



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ – ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ**

**ΑΚΟΥΣΤΙΚΗ ΕΚΠΟΜΠΗ ΤΕΧΝΗΤΩΝ  
ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ ΥΠΟ ΘΑΛΨΗ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ ΠΑΠΑΔΟΠΟΥΛΟΣ**

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ**

**ΠΑΥΛΟΣ Π. ΝΟΜΙΚΟΣ**

**ΕΠΙΚ. ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π.**

**ΑΘΗΝΑ 2013**

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα εργασία πραγματεύεται το θέμα της ανάπτυξης και εξέλιξης της ρωγμάτωσης γύρω από κυκλικές και τετραγωνικές οπές κατά την μονοαξονική θλίψη φυσικών μοντέλων τεχνητών πετρωμάτων. Το θέμα έχει τόσο θεωρητικό όσο και πρακτικό ενδιαφέρον, ειδικότερα κατά την αξιολόγηση της μηχανικής συμπεριφοράς υπογείων εκσκαφών σε πετρώματα.

Θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στον κ. Νομικό Παύλο, Επίκουρο Καθηγητή της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων – Μεταλλουργών του Ε.Μ.Π για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε αναθέτοντάς μου την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Επίσης, τον κ Σοφιανό Αλέξανδρο, Καθηγητή της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων – Μεταλλουργών για την επιστημονική του συμβολή καθόλη τη διάρκεια εκπόνησης αυτής της εργασίας.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τους κ.κ. Γ. Παπαντωνόπουλο, Δρ. Μηχανικό Μεταλλείων, και Κ. Σακκά, Μηχανικό Μεταλλείων για την πολύτιμη βοήθεια που παρείχαν κατά τη διάρκεια διεξαγωγής των εργαστηριακών δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αυτή η διπλωματική εργασία ασχολείται κατά κύριο λόγο με την παρατήρηση του τρόπου θραύσης φυσικών μοντέλων με κυκλικό και τετραγωνικό άνοιγμα παράλληλα με τη χρήση της τεχνικής της ακουστικής εκπομπής. Αρχικά δίνεται ένα θεωρητικό υπόβαθρο που σχετίζεται με τη χρήση των φυσικών μοντέλων σε διάφορα προβλήματα μηχανικής πετρωμάτων καθώς και μία γενική κατηγοριοποίηση των υλικών κατασκευής αυτών και των ιδιοτήτων τους. Επίσης γίνεται μία γενική αναφορά σε πειράματα που έχουν εκτελεστεί σε φυσικά μοντέλα προσομοίωσης υπόγειων εκσκαφών, και τα συμπεράσματα που έχουν προκύψει από αυτά. Στη συνέχεια ακολουθεί η προετοιμασία των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή δοκιμίων (κύβων, πρισμάτων), τα οποία δοκιμάστηκαν σε μονοαξονική θλίψη. Τα δοκίμια σχεδιάστηκαν έτσι ώστε να εξαχθούν συμπεράσματα για την επίδραση του μεγέθους και του σχήματος καθώς και τη συμβολή του χρόνου ωρίμανσης στην αντοχή τους. Όσον αφορά τις δοκιμές φόρτισης στα πρίσματα χρησιμοποιήθηκε η τεχνική της ακουστικής εκπομπής για καλύτερη αξιολόγηση. Ύστερα ακολουθεί η παρουσίαση της προετοιμασίας των φυσικών μοντέλων με κυκλικές και τετραγωνικές οπές. Αυτά δοκιμάστηκαν σε μονοαξονική θλίψη με σκοπό την παρατήρηση της εξέλιξης του τρόπου θραύσης τους και σε συνδυασμό με την τεχνική της ακουστικής εκπομπής, ώστε να σχηματιστεί μία καλύτερη εικόνα για τις εσωτερικές διεργασίες που συμβαίνουν κατά την φόρτιση. Το πειραματικό στάδιο των δοκιμών βιντεοσκοπήθηκε για καλύτερη και ασφαλέστερη αξιολόγηση των εξελίξεων που πραγματοποιήθηκαν. Τα βίντεο έχουν χρονικά συγχρονιστεί με την καταγραφή της ακουστικής εκπομπής και επίσης λήφθηκαν φωτογραφίες οι οποίες παρατίθενται με χρονική συνέχεια. Τέλος ακολουθούν τα συμπεράσματα που προέκυψαν.

## ABSTRACT

This thesis mainly deals with the observation of fracture patterns around circular and square openings in physical models of synthetic rocks under uniaxial compression, using the acoustic emission technique. It starts with a theoretical background associated with the use of physical models in various rock engineering problems and an overall classification of the modeling materials and their properties. Also there are general references to the literature relevant with experiments performed in natural underground excavation simulation models, and the conclusions derived from them. Then follows the preparation of the materials used for the preparation of specimens (cubes, prisms), which were tested in uniaxial compression. The tests are designed to draw conclusions about the effect of size and shape, and the effect of the material maturity on the material strength. In the compression testing of prismatic specimens, the technique of acoustic emission was also used for better evaluation. Then, the description of the physical models preparation and the technique used to create circular and square openings, follows. These physical models were tested in uniaxial compression in order to observe the evolution of fracture mode, and in combination with the acoustic emission technique, to form a better understanding of the processes occurring during loading. The testing phase was videotaped for better and safer assessment of the fracture development that was observed. Videos are time synchronized with the recording of acoustic emission and also photographs have been taken with a time listed below. Finally the conclusions follow.

## Περιεχόμενα

<b>1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....</b>	<b>7</b>
1.1. Φυσικά μοντέλα στη μηχανική πετρωμάτων.....	7
1.2. Φυσικά μοντέλα υπογείων εκσκαφών σε πετρώματα.....	7
1.2.1. Γενικά.....	7
1.2.2. Πειραματικές παρατηρήσεις.....	8
1.2.3. Τα πειράματα του Carter (1991, 1992).....	11
1.3. Αντικείμενο της παρούσας εργασίας.....	14
<b>2. ΥΛΙΚΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΤΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΟΥ ΠΕΤΡΩΜΑΤΟΣ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ.....</b>	<b>16</b>
2.1. Κατηγοριοποίηση των υλικών μοντελοποίησης του πετρώματος.....	16
2.2. Ιδιότητες.....	18
2.3. Κοκκώδη.....	18
2.3.1. Με γύψο.....	18
2.3.2. Με τσιμέντο.....	21
2.3.3. Τσιμεντωμένα με κερί.....	24
2.3.4. Τσιμεντωμένα με ρητίνη και πλαστικό.....	26
2.3.5. Τσιμεντωμένα με πηλό.....	28
2.4. Μη κοκκώδη.....	28
2.4.1. Πλαστικό με πλαστικό μόνο.....	28
2.4.2. Πλαστικά που περιέχουν πλαστικά.....	30
2.4.3. Μη πλαστικά-μεταλλικά.....	30
2.4.4. Μη πλαστικά-μη μεταλλικά-ψαθυρά.....	30
2.4.5. Μη πλαστικά-μη μεταλλικά-μη ψαθυρά.....	36
2.5. Η ανισοτροπία των φυσικών μοντέλων και η συμπεριφορά των ασυνεχειών ...	38

**3. ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΚΑΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΥΛΙΚΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ... 40**

3.1.	Σύνθεση.....	40
3.2.	Προετοιμασία κύβων για δοκιμές θλίψης.....	41
3.3.	Προετοιμασία πρισμάτων για δοκιμές θλίψης .....	43
3.4.	Δοκιμές αντοχής σε κύβους.....	46
3.4.1.	Περιγραφή πειραματικής διαδικασίας.....	46
3.4.2.	Φωτογραφίες δοκιμών φόρτισης κύβων.....	46
3.4.3.	Σύνοψη αποτελεσμάτων και αξιολόγηση.....	51
3.5.	Δοκιμές θλίψης σε πρίσματα .....	52
3.5.1.	Περιγραφή πειραματικής διαδικασίας.....	52
3.5.2.	Καταγραφή ακουστικής εκπομπής.....	52
3.5.3.	Φωτογραφίες δοκιμών φόρτισης πρισμάτων.....	55
3.5.4.	Πρίσμα #1 .....	58
3.5.5.	Πρίσμα #2.....	59
3.5.6.	Πρίσμα #3.....	59
3.5.7.	Πρίσμα #4.....	60
3.5.8.	Σύνοψη αποτελεσμάτων και αξιολόγηση.....	61

**4. ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΚΑΙ ΔΟΚΙΜΕΣ ΣΕ ΦΥΣΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΜΕ ΟΠΕΣ..... 62**

4.1.	Διαδικασία κατασκευής φυσικών δοκιμίων με ανοίγματα .....	62
4.2.	Φυσικό μοντέλο #1 με κυκλικό άνοιγμα .....	65
4.3.	Φυσικό μοντέλο #2 με κυκλικό άνοιγμα .....	74
4.4.	Φυσικό μοντέλο #3 με κυκλικό άνοιγμα .....	80
4.5.	Φυσικό μοντέλο #4 με κυκλικό άνοιγμα .....	87
4.6.	Φυσικό μοντέλο #5 με κυκλικό άνοιγμα .....	91

4.7.	Φυσικό μοντέλο #6 με κυκλικό άνοιγμα .....	95
4.8.	Φυσικό μοντέλο #1 με τετραγωνικό άνοιγμα .....	101
4.9.	Φυσικό μοντέλο #2 με τετραγωνικό άνοιγμα .....	105
4.10.	Φυσικό μοντέλο #3 με τετραγωνικό άνοιγμα .....	109
4.11.	Φυσικό μοντέλο #4 με τετραγωνικό άνοιγμα .....	119
<b>5.</b>	<b>ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....</b>	<b>127</b>
	<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ.....</b>	<b>129</b>

## **1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

### **1.1. Φυσικά μοντέλα στη μηχανική πετρωμάτων**

Τα φυσικά μοντέλα στη μηχανική πετρωμάτων χρησιμοποιούνται σε δύο περιπτώσεις (STIMPSON 1970). Στην πρώτη περίπτωση σχεδιάζεται ένα απλό μοντέλο από κοινά υλικά με σκοπό την επίτευξη γεωμετρικής ομοιότητας, που παρέχει χρήσιμες πληροφορίες μόνο ποιοτικής φύσης. Για παράδειγμα το μοντέλο του Trollope (1966) με τραπεζοειδές άνοιγμα και με ογκοτεμαχισμένο υλικό, μπορεί να κατασκευαστεί από κόκκους ζάχαρης και αποδεικνύει τη συμβολή της συμπεριφοράς χαμηλού θόλου (Σοφιανός 2012) στη σταθεροποίηση της οροφής.

Στη δεύτερη περίπτωση σχεδιάζεται ένα φυσικό μοντέλο στο οποίο ικανοποιούνται συνθήκες ομοιότητας μέσω του οποίου λαμβάνονται περισσότερο ποσοτικές πληροφορίες. Πρακτικά δύσκολα επιτυγχάνουμε τέτοιες συνθήκες ομοιότητας, αλλά είναι δυνατό να επιτευχθεί σχετική ακρίβεια, η οποία μπορεί να συμβάλλει στη λύση προβλημάτων της μηχανικής πετρωμάτων. Η αξία τέτοιων ποσοτικών μοντέλων διαφέρει από έρευνα σε έρευνα και γενικά τα φυσικά μοντέλα δεν έχουν την ίδια συνεισφορά ως εργαλεία σχεδιασμού για παράδειγμα όπως στην υδραυλική, στην υδροδυναμική και στην αεροδυναμική. Όμως είναι γεγονός ότι έχουν συνεισφέρει σημαντικά στη διερεύνηση των βασικών αρχών της μηχανικής πετρωμάτων.

