περιβάλλον.

Στην παρούσα εργασία διερευνάται η εφελκυστική και θλιπτική αντοχή, οι καμπύλες τάσεων- παραμορφώσεων, το μέτρο ελαστικότητας, η καμπτική και διατμητική συμπεριφορά σκυροδεμάτων παρασκευασμένων με αντικατάσταση των χονδρόκοκκων αδρανών τους με 0, 10, 50 και 100% κβ αδρανή που προέρχονται από ανακυκλωμένο σκυρόδεμα. Για κάθε μείγμα παρασκευάστηκαν αφενός άοπλα κυλινδρικά (15x30cm) δοκίμια και αφετέρου πρισματικά δοκίμια (10x10x40cm) είτε με εφελκυστικό κάτω οπλισμό 2Ø8, -χωρίς συνδετήρες- είτε άοπλα. Από τα αποτελέσματα επιβεβαιώνεται η πλήρη δυνατότητα χρήσης ανακυκλωμένων αδρανών στα δομικά στοιχεία από σκυρόδεμα.

¹ MSc Πολιτικός Μηχανικός, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, email: giarmaditsa22@gmail.com

² Αν. Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, email: chalioti@civil.duth.gr

³ Καθηγήτρια, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, email: asavva@civil.duth.gr

ABSTRACT: In the context of sustainable development, an alternative solution to natural resources and landfills of debris is recycling concrete and, therefore, the concrete with these recycled aggregates is an environmentally friendly material.

In this research, tensile and compressive strength, stress-strain curves, modulus of elasticity, flexural and shear behavior are investigated. Four different concrete mixes were made with 0%, 10%, 50% and 100% replacement of natural coarse aggregates with recycles. For each mixture, cylindrical specimens (15x30cm), prism specimens (10x10x40cm) either with flexural reinforcement 2Ø8 without stirrups or without reinforcement at all, were prepared and studied until failure.

The results certify that it is possible to produce structural concrete of satisfactory mechanical properties using of concrete recycled aggregates.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ανάγκη για αλλαγή χρήσης των κατασκευών, οι βλάβες λόγω περιβαλλοντικών παραγόντων, η αναδιάρθρωση της πόλης, η επέκταση των οδικών δικτύων και οι φυσικές καταστροφές οδηγούν συχνά, στην κατεδάφιση παλαιών κτιρίων και την κατασκευή νέων. Κάθε χρόνο στην Ευρωπαϊκή ένωση παράγονται περίπου 850 εκατομμύρια τόνοι αποβλήτων από κατασκευές και κατεδαφίσεις, τα οποία αντιπροσωπεύουν το 31% του συνόλου των αποβλήτων στον κόσμο (Alexander and Mindess, 2005). Λόγω δε της αναποτελεσματικής διαχείρισής τους, συμβάλλουν στη μόλυνση του περιβάλλοντος, επομένως η αξιοποίηση αυτών των αποβλήτων σκυροδέματος μπορεί να δώσει μία λύση και να οδηγήσει στη βιώσιμη ανάπτυξη.

Τα αδρανή αποτελούν τη βάση του σκυροδέματος και καταλαμβάνουν, συνήθως, το 70% του συνολικού του όγκου και η ζήτησή τους είναι τεράστια στον κατασκευαστικό τομέα. Η αλόγιστη, όμως, χρήση οδήγησε σε μια οικολογική ανισορροπία. Η χρήση αδρανών από ανακυκλωμένο σκυρόδεμα (RCA=Recycled Concrete Aggregate) που προκύπτει από την κατεδάφιση κτιρίων από σκυρόδεμα αποτελεί μια καλή εναλλακτική λύση.

Εδώ και 30 χρόνια διεξάγονται έρευνες με στόχο να διερευνηθούν οι ιδιότητες των RCA και του νέου σκυροδέματος με ανακυκλωμένα αδρανή (RAC=Recycled Aggregate Concrete). Σύμφωνα με τους Shayan and Xu (2003), η χρήση των RCA σε υψηλής αντοχής και υψηλής επιτελεστικότητας κατασκευαστικά σκυροδέματα, μπορεί να επιτευχθεί με την προσθήκη silica fume και μέσω κατάλληλου σχεδιασμού ανάμιξης και ελέγχου της ποιότητας. Οι Levy and Helene (2004) και οι Poon et al (2003), έδειξαν ότι τα RCA είναι πιθανώς κατάλληλα για κατασκευαστικά σκυροδέματα. Επιπλέον, οι Hendricks and Pieterse (1998) και αργότερα οι Tu et al (2006) ανέφεραν ότι τα RCA μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην παραγωγή ανθεκτικών και βιώσιμων σκυροδεμάτων.

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Υλικά

- *Τσιμέντο:* 350 kg/m^3 , CEM II/A-LL 42.5N της εταιρείας TITAN, με ειδικό βάρος 3 kg/dm^3
- *Νερό:* 189 kg/m^3 , με λόγο νερού προς τσιμέντου για όλα τα μείγματα= 0,54.
- *Αδρανή:* $D_{\max}=32 \text{ mm}$. Τα ανακυκλωμένα αδρανή προήλθαν από το κέντρο ανακύκλωσης της εταιρίας “Ανακύκλωση Αδρανών Μακεδονίας”, ενώ τα συμβατικά ήταν ποταμίσια (ποταμός Κόσυνθος, Ξάνθης). Τα φαινόμενα βάρη τους δίνονται στον “Πίνακα 1”. Η συμβατική άμμος ήταν και θραυστή και συλλεκτή, ενώ τα χονδρόκοκκα ήταν θραυστά. Ανακυκλωμένα και συμβατικά αδρανή είχαν παρόμοιες κοκκομετρίες, εντός της υποζώνης Δ του ΚΤΣ-16. Επειδή η απορροφητικότητα των ανακυκλωμένων αδρανών είναι πολύ μεγάλη, κρίθηκε σκόπιμο όλα τα αδρανή να είναι σε κατάσταση κεκορεσμένης στεγνής επιφάνειας. Για το σκοπό αυτό, τα αδρανή τοποθετήθηκαν για ένα 24ωρο σε μεγάλες λεκάνες βυθισμένα στο νερό και μετά τοποθετήθηκαν πάνω σε ειδικά διάτρητα υφάσματα, σε κανονικές συνθήκες, έως ότου στεγνώσουν επιφανειακά, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 1**.
- *Χημικά Πρόσθετα:* Υπερρευστοποιητής Viscocrete 600 plus της εταιρίας SIKA

Πίνακας 1. Φαινόμενα βάρη των αδρανών

Υλικά	Φαινόμενα Βάρη (kg/dm^3)
Συμβατικά αδρανή	2,65
Γαρμπίλι ανακυκλωμένο	2,55
Σκύρα ανακυκλωμένα	2,60



Σχήμα 1. Επιφανειακή ξήρανση όλων των αδρανών

Μείγματα

Παρασκευάστηκαν τέσσερις σειρές μειγμάτων, οι αναλογίες μείξης των οποίων δίνονται στον “Πίνακα 2”:

- Μείγμα N, σκυρόδεμα με συμβατικά αδρανή, ως σκυρόδεμα αναφοράς
- Μείγμα R_{10%} με συμβατική άμμο και χονδρόκοκκα αδρανή 10% κ.β. των οποίων είναι ανακυκλωμένα
- Μείγμα R_{50%} με συμβατική άμμο και χονδρόκοκκα αδρανή, 50% κ.β. των οποίων είναι ανακυκλωμένα
- Μείγμα R, σκυρόδεμα με συμβατική άμμο και όλα τα χονδρόκοκκα αδρανή ανακυκλωμένα

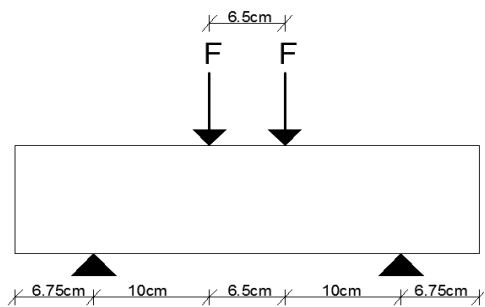
Πίνακας 2. Αναλογίες μείξης

Υλικό (kg/m ³)	Μείγμα			
	N	R10%	R50%	R100%
Τσιμέντο	350	350	350	350
Νερό	189	189	189	189
w/c	0.54	0.54	0.54	0.54
Άμμος φυσική	270.04	270.04	270.04	270.04
Άμμος θραυστή	810.11	810.11	810.11	810.11
Γαρμπίλι συμβατικό	450.06	403.47	220.70	-
Σκύρα συμβατικά	270.04	242.57	133.73	-
Γαρμπίλι ανακυκλωμένο	-	44.83	220.70	433.08
Σκύρα ανακυκλωμένα	-	26.95	133.73	264.94
Ρευστοποιητής (% του C)	0	0	0	1

Πειραματικοί έλεγχοι - Δοκίμια

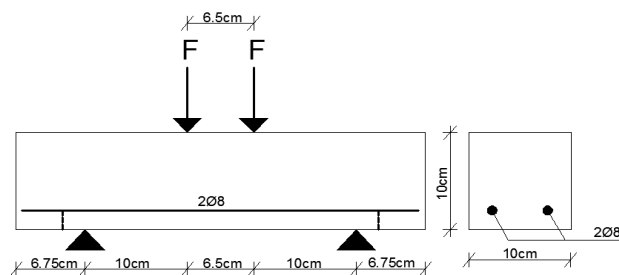
Η μέτρηση των αντοχών (θλιπτικής και εφελκυστικής σε διάρρηξη) καθώς και του μέτρου ελαστικότητας έγινε με κυλινδρικά δοκίμια (15X30 cm) και με τη βοήθεια μηχανοκίνητων (LVDT) για τη μέτρηση των παραμορφώσεων.

Η καμπτική συμπεριφορά των σκυροδεμάτων μετρήθηκε με άοπλα πρισματικά δοκίμια (10X10X40 cm) σε πρέσα μεγίστου φορτίου 100 kN. Εφαρμόστηκαν δύο συμμετρικά κατακόρυφα φορτία με σταθερό ρυθμό αύξησης της φόρτισης, μέχρι την αστοχία. Για τη μέτρηση των παραμορφώσεων τοποθετήθηκαν δύο LVDTs στην μπροστινή και πίσω πλευρά, κεντρικά του δοκιμίου. Οι διαστάσεις, οι στηρίξεις, το σύστημα φόρτισης και η αστοχία των δοκών χωρίς οπλισμό, που ήταν καμπτική, ψαθυρής μορφής, παρουσιάζονται στο **Σχήμα 2**.



Σχήμα 2. Διαστάσεις, οπλισμός, σύστημα φόρτισης και καμπτική αστοχία δοκών χωρίς οπλισμό

Για τη διατμητική συμπεριφορά των σκυροδεμάτων παρασκευάστηκαν πρισματικά δοκίμια (10X10X40 cm). Τα δοκίμια οπλίστηκαν με εφελκόμενο κάτω οπλισμό 2φ8, χωρίς συνδετήρες, με τοποθέτηση αποστατήρων στα 2cm από τη βάση της δοκού. Η φόρτιση έγινε σε δύο σημεία της δοκού συμμετρικά, ενώ για τη μέτρηση των παραμορφώσεων τοποθετήθηκαν κεντρικά δύο LVDT με ακρίβεια χιλιοστού και εκατοστού του χιλιοστού αντίστοιχα, στην μπροστινή και πίσω όψη του δοκιμίου, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 3**.



Σχήμα 3. Διαστάσεις, οπλισμός, σύστημα φόρτισης, διατμητική αστοχία (δοκός R50%) και μορφή ρηγμάτωσης οπλισμένων δοκών

Η αστοχία όλων των οπλισμένων δοκιμίων ήταν διατμητική. Συγκεκριμένα, αρχικά εμφανίστηκε μια καμπτική ρωγή που έφτασε ως το μέσον του ύψους της δοκού και έπειτα με την αύξηση του εφαρμοζόμενου φορτίου εμφανίστηκε μια μόνο λοξή ρωγή που συνδέει το σημείο εφαρμογής του φορτίου με το άκρο της προηγούμενης κύριας ρωγμής, με αποτέλεσμα την ξαφνική- ψαθυρή αστοχία της δοκού, **Σχήμα 3**.

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ

Εργασιμότητα

Η κάθιση των μειγμάτων παρουσιάζεται στον “Πίνακα 3”. Για ποσοστό συμμετοχής των ανακυκλωμένων αδρανών έως 50%, η εργασιμότητα των σκυροδεμάτων δεν διαφοροποιείται σε σχέση με το σκυρόδεμα αναφοράς. Και αυτό ίσως οφείλεται στον πρότερο υδατοκορεσμό τους. Η ολική όμως αντικατάσταση των χονδρόκοκκων αδρανών μειώνει πάρα πολύ (κατά 70.5%) την εργασιμότητα, παρόλο που στο μείγμα προσετέθη υπερρευστοποιητής. Κατά την ανάδευση του μείγματος πολλά, από τα ανακυκλωμένα, αδρανή θραύονται ή αποκολλάται ο παλιός τσιμεντοπολτός. Η συμμετοχή τους στο μείγμα κατά 100% έχει ως συνέπεια την αύξηση του λεπτού υλικού, γεγονός που οδηγεί σε μείωση της εργασιμότητας. Τα αποτελέσματα συμφωνούν με αυτά των Safiuddin et al (2011). Το πρόβλημα πάντως μπορεί να αντιμετωπιστεί με αύξηση της ποσότητας του πρόσθετου.

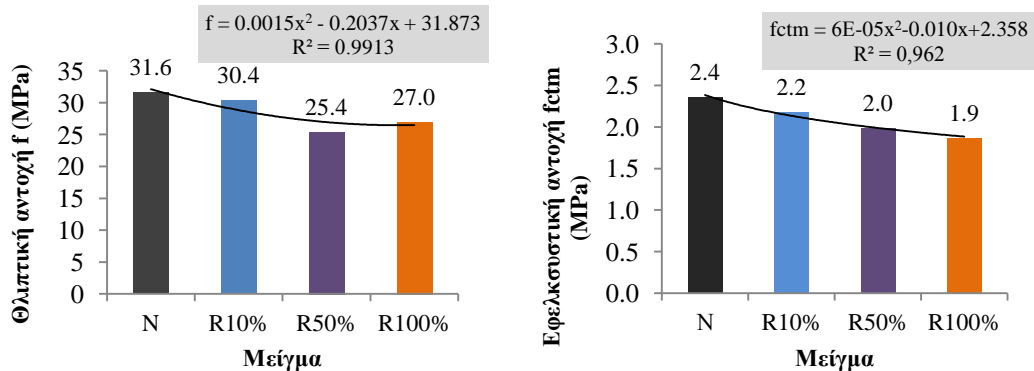
Πίνακας 3. Κάθιση εξεταζόμενων μειγμάτων

Μείγμα	Κάθιση (cm)	Υπερρευστοποιητής (% του C)
N	8.5	0
R10%	9.5	0
R50%	7.5	0
R100%	2.5	1

Θλιπτική αντοχή

Στο **Σχήμα 4** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της θλιπτικής αντοχής όλων των μειγμάτων στις 28 ημέρες ως μέσος όρος τριών κυλινδρικών δοκιμίων (15x30 cm). Όλα τα ανακυκλωμένα μείγματα παρουσίασαν πολύ ικανοποιητική χαρακτηριστική αντοχή με κατηγορίες αντοχής ίδιας ή μιας τάξης μεγέθους χαμηλότερη σε σχέση με το συμβατικό.

Η αντικατάσταση των συμβατικών αδρανών με 10% ανακυκλωμένα μειώνει τη θλιπτική αντοχή κατά 3,8%, μείωση που δεν θεωρείται σημαντική. Η περαιτέρω αύξηση του ποσοστού αντικατάστασης μειώνει τη θλιπτική αντοχή κατά 19,6% και 14,6%, για αντικατάσταση 50% και 100% αντιστοίχως. Παρατηρείται όμως, ότι η ολική αντικατάσταση επιφέρει μικρότερη μείωση από ότι η αντικατάσταση κατά 50%. Πιθανόν αυτό οφείλεται στο ότι η πορώδης φύση των ανακυκλωμένων αδρανών, συγκρατώντας αρκετό νερό, αποτελεί μια μικρή δεξαμενή και συμβάλλει, ως εσωτερική συντήρηση, στην ενυδάτωση των κόκκων του τσιμέντου, όπως έχει αναφερθεί και από τους González-Fonteboa et al (2011). Η σχέση θλιπτικής αντοχής-ποσοστού ανακύκλωσης που δίνεται, $f = 0.0015x^2 - 0.2037x + 31.873$, όπου X το ποσοστό (κβ) αντικατάστασης, παρουσιάζει ένα πολύ υψηλό συντελεστή συσχέτισης $r^2=0.9913$



Σχήμα 4. Θλιπτική αντοχή f (MPa) και εφελκυστική αντοχή σε διάρρηξη fctm (MPa) των μειγμάτων

Εφελκυστική αντοχή

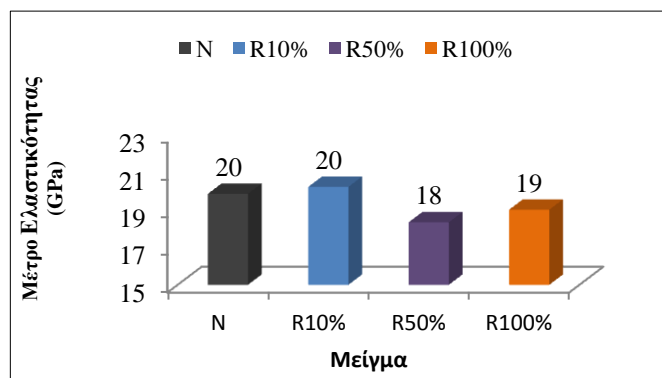
Στο **Σχήμα 4** παρουσιάζεται η εφελκυστική αντοχή σε διάρρηξη των μειγμάτων ως μέσος όρος των αντοχών δύο κυλινδρικών δοκιμών (15x30cm).

Παρατηρείται ότι, η παρουσία των RCA στο σκυρόδεμα επιφέρει πτώση των τιμών της εφελκυστικής αντοχής, κατά 8,3%, 16,7% και 20,8% για ποσοστό αντικατάστασης 10%, 50% και 100% αντιστοίχως. Η μείωση είναι πολύ μεγαλύτερη από αυτήν που παρατηρήθηκε στη θλιπτική αντοχή και αυξάνει με την αύξηση του ποσοστού αντικατάστασης. Αυτό συμβαίνει, επειδή η εφελκυστική αντοχή επηρεάζεται πολύ από τις διεπιφάνειες αδρανών τσιμεντόπαστας. Στα ανακυκλωμένα αδρανή, οι διεπιφάνειες είναι πολύ περισσότερες από ότι στα συμβατικά. Το αδρανές αποτελείται από τεμάχιο παλαιού σκυροδέματος, επομένως υπάρχει η διεπιφάνεια παλαιού αδρανούς με παλαιά τσιμεντόπαστα. Η προσθήκη της νέας τσιμεντόπαστας δημιουργεί μια νέα διεπιφάνεια. Από αυτές τις διεπιφάνειες ξεκινούν και οι ρηγματώσεις.

Ο λόγος εφελκυστικής προς τη θλιπτική αντοχή στα ανακυκλωμένα μείγματα κυμαίνεται από 7-8% έναντι 7,6% του συμβατικού σκυροδέματος αναφοράς, επομένως, μπορούν να μελετηθούν και να υπολογιστούν όπως ακριβώς τα συμβατικά σκυροδέματα. Η σχέση εφελκυστικής αντοχής-ποσοστού ανακύκλωσης που δίνεται, $f_{ctm} = 6E-05x^2 - 0.010X + 2,358$ παρουσιάζει ένα πολύ υψηλό συντελεστή συσχέτισης $r^2 = 0.962$.

Μέτρο ελαστικότητας

Τα αποτελέσματα των δοκιμών για το μέτρο ελαστικότητας του σκυροδέματος παρουσιάζονται στο **Σχήμα 5**.



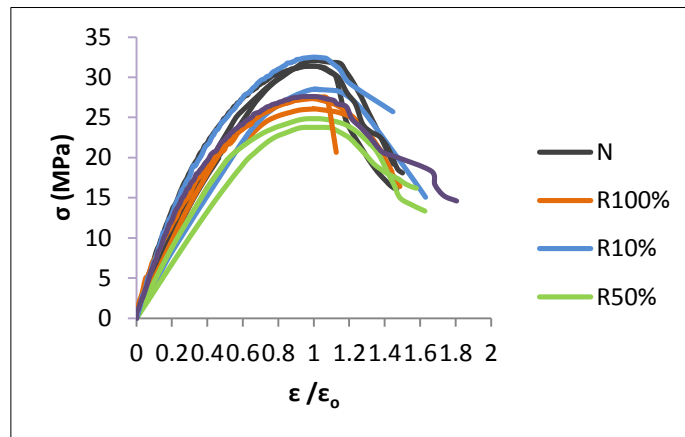
Σχήμα 5. Μέτρο ελαστικότητας (GPa) των μειγμάτων

Το μικρότερο μέτρο ελαστικότητας στα σκυροδέματα με ανακυκλωμένα αδρανή οφείλεται, στο μεγαλύτερο πορώδες και τη μικρότερη αντοχή τους σε σχέση με τα συμβατικά, καθώς εξαρτάται περισσότερο από τις ιδιότητες των αδρανών (ελαστικότητα αδρανών), παρά από τις ιδιότητες του σκυροδέματος ως σύνολο (θλιπτική και καμπτική αντοχή).

Καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης σε μονοαξονική θλίψη

Στο **Σχήμα 6**, παρουσιάζονται οι τυπικές καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης (SSC) του σκυροδέματος με ανακυκλωμένα αδρανή.

Παρατηρείται ότι η αντικατάσταση των συμβατικών αδρανών με ανακυκλωμένα έχει αξιοσημείωτη επιρροή στα διαγράμματα σ-ε. Παρόλα αυτά, το σχήμα της καμπύλης τάσης-παραμόρφωσης για όλα τα σκυροδέματα με ανακυκλωμένα αδρανή, είναι παρόμοιο με αυτό του μείγματος αναφοράς, ανεξάρτητα από το ποσοστό αντικατάστασης των αδρανών, το οποίο συμπίπτει με αυτό που προέκυψε στην εργασία των González -Fonteboa et al (2011). Επομένως στα RAC σκυροδέματα μπορεί να εφαρμοστεί η διαδικασία δομικού σχεδιασμού για την εφαρμογή της θεωρίας της πλαστικότητας. Αξίζει να σημειωθεί, ότι οι παραμορφώσεις που αντιστοιχούν στο ίδιο φορτίο είναι μεγαλύτερες στα σκυροδέματα με ανακυκλωμένα αδρανή, λόγω του χαμηλού μέτρου ελαστικότητας των ανακυκλωμένων αδρανών. Σε γενικές γραμμές, το διάγραμμα σ-ε μπορεί να χωριστεί σε τρία χαρακτηριστικά τμήματα. Το πρώτο μέρος αντιπροσωπεύει το γραμμικό τμήμα, το δεύτερο το μη-γραμμικό τμήμα του αύξοντα κλάδου και το τρίτο μέρος απεικονίζει τον πτωτικό κλάδο. Η καμπυλότητα του αύξοντα κλάδου της καμπύλης σ-ε βελτιώνεται με την αύξηση του ποσοστού των RCA. Τέλος, η παραμόρφωση αυξάνεται με μεγαλύτερο ρυθμό, σε σχέση με την εφαρμοζόμενη τάση και επομένως η καμπυλότητα των σ-ε αυξάνεται με την αύξηση των RCA στο μείγμα.



Σχήμα 6. Καμπύλες τάσης - ανηγμένης παραμόρφωσης (σ - $\varepsilon/\varepsilon_0$) των μειγμάτων

Διατμητική αντοχή

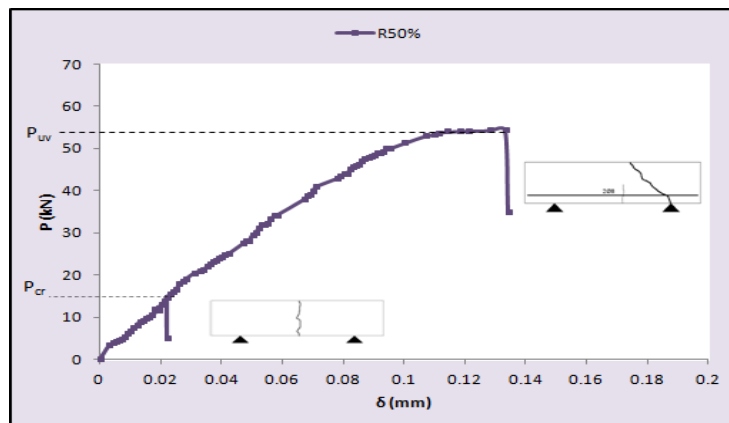
Στον “Πίνακα 6” παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της διατμητικής αντοχής των δοκών, ενώ στο **Σχήμα 7** η καμπύλη φορτίου -μετατόπισης για το μείγμα $R_{50\%}$.

Πίνακας 6. Διατμητική και καμπτική αντοχή και αντίστοιχη max μετατόπιση των μειγμάτων

Μείγμα	Διάτμηση			Κάμψη		
	P (kN)	τ (MPa)	δ_{max} (mm)	P (kN)	τ (MPa)	δ_{max} (mm)
N	60.4	3.02	0.145	15.4	0.770	0.020
$R_{10\%}$	65.5	3.28	0.218	16.2	0.808	0.020
$R_{50\%}$	54.4	2.72	0.132	14.5	0.725	0.020
$R_{100\%}$	53.0	2.65	0.178	12.5	0.623	0.021

Το μείγμα που σημείωσε την μεγαλύτερη διατμητική δύναμη, κατά 8.4% μεγαλύτερη σε σχέση με το συμβατικό, ήταν το $R_{10\%}$. Αντίθετα, τα $R_{50\%}$ και $R_{100\%}$ σημείωσαν πτώση κατά 9.9% και 12.3% συγκρινόμενα με το N. Όλοι οι δοκοί με οπλισμό 2 Φ 8 παρουσίασαν παρόμοια συμπεριφορά με το μείγμα αναφοράς, αστοχώντας διατμητικά με μια διαγώνια ρωγμή. Η μέγιστη μετατόπιση δεν επηρεάστηκε σημαντικά από την αντικατάσταση των συμβατικών αδρανών με ανακυκλωμένα. Κατά βάση, οι μετατοπίσεις των μειγμάτων με ανακυκλωμένα αδρανή ήταν μεγαλύτερες σε σχέση με το συμβατικό. Όπως παρατηρούμε από τον αντίστοιχο πίνακα, στα μείγματα $R_{10\%}$ και $R_{100\%}$ οι παραμορφώσεις αυξήθηκαν κατά 50.3% και 22.8% αντίστοιχα σε σχέση με το N, ενώ το $R_{50\%}$ σημείωσε αύξηση 9%. Παρόμοια

αποτελέσματα εμφανίζονται στην πειραματική μελέτη των M. Etxeberria et al. (2006). Μια πιθανή αιτία για τις αυξημένες παραμορφώσεις των δοκών από RCA σκυρόδεμα είναι το μικρότερο μέτρο ελαστικότητας, το οποίο υποδεικνύει ότι το υλικό είναι ευκολότερο να παραμορφωθεί. Συνεπώς, ένα χαμηλότερο φορτίο μπορεί να προκαλέσει μεγαλύτερη μετατόπιση σε μια δοκό από σκυρόδεμα με ανακυκλωμένα αδρανή, συγκριτικά με αυτή του σκυροδέματος αναφοράς.



Σχήμα 7. Καμπύλη φορτίου-μετατόπισης για το μείγμα R50%, καμπτική αστοχία άοπλης και διατμητική αστοχία οπλισμένης δοκού

Καμπτική αντοχή

Η αντοχή σε κάμψη των μειγμάτων δίνεται στον “Πίνακα 6”. Παρατηρείται ότι, τα ανακυκλωμένα αδρανή δεν επηρεάζουν ιδιαίτεως αρνητικά την καμπτική αντοχή του σκυροδέματος. Η αντοχή κάμψης των μειγμάτων R_{50%} και R_{100%} ήταν κατά 5.9% και 19.2% μικρότερη σε σύγκριση με το συμβατικό σκυρόδεμα. Αντίθετα, το R_{10%} σημείωσε μια μικρή αύξηση κατά 4.9%. Τα χαρακτηριστικά των ανακυκλωμένων αδρανών, (τραχύτητα επιφάνειας, γωνιώδες σχήμα, κλπ) συμβάλλουν στην ανάπτυξη καλύτερων δεσμών μεταξύ τους. Επιπλέον, τα χονδρόκοκκα αδρανή, συνήθως, προσανατολίζονται κατά μήκος της μεγάλης διάστασης του δοκιμίου, το οποίο σημαίνει ότι, ο διεπιφανειακός δεσμός είναι περισσότερο αποτελεσματικός κατά μήκος της δοκού. Ως εκ τούτου, παρατηρήθηκε μεγαλύτερη αντίσταση στη ροπή κάμψης.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η αντικατάσταση, έως 50% κ.β., των συμβατικών αδρανών με ανακυκλωμένα, όταν αυτά χρησιμοποιούνται κεκορεσμένα, δεν επηρεάζει ιδιαίτεως την εργασιμότητα του σκυροδέματος. Για μεγαλύτερα ποσοστά αντικατάστασης, που η μείωση της εργασιμότητας είναι σημαντική, μπορεί να αντιμετωπιστεί με την αύξηση της ποσότητας του ρευστοποιητή.

Όλα τα ανακυκλωμένα μείγματα παρουσίασαν κατηγορία αντοχής ίδια ή μια τάξη μεγέθους χαμηλότερη σε σχέση με το συμβατικό σκυρόδεμα.

Η θλιπτική και εφελκυστική αντοχή των σκυροδεμάτων μειώνεται έως και 21%, με την αντικατάσταση των χονδρόκοκκων αδρανών τους με ανακυκλωμένα. Η μείωση όμως είναι πάρα πολύ μικρή (~4-8%) για ποσοστό αντικατάσταση έως 10% κ.β.

Ο λόγος εφελκυστικής προς θλιπτική αντοχή για τα σκυροδέματα με ανακυκλωμένα αδρανή κυμαίνεται στο 7- 8%, έναντι 7,5% του συμβατικού. Επομένως, μπορούν να μελετηθούν και να υπολογιστούν όπως ακριβώς τα συμβατικά σκυροδέματα.

Το μέτρο ελαστικότητας των ανακυκλωμένων σκυροδεμάτων μειώνεται όσο αυξάνεται το ποσοστό αντικατάστασης. Η μείωση αυτή είναι μικρή (έως και 10%)

Το ποσοστό αντικατάστασης των ανακυκλωμένων αδρανών έχει σημαντική επιρροή στις καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης. Αυξάνεται η μέγιστη παραμόρφωση και μειώνεται σημαντικά η πλαστιμότητα, όπως φαίνεται από τον φθίνοντα κλάδο των αντίστοιχων καμπύλων των ανακυκλωμένων μειγμάτων.

Οι απώλειες της καμπτικής αντοχής λόγω της παρουσίας των ανακυκλωμένων αδρανών κυμάνθηκαν στο 6-19%, με εξαίρεση το μείγμα με 10% ανακυκλωμένα αδρανή, το οποίο παρουσίασε αντοχή κατά 5% περίπου μεγαλύτερη του συμβατικού.

Οι μετατοπίσεις των δοκών δεν εξαρτώνται από το είδος και την ποσότητα των χρησιμοποιούμενων αδρανών στην ελαστική περιοχή, έτσι σημειώθηκαν παρόμοιες μετατοπίσεις ανεξάρτητα από τον τύπο σκυροδέματος. Στη μετελαστική περιοχή, όμως, η αύξηση της ποσότητας των ανακυκλωμένων χονδρόκοκκων αδρανών αυξάνει την τιμή της μετατόπισης κατά 23-50%, με εξαίρεση το μείγμα με 50% ανακυκλωμένα αδρανή, που σημείωσε μέγιστη μετατόπιση κατά 9% περίπου μικρότερη του συμβατικού.

Η μορφή αστοχίας και η ρηγμάτωση υπό διάτμηση όλων των ανακυκλωμένων μειγμάτων δεν παρουσίασε σημαντικές διαφορές σε σχέση με το συμβατικό. Η μέγιστη διατμητική τάση όλων των μειγμάτων παρουσίασε μείωση κατά 10-12% σε σχέση με το συμβατικό μείγμα, πλην του μείγματος με 10% ανακυκλωμένα αδρανή που σημείωσε αύξηση κατά 8.5%.

Εν κατακλείδι, η χρήση 10% ανακυκλωμένων αδρανών θεωρείται ιδιαίτερα πλεονεκτική, ενώ η αύξηση του ποσοστού ανακύκλωσης μέχρι 50% θεωρείται εξαιρετικά ικανοποιητική. Τα σκυροδέματα με ανακυκλωμένα χονδρόκοκκα αδρανή έως 50% μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε δομικές εφαρμογές, όπως τα αντίστοιχα συμβατικά σκυροδέματα.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

Ajdukiewicz, A., "Comparative tests of beams and columns made of recycled aggregate concrete and natural aggregate concrete". Journal of Advanced Concrete Technology, Vol 2 (2007) 259-273

Alexander, M. & Mindess, S., «Aggregates in Concrete», Taylor & Francis, London and New York (2005)

Cabral,A., Schalch.V, Molin,D., & Ribeiro J., “Mechanical properties modeling of recycled aggregate concrete”. *Construction and Building Materials*, Vol. 24 (2010) pp.421-430

dos Santos, J.R., Branco, F. & de Brito, J., “Mechanical Properties of Concrete with Coarse Recycled Aggregates”, *Structural Engineering International*, Vol 3, (2004) 213- 215

Etxeberria, M., Mari,R.A. & Vazquez,E., “Recycled aggregate concrete as structural material”. *Materials and Structures*, 40 (2007) 529-541

González-Fonteboa, B. , Martínez-Abella, F., Carro López, D., Seara-Paz S., “Stress-Strain relationship in axial compression for concrete using recycled saturated coarse aggregate”, *Construction and Building Materials*, 25, (2011) 2335- 2342

Hendriks, F.C., Pieterse, S.H., “Concrete: durable but also sustainable”, in “*Proceedings of the International Conference on the Use of Recycled Concrete Aggregates*”, ed. Thomas Telford., UK (1998) 1-18

Levy, M.S. & Helene,P., “Durability of recycled aggregates concrete: a safe way to sustainable development”. *Cement and Concrete Research*, 34 (2004) 1975-1980

Poon, S.C., Shui, H.Z., Lam, L., Fok, H. & Kou, C.S., “Influence of moisture states of natural and recycled aggregates on the slump and compressive strength of concrete”. *Cement and Concrete Research*, Vol 34 (2004) 31-36

Safiuddin, Md., Ubagaram, J.A., Abdus Salam Md., Jumaat, M.Z., Jaafar F.F. & Saad, H.B., “Properties of high-workability concrete with recycled concrete aggregate”. *Materials Research*, Vol 14, No 2 (2011)

Safiuddin, Md., Ubagaram J.A., Moshir Rahman, Md., Abdus Salam, Md.& Jumaat M.Z., “Use of Recycled Concrete Aggregate in Concrete: A Review”. *Journal of Civil Engineering and Management*, Vol 19, No 6 (2012) 796- 810

Shayan, A. & Xu, A., “Performance and properties of structural concrete made with recycled concrete aggregate”. *Materials and Structures*, RILEM, 44 (2003) 205-220

Tu, Y-T, Chen, Y-Y, Hwang, L-C, “Properties of HPC with recycled aggregates”. *Cement and Concrete Research* 36 (2006) 943-950