

Προσδιορισμός υποεπιφανειακής βλάβης στο σκυρόδεμα με μετρήσεις υπερήχων

Identification of subsurface damage in concrete using one sided wave measurements

Έλενα Α. ΛΕΩΝΙΔΟΥ¹, Δημήτριος Γ. ΑΓΓΕΛΗΣ², Θεόδωρος Ε. ΜΑΤΙΚΑΣ³

Λέξεις κλειδιά: Σκυρόδεμα, διάβρωση, συχνότητα, εύρος παλμού, επιφανειακά κύματα, υποεπιφανειακή βλάβη.

Περίληψη

Η επιφανειακή βλάβη είναι ο πιο κοινός τύπος βλάβης σε σκυρόδεμα. Στην περίπτωση της υποεπιφανειακής βλάβης αυξάνεται η δυσκολία χαρακτηρισμού αφού δεν υπάρχει οπτική ένδειξη της ρωγμής. Το στρώμα του υλικού κοντά στην επιφάνεια που παραμένει άθικτο και η ευαισθησία της ταχύτητας διαμήκους κύματος (η οποία μετράται τυπικά είναι μετρήσιμη σε ελέγχους), είναι αμφισβητήσιμα. Στην παρούσα έρευνα, οι ρωγμές δημιουργήθηκαν από κάμψη τεσσάρων σημείων σε ινοπλισμένα δοκίμια σκυροδέματος. Τα χαρακτηριστικά του κύματος μετρήθηκαν στις άθικτες επιφάνειες (πλευρά θλίψης) με χρήση κοινών αισθητήρων ακουστικής εκπομπής. Παρότι δεν υπήρχε καμία οπτική ένδειξη της ρωγμής, οι ταχύτητες επιφανειακού καθώς και διαμήκους κύματος επηρεάστηκαν παρουσιάζοντας σαφή μείωση σε σύγκριση με το υγιές υλικό. Επιπλέον άλλες παράμετροι όπως το εύρος ή η ενέργεια των κυμάτων ήταν πιο ευαίσθητες στη βλάβη. Για την καλύτερη κατανόηση της διάδοσης σε υλικό με υποεπιφανειακή βλάβη, έγινε αριθμητική προσομοίωση κάνοντας μια παραμετρική μελέτη μεταξύ του βάθους του υγιούς στρώματος, του μήκους κύματος και των μετρήσιμων κυματικών παραμέτρων. Συμπεραίνεται ότι σαρώνοντας μια επιφάνεια με απλές ακουστικές μετρήσεις από την υγιή πλευρά του υλικού, ο προσδιορισμός της θέσης της υποεπιφανειακής βλάβης είναι εφικτός ενώ τα χαρακτηριστικά διάδοσης παρέχουν πληροφορίες για τη μορφή και το βάθος της ρωγμής.

ABSTRACT

Surface deterioration is the most common type of concrete damage. In the case of subsurface damage the difficulty of characterization increases as there is no visual evidence of the crack. Additionally since the close to surface layer of the material is intact, the sensitivity of the longitudinal wave velocity, which is typically measured for inspection purposes, is questionable. In the present paper, cracks were created in steel fiber reinforced concrete specimens by four point bending. Wave characteristics were then measured on the intact surfaces (compression side) using common acoustic emission transducers. It was seen that although there was no visual sign of the crack,

¹ Μηχανικός Επιστήμης Υλικών, Τμήμα Μηχανικών Επιστήμης Υλικών, Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων, email: lena_lewnidou@yahoo.gr

² Επίκουρος Καθηγητής (Π.Δ. 407) Τμήμα Μηχανικών Επιστήμης Υλικών, Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων, email: daggelis@cc.uoi.gr

³ Καθηγητής, Τμήμα Μηχανικών Επιστήμης Υλικών, Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων, email: matikas@cc.uoi.gr

Rayleigh as well as longitudinal wave velocities were influenced showing clear decrease relatively to the sound material. Additionally other parameters such as the amplitude or energy of the waves were much more sensitive to damage. In order to explain the results, numerical simulations were conducted making a parametric study between the depth of the sound layer, the propagating wavelength and the measured wave parameters. It is concluded that by scanning a surface with simple acoustic one sided measurements, the identification of the location of the subsurface damage is possible, while the propagating wave gives information about the form and depth of the crack.

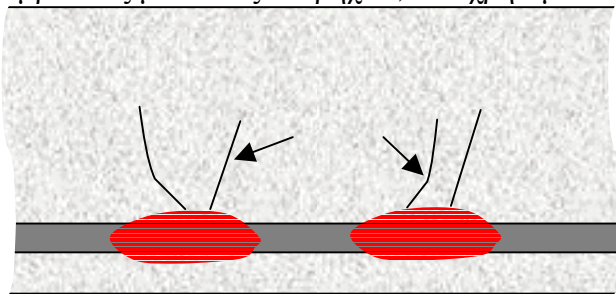
1. Εισαγωγή

Η βλάβη του σκυροδέματος λόγω της διάβρωσης του οπλισμού είναι ένα κρίσιμο πρόβλημα στις ενισχυμένες δομές. Οι ρωγμές αναπτύσσονται από τις ράβδους χάλυβα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1, αλλά συνήθως το πρόβλημα προσδιορίζεται αφότου παρατηρηθούν οι ρωγμές και η σκουριά στην επιφάνεια. Συνεπώς η ανάπτυξη τεχνικών Μη Καταστροφικού Ελέγχου (ΜΚΕ) που μπορούν να αξιολογήσουν τα αρχικά στάδια της βλάβης, είναι επιθυμητή.¹ Το κίνητρο αυτής της μελέτης προέρχεται από έλεγχο γέφυρας. Η δραστηριότητα της ακουστικής εκπομπής (ΑΕ) υπέδειξε ζώνες αμφισβητήσιμης ποιότητας.² Οι ελαστικές μετρήσεις κυμάτων σε εκείνα τα τμήματα της επιφάνειας αποκάλυψαν πραγματικά τη χαμηλή ταχύτητα παλμού. Εντούτοις, δεν υπήρξε καμία οπτική ένδειξη της ζημίας. Κατά συνέπεια, είναι λογικό ότι κάτω από την επιφάνεια είχε αναπτυχθεί βλάβη λόγω διάβρωσης του οπλισμού που είχε ενσωματωθεί 50-60 χιλ. κάτω από την επιφάνεια.

Όταν οι ρωγμές διαδίδονται προς την επιφάνεια, αν και δεν δίνουν κανένα οπτικό σημάδι, μπορούν να επιφέρουν μείωση στην ταχύτητα των επιφανειακών κυμάτων. Δεδομένου ότι τα επιφανειακά κύματα διαδίδονται κοντά στην ελεύθερη επιφάνεια, η χρήση τους είναι κατάλληλη για έλεγχο επιφανειακής και υποεπιφανειακής βλάβης. Κατά συνέπεια, οι μελέτες αλληλεπίδρασης μεταξύ επιφανειακών κυμάτων και υποεπιφανειακών ρωγμών είναι ιδιαίτερου ενδιαφέροντος για τον ΜΚΕ³. Όσον αφορά τον επιφανειακό τύπο κυμάτων, είναι ευρέως αποδεκτό ότι η διάδοσή τους πραγματοποιείται σε ένα στρώμα με βάθος περίπου ίσου με το μήκος κύματός τους.⁴ Επομένως, η ταχύτητα του επιφανειακού κύματος που μετράται είναι χαρακτηριστική του στρώματος αυτού. Εντούτοις, όσον αφορά στα διαμήκη κύματα που διαδίδονται στην επιφάνεια, το πάχος του στρώματος που χαρακτηρίζεται από την μετρούμενη ταχύτητα παλμού, δεν είναι διαθέσιμο. Ο λόγος είναι ότι ακόμη και ένα πολύ λεπτό στρώμα του άθικτου υλικού μπορεί να παρέχει μια συμπαγή ζώνη για τη διάδοση του κύματος.

Στη παρούσα μελέτη τα πρισματικά δοκίμια ήταν ενισχυμένα από ίνες χάλυβα και είχαν υποβληθεί σε δοκιμή κάμψης τεσσάρων σημείων. Οι ρωγμές αναπτύχθηκαν από την εφελκυσόμενη προς την συμπιεζόμενη επιφάνεια, χωρίς το δείγμα να σπάσει σε κομμάτια, γεγονός που οφείλετε στη δράση των ινών. Μετά το τέλος της δοκιμής κάμψης τα δοκίμια χρησιμοποιήθηκαν για μετρήσεις υπερήχων από την άθικτη πλευρά, προκειμένου να εξετασθεί εάν τα ελαστικά κύματα είναι ευαίσθητα στην υποεπιφανειακή βλάβη. Το ινοπλισμένο σκυρόδεμα είναι κατάλληλο για μία τέτοια μελέτη γιατί μπορούν να αναπτυχθούν ρωγμές στο μέσο του δοκιμίου χωρίς αυτό να χωριστεί σε δύο κομμάτια, επιτρέποντας την τοποθέτηση των αισθητήρων

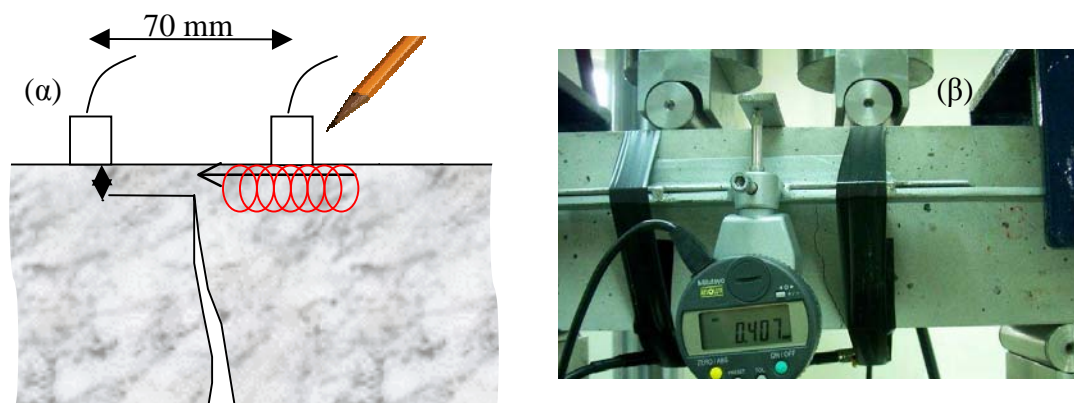
εκατέρωθεν της ρωγμής. Επιπλέον, ένας άλλος στόχος ήταν να δούμε εάν σκυρόδεμα με χαλύβδινες ίνες και άρα με αυξημένη ανομοιογένεια μπορούν να αξιολογηθεί από τις συμβατικές μεθόδους υπερήχων, που χρησιμοποιούνται για το άοπλο σκυρόδεμα.



Σχήμα 1. Ανάπτυξη υποεπιφανειακής ρωγμής λόγω διάβρωσης οπλισμού

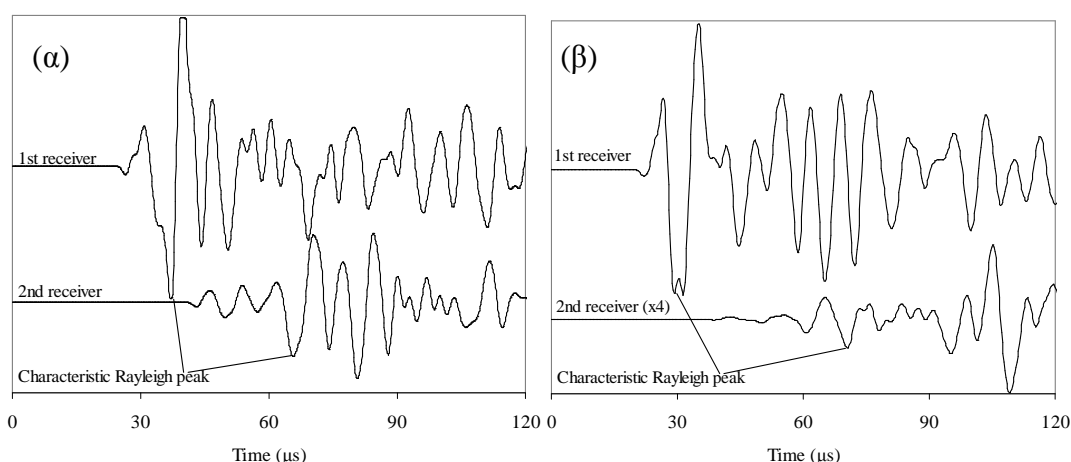
2. ΛΕΠΤΟΜΕΡΙΕΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ

Το Σχήμα 2α δείχνει την πειραματική διάταξη για μετρήσεις ελαστικών κυμάτων. Οι δύο αισθητήρες ήταν Physical Acoustics, PAC R6, με ονομαστική ευαισθησία περίπου στα 60 kHz. Η απόσταση μεταξύ των αισθητήρων ήταν 70 mm. Η διέγερση έγινε με σπάσιμο μύτης μηχανικού μολυβιού HB 0.5 που απείχε 10 mm από τον πρώτο αισθητήρα. Η διέγερση αυτή εισάγει συχνότητες 100 kHz περίπου, ενώ η συχνότητα δειγματοληψίας ορίστηκε στα 5 MHz. Το Σχήμα 2β παρουσιάζει ένα στιγμιότυπο κατά τη διάρκεια της δοκιμής κάμψης τεσσάρων σημείων για την κατανόηση του τρόπου δημιουργίας ρωγμών στο δοκίμιο. Η ανάπτυξη της ρωγμής ξεκινά από την κάτω επιφάνεια του δοκιμίου και διαδίδεται προς την κορυφή. Η δοκιμή κάμψης σταματά όταν η κεντρική βύθιση των δοκιμίων φτάσει στα 2 mm. Η δραστηριότητα της ακουστικής εκπομπής κατά τη διάρκεια του πειράματος καταγράφηκε και παρουσιάζεται αλλού.⁵ Χρησιμοποιήθηκαν δοκίμια με ποσοστά ινών 0.5%, 1% και 1.5% κ.ο. σκυροδέματος. Παράλληλα, έγιναν μετρήσεις και σε άοπλο δοκίμιο. Όσον αφορά τα άοπλα δοκίμια γενικά αστόχησαν σε δύο κομμάτια. Ωστόσο ένα υπέστη την επιβαλλόμενη βύθιση χωρίς να αστοχήσει σε δύο μέρη και άρα ήταν εφικτή η εξέτασή. Πρέπει να σημειωθεί ότι πριν τα πειράματα κάμψης, οι μετρήσεις υπερήχων έγιναν πρώτα στα υγιή δοκίμια ώστε να καταγραφεί η ταχύτητα και το εύρος κύματος αναφοράς.



Σχήμα 2. (α) Πειραματική διάταξη υπερήχων κατά την επιφάνεια. (β) Ανάπτυξη και διάδοση της ρωγμής από την κάτω επιφάνεια του δοκιμίου σκυροδέματος προς την κορυφή κατά τη διάρκεια της δοκιμής κάμψης.

Τυπικές κυματομορφές που καταγράφηκαν από τους δύο αισθητήρες που ήταν τοποθετημένοι στο υγιές υλικό απεικονίζονται στο Σχήμα 3α. Η ταχύτητα μετρήθηκε από τον χρόνο καθυστέρησης ανάμεσα στην πρώτη διαταραχή που κατέγραψαν οι δύο αισθητήρες. Αντιστοιχεί στα διαμήκη κύματα που είναι τα ταχύτερα. Η ταχύτητα επιφανειακού κύματος μετρήθηκε από μια χαρακτηριστική κορυφή της κυματομορφής. Στα υγιή δοκίμια η κορυφή του επιφανειακού κύματος ήταν ευδιάκριτη, επειδή μετέφεραν μεγάλα ποσά ενέργειας; ενώ στα ρηγματωμένα δοκίμια, η ρωγμή επιφέρει μεγάλη εξασθένηση του κύματος. Το Σχήμα 3β παρουσιάζει τυπικές κυματομορφές για την περίπτωση υποεπιφανειακής ρωγμής σε δοκίμιο με ποσοστό ινών 1.5% κ.ο. σκυροδέματος. Η κυματομορφή του πρώτου αισθητήρα είναι παρόμοια με την προηγούμενη περίπτωση; ωστόσο, το εύρος που καταγράφεται από το δεύτερο αισθητήρα είναι πολύ χαμηλότερο (το σχήμα έχει μεγεθυνθεί κατά 4 φορές). Σε μερικές περιπτώσεις ρηγματωμένων δοκιμίων ήταν αδύνατον να ξεχωρίσει η χαρακτηριστική κορυφή και έτσι η ταχύτητα του επιφανειακού κύματος δεν μπορούσε να μετρηθεί. Οι μετρήσεις επαναλήφθηκαν είκοσι φορές μετακινώντας ελαφρώς τους αισθητήρες για να έχουμε πιο αντιπροσωπευτικές πληροφορίες για το υλικό, ενώ σε κάθε περίπτωση η ρωγμή βρισκόταν ανάμεσα από τους αισθητήρες.



Σχήμα 3. Τυπικές κυματομορφές για (α) υγιές υλικό και (β) υλικό με υποεπιφανειακή βλάβη.

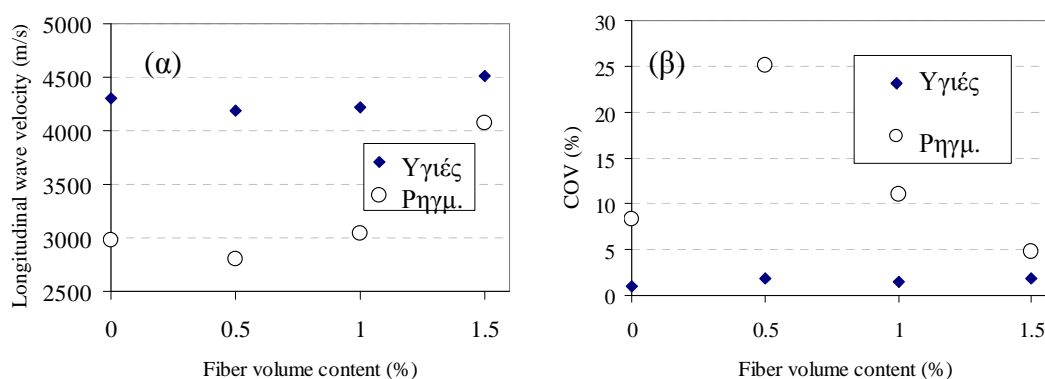
3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

3.1 Διαμήκη κύματα

Στο Σχήμα 4α απεικονίζεται η ταχύτητα διαμήκους κύματος για διαφορετικά ποσοστά ινών. Όπως φαίνεται στο άοπλο δοκίμιο σκυροδέματος η ταχύτητα κυμαίνεται περίπου στα 4300 m/s, ενώ καθώς αυξάνεται το ποσοστό ενίσχυσης του σκυροδέματος, η ταχύτητα αυξάνεται πέραν των 4500 m/s. Θα ήταν λογικό να αναμένουμε ότι οποιοδήποτε ποσοστό ινών θα προκαλούσε αύξηση ταχύτητας. Όμως, για ποσοστά ινών 0.5% και 1% η ταχύτητα μειώνεται ελαφρώς (περίπου στα 4200 m/s) συγκριτικά με το άοπλο δοκίμιο. Παρόμοια φαινόμενα έχουν παρατηρηθεί στη βιβλιογραφία όπου η φάση ενίσχυσης σε μία χαμηλής ελαστικότητας μήτρα δεν αυξάνει απαραίτητα τις τιμές της ταχύτητας και το γεγονός αυτό αποδίδεται σε

φαινόμενα σκέδασης^{6,7}. Παρότι το φαινόμενο αυτό παρουσιάζει ενδιαφέρον δεν εμπίπτει στο αντικείμενο μελέτης αυτής της έρευνας και θα μελετηθεί χωριστά.

Όταν υπάρχει υποεπιφανειακή βλάβη, η ταχύτητα παρουσιάζει εμφανή μείωση για όλα τα ποσοστά ενίσχυσης. Η μείωση που σημειώνεται ξεπερνά τα 1000 m/s, εκτός από την περίπτωση 1.5% , που η μείωση είναι περίπου 500 m/s, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4α. Η μικρή μείωση ταχύτητας στα πολύ ενισχυμένα δοκίμια οφείλεται στη γεφύρωση της ρωγμής από τις ίνες. Οι ίνες λειτουργούν ως μονοπάτια που επιτρέπουν σε ποσά ενέργειας να διαδίδονται και να φτάνουν στο δέκτη. Κατ' αυτόν τον τρόπο η ταχύτητα δεν επηρεάζεται κατά πολύ, ενώ η ρωγμή βρίσκεται πολύ λίγα χιλιοστά κάτω από την επιφάνεια του δοκιμίου. Συνεπώς, στην περίπτωση όπου το ποσοστό ινών είναι μεγάλο, η παράμετρος της ταχύτητας δεν επιφέρει αξιόπιστα συμπεράσματα. Το πρόβλημα αυτό παρουσιάζεται και σε ρωγμές ανοιχτές στην επιφάνεια και οποιαδήποτε γεφύρωση (ενίσχυσης, νερού, σκόνης) καθιστά προβληματικές τις μετρήσεις από μία μόνο πλευρά.^{8,9}

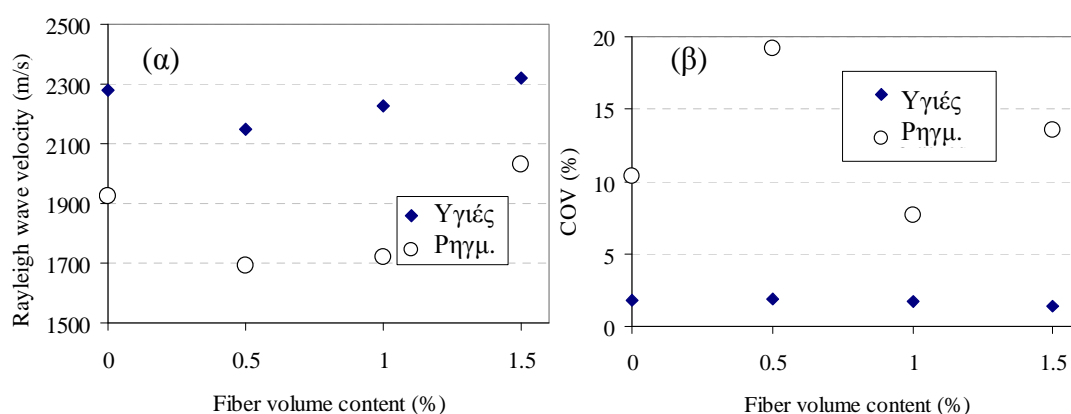


Σχήμα 4. (α) Τιμές ταχύτητας για υγιή και ρηγματωμένα δοκίμια για διαφορετικά ποσοστά ινών. (β) Πειραματική διασπορά (COV) των αποτελεσμάτων της γραφικής συνάρτησης (α).

Το Σχήμα 4β δείχνει το συντελεστή διασποράς (coefficient of variation - COV) όλων των μετρήσεων (τυπική απόκλιση προς τη μέση τιμή των μετρήσεων). Για τα υγιή δοκίμια η διακύμανση του COV ήταν πολύ χαμηλή (1-2%). Αυτή η τιμή αντιστοιχεί σε πιθανές πειραματικές αποκλίσεις, καθώς και στην ανομοιογένεια του σκυροδέματος, γεγονός που καθιστά κάθε διαδρομή του κύματος διαφορετική από κάθε άλλη. Ωστόσο οι διακυμάνσεις στα ρηγματωμένα δοκίμια είναι πολύ υψηλότερες, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4β. Ο COV αυξάνεται σε 5% έως 25%. Συνεπάγεται ότι ο συντελεστής διασποράς, αποτελεί μία επιπλέον παράμετρο που βοηθά στο καλύτερο χαρακτηρισμό του υλικού. Στην πραγματικότητα ο συντελεστής διασποράς επαρκών μετρήσεων έχει συσχετισθεί με τη βλάβη σε επιφανειακές μετρήσεις υλικών.^{10,11} Ο λόγος είναι η αλλαγή της θέσης των αισθητήρων, γεγονός που αλλάζει επίσης τη θέση και τον προσανατολισμό της ρωγμής σε σχέση με τη διεύθυνση του κύματος. Συνεπώς, κάθε κυματομορφή θα είναι διαφορετική καθώς το κύμα διαδίδεται σε διαδρομή με διαφορετικά χαρακτηριστικά. Άρα είναι λογικό να λαμβάνεται πληθυσμός μετρήσεων και τα χαρακτηριστικά του δείγματος να συγκρίνονται με τα αντίστοιχα υγιών δοκιμίων.

3.2 Επιφανειακά κύματα

Η ταχύτητα επιφανειακών κυμάτων δείχνει παρόμοια αποτελέσματα με την ταχύτητα των διαμηκών κυμάτων. Σε ποσοστά ινών 1.5% κ.ο έχουμε την υψηλότερη ταχύτητα (μεγαλύτερη από 2300 m/s), ενώ σε ποσοστό ινών 0.5% έχουμε τη χαμηλότερη (2150 m/s) όπως φαίνεται στο Σχήμα 5α. Στα ρηγματωμένα δοκίμια η μείωση είναι φανερή και κυμαίνεται από 300 m/s (για ποσοστό ινών 1.5% κ.ο) έως 500 m/s (για ποσοστό ινών 1% κ.ο). Επίσης ο COV για υγιή δοκίμια είναι περίπου 2% αλλά αυξάνεται στο 8-20% όπως φαίνεται στο Σχήμα 5β στην περίπτωση δοκιμίων με υποεπιφανειακή βλάβη. Τόσο στα διαμήκη όσο και στα επιφανειακά κύματα είναι εμφανές ότι η ταχύτητα μειώνεται περίπου στο 20-25% συγκριτικά με τα υγιή δοκίμια. Ωστόσο η στατιστική απόκλιση ενός αριθμού μετρήσεων αυξάνεται τουλάχιστον 3 έως 13 φορές γεγονός που καθιστά το COV πιο ευαίσθητο μέγεθος κατά την ύπαρξη ρωγμής.



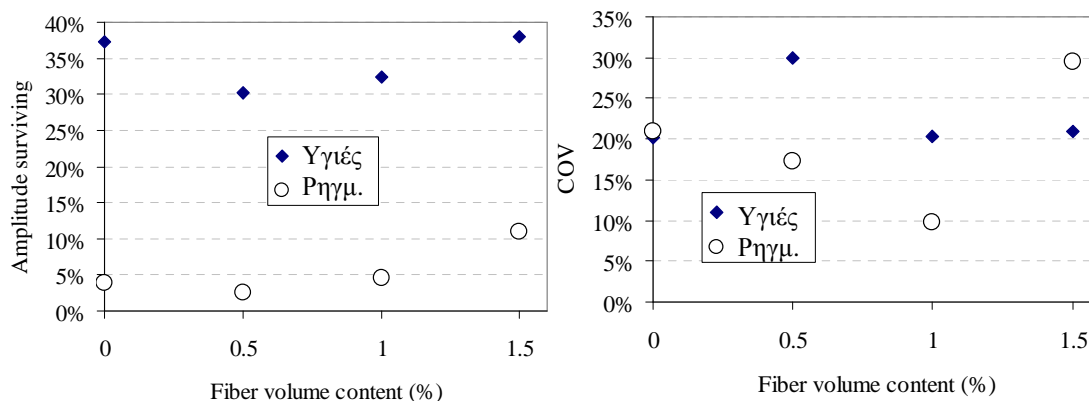
Σχήμα 5. (α) Ταχύτητα επιφανειακού κύματος για υγιή και ρηγματωμένα δοκίμια σε διαφορετικά ποσοστά ινών. (β) COV των αποτελεσμάτων της γραφικής συνάρτησης (α).

3.3 Εύρος

Είναι γνωστό ότι η ενέργεια του κύματος είναι πιο ευαίσθητη στην ύπαρξη ρωγμών από την ταχύτητα. Ακόμη και λίγο πριν την τελική θραύση, η ταχύτητα μειώνεται μόνο κατά 10-20%.¹²⁻¹⁴ Ωστόσο, παράμετροι, όπως η ενέργεια ή το εύρος, μειώνονται ακόμη και στα πρώτα στάδια φόρτισης. Σε αυτή τη περίπτωση το μέγιστο εύρος του δεύτερου δέκτη (σε απόλυτη τιμή) συγκρίθηκε με το εύρος του πρώτου δέκτη. Μηχανισμοί εξασθένισης είναι ενεργοί ακόμα και σε υγιές υλικό λόγω απόσβεσης και γεωμετρικής διάχυσης της δέσμης. Καθώς αυξάνεται η ανομοιογένεια, η σκέδαση γίνεται όλο και περισσότερο σημαντικός μηχανισμός.¹⁵ Στη συγκεκριμένη περίπτωση η ανάκλαση ενός μεγάλου τμήματος ενέργειας λόγω της υποεπιφανειακής βλάβης συμβάλλει στη μεγάλη μείωση του λαμβανόμενου εύρους του δεύτερου αισθητήρα.

Για το υγιές δοκίμιο, ο δεύτερος δέκτης είχε περίπου το 30-37% από το εύρος του πρώτου δέκτη (βλέπε Σχήμα 6α) για οποιοδήποτε δοκίμιο σκυροδέματος. Αυτό δείχνει ότι οποιαδήποτε διαφορά στη «συμπεριφορά» του κύματος που οφείλεται στις ίνες δεν είναι σημαντική, και η επίδραση της ρωγμής πρέπει να είναι εύκολα αναγνωρίσιμη. Στη περίπτωση που η υποεπιφανειακή βλάβη είναι παρούσα το υπολειπόμενο εύρος εξασθενεί στο 3-11% του πρώτου δέκτη. Τα δοκίμια σκυροδέματος με υψηλά ποσοστά ενίσχυσης επιδεικνύουν το υψηλότερο εύρος ακόμη σε κατάσταση ρωγμής λόγω της γεφύρωσης της ρωγμής από τις ίνες. Σε

οποιαδήποτε περίπτωση το εύρος αποδεικνύεται πιο αξιόπιστη παράμετρος από την ταχύτητα καθώς παρουσιάζει μείωση της τάξεως του 90% σε σύγκριση με τα υγιή δοκίμια, ενώ η ταχύτητα σημειώνει μείωση περίπου στο 20%, όπως προαναφέρθηκε. Η εγγενής ανομοιογένεια του σκυροδέματος, που περιλαμβάνει πορώδες, φυσαλίδες αέρα, άμμο, χονδρά αδρανή και χαλύβδινες ίνες, αυξάνει το COV των μετρήσεων του εύρους ακόμα και σε υγιές υλικό. Γι' αυτό το λόγο, στην συγκεκριμένη περίπτωση, η παράμετρος αυτή δεν εμφάνισε συστηματική μεταβολή για τα ρηγματωμένα δοκίμια.



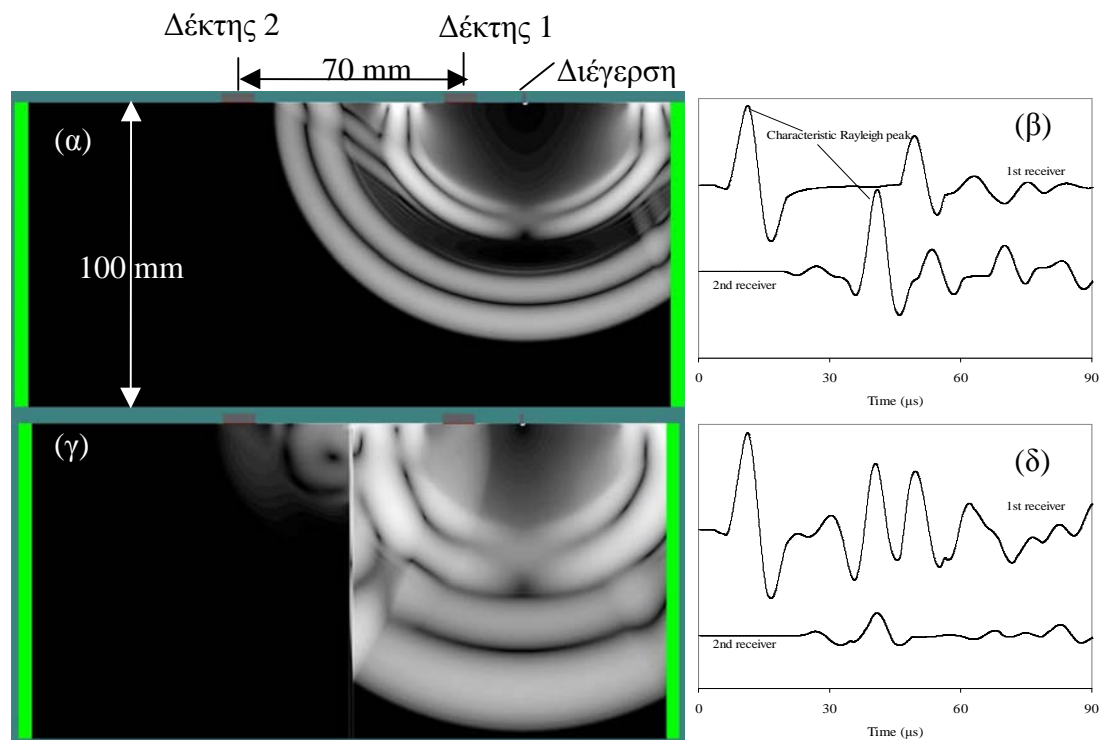
Σχήμα 6. (α) Κυματοσυνάρτηση εύρους για υγιή και ρηγματωμένα δοκίμια σε διαφορετικά ποσοστά ινών. (β) COV των αποτελεσμάτων της γραφικής συνάρτησης (α).

4. ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

Για τις πειραματικές περιπτώσεις, οι ρωγμές σχεδόν αγγίζουν την επιφάνεια και επιφέρουν σαφή μεταβολή στις κυματικές παραμέτρους. Προκειμένου να εξετασθούν διαφορετικές περιπτώσεις βάθους ρωγμής και για να αυξηθεί η κατανόηση ούτως ώστε να βοηθηθεί η έρευνα για εύρεση παραμέτρων πιο ευαίσθητων στη βλάβη από ότι είναι η ταχύτητα, πραγματοποιήθηκε αριθμητική προσομοίωση. Για το σκοπό αυτό έγινε χρήση εμπορικού λογισμικού.¹⁶ Η λειτουργία του προγράμματος βασίζεται στην επίλυση δισδιάστατης, ακουστικής κυματικής εξίσωσης, με τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών και έχει χρησιμοποιηθεί πρόσφατα για κυματική διάδοση σε ανομοιογενές σκυρόδεμα.¹⁷ Τα υλικά, που περιλαμβάνονται εξετάστηκαν ως ελαστικά, παραλείποντας τις ιξωδοελαστικές ιδιότητες τους. Οι σταθερές Lamé που χρησιμοποιήθηκαν ήταν $\lambda = 12$ GPa και $\mu = 16.5$ GPa, με πυκνότητα ίση με 2400 kg/m^3 , οδηγώντας σε ταχύτητα διαμηκών κυμάτων ίση με 4300 m/s . Η γεωμετρία του δείγματος ήταν ορθογωνική με πάχος 100 mm (όπως και το πραγματικό δοκίμιο, βλέπε Σχήμα 7α). Το βήμα υπολογισμού στο χώρο (spacing resolution) ορίστηκε στα 0.2 mm πολύ μικρότερο από το μήκος κύματος του διαμήκους κύματος και του επιφανειακού κύματος (43 mm και 24 mm αντίστοιχα).

Προκειμένου να μειωθεί ο χρόνος υπολογισμού, εξετάστηκε η περιοχή στο κέντρο του δοκιμίου μήκους 200 mm και τέθηκαν συνοριακές συνθήκες άπειρου μέσου στις απέναντι πλευρές για να μην παρουσιαστούν φαινόμενα ανάκλασης. Οι δέκτες της αριθμητικής προσομοίωσης είχαν μήκος 15 mm για να μοιάζουν με τους πραγματικούς δέκτες, τοποθετήθηκαν στην κορυφή του δοκιμίου και η μεταξύ τους απόσταση ήταν 70 mm , όμοια με του πειράματος. Οι δέκτες υπολογίζουν τον μέσο

όρο της πλευρικής μετατόπισης σε όλο τους το μήκος. Διαφορετικά δείγματα εξετάστηκαν με αριθμητική προσομοίωση, όπως άοπλο και δείγματα με υποεπιφανειακή βλάβη βάθους 10 mm, 8 mm, 5 mm, 3 mm και 1 mm κάτω από την επιφάνεια του δείγματος. Το Σχήμα 7α δείχνει ένα στιγμιότυπο του πεδίου μετατοπίσεων για την περίπτωση του δοκιμίου χωρίς υποεπιφανειακή βλάβη και το Σχήμα 7β δείχνει τις κυματομορφές που λαμβάνονται σε αυτή την περίπτωση. Η χαρακτηριστική κορυφή του επιφανειακού κύματος μπορεί εύκολα να αναγνωριστεί στις κυματομορφές και των δύο αισθητήρων, καθώς η ενέργεια μπορεί να διαδοθεί χωρίς καμία παρεμπόδιση. Στο Σχήμα 7γ απεικονίζεται η περίπτωση με βάθος ρωγμής 1 mm, ενώ η αντίστοιχη κυματομορφή φαίνεται στο Σχήμα 7δ. Η ρωγμή έχει πάχος 1 mm. Όσο η ρωγμή πλησιάζει την επιφάνεια λιγότερη ενέργεια μπορεί να περάσει από το δεύτερο μισό του δείγματος προς το δεύτερο δέκτη. Το πεδίο μετατόπισης είναι ισχυρά σκεδασμένο και η κυματομορφή του δεύτερου αισθητήρα είναι πολύ μικρότερη σε εύρος. Το επιφανειακό κύμα μπορεί ακόμη να διακριθεί (Σχήμα 7δ), και η ταχύτητα μπορεί να μετρηθεί σε όλες τις περιπτώσεις. Οι μεγαλύτερες κορυφές που παρατηρούνται στη κυματομορφή του πρώτου δέκτη μετά από 30 μs οφείλονται στην ανάκλαση από τη ρωγμή διότι ένα μεγάλο τμήμα της ενέργειας ανακλάται από τη ρωγμή. Αντίστοιχα το εύρος στο δεύτερο δέκτη μειώνεται, όσο περισσότερη ενέργεια ανακλάται.

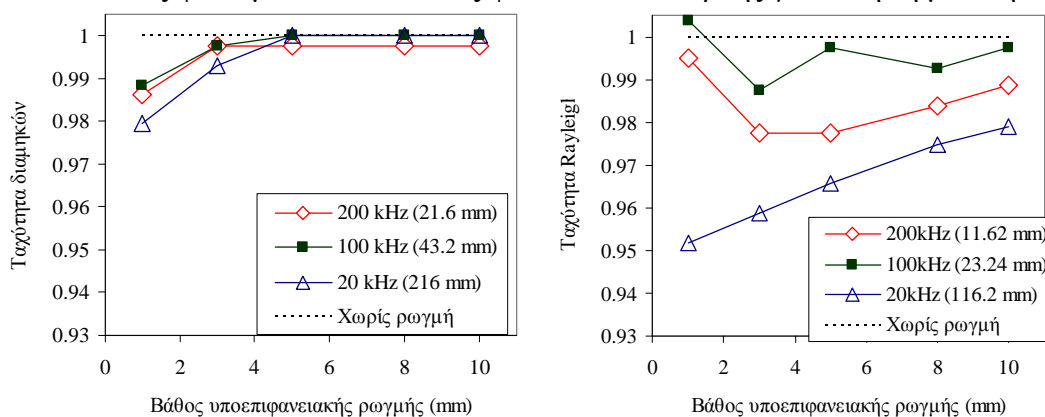


Σχήμα 7. (α) και (γ) Στιγμιότυπο του πεδίου μετατόπισης για δείγμα χωρίς ρωγμή και για δείγμα με βάθος ρωγμής 1 mm αντίστοιχα, (β) και (δ) Κυματομορφές που λήφθηκαν κατά την προσομοίωση των (α) και (γ) αντίστοιχα. Η συχνότητα είναι 100 kHz.

Εκτός από τα διαφορετικά βάθη ρωγμής, στην προσομοίωση μεταβλήθηκε και η συχνότητα. Πέραν από τη συχνότητα των 100 kHz, που ήταν περίπου η συχνότητα που χρησιμοποιήθηκε κατά τη διεξαγωγή του πειράματος, οι συχνότητες των 200 kHz και των 20 kHz εφαρμόστηκαν επίσης για την εξέταση του αν η αλλαγή της συχνότητας βοηθάει στο χαρακτηρισμό, αλλάζοντας το βάθος διείσδυσης του κύματος.

Όσον αφορά τα διαμήκη κύματα η ταχύτητα δεν φαίνεται να επηρεάζεται από την υποεπιφανειακή βλάβη. Για βάθος ρωγμής 1 mm η ταχύτητα μειώνεται μόνο 1% για τις συχνότητες 100 και 200 kHz, ενώ στα 20 kHz μειώνεται στα 2%, όπως δείχνει το Σχήμα 8α. Για βάθος ρωγμής μεγαλύτερο από 3 mm η ταχύτητα δεν επηρεάζεται, ακόμη και όταν το μήκος κύματος είναι μεγάλο (216 mm για 20 kHz). Το λεπτό στρώμα επιφάνειας είναι αρκετό για να διαδοθεί το διαμήκες κύμα.

Αντίθετα, στα επιφανειακά κύματα η ταχύτητα επηρεάζεται ακόμη και σε βάθος ρωγμής 10 mm. Οι υψηλές συχνότητες δεν παράγουν μονότονη καμπύλη της μείωσης ανάλογα με το βάθος ρωγμής. (βλέπε Σχήμα 8β). Η χαμηλή συχνότητα των 20 kHz παρουσιάζει καλύτερα αποτελέσματα, μιας και η ταχύτητα μειώνεται ανάλογα με το πόσο η ρωγμή πλησιάζει την επιφάνεια του δείγματος. Για τις περιπτώσεις που η ρωγμή είναι βαθύτερη (10 mm κάτω από την επιφάνεια) η ταχύτητα του επιφανειακού κύματος μειώνεται κατά 2% και όσο η ρωγμή πλησιάζει την επιφάνεια (1 mm) η μείωση της ταχύτητας επιφανειακού κύματος φτάνει το 5%. Αυτό δείχνει ότι μεγάλα μήκη κύματος είναι πιο αξιόπιστα καθώς διαδίδονται σε βαθύτερα στρώματα. Είναι ενδεικτικό ότι βασισμένοι στην ταχύτητα των υψηλότερων συχνοτήτων των 100 kHz και των 200 kHz δεν είμαστε σε θέση να διακρίνουμε καθαρά ακόμη και τη βλάβη σε βάθος ρωγμής 1 mm. Η συχνότητα των 20 kHz όμως, υφίσταται μεγαλύτερη μείωση ταχύτητας γεγονός που επιτρέπει πιο εύκολη αξιολόγηση. Σε υψηλότερες συχνότητες, όσο η ρωγμή πλησιάζει την επιφάνεια, η ταχύτητα μειώνεται με εξαίρεση τη ρωγμή 1 mm κάτω από την επιφάνεια που επιδεικνύει ταχύτητα όμοια με του υγιούς δείγματος. Αυτή η αύξηση φαίνεται αντίθετη με το γεγονός ότι το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας ανακλάται. Ωστόσο, υπενθυμίζεται ότι αν και το προσπίπτον κύμα Rayleigh ανακλάται, ένα νέο επιφανειακό κύμα σχηματίζεται λόγω της διάθλασης του διαμήκους και εγκάρσιου κύματος στην άκρη της ρωγμής.³ Η χαμηλότερη συχνότητα των 20 kHz δεν εμφανίζει τέτοιου είδους φαινόμενα και συνεπώς φαίνεται πιο επαρκής για αυτή τη μελέτη.



Σχήμα 8. Ταχύτητα προς βάθος υποεπιφανειακής ρωγμής, (α) διαμήκες, (β) επιφανειακό για διαφορετικές συχνότητες. (Ο αριθμός στην παρένθεση αντιστοιχεί στο μήκος κύματος).

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η παρούσα μελέτη αφορά το χαρακτηρισμό των υποεπιφανειακής βλάβης σε σκυρόδεμα. Μετρήσεις ελαστικού κύματος 100 kHz έγιναν από τη μία πλευρά ενώ οι ρωγμές αναπτύχθηκαν από τη δοκιμή κάμψης τεσσάρων σημείων και βρίσκονται μερικά mm κάτω από την επιφάνεια. Διαπιστώθηκε ότι η ταχύτητα διαμήκους και επιφανειακού κύματος μειώθηκε περισσότερο από 20%. Ωστόσο, υψηλότερη

ευαισθησία παρουσιάζει η στατιστική διασπορά των μετρήσεων λόγω της ύπαρξης της ρωγμής στο υλικό, παράμετρος που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για έλεγχο επί τόπου στο έργο. Το εύρος ή η ενέργεια της κυματομορφής είναι ακόμα μία παράμετρος που αποδεικνύεται πολύ πιο ευαίσθητη από την ταχύτητα. Αριθμητική προσομοίωση έγινε για να εξεταστεί η επίδραση των διαφορετικών συχνοτήτων και του βάθους ρωγμής στη διάδοση επιφανειακών κυμάτων. Προτείνεται ότι τα επιφανειακά κύματα χαμηλής συχνότητας είναι κατάλληλα για το χαρακτηρισμό υποεπιφανειακών ρωγμών, αφού η ταχύτητα τους επηρεάζεται ακόμη και σε βάθος ρωγμής 10 mm. Λαμβάνοντας υπόψη τον αργό ρυθμό ανάπτυξης της ρωγμής λόγω διάβρωσης, γίνεται εκτίμηση με βάση τις τιμές ταχύτητας του επιφανειακού κύματος πολύ νωρίτερα, από την παρατήρηση της πραγματικής ρωγμής, μετά από το σπάσιμο της επιφάνειας. Τέλος συχνότητες χαμηλότερες από 20 kHz, με μεγαλύτερο βάθος διείσδυσης, πρέπει να μελετηθούν για την αναγνώριση βλάβης λόγω διάβρωσης οπλισμού σε πολύ αρχικό στάδιο μακριά από την επιφάνεια.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Tomoda, Y., Ohtsu M., “Corrosion process of steel bar in reinforced concrete by acoustic emission,” *Progress in Acoustic Emission XIV*, 341-346 (2008).
2. Shiotani, T., Aggelis, D. G., Makishima, O., “Global monitoring of large concrete structures by acoustic emission and ultrasonic techniques: case study”, *Journal of Bridge Engineering - ASCE*, 14(3), 188-192, (2009).
3. Liu, S-W., Sung J-C, Chang C-S., “Transient scattering of Rayleigh waves by surface-breaking and sub-surface cracks”, *Int. J. Engng. Sci.* 34(9), 1059-1075, (1996).
4. Aggelis, D. G., Shiotani, T., Polyzos, D., “Characterization of surface crack depth and repair evaluation using Rayleigh waves”, *Cement and Concrete Composites*, 31(1), 77-83 (2009).
5. Aggelis, D., G., Soulioti, D., Barkoula, N., M., Paipetis, A., Matikas, T. E., Shiotani, T., “Acoustic emission of fiber reinforced concrete beams under bending”, *Progress in Acoustic Emission XIV*, 287-294 (2008).
6. Anson L. W., Chivers R.C., “Ultrasonic velocity in suspensions of solids in solids—a comparison of theory and experiment”, *J. Phys. D.*,26, 1566–1575 (1993).
7. Aggelis D. G., Tsinopoulos S.V., Polyzos D., “An iterative effective medium approximation (IEMA) for wave dispersion and attenuation predictions in particulate composites, suspensions and emulsions”. *Journal of the Acoustical Society of America* 116, 3443-3452 (2004).
8. Aggelis, D. G., Shiotani, T., “Repair evaluation of concrete cracks using surface and through-transmission wave measurements” *Cement and Concrete Composites* 29(9), 700-711 (2007).
9. Pecorari, C., “Scattering of a Rayleigh wave by a surface-breaking crack with faces in partial contact”, *Wave Motion*, 33, 259-270 (2001).
10. Aggelis, D. G., Shiotani, T., “Experimental study of surface wave propagation in strongly heterogeneous media” *JASA* 122(5) EL 151-157 (2007).
11. Aggelis, D. G., Shiotani, T., “Surface wave dispersion in cement-based media: inclusion size effect”, *NDT&E INT* 41, 319-325 (2008).
12. Aggelis, D. G., Shiotani, T., Momoki, S., Terazawa, M., “Acoustic emission of full scale concrete beams for evaluation of joint effect”, *Advances in Acoustic Emission – 2007*, 390-395 (2007)
13. T. Shiotani T., Aggelis, D. G., “Wave propagation in concrete containing artificial distributed damage”, *Materials and Structures*, 42(3), 377-384 (2009).
14. Popovics, S., Popovics, J. S., “Effect of stresses on the ultrasonic pulse velocity in concrete” *Mater Struct* 24:15 (1991).
15. Jacobs, L. J., Owino, J. O., “Effect of aggregate size on attenuation of Rayleigh surface waves in cement-based materials, *J. Eng. Mech. ASCE*, 126(11), 1124-1130 (2000).
16. Wave2000, Cyber-Logic, Inc, NY (<http://www.cyberlogic.org/>)
17. Aggelis, D. G., Momoki, S. “Numerical simulation of wave propagation in mortar with inhomogeneities”, *ACI Materials Journal* 106(1), 59-63, (2009)