Παρόλη την ανάπτυξη εξελιγμένων τεχνικών αριθμητικής ανάλυσης υπάρχουν ακόμη περιοχές της μηχανικής συμπεριφοράς των πετρωμάτων, που δεν είναι δυνατόν να εξεταστούν ρεαλιστικά με τις υπάρχουσες μαθηματικές τεχνικές. Αυτές οι ικανότητες των αριθμητικών μεθόδων αναμφισβήτητα θα επεκταθούν, αλλά κατά τη διάρκεια της φάσης της ανάπτυξης τα φυσικά μοντέλα ίσως είναι απαραίτητα για να επιβεβαιώσουν τις εκτιμήσεις της μαθηματικής ανάλυσης.

### **1.2. Φυσικά μοντέλα υπογείων εκσκαφών σε πετρώματα**

#### **1.2.1. Γενικά**

Η ανάπτυξη των ρωγμών γύρω από μία οπή εξετάζεται μέσω φυσικών μοντέλων από τον Carter (1991, 1992). Κατά την μονοαξονική θλίψη η θραύση εξελίσσεται από αρχικές εφελκυστικές ρωγμές (primary fractures), σε ρωγμές σε τμήματα του φυσικού μοντέλου



που είναι μακριά από την οπή (remote fractures), και στην αποφλοιώση στη θλιβόμενη ζώνη στα τοιχώματα της οπής (slabbing). Υπάρχει ένα ευρύ μεσοδιάστημα κατά το οποίο το μόνο γεγονός που συμβαίνει είναι μία σταθερή διάδοση της αρχικής ρωγμής. Όταν το μήκος της ρωγμής γίνει ίσο με τη διάμετρο της οπής, η κρίσιμη εντατική κατάσταση μετατοπίζεται εκατέρωθεν της αρχικής ρωγμής, προκαλώντας έτσι την ανάπτυξη των απομονωμένων ρωγμών και σχεδόν στιγμιαία ακολουθεί η θλιπτική αστοχία με αποφλοιώση. Με την αύξηση της έντασης οι ρωγμές της απομονωμένης περιοχής αναπτύσσονται κατά μήκος του εντατικού πεδίου και ενώνονται με τη θλιβόμενη ζώνη. Αύξηση της πλευρικής τάσης προκαλεί μείωση του μεσοδιαστήματος, κατά το οποίο η μόνη διαδικασία είναι η ανάπτυξη της αρχικής ρωγμής, και τη μετατόπιση της αστοχίας στην απομονωμένη και στην θλιβόμενη ζώνη.

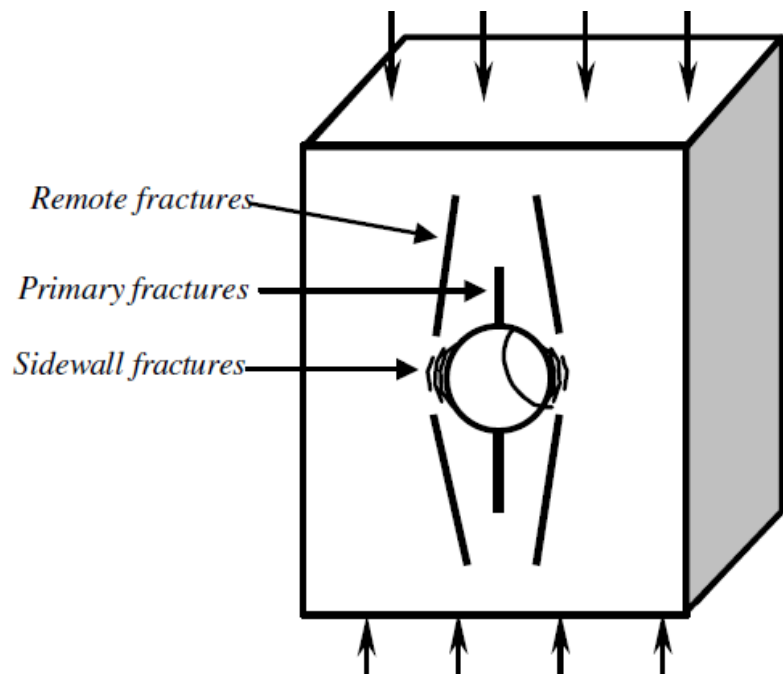
### **1.2.2. Πειραματικές παρατηρήσεις**

Η θραύση του πετρώματος γύρω από υπόγειες εκσκαφές έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον για τη μηχανική των πετρωμάτων. Οι παρατηρούμενες αστοχίες μπορεί να είναι εμφανείς με διάφορους βαθμούς έντασης, ξεκινώντας από αβλαβείς αποφλοιώσεις στη περίμετρο της εκσκαφής έως τις βίαιες εκτινάξεις πετρώματος γνωστές ως rock bursts. Γενικά, παρά το γεγονός ότι τέτοιες αστοχίες είναι συνήθεις, υπάρχουν λίγες πληροφορίες για τη γεωμετρία, τους μηχανισμούς και τις εντατικές καταστάσεις που συμβαίνουν κατά την αστοχία ενός πετρώματος σε μεγάλη κλίμακα. Αντιθέτως σε απλές εργαστηριακές δοκιμές η ανάπτυξη των αστοχιών στα φυσικά μοντέλα με ανοίγματα είναι σχετικά γνωστές. Κατά τη μονοαξονική θλίψη ή την αξονική θλίψη με σχετικά χαμηλή πλευρική πίεση ένα φυσικό μοντέλο με κυκλικό άνοιγμα θα παρουσιάσει γενικά θραύσεις, που εμφανίζονται σταδιακά, και περιλαμβάνουν (Carter 1991):

1. Αρχικές εφελκυστικές ρωγμές (Primary fractures, P).
2. Δευτερεύουσες ρωγμές ή ρωγμές σε απομονωμένα τμήματα (Remote fractures, R).
3. Αποφλοιώσεις στη θλιβόμενη ζώνη (Slabbing, S).

Οι εφελκυστικές ρωγμές έχουν αναγνωριστεί από παλιά, αφού σχηματίζονται σε προβλέψιμες μονοαξονικές εφελκυστικές τάσεις. Παρομοίως η αστοχία στη θλιβόμενη ζώνη του πετρώματος στην περίμετρο του τοιχώματος είναι αναμενόμενη από την παρουσία του υψηλού εντατικού πεδίου. Η παρουσία των δευτερευουσών αστοχιών δεν

είναι εμφανής στις υπόγειες εκσκαφές, επειδή αναπτύσσονται μακριά από το άνοιγμα και έχει αποδεχθεί μόνο μέσω των δοκιμών θλίψης των φυσικών μοντέλων.



Σχήμα 1.1. Ρωγμές που αναπτύσσονται γύρω από μία κυκλική οπή σε φυσικό μοντέλο πετρώματος υπό μονοαξονική θλίψη (πηγή: Klerck et al. 2004)

Χρησιμοποιώντας την τεχνική της φωτοελαστικής ανάλυσης, ο Hoek (1964) εντόπισε ως αιτία ανάπτυξης απομονωμένων αστοχιών την εφελκυστική τάση, η οποία αναπτύσσεται μακριά από το άνοιγμα καθώς σε αυτό αναπτύσσονται πλήρως οι εφελκυστικές ρωγμές. Η εφελκυστική ρωγμή σε αυτό το απομονωμένο σημείο μπορεί να γίνει αρκετά μεγάλη ώστε να μετατραπεί σταθερά σε εφελκυστική αστοχία.

Ο Ingraffea (1977) ανέλυσε τα αποτελέσματα του Hoek (1964) με αριθμητική προσομοίωση με πεπερασμένα στοιχεία, χρησιμοποιώντας γραμμικά ελαστική θραυστομηχανική (LEFM), και έδειξε ότι η εφελκυστική τάση που δημιουργείται στην απομονωμένη ζώνη προκαλεί ρωγμές. Χρησιμοποιώντας γύψινα μοντέλα ο Lajtai (1975) απέδειξε ότι οι ρωγμές αυτές συνδυάζονται με την εξέλιξη της θραύσης στη θλιβόμενη ζώνη προκαλώντας έτσι την κατάρρευση της κοιλότητας.

Ο Carter (1991) εκτέλεσε μονοαξονικές δοκιμές θλίψης σε φυσικά μοντέλα πετρώματος με οπή ύστερα από την παρατήρηση ρωγμών γύρω από το καταρρέον υπόγειο ορυχείο στη

Vanscoy, Sakatchwan. Πολλά από τα ορυχεία στην περιοχή αυτή λειτουργούσαν κάτω από συνθήκες πίεσης, που είναι ικανή να προκαλέσει αποφλοιώσεις και εκτεταμένες ρωγμές στους στύλους. Η επανεκσκαφή παλαιότερων εγκαταλελειμμένων και καταρρεόντων τμημάτων του ορυχείου φανέρωσε ρωγμές μέσα και γύρω από τους στύλους, ενώ πολλές από τις ρωγμές είχαν σχηματιστεί μακριά από το άνοιγμα.

Δοκιμές σε φυσικά μοντέλα για την επίδραση των οπών στην αντοχή των πετρωμάτων και άλλων υλικών εκτελούνται από παλιά. Κατά τον Carter (1991), το πρόβλημα σχετίζεται με δύο διαφορετικές περιοχές ενδιαφέροντος.

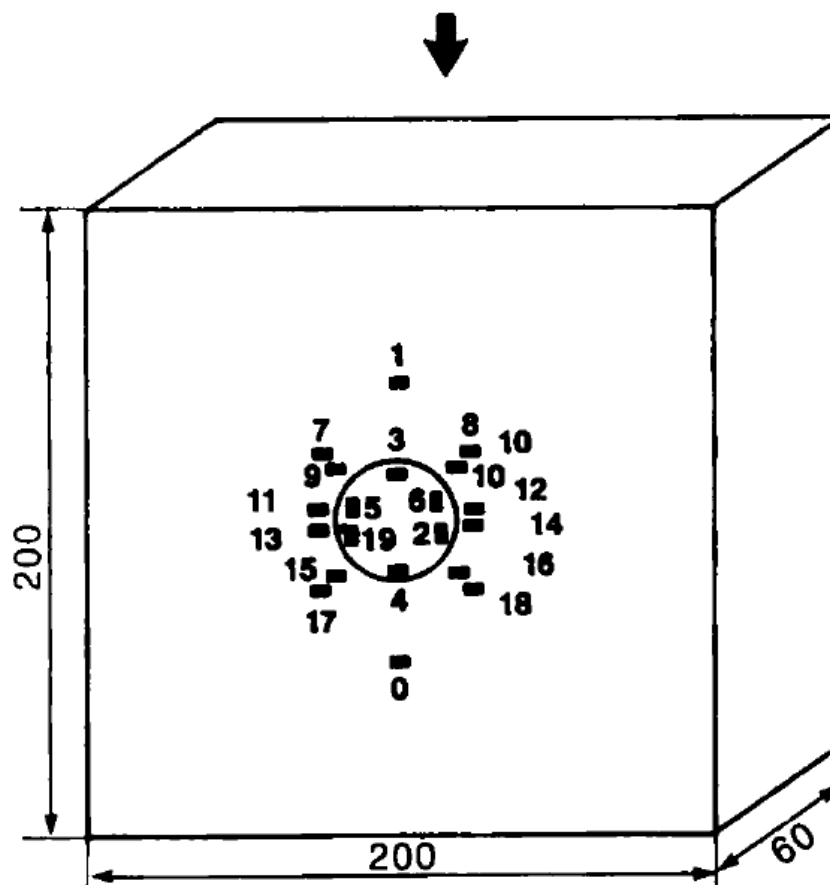
1. Στην ψαθυρή θραύση των πετρωμάτων, όπου ατέλειες στη δομή του πετρώματος σε μικροσκοπική κλίμακα υπό μορφής επιμήκους ρωγμής θεωρείται ότι προκαλούν τοπική συγκέντρωση τάσης και αιτία ανάπτυξης νέων ρωγμών που συνενώνονται κατά τη φόρτιση.
2. Σε εκσκαφές ορυχείων ή σηράγγων (μακροσκοπικά), όπου τα υπόγεια ανοίγματα προκαλούν συγκέντρωση τάσεων στην περιβάλλουσα μάζα του πετρώματος, η οποία με τη σειρά της περιέχει ατέλειες δομής σε μακροσκοπική κλίμακα (κενά, ασυνέχειες).

Οι μικροσκοπικοί και μακροσκοπικοί μηχανισμοί των ρωγμών και στις δύο κλίμακες αξιολογούνται μέσω φυσικών μοντέλων τα οποία μπορούν να θεωρηθούν ως μακροσκοπικού μεγέθους. Το συμπέρασμα των δοκιμών προκύπτει θεωρητικά αφού ληφθούν υπόψη οι εντατικές βαθμίδες που προκαλούνται από την μεταβολή του μεγέθους και την ανάλογη σχετική επίδραση της τάσης.

Πρέπει να σημειωθεί ότι τα αποτελέσματα των φυσικών μοντέλων εξηγούνται διαφορετικά στις παραπάνω δύο περιοχές ενδιαφέροντος. Στην πρώτη οι περισσότεροι ερευνητές αγνοούν την αστοχία από τις ρωγμές στην θλιβόμενη ζώνη, ενώ λίγοι αναγνωρίζουν την επιρροή των απομονωμένων ρωγμών (π.χ. ο Lajtai). Στα ανοίγματα των ορυχείων ή των σηράγγων, οι αρχικές εφελκυστικές ρωγμές είναι σπάνιες, λόγω του περιορισμού στη περιοχή που αυτές αναπτύσσονται. Επίσης, στην κλίμακα των ορυχείων οι απομονωμένες ρωγματώσεις δεν είναι ιδιαίτερα γνωστές, αφού σπανίως εμφανίζονται στη περίμετρο της κοιλότητας. Έτσι, το ενδιαφέρον εστιάζεται κυρίως στην αστοχία της θλιβόμενης ζώνης.

### 1.2.3. Τα πειράματα του Carter (1991, 1992)

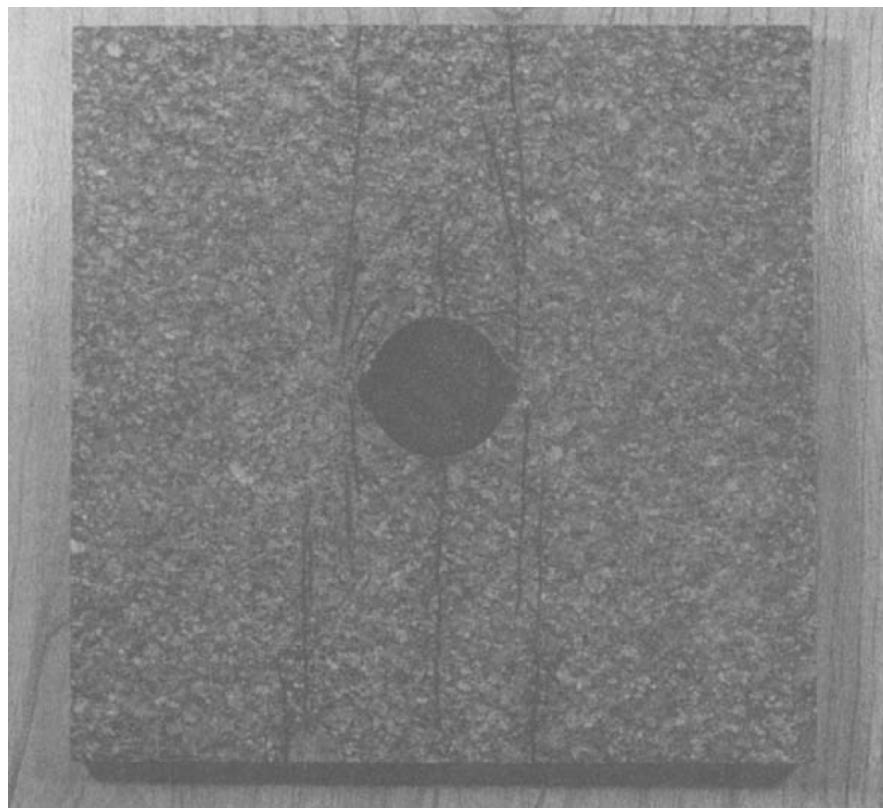
Το πρώτο πείραμα του Carter (1991) είχε σαν στόχο την ποσοτική συλλογή δεδομένων κατά την εξέλιξη των αρχικών ρωγμών, των απομονωμένων ρωγμών και των ρωγμών στη θλιβόμενη ζώνη. Κατασκεύασε δοκίμιο από γρανίτη διαστάσεων 200\*200\*60 mm με διάμετρο κυκλικού ανοίγματος 36 mm στο κέντρο. Τοποθέτησε 19 τροπόμετρα ηλεκτρικής αντίστασης (strain gauges), με 5 mm μήκος του ενεργού στοιχείου μέτρησης, στην περιφέρεια του ανοίγματος και στην επιφάνεια του δοκιμίου στις θέσεις που αναμένονταν (σύμφωνα με προηγούμενες δοκιμές) η δημιουργία των αρχικών, απομονωμένων και θλιπτικών ρωγμών. Το φυσικό μοντέλο τοποθετήθηκε σε πλαίσιο δυναμικότητας 2500 kN με σκοπό να φορτιστεί στα 157 MPa. Η θλιπτική αντοχή του παραπάνω γρανίτη είναι στα 226 MPa όμως η διαδικασία φόρτισης διακόπηκε στα 157MPa, φορτίο κατά το οποίο είχαν σχηματιστεί και τα 3 είδη ρωγμών, ώστε να παρατηρηθούν οι ρωγματώσεις χωρίς να καταστραφεί το δοκίμιο.



Σχήμα 1.2. Σκαρίφημα από το δοκίμιο γρανίτη που χρησιμοποίησε ο Carter στις δοκιμές του, με τα τροπόμετρα (strain gauges) τοποθετημένα. Τα τροπόμετρα που εμφανίζονται στο εσωτερικό της κυκλικής οπής κολλήθηκαν στο εσωτερικό τοίχωμα. Η φόρτιση ήταν σε μονοαξονική θλίψη (πηγή: Carter 1991)

Τα τροπόμετρα τοποθετήθηκαν στρατηγικά ώστε να στέλνουν σήματα κατά τη διάρκεια ενεργοποίησης των 3 ρωγμών. Μία ρωγμή που σχηματίζεται στην περιοχή που είναι τοποθετημένο ένα τροπόμετρο προκαλεί εκτροπή της καμπύλης φορτίου-τροπής από την ευθυγραμμία. Επίσης μία ρωγμή που διασχίζει το τροπόμετρο παρουσιάζει ραγδαία αύξηση της εφελκυστικής τροπής. Αντίθετα μία ρωγμή που πλησιάζει και στη συνέχεια παρακάμπτει το τροπόμετρο οδηγεί στην μείωση της μετρούμενης τροπής. Οι μετρητές που τοποθετούνται στη θλιβόμενη ζώνη δε φαίνονται να αντιδρούν στις αρχικές ρωγμές και στις ρωγμές των απομονωμένων περιοχών. Στέλνουν σήματα μόνο από την αύξηση της πίεσης στη θλιβόμενη ζώνη και στη συνέχεια από τη μείωση της θλιπτικής τροπής καθώς το θραυσμένο πέτρωμα αποχωρίζεται από το τοίχωμα.

Η δημιουργία των ρωγμών στο πείραμα εξελίχθηκε όπως αναμενόταν.



Σχήμα 1.3. Φωτογραφία του δοκιμίου γρανίτη, από το πείραμα του Carter, μετά το τέλος της δοκιμής, όπου παρατηρούνται οι ρωγμές που αναπτύχθηκαν. (πηγή: Carter 1991)

Οι αρχικές εφελκυστικές ρωγμές σχηματίστηκαν στα 16 MPa, τάση που είναι 2 MPa μεγαλύτερη από την εφελκυστική αντοχή του γρανίτη όπως προκύπτει από σε δοκιμές Brazilian. Στα 135 MPa οι αρχικές ρωγμές διαδόθηκαν περίπου κατά 43 mm, ενώ επεκτάθηκαν κατά 4 ακόμη mm μέχρι το τέλος του πειράματος στα 157 MPa. Οι

απομονωμένες ρωγμές εμφανίστηκαν στα 119 MPa. Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό των απομονωμένων ρωγμών είναι το γεγονός ότι δεν είναι ενιαίες ρωγμές, αλλά αποτελούν μία ζώνη ρωγμάτωσης με ένα σύνολο παράλληλων ρωγμών. Συγκεκριμένα μοιάζουν πολύ με την αξονική κατάκλαση που παρατηρούνται στα απλά κυλινδρικά δοκίμια που δοκιμάζονται σε μονοαξονική και τριαξονική θλίψη.

Η αστοχία στη θλιβόμενη ζώνη εμφανίστηκε με αποφλοιώσεις στα 126 MPa. Από το παραπάνω πείραμα παρατηρήθηκε ότι στο τελευταίο στάδιο ανάμεσα στα 140 – 157 MPa οι απομονωμένες ρωγμές ενώθηκαν με τις ρωγμές της συμπιεστικής ζώνης.

Σε επόμενο πείραμα, ο CARTER (1992), για τη μελέτη της επίδρασης του μεγέθους και της εντατικής βαθμίδας στη θραύση γύρω από κυκλικά ανοίγματα, χρησιμοποίησε δοκίμια μεγέθους έως 750\*500\*100 mm. Κάθε δοκίμιο είχε κυκλικό άνοιγμα, ενώ το μέγεθός τους μεταβαλλόταν έτσι ώστε το πλάτος του να είναι τουλάχιστον 10 φορές μεγαλύτερο από τη διάμετρο του ανοίγματος. Σε κάθε δοκίμιο τοποθετήθηκαν τροπόμετρα (strain gauges) με τέτοιο τρόπο ώστε να εντοπίζουν τις αρχικές, τις δευτερεύουσες και τις ρωγμές της θλιβόμενης ζώνης. Η μονοαξονική δοκιμή έγινε σε πλαίσιο δυναμικότητας 5000 kN, ενώ ο ρυθμός φόρτισης μεταβαλλόταν ώστε να γίνεται οπτική εξέταση των φαινομένων. Στα 150 kN εμφανίζονταν και τα 3 είδη των ρωγματώσεων χωρίς την πρόκληση θραύσης των μοντέλων. Σε αυτό το πείραμα αυτά δοκιμάστηκαν διαφορετικοί τύπου συνοριακών συνθηκών και αποδείχτηκε ότι οι συνοριακές συνθήκες επέδρασαν ελάχιστα σε σχέση με το μέγεθος.

Ο σχηματισμός της πρώτης ρωγμής εντοπίστηκε από τα τροπόμετρα που τοποθετήθηκαν στις απομονωμένες περιοχές του δοκιμίου. Όσον αφορά την αρχική ρωγή και τις αποφλοιώσεις, η ρωγή ξεκίνησε από την περίμετρο του ανοίγματος. Για μεγαλύτερα ανοίγματα ( $R > 20$  mm) είναι δυνατό να επιτευχθεί η τοποθέτηση τροπόμετρου στο εσωτερικό του ανοίγματος. Για μικρότερα ανοίγματα, το σημείο ενεργοποίησης εντοπίστηκε από τον πρώτο αισθητήρα πάνω από την περίμετρο του κύκλου.

Η τάση έναρξης ρωγμάτωσης, για όλους τους τύπους των ρωγμών, ήταν αντιστρόφως ανάλογη με το μέγεθος της οπής. Μετά από την ενεργοποίηση, η μετάδοση της αρχικής ρωγμής ως αποτέλεσμα της αύξησης της μονοαξονικής φόρτισης ήταν εμφανής οπτικά και ακολουθούσε την αρχική διαδρομή. Όσον αφορά τα μεγάλα ανοίγματα το εσωτερικό strain gauge αποκαλύπτει το σημείο ενεργοποίησης από την εκτροπή της καμπύλης τάσης-τροπής από την ευθυγραμμία. Λόγω της γραμμικά ελαστικής συμπεριφορά του

πετρώματος σε αυτό το εύρος τάσεων, η εκτροπή της καμπύλης θα μπορούσε να προκαλείται μόνο από την έναρξη μιας ρωγμής. Για τους εξωτερικούς αισθητήρες η ερμηνεία είναι πιο δύσκολη. Γενικά όλα τα strain gauges που βρίσκονται κοντά στη περιοχή της έναρξης θα δώσουν σημάδια διαταραχής. Για το κυκλικό άνοιγμα 10 mm όλοι οι αισθητήρες έδειξαν σημάδια στιγμιαίας ενεργοποίησης. Η άφιξη του άκρου της ρωγμής σηματοδοτείται επίσης από την παρατηρούμενη απόκλιση από την ευθυγραμμία στην καμπύλη φορτίου-τροπής, ύστερα από μία περίοδο συνεχιζόμενης ελαστικής παραμόρφωσης.

Συμπερασματικά, ο Carter (1992) αναφέρει ότι αποδείχθηκε η ύπαρξη και των τριών κατηγοριών ρωγμών, που έχουν αναφερθεί παραπάνω. Δεν είναι απαραίτητο να σχηματιστούν και οι τρεις, ενώ η δημιουργία τους εξαρτάται από τις συνθήκες φόρτισης και από το μέγεθος του ανοίγματος. Επίσης η μετάδοση των αρχικών εφελκυστικών ρωγμών σε ένα κυκλικό άνοιγμα εξαρτάται από το μέγεθος του ανοίγματος. Η συνολική τάση της επέκτασης της ρωγμής είναι σταθερή για μικρές κοιλότητες ( $R < 20\text{mm}$ ) και ασταθής για μεγάλες κοιλότητες ( $R > 40\text{mm}$ ). Για μεσαία μεγέθη παρατηρείται μια μεταβατική συμπεριφορά, ενώ για πολύ μικρά ανοίγματα ( $R < 3\text{mm}$ ) δεν αναπτύσσονται εφελκυστικές ρωγμές, αλλά μόνο ρωγμές στις απομονωμένες περιοχές.

### **1.3. Αντικείμενο της παρούσας εργασίας**

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται το αντικείμενο της ρωγμάτωσης που παρατηρείται γύρω από οπές σε φυσικά μοντέλα κατασκευασμένα από ένα υλικό που χρησιμοποιείται συχνά σε φυσικά μοντέλα μηχανικής πετρωμάτων, το τσιμεντένεμα. Παρατηρείται η εξέλιξη της ρωγμάτωσης που συντελείται κατά την μονοαξονική φόρτιση φυσικών μοντέλων τσιμεντένεματος για προσομοίωση υπόγειων εκσκαφών. Από την βιβλιογραφία προκύπτει ότι για τέτοιου είδους μοντέλα είναι προτιμότερο τα συστατικά σύνθεσης να είναι κοκκώδη. Για αυτό το λόγο τα φυσικά μοντέλα κατασκευάστηκαν από τσιμεντένεμα, το οποίο χρησιμοποιείται ευρέως σε φυσικά μοντέλα που σχετίζονται με προβλήματα της μηχανικής πετρωμάτων.

Αρχικά γίνεται μία εισαγωγή με βιβλιογραφική αναφορά στα φυσικά μοντέλα του Carter (1991, 1992), ο οποίος μελέτησε την ανάπτυξη των ρωγμών γύρω από κυκλικές οπές. Παρουσιάζονται τα πειράματα αυτά καθώς και τα συμπεράσματα που προέκυψαν, όπως η επίδραση του μεγέθους και του σχήματος της διατομής.

Στη συνέχεια, στο κεφάλαιο 2, γίνεται εκτενής αναφορά στα υλικά προσομοίωσης του πετρώματος σε φυσικά μοντέλα, και στην κατηγοριοποίησή τους. Η περιγραφή των υλικών προσομοίωσης της συμπεριφοράς του πετρώματος στο εργαστήριο ακολουθεί την ανάλυση του Stimpson που δημοσιεύθηκε στο περιοδικό *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* το 1970.

Στο κεφάλαιο 3, παρουσιάζεται η σύνθεση, η διαδικασία παρασκευής και ο χαρακτηρισμός από πλευράς αντοχής των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν για να κατασκευαστούν τα δοκίμια φυσικών μοντέλων που δοκιμάστηκαν σε μονοαξονική θλίψη. Πραγματοποιήθηκαν δύο κατηγορίες πειραμάτων. Σε πρώτη φάση εκτελούνται δοκιμές μονοαξονικής θλίψης σε κύβους με διαφορετικό χρόνο ωρίμανσης και συγκρίνονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν. Στο δεύτερο τμήμα δοκιμάζονται πρίσματα διαφορετικού μεγέθους, αλλά ίδιου χρόνου ωρίμανσης, σε μονοαξονική θλίψη. Αυτό το πείραμα συνδυάζεται με τη χρήση της ακουστικής εκπομπής για αναλυτικότερα αποτελέσματα.

Στο κεφάλαιο 4, οι δοκιμές μονοαξονικής θλίψης επικεντρώνονται σε φυσικά μοντέλα με κυκλικές και τετραγωνικές οπές, οι οποίες δημιουργήθηκαν με αφαίρεση ενός κυλινδρικού και τετραγωνικού μέσου αντίστοιχα. Κατά την αφαίρεση αυτών των μέσων σχηματίστηκαν μικρορωγματώσεις, που μπορεί να επηρέασαν την αντοχή των φυσικών μοντέλων σε μικρό βαθμό, αλλά δεν επηρέασαν την παρατήρηση των εξελίξεων που συμβαίνουν κατά τη μονοαξονική φόρτισή τους. Εκτός της πρώτης πειραματικής δοκιμής, χρησιμοποιήθηκε η τεχνική της ακουστικής εκπομπής για λεπτομερέστερη παρατήρηση των γεγονότων που συμβαίνουν κατά την φόρτιση. Το πλεονέκτημα της ακουστικής εκπομπής είναι ότι στέλνει σήματα κατά τη δημιουργία των ρωγματώσεων που συντελούνται πριν γίνουν ορατά. Η επεξεργασία των δεδομένων της ακουστικής εκπομπής που προέκυψαν από τα πειράματα πραγματοποιήθηκε με το υπολογιστικό πρόγραμμα Noesis. Τα δεδομένα είναι χρονικά συγχρονισμένα με την βιντεοσκόπηση, που έγινε σε κάθε φυσικό μοντέλο.

Τέλος, στο κεφάλαιο 5 παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την πειραματική διαδικασία.



## **2. ΥΛΙΚΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΤΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΟΥ ΠΕΤΡΩΜΑΤΟΣ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ**

Η ακόλουθη περιγραφή των υλικών προσομοίωσης της συμπεριφοράς του πετρώματος στο εργαστήριο ακολουθεί την ανάλυση του Stimpson που δημοσιεύθηκε στο περιοδικό International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences το 1970.

### **2.1. Κατηγοριοποίηση των υλικών μοντελοποίησης του πετρώματος**

Στην προσπάθεια να κατηγοριοποιήσει τα φυσικά μοντέλα, ο Stimpson (1966) ανέπτυξε ένα απλό σχέδιο, το οποίο υποδεικνύει τις ευρείες διαφορές στη φυσική συμπεριφορά, στην κατασκευή και στην κατεργασιμότητα. Έτσι υποδεικνύονται προβλήματα, τα οποία μπορεί να συμβούν στην οργάνωση των υλικών για μεταγενέστερη αποτίμηση.

Εάν συμπεριληφθούν όλες οι παράμετροι και οι μεταβλητές που θεωρούνται σε ένα δεδομένο πρόβλημα, τότε συχνά οδηγούμαστε σε ένα πολύπλοκο σύνολο συνθηκών ομοιότητας. Συνήθως η επιτυχία ενός φυσικού μοντέλου καθορίζεται ανάλογα με το εάν η πιο κρίσιμη παράμετρος εμφανίζει επαρκή ομοιότητα με το φυσικό πρόβλημα. Για παράδειγμα σε ένα μοντέλο υπόγειου ανοίγματος στο οποίο μελετάται η αστοχία του ανοίγματος, η προσομοίωση συχνά βασίζεται στη μονοαξονική αντοχή σε θλίψη ή σε εφελκυσμό ή στη διατμητική αντοχή των υλικών. Γενικά δεν υπάρχει επαρκής θεωρητική βάση για αυτές τις απλοποιήσεις, αν και ο Franklin (1968) έδειξε εμπειρικά ότι μια επιλογή βασισμένη στη μονοαξονική θλιπτική αντοχή θα ικανοποιήσει σε μεγάλο βαθμό τις συνθήκες ομοιότητας κατά την τριαξονική θλίψη, στην ψαθυρή περιοχή. Η ταξινόμηση των υλικών θα μπορούσε επίσης να βασιστεί σε παραμέτρους που έχουν ταξινομηθεί στη βιβλιογραφία.

Η γνώση των τελευταίων χρόνων πάνω στους βραχώδεις σχηματισμούς και σε παρόμοια υλικά κατά την παραμόρφωση του υλικού σε θλίψη καταδεικνύει τη σημασία της διασταλτικότητας. Αυτή είναι πιο εμφανής στα υλικά με κοκκώδη δομή. Έτσι αντί να τα κατηγοριοποιήσουμε με βάση την αντοχή ή την παραμορφωσιμότητα, τα διαχωρίζουμε σε κοκκώδη και σε μη κοκκώδη, όπως φαίνεται και στον Πίνακα 2.1.

Γενικά αυτή η πρώτη υποδιαίρεση υποδεικνύει μερική απόκλιση στις ιδιότητες αν και μπορούν να ληφθούν ειδικές εξαιρέσεις. Για παράδειγμα μία κοκκώδης δομή δεν είναι απαραίτητη και επαρκής συνθήκη για ύπαρξη διασταλτικότητας. Έτσι είναι πιθανό ένα

μίγμα άμμου-εποξειδικής ρητίνης, στην οποία η τσιμεντώση είναι ισχυρή, σε συνθήκες μονοαξονικής θλίψης να μπορούσε να διασταλεί μόνο πολύ κοντά στην αντοχή του. Παρ'όλα αυτά μία λεπτομερή κατηγοριοποίηση, που συμπεριλαμβάνει όλα τα διαφορετικά στοιχεία, θα ήταν αναίτια υπερβολική και μη πρακτική.

Πίνακας 2.1. Απλουστευμένη κατηγοριοποίηση υλικών προσομοίωσης του πετρώματος σε κοκκώδη και μη-κοκκώδη (Stimpson 1970).

Κοκκώδη	Τσιμεντωμένα	Με γύψο	
		Με τσιμέντο	
		Με κερί	
		Με ρητίνη	
		Με άργιλο (πηλό)	
	Μη τσιμεντωμένα		
Μη κοκκώδη	Πλαστικά	Με πλαστικό μόνο	
		Με πλαστικό	
	Μη πλαστικά	Μεταλλικά	
		Μη μεταλλικά	Ψαθυρά
			Μη Ψαθυρά

Στην παραπάνω κατηγοριοποίηση, ως «πλαστικά» θεωρούνται τα υλικά με συνθετικά οργανικά συστατικά, και ως «ψαθυρά» τα υλικά που αστοχούν σε θραύση με μικρή ή καθόλου παραμένουσα παραμόρφωση, όπως ορίζεται από τον Stimpson (1970) με αναφορά στον Bieniawski (1967).

Προφανώς μία τόσο απλή κατηγοριοποίηση δε μπορεί να είναι τελείως συνεκτική και συνεπής, λόγω της τεράστιας ποικιλίας των υλικών που περιλαμβάνει, αλλά είναι μία χρήσιμη βάση για τη θεώρηση των υλικών που αναλύονται παρακάτω.

## 2.2. Ιδιότητες

Με την ποικιλία των συστατικών που είναι κατηγοριοποιημένες στον Πίνακα 2.1 δεν είναι πρακτικό να συμπεριλαμβάνεται με κάθε λεπτομέρεια η συμπεριφορά του υλικού, η μέθοδος παραγωγής του κτλ. Δεδομένα για ορισμένα κοκκώδη υλικά παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.2

Πίνακας 2.2. Μηχανικές ιδιότητες για ορισμένα κοκκώδη υλικά προσομοίωσης του πετρώματος από τη διεθνή βιβλιογραφία (Stimpson 1970).

	$\sigma_c$ (MPa)	E (GPa)	$\sigma_t$ (MPa)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	N	$\epsilon_{ult}$	$\sigma_c/\sigma_t$
Τσιμεντωμένα με γύψο							
Με άμμο	4.6-8.5	0.7-0.12	3.1-5.6	1378	-	0.8	1.4 -1.8
Με άμμο	3.9-9.8	0.5-1.23	2.7-5.4	1378		0.8	4
Με άμμο	19.3-45.5	-	1.4-2.4	-	-	0.42	11- 19
Με άμμο	13.8-41.4	-	1.6-4.6	-	0.2	0.25	8 -9
Τσιμεντωμένα με τσιμέντο							
Με άμμο	22.0	27.6	3.7	-	0.13	-	6
Με άμμο	19.3-62.1	-	2.8-5.7	2211- 2386	-	-	7-11

Η ποσότητα των πληροφοριών στη βιβλιογραφία για κάθε ξεχωριστό υλικό ποικίλλει ευρέως. Σε μερικές περιπτώσεις αναφέρεται μόνο το υλικό που χρησιμοποιήθηκε, επειδή ορισμένα φυσικά δεδομένα απουσιάζουν από τη βιβλιογραφία.

## 2.3. Κοκκώδη

### 2.3.1. Με γύψο.

Αυτά τα υλικά χρησιμοποιούνται πιο συχνά στη προσομοίωση ιζηματογενών πετρωμάτων και του σκυροδέματος. Η εφαρμογή τέτοιων υλικών υιοθετήθηκε κυρίως για την απλοποιημένη παρασκευή τους, για το χαμηλό κόστος, για τις ευρείες ομοιότητες τους με το πρωτότυπο, αλλά όμως παρουσιάζει μειωμένη αντοχή και μεγαλύτερη παραμόρφωση σε σχέση με το πρωτότυπο υλικό.

Επιπλέον οι ιδιότητες μπορούν να ποικίλουν ανάλογα με τα διαφορετικά κοκκώδη στοιχεία που μπορούμε να προσθέσουμε, από το είδος του γύψου που θα χρησιμοποιήσουμε και από την μέθοδο παραγωγής και επεξεργασίας που θα

ακολουθήσουμε. Από τα παραπάνω στοιχεία είναι δύσκολο να αποφανθούμε γενικά για τη μηχανική συμπεριφορά του μοντέλου που θα προκύψει.

Η προσθήκη άμμου αυξάνει το μέτρο ελαστικότητας, αλλά έχει μία μικρή επίδραση στο λόγο Poisson. Επίσης η επίδρασή της στη μονοαξονική εφελκυστική και θλιπτική αντοχή εξαρτάται από την περιεκτικότητα του υλικού σε άμμο. Αναφέρονται τιμές του λόγου θλιπτικής προς εφελκυστική αντοχή μεταξύ 11-19, χρησιμοποιώντας οδοντικό γύψο, αλλά γενικά οι τιμές του λόγου περιορίζονται μεταξύ 2 και 8.

Το μέτρο ελαστικότητας μπορεί να υπερβεί τα 17 GPa ενώ συνήθως δεν είναι λιγότερο από 300 MPa και η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη κυμαίνεται από 27-45 MPa. Τα περισσότερα από αυτά τα υλικά παρουσιάζουν μη γραμμικές καμπύλες τάσης-τροπής υπό θλίψη.

Με προσθήκη χαλαζία το μίγμα είναι εξαιρετικά λειαντικό και απαιτεί ανθεκτικά στη λείανση υλικά για μηχανουργική επεξεργασία.

Σύμφωνα με τον Barton (1968) πυκνό μίγμα με μικρή αντοχή, με πηλό, με ερυθρό οξείδιο μολύβδου, άμμο και νερό, το οποίο το αφήνουμε να ωριμάσει στους 90 °C για 4 ημέρες, παρουσιάζει αντοχή σε μονοαξονική θλίψη χαμηλή έως και 1 MPa. Η οριακή μονοαξονική θλιπτική αξονική τροπή 0,35-0,45% είναι μεγαλύτερη από αυτή που επιτυγχάνεται από τα περισσότερα από τα ψαθυρά πετρώματα., αλλά αυτή μπορεί να περιοριστεί στο 0,28% με δόνηση του μίγματος για 1 λεπτό.

Ο Hobbs (1966) επίσης μείωσε την αντοχή σε μονοαξονική θλίψη και το μέτρο ελαστικότητας κατά 85% με ωρίμανση σε θερμοκρασία 90 °C. Παρόλα αυτά η συμπίεση των πιο παραμορφώσιμων μιγμάτων φτάνει σχεδόν το 7% στα 1,38 MPa.

Τα υλικά που έχουν καταγραφεί από τον Kuznetsov (1959) έχουν σχεδιαστεί για μοντέλα με κλίμακα μεγαλύτερη του 1 προς 40. Με προσθήκη μαρμαρυγία το υλικό γίνεται πιο αδύναμο, ενώ με προσθήκη κιμωλίας και αργίλου αυξάνεται η ψαθυρότητα, όμως η παρουσία της κιμωλίας μειώνει την κατεργασιμότητα. Η έρευνα πάνω σε αυτά τα μείγματα, περιλαμβάνει τη μελέτη της επίδρασης των επιβραδυντών, την προσθήκη ασβέστη, αλλαγές στη περιεκτικότητα της υγρασίας, στην συμπίεση και στη χειροκίνητη ανάμιξη.

Σημειώνοντας ότι τα μείγματα γύψου, νερού και γης διατομών αστοχούν σε μονοαξονική θλίψη όπως το σκυρόδεμα, οι Priest και Stieth (1963) δημιούργησαν ένα συγκριτικό

μοντέλο παρακολούθησης για ασπίδες φράγματος, χρησιμοποιώντας δύο είδη γύψων. Τα αποτελέσματα που υπολογίστηκαν για το μοντέλο γύψου, άμμου, νερού βρίσκονται πιο κοντά στα αποτελέσματα αναλυτικών υπολογισμών σε σχέση με αυτά του μοντέλου με βάση το γύψο, celite, νερό. Δεν αντιμετωπίστηκαν δυσκολίες με την άμμο, οι οποίες αποφεύχθηκαν με το συνεχές ανακάτεμα μέχρι η συνοχή του μείγματος είναι επαρκής για την αποφυγή του διαχωρισμού.

O Ramberg (1965) ανέπτυξε ένα χαμηλής αντοχής πυκνό υλικό για μοντέλα ορυχείων, με φυγοκέντρωση έως 3000 g. Παρ' όλα αυτά το μεγαλύτερο ενδιαφέρον του τίθεται στη φυγοκέντρωση τεκτονικών μοντέλων και άλλες σημαντικές ιδιότητες όπως το μέτρο ελαστικότητας, η μονοαξονική θλιπτική αντοχή και ο λόγος Poisson δεν υπολογίστηκαν.

O Ranganathan (1967) βρήκε ένα κονίαμα για την προσομοίωση σκυροδέματος χαμηλής προς μεσαίας αντοχής που παρουσίασε υψηλότερη οριακή αξονική τροπή.

O Roberts (1966) δημιούργησε μείγματα με γύψο, πριονίδι και νερό για μοντέλο λιγνιτικών στρωμάτων, τα οποία παρουσίασαν πλαστική ροή όταν προσέθετε παραπάνω ποσότητα νερού.

Oi Sabnis και White (1966) εντόπισαν μεγάλη ομοιότητα υλικών με γύψο, άμμο και νερό και του χαμηλής έως μεσαίας αντοχή σκυροδέματος. Όμως, σχετικά με την επίδραση της κλίμακας στην αντοχή, παρατήρησαν ότι όταν μετά την ωρίμανση σε 70% RH (σχετική υγρασία), η υγρασία διατηρήθηκε στο υλικό με επικάλυψη ρητίνης, οι αντοχές διατηρήθηκαν σταθερές για 4 ημέρες. Αυτό το σφράγισμα επηρέασε σημαντικά την σχέση αντοχής-μεγέθους. Με διάμετρο  $\frac{1}{2}$  in\*1 in μήκος κυλίνδρου το μοντέλο ήταν πιο ανθεκτικό κατά 50% σε μονοαξονική θλίψη από ένα μοντέλο ίδιου υλικού με διάμετρο 3 in\*6in μήκος κυλίνδρου, όταν και τα δύο παρέμειναν ασφράγιστα. Με τη σφράγιση των δειγμάτων περιορίστηκε η επίδραση του μεγέθους σε αμελητέα ποσοστά.

O Suacier (1967) πειραματίστηκε με έναν εμπορικό γύψο και με έναν υψηλής αντοχής γύψο. Τα πιο σημαντικά σημεία που προκύπτουν από τα δεδομένα του πειράματος είναι τα εξής.

- Η προσθήκη άμμου μειώνει το λόγο μέτρου ελαστικότητας προς αντοχή μεταξύ 90 ως 200 από 400 ως 550 για τον απλό γύψο με νερό και μειώνει επίσης την οριακή μονοαξονική τροπή κατά 76% από 0,25% σε 0,06%.

- Χαμηλές συγκεντρώσεις άμμου αυξάνουν την αντοχή σε μονοαξονική θλίψη και την αντοχή σε εφελκυσμό, αλλά σε μεγαλύτερες συγκεντρώσεις αυτές μειώνονται σταδιακά σε παρόμοια δείγματα.
- Ο λόγος μονοαξονικής θλιπτικής και εφελκυστικής αντοχής δεν μεταβάλλεται αισθητά με την προσθήκη άμμου.
- Οι διάφοροι τύποι άμμου και η διαφορετική κοκκομετρία αυτών δεν μετέβαλλε σημαντικά την γωνία εσωτερικής τριβής, η οποία γενικά είναι 30 μοίρες (είναι γενικά μικρή σε σχέση με τα περισσότερα πετρώματα). Αυτή η μη ευαισθησία στα κοκκώδη συστατικά αποδίδεται στην αδυναμία του γύψου σε συνδυασμό με το σύνολο και την έλλειψη επαφής μεταξύ των κόκκων. Η τιμή της γωνίας εσωτερικής τριβής είναι πολύ μικρή σε σχέση με τις τιμές μεταξύ 42 και 58 αν συγκριθεί από τις παρατηρήσεις του Patton (1966) στα μείγματα γύψου, άμμου και νερού. Ο Stimpson (1970) αποδίδει τη φαινομενική αυτή ασυμφωνία μεταξύ των αποτελεσμάτων στο ότι ο Patton (1966) μέτρησε τη γωνία σε χαμηλές συνθήκες πίεσης. Επίσης, κατά τον Stimpson (1970), εάν απεικονισθούν τα δεδομένα των δοκιμών εφελκυσμού του Suacier στο διάγραμμα του Mohr η γωνία των 54° μπορεί να επιτευχθεί σε χαμηλές ορθές τάσεις.

### 2.3.2. Με τσιμέντο

Η ανάπτυξη ενός κοκκώδους φυσικού μοντέλου από τσιμέντο για μοντελοποίηση πετρώματος και σκυροδέματος μπορεί να βασιστεί σε μερικές ιδιότητες των παραπάνω μοντέλων γύψου όπως την φθηνή και εύκολη κατασκευή. Τα μοντέλα με βάση τον γύψο προτιμούνται επειδή στερεοποιούνται σε μικρότερο χρόνο και όταν στεγνώσουν δεν υπόκεινται σε μακροπρόθεσμες αλλαγές στην αντοχή όπως τα μείγματα με τσιμέντο. Παρ' όλα αυτά για προσομοίωση σκυροδέματος είναι λογικό να διατηρείται το τσιμέντο και να μειώνεται μέγεθος των αδρανών, ενώ ελέγχεται η διαβάθμιση με παρόμοιο τρόπο όπως του σκυροδέματος. Ο Hashin (1959) απέδειξε πειραματικά πως το μέγεθος των σωματιδίων δεν επιδρά σημαντικά στο μέτρο ελαστικότητας του συνθετικού υλικού και επίσης ότι μικροσκυροδέματα (με άμμο, τσιμέντο και νερό) έχουν παρόμοιες παραμορφωσιακές ιδιότητες και παρόμοια αντοχή σε σύγκριση με ένα πρωτότυπο σκυρόδεμα.

Πιο παραμορφώσιμα και λιγότερο ισχυρά μίγματα επιτυγχάνονται με την προσθήκη υλικών όπως μπετονίτη και ελαφρόπετρας με την ενσωμάτωση μεγάλων ποσοτήτων κοκκωδών συστατικών και με την ωρίμανσή τους σε αυξημένες θερμοκρασίες.

Όλα τα υλικά που βασίζονται στο τσιμέντο είναι ψαθυρά και παρουσιάζουν μη γραμμική μονοαξονική παραμόρφωση σε θλίψη. Χρησιμοποιώντας διαφορετικές διαδικασίες επεξεργασίας και διαφορετικούς τύπους τσιμέντων είναι πιθανόν να παρουσιαστούν τιμές του μέτρου ελαστικότητας μεταξύ μερικών εκαντοντάδων MPa και 30 GPa και η μονοαξονική αντοχή να κυμαίνεται από 0,1 έως 50 MPa. Με υψηλή συγκέντρωση κοκκωδών συστατικών και σε συνδυασμό με τις υψηλές θερμοκρασίες είναι πιθανό να αυξηθεί η αναλογία θλιπτικών και εφελκυστικών αντοχών μεταξύ 12 και 16.

Για κοκκώδη μίγματα τσιμέντου με κόκκους φελλού ο Beshar (1967) βρήκε ότι η μονοαξονική και η εφελκυστική αντοχή εξαρτάται από τη διάμετρο των κόκκων φελλού.

Ο Clegg (1956) ενδιαφέρθηκε για την παραγωγή χαμηλής αντοχής υλικών προσομοίωσης, στα οποία η συνοχή μπορεί να διαφέρει. Τελικά επέλεξε τσιμέντο τύπου Portland ως το κύριο συστατικό, που αναπτύσσει αντοχή με την πάροδο του χρόνου. Το τσιμέντο και το νερό αποτελούν μόνο το 4%, του μίγματος, το καθένα κατά βάρος, τα οποία αναδεύτηκαν μηχανικά και συμπιέστηκαν με σχετική πυκνότητα περίπου 70%. Αυτό το εύθρυπτο υλικό δοκιμάστηκε σε τριαξονική δοκιμή και η μεταβολή του λόγου κενών με την πίεση του κελιού προσδιορίστηκε για διαφορετικούς χρόνους ωρίμανσης του δείγματος (5 ώρες – 7 ημέρες). Η σχέση του χρόνου πήξης με την εφελκυστική αντοχή, το μέτρο ελαστικότητας, την διατμητική αντοχή και τη μονοαξονική θλιπτική αντοχή είναι γραμμική. Η επίδραση του χρόνου ωρίμανσης στην εσωτερική τριβή και συνοχή προσδιορίστηκε επίσης ως καθοριστική. Αυξάνοντας την περιεκτικότητα σε τσιμέντο αυξάνει και η γωνία τριβής. Κατά τον Clegg, αυτό το υλικό ήταν σίγουρα ψαθυρό.

Το χαμηλού μέτρου ελαστικότητας κονίαμα από τσιμέντο και ελαφρόπετρα που χρησιμοποιήθηκε από τον Fugamalli (1955) ικανοποιεί συνθήκες ομοιότητας με το σκυρόδεμα σε θλίψη, εφελκυσμό και ερπυσμό. Το νερό διατηρήθηκε με την απομόνωση της επιφάνειας με ένα πολυμερές, ώστε να αποφευχθεί η συστολή ξήρανσης.

Ο Rowe (1962, 1966) επιβεβαιώνει ότι το αμιαντοτσιμέντο παρουσιάζει ελαστική ψαθυρή συμπεριφορά με μέτρο ελαστικότητας και λόγο Poisson όπως ένα καλής ποιότητας σκυρόδεμα, αλλά με εφελκυστική αντοχή 15 φορές μεγαλύτερη από την κανονική ενός σκυροδέματος. Αυτό το υλικό είναι ιδανικό για φυσικά μοντέλα επίπεδης ελαστικής

πλάκας, αλλά μπορεί να υποφέρει από ανισοτροπία και μεταβαλλόμενες μηχανικές ιδιότητες.

Μείγματα με τσιμέντο, νερό, άμμο και τέφρα έχουν υψηλό πορώδες, υψηλή παραμόρφωση και χαμηλή αντοχή.

Για τον εντοπισμό κατάλληλων υλικών για ένα μοντέλο στο οποίο θέλουμε να εξετάσουμε προβλήματα δύο ή τριών φάσεων ροής στη μηχανική πετρελαίων, εξετάζουμε τη γεωμετρία του πορώδους, τη σχετική υδροπερατότητα κτλ. Ο βαθμός και η φύση του πορώδους επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τις μηχανικές ιδιότητες των πετρωμάτων και γι' αυτό τα φυσικά μοντέλα της μηχανικής πετρελαίων παρουσιάζουν ενδιαφέρον και για τα μη υδρομηχανικά προβλήματα της μηχανικής πετρωμάτων. Έτσι ψάχνοντας ένα συνθετικό πέτρωμα με πορώδες 25% ή λιγότερο και με υδροπερατότητα στα 2 darcy, ο Heath (1965) ανέπτυξε ένα μείγμα από άμμο ποταμού, τσιμέντο Portland και νερό. Η συμπεριφορά της ροής δεν επηρεάστηκε αισθητά από τη χρήση είτε νερού βρύσης είτε απιονισμένου νερού. Έγιναν έρευνες σε τριμερή υλικά με μεγάλους κόκκους άμμου, μικρούς κόκκους άμμου και τσιμέντο, σε διμερή με μικρούς κόκκους άμμου και τσιμέντο και τέλος επιλέχθηκε ένα τριμερές υλικό με περιεκτικότητα 65, 27 και 8% κατά βάρος μεγάλων κόκκων άμμου, μικρών κόκκων άμμου και τσιμέντου. Ένας ειδικός διανομέας, στον οποίο διοχετεύθηκε το μείγμα άμμου και τσιμέντου, παρήγαγε ένα ομοιόμορφο αδρανές στο οποίο οι μικρότεροι κόκκοι άμμου εισχωρούν ανάμεσα στους μεγάλους κόκκους. Για να αποφευχθούν μεγάλες αλλαγές στην διαπερατότητα, το νερό του μείγματος έπρεπε να προστεθεί μέσω της βάσης του καλουπιού για να μην καταστραφεί η δομή των πόρων. Για σταθερό τρόπο παρασκευής η αρχική υγρασία που περιέχεται στο μείγμα τσιμέντου- άμμου ελέγχει το τελικό πορώδες. Όσο μικρότερη είναι η αρχική υγρασία τόσο μικρότερο θα είναι το τελικό πορώδες. Η συμπεριφορά ροής αυτού του συνθετικού πετρώματος μοιάζει με αυτή του ψαμμίτη Berea. Ο Heath επίσης σχολιάζει την ποικιλία του πορώδους με την υδροπερατότητα και την επίδραση διαφόρων παραμέτρων όπως ο ρυθμός παροχής από τον διανομέα.

Ο Evers (1967) επιδίωξε την παρασκευή υλικού με πορώδες μεγαλύτερο του 10% και με λόγοδιαπερατότητας/πορώδους μικρότερου από 0,5. Κατασκεύασε πλάκες 4\*4\*3in, ακολούθησε μηχανική ανάμιξη του κονιάματος, από το οποίο ελήφθησαν πυρήνες διαμέτρου 1 in και ύψους 1 in για δοκιμές. Η επίδραση του λόγου του νερού/τσιμέντου και άμμου/τσιμέντου, οι συνθήκες ωρίμανσης και ξήρανσης, και η επίδραση της κοκκομετρίας



στο πορώδες εξετάστηκαν εκτενώς. Παρατηρήθηκε ότι το πορώδες δεν επηρεάστηκε από την αναλογία τσιμέντου και άμμου και επιβεβαιώθηκε η άποψη ότι το πορώδες του σκυροδέματος εξαρτάται από την περιεκτικότητα σε νερό που δε συμμετέχει στην αντίδραση ενυδάτωσης του τσιμέντου. Και το πορώδες και η διαπερατότητα μειώθηκαν με την αύξηση του μεγέθους των κόκκων.

Στις έρευνες για την επιρροή του πετρώματος στην ταχύτητα των σεισμικών κυμάτων ο Murphy (1957) κατασκεύασε τσιμέντο από άμμο Ottawa χρησιμοποιώντας τρία είδη τσιμέντων, με διαφορετικό πορώδες ξεκινώντας από 2% και καταλήγοντας σε πορώδες 22%. Με μηχανική ανάμιξη κατάφεραν να διαμορφώσουν το πορώδες του συνθετικού πετρώματος μεταξύ 9% και 24%, αλλά παρατήρησαν ότι σε πορώδες μικρότερου του 10% προκαλείται θρυμματισμός στο πυρήνα του πετρώματος. Μέσω μικροσκοπικής παρατήρησης βρέθηκε ότι το τσιμέντο γέμισε τα κενά των κόκκων και ότι η σχέση μεταξύ του πορώδους και του όγκου του τσιμέντου ήταν γραμμική. Επίσης παρατηρήθηκαν λίγοι κόκκοι χαλαζία με αποτέλεσμα να συμπεράνουν ότι το υλικό δεν ήταν όπως ο φυσικός ψαμμίτης.

### **2.3.3. Τσιμεντωμένα με κερί**

Από πρακτική σκοπιά ένα ιδανικό φυσικό μοντέλο πρέπει να είναι φθινό, να κατασκευάζεται εύκολα, να δίνει μετρήσιμες παραμορφώσεις σε μικρές φορτίσεις, εξαλείφοντας την ανάγκη για δυσκίνητο, βαρύ και ακριβό εξοπλισμό φόρτισης. Έρευνες στις ιδιότητες των κοκκώδων υλικών τσιμεντωμένων με λάδι ή κερί παροτρύνθηκαν λόγω των πιθανοτήτων αυτές οι ουσίες να ικανοποιούν τις ανάγκες που αναφέρθηκαν παραπάνω. Αν και επιτεύχθηκε αξιοσημείωτη επιτυχία με αυτά τα υλικά γενικά δεν ακολουθούν αυστηρή ομοιότητα και πιο συγκεκριμένα συχνά παρουσιάζουν μεγαλύτερη πλαστικότητα και μικρότερη γωνία εσωτερικής τριβής σε σχέση με τους περισσότερους τύπους πετρωμάτων. Έχει παραχθεί φυσικό μοντέλο με μέτρο ελαστικότητας που είναι χαμηλό στα 5 MPa και με μονοαξονική θλιπτική αντοχή κάτω από 50 kPa. Χαρακτηριστικά ο λόγος της μονοαξονικής θλιπτικής και εφελκυστικής αντοχής είναι πολύ χαμηλός μεταξύ 2-5.

Ο Benito (1960) συμπίεσε λεπτομερή άμμο με βαζελίνη. Αυτό το μίγμα παρουσιάζει αντοχή σε μονοαξονική θλίψη που ποικίλει ανάλογα με την περιεκτικότητα της άμμου. Επίσης η καμπύλη αξονικής τάσης-τροπής είναι παρόμοια με αυτή του σκυροδέματος, ενώ η εφελκυστική αντοχή είναι αμελητέα.

Οι Garner και Gatun (1963) κατάφεραν να μεταβάλουν την ελατότητα του μείγματος, άμμου και μικροκρυσταλλικού κεριού, χρησιμοποιώντας διαφορετικά είδη κεριού. Έγιναν τριαξονικές δοκιμές σε κυλινδρικά δοκίμια, που προετοιμάστηκαν σε αργό χρόνο προσθέτοντας άμμο στο λιωμένο κεριό, το οποίο ήταν τοποθετημένο σε καλούπι. Τα αποτελέσματα παρουσίασαν ποιοτική ομοιότητα με τον ασβεστόλιθο Indiana, με αντοχή και πλευρικές πιέσεις μειωμένες κατά ένα συντελεστή 10. Πάνω από το όριο ελαστικότητας το υλικό διέρρευσε με σχεδόν σταθερή τάση και τα δείγματα παραμορφώθηκαν σχεδόν όπως τα δείγματα πραγματικών πετρωμάτων. Σε ατμοσφαιρική πίεση τα δείγματα έσπασαν σε πολλά κομμάτια, αλλά σε υψηλότερες πλευρικές πιέσεις παρουσίασαν σχήμα βαρελιού. Η περιβάλλουσα αντοχής του υλικού ήταν σχετικά ευθεία με μικρότερη όμως κλίση σε σχέση με αυτή των πετρωμάτων. Η ιξώδης ροή ήταν υπολογίσιμη ακόμα και κάτω από δυναμικές συνθήκες φόρτισης και η χρήση αυτού του υλικού για δυναμικά προβλήματα πρέπει να αποφεύγεται.



Εικόνα 2-1 Μικροκρυσταλλικό κεριό

(πηγή:<http://www.waxmanufacturer.com/microcrystallinewax.html>)

#### 2.3.4. Τσιμεντωμένα με ρητίνη και πλαστικό

Από τα πλαστικά που έχουν παραχθεί τα εποξικά είναι τα πιο κατάλληλα ως συστατικά για την κατασκευή των φυσικών μοντέλων. Τα κύρια πλεονεκτήματά τους είναι η διαθεσιμότητά τους σε υγρή μορφή, η μεγάλη διάρκεια ζωής τους, η δυνατότητά τους να αναμιγνύονται με άλλα υλικά σε συνθήκες δωματίου, η μικρή συστολή που επιτρέπει γεωμετρική ακρίβεια στην προετοιμασία μοντέλων και ο τέλειος δεσμός που παράγεται μεταξύ των συστατικών του φυσικού μοντέλου. Γενικά είναι ομοιογενή, ισότροπα και ακολουθούν τους νόμους του Hooke και ο βαθμός ερπυσμού είναι χαμηλός.

Η εμπορικά διαθέσιμη ρητίνη Araldite έχει μονοαξονική θλιπτική αντοχή που κυμαίνεται μεταξύ 100 και 110 MPa. Ο λόγος Poisson είναι σχετικά υψηλός περίπου στα 0,38. Αυτά τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η εποξική ρητίνη πλησιάζει ένα συνθετικό βραχώδες υλικό. Η αναλογία των θλιπτικών και των εφελκυστικών αντοχών είναι 1.7, σημαντικά πιο κάτω από αυτή των πετρωμάτων, και ο λόγος Poisson 0.38 είναι μεγαλύτερος από εκείνο των πετρωμάτων. Αυτοί είναι γενικά οι παράγοντες που ώθησαν στην έρευνα της επιρροής των υλικών πλήρωσης στα πλαστικά.

Θεωρητικές και φυσικές απόψεις υποδηλώνουν ότι για να μειωθεί ο λόγος Poisson και το μέτρο ελαστικότητας, το υλικό πλήρωσης θα πρέπει να έχει χαμηλό λόγο Poisson και μέτρο ελαστικότητας. Για παράδειγμα προσθήκη χαλαζιακής άμμου στην εποξική ρητίνη με λόγο Poisson 0.22 και με μέτρο ελαστικότητας 70GPa θα μειώσει το λόγο Poisson, αλλά θα αυξήσει το μέτρο ελαστικότητας. Προφανώς το κάτω όριο του λόγου Poisson θα είναι 0.22, όταν ολόκληρος ο όγκος αποτελείται από άμμο. Έτσι από πρακτική σκοπιά ο λόγος θα είναι διαφορετικός από το 0.22 και δε θα είναι αντιπροσωπευτικός των περισσότερων πετρωμάτων.

Τα διάφορα πληρωτικά και οι τεχνικές μορφοποίησης διαμορφώνουν το μέτρο ελαστικότητας μεταξύ μερικών δεκάδων MPa έως 20 GPa και τη μονοαξονική θλιπτική αντοχή μεταξύ 1 έως 150 MPa. Οι διάσπαρτες πληροφορίες που είναι διαθέσιμες δείχνουν ότι υπάρχουν προοπτικές για την επίτευξη προσομοίωσης σε σχέση με τις γωνίες της εσωτερικής τριβής, αλλά ο λόγος Poisson είναι μάλλον υψηλός.

Ένας κοκκώδης φελλός προσφέρει τη δυνατότητα μείωσης του μέτρου ελαστικότητας και του λόγου Poisson εφόσον στη γραμμική ελαστική περιοχή έχει μέτρο ελαστικότητας περίπου στα 150 MPa λόγο Poisson περίπου 0,04. Η κύρια δυσκολία εμφανίζεται κατά την ανάμιξη του υλικού και αυτό οδήγησε στην ανάπτυξη εναλλακτικών μεθόδων μίξης, όπως

η οδήγηση του πλαστικού στο κοκκώδες μέσο υπό πίεση. Αυτή η τεχνική έχει όρια όσον αφορά τη συγκέντρωση των κόκκων του φελλού. Ο Muhlfelner (1963) προσπάθησε να μεταβάλλει και να μειώσει το μέτρο ελαστικότητας προσθέτοντας θειούχα αποσκληρυντικά, αλλά το υλικό παρουσίασε υψηλό ερπυσμό.



Εικόνα 2-2 Κοκκώδης φελλός (πηγή: <http://www.jelinek.com/granulated.htm>)

Ο Neville-Polley (1966) ερεύνησε τη δημιουργία δεσμών μεταξύ ρευστής και ωριμασμένης ρητίνης. Τροπόμετρα (strain gauges) τοποθετήθηκαν στην κυλινδρική επιφάνεια ενός ωριμασμένου πυρήνα που περικυκλώθηκε από ένα άπηχτο μίγμα, ώστε να δημιουργηθεί ένας τελικός στερεός μη ενωμένος κύλινδρος με μετρητές εσωτερικής παραμόρφωσης. Ένα υλικό με λεπτομερή άμμο/εποξική ρητίνη παρουσίασε παρόμοια συμπεριφορά με ιζηματογενή πετρώματα σε μονοαξονική θλίψη, αλλά με μεγαλύτερη μόνιμη παραμόρφωση και υστέρηση. Πάντως κάτω από δυναμικές συνθήκες φόρτισης του υλικού, η καταπόνηση ήταν τελείως ελαστική.

Θερμαίνοντας υγρή εποξική ρητίνη σε υψηλή θερμοκρασία, κατά την οποία η δομή της ρητίνης επηρεάζεται, αυξάνεται η μονοαξονική αντοχή σε θλίψη και το μέτρο παραμόρφωσης, αλλά το υλικό είναι πιο ψαθυρό. Ο Stimpson (1969) θέρμανε απαερισμένη άμμο και ρητίνη σε θερμοκρασία 200 °C για 6 ώρες και παρατήρησε σημαντικές αυξήσεις στο μέτρο ελαστικότητας. Ο απαερισμός είχε σημαντικό ρόλο σε αυτή τη διαδικασία. Το μέτρο της παραμόρφωσης αυξήθηκε κατά 50% με εκκένωση αέρα από το μείγμα σε πίεση 2mm Hg. Ο αέρας συνεισφέρει στην ευκολία της κατασκευής, η οποία μειώνεται κατά την απομάκρυνσή του, ενώ στα αρνητικά το μίγμα μερικές φορές ήταν πολύ σκληρό για να ρέει.

### **2.3.5. Τσιμεντωμένα με πηλό**

Ο πηλός ως συστατικό τσιμεντώσεως, δεν έχει χρησιμοποιηθεί στα φυσικά μοντέλα της μηχανικής πετρωμάτων, διότι προσδίδει εδαφικό χαρακτήρα, ακόμη και σε μικρή ποσότητα. Αυτό το χαρακτηριστικό ενδιαφέρει στον τομέα της προσομοίωσης της συμπεριφοράς των ασυνεχειών του πετρώματος.

## **2.4. Μη κοκκώδη**

### **2.4.1. Πλαστικό με πλαστικό μόνο**

Οι φυσικές και μηχανικές ιδιότητες σε ένα «υψηλού» μέτρου ελαστικότητας ( $>1,7$  GPa) μοντέλου που αποτελείται από πολυεστέρα, ακρυλικό υλικό και ρητίνη έχουν καταγραφεί σε αρκετές αναφορές. Εκτός από τη χρήση τους για φωτοελαστική ανάλυση, χρησιμοποιούνται επίσης και για μη φωτοελαστικά μοντέλα κυρίως στη δομική μηχανική. Αν και δεν είναι δύσκολη η προμήθεια αυτών των υλικών δε χρησιμοποιούνται για στατικά προβλήματα μηχανικής πετρωμάτων, αλλά μόνο σε φωτοελαστικές μελέτες. Αυτή οφείλεται στο μεγάλο χρηματικό κόστος συγκρινόμενο με τα άλλα φυσικά μοντέλα. Επίσης έχουν υπερβολική διαφορά στις τιμές του λόγου Poisson σε σχέση με τα πετρώματα, στη θερμοκρασιακή ευαισθησία και στις ερπυστικές ιδιότητες. Η μόνη περίπτωση που έχουν χρησιμοποιηθεί αυτά τα υλικά σε ένα φυσικό μοντέλο, που δεν έχει φωτοελαστικές ιδιότητες, είναι σε περιπτώσεις προσομοίωσης σήραγγας σε εδαφικό σχηματισμό.

Μερικά από τα πιο ψαθυρά πλαστικά όπως το πλέξιγκλας και ο λουσίτης έχουν βρει μεγαλύτερη εφαρμογή σε πολλές εργαστηριακές μελέτες δυναμικών προβλημάτων. Η ελαστικότητά τους, η ψαθυρότητά τους, η ευκολία χειρισμού τους και η δυνατότητα της διαφάνειας που παρουσιάζουν για την καλύτερη παρατήρησή τους είναι ιδιότητες που τους δίνουν σημαντικά πλεονεκτήματα.

Τα χαμηλής ελαστικότητας πλαστικά είναι πιο δύσκολα στο να δοκιμαστούν. Αυτά τα υλικά είναι επίσης πιο δύσκολο να συμπιεστούν και ο λόγος Poisson εκτείνεται από 0,45-0,50. Τα πιο παραμορφώσιμα από αυτά τα πλαστικά δεν είναι καθόλου ψαθυρά και χρησιμοποιούνται μόνο για φωτοελαστικές έρευνες.

Ο Belluson (1960) ερεύνησε τα λεγόμενα οπτικά ενεργά υλικά και κατάφερε να φτάσει σε στάδιο κατά το οποίο τα φυσικά μοντέλα να προσομοιώνουν ποιοτικά τις θεμελιώσεις. Μερικά από αυτά τα συστατικά περιέχουν και ρητίνη. Οι Bell και Currie (1964) μέσω των χαμηλής ελαστικότητας φωτοελαστικών υλικών διαφορετικού ιξώδους και πλαστικότητας χρησιμοποίησαν και αυτοί αυτά τα φυσικά μοντέλα για προβλήματα μηχανικής πετρωμάτων.

Οι αφρώδεις πολυστερίνες που περιέχουν 98% αέρα μπορούν να κοπούν εύκολα με ηλεκτρικά θερμαινόμενο καλώδιο και μπορεί εύκολα να επεξεργαστούν.

Οι χρήσιμες ιδιότητες του πολυαιθυλενίου όπως το χαμηλό μέτρο ελαστικότητας σε κάποιο βαθμό τείνουν να αναιρούνται από την υψηλή συρρίκνωση κατά τη διάρκεια της στερεοποίησης και από το συντελεστή της θερμικής διαστολής. Η συρρίκνωση δημιουργεί υπολειμματικές πιέσεις οι οποίες μπορούν να προκαλέσουν την πρόωγη θραύση του. Επιπλέον οι ιδιότητες δε μπορούν να ποικίλουν και οι διαφορές στην ικανότητα παραμόρφωσης πρέπει να δημιουργούνται με τη δημιουργία οπών σύμφωνα με ένα συγκεκριμένο σχέδιο.

Το *marco* δεν έχει τους ίδιους περιορισμούς κατά τη διάρκεια της κατασκευής, όπως το πολυαιθυλένιο, είναι διαφανές και αναμιγνύεται σε θερμοκρασία δωματίου, αλλά και αυτό υπόκειται σε υψηλή συρρίκνωση.

Υπάρχει τόση μεγάλη ποικιλία πλαστικών που είναι δύσκολο πρακτικά να γίνουν γενικεύσεις για τη συμπεριφορά τους. Παρ' όλα αυτά σε πολλές περιπτώσεις, κατά τις οποίες περιλαμβάνεται ο ερπυσμός, είναι εφικτό να καθοριστεί το μέτρο της ελαστικότητας κατά την φόρτιση με την πάροδο του χρόνου. Για παράδειγμα για φορτίσεις μικρότερες από κάποιο όριο η παραμόρφωση είναι ανάλογη της φόρτισης. Έτσι καθορίζοντας τη σχέση μεταξύ φόρτισης και παραμόρφωσης για διάφορους χρόνους υπάρχει η δυνατότητα να καθοριστεί ο ερπυσμός και να προβλεφθούν διορθώσεις για αυτόν. Άλλοι παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπόψη είναι η υγρασία, που επηρεάζει αρκετά πλαστικά και η ευαισθησία στις διάφορες θερμοκρασίες. Επίσης μερικές ρητίνες που πηξουν σε κανονικές συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας πολυμερίζονται ανομοιόμορφα και υπάρχει περίπτωση να προκαλέσουν σημαντική ετερογένεια στο μοντέλο.

#### **2.4.2. Πλαστικά που περιέχουν πλαστικά**

Αυτή η κατηγορία περιλαμβάνει υλικά με παρόμοιες ιδιότητες με την ενότητα 2.3.4, αφού η μόνη διαφορά είναι η μη συμμετοχή, στο μοντέλο, κοκκωδών συστατικών. Αρκετά υλικά, χαμηλής ελαστικότητας και μεγάλης πυκνότητας, για προσομοιώσεις της πίεσης της βαρύτητας, σχηματίζουν μία επικουρική κατηγορία με ξεχωριστές ιδιότητες.

#### **2.4.3. Μη πλαστικά-μεταλλικά**

Τα μέταλλα έχουν χρησιμοποιηθεί σε πολλές περιπτώσεις σε μοντέλα για προσομοίωση κτιρίων, γεφυρών και γενικά των πλαισιωτών φορέων όπου είναι εύκολο να μετρηθούν οι παραμορφώσεις σε χαμηλές τιμές φόρτισης. Στη μοντελοποίηση στερεών δομών σε πετρώματα απαιτούνται πολύ μεγαλύτερες φορτίσεις για να υπάρχει μια σαφή εικόνα των παραμορφώσεων. Επιπρόσθετα η χρήση των μετάλλων συχνά αποκλείεται λόγω της γεωμετρίας που περιλαμβάνεται. Είναι επίσης αξιόλογο να αναφερθεί ότι δε μπορεί να επιτευχθεί ομοιότητα με τη θραύση των πετρωμάτων και το υλικό περιορίζεται στην έρευνα για μετακινήσεις.

#### **2.4.4. Μη πλαστικά-μη μεταλλικά-ψαθυρά**

Αυτή η κατηγορία αποτελείται από υλικά που χρησιμοποιούνται στη μηχανική πετρωμάτων, και περιλαμβάνει κυρίως υλικά με γύψο. Η αποδοχή των μη κοκκωδών υλικών με γύψο είναι γενικά αδιαμφισβήτητη, ενώ η έκταση εφαρμογής τους μεγάλη. Έτσι, συχνά, προσπερνιόνται τα διάφορα μειονεκτήματα που μπορεί να μαρουσιάσουν.

Σχετικά με τις ιδιότητες του γύψου ο λόγος Poisson είναι μεταξύ 0,06 και 0,304, το μέτρο ελαστικότητας κυμαίνεται μεταξύ 2 έως 20 GPa και η μονοαξονική θλιπτική αντοχή μεταξύ 2 και 7 GPa. Έχει ερευνηθεί η σχέση αναλογίας μεταξύ νερού και γύψου, με το μέτρο ελαστικότητας, το λόγο Poisson, τη μονοαξονική αντοχή σε θλίψη και εφελκυσμό και την πυκνότητα. Οι διάφορες έρευνες σε αυτό το τομέα, όσον αφορά το μέτρο ελαστικότητας και την αντοχή, συμφωνούν μεταξύ τους. Αν εξαιρεθεί η διαδικασία των δοκιμών, οι φυσικές μεταβλητές που θα επηρεάσουν τις ιδιότητες του γύψου περιλαμβάνουν τον τύπο του γύψου, την αποθήκευση του γύψου, την προετοιμασία, την πήξη, το χρόνο που θα μεσολαβήσει για τις δοκιμές και τη θέση του δοκιμίου κατά τη χύτευση.

Ο τύπος του γύψου καθορίζεται από τη φυσικοχημική διεργασία παραγωγής και το κοίτασμα από το οποίο εξάγεται το υλικό. Ακόμα και σε αυτό το στάδιο εμφανίζεται

ποικιλομορφία και κατά τη διαδικασία ελέγχου της παραγωγής οι διαφορές μπορούν να αλλάξουν λίγο και την καθαρότητα του υλικού, που μπορεί να μην είναι σταθερή. Γι' αυτό το λόγο πρέπει κάποιος να είναι σίγουρος ότι η παρτίδα του υλικού θα είναι αρκετή για την ολοκλήρωση της πειραματικής μελέτης και τέλος να ελέγχεται η ομοιογένεια σε τακτά χρονικά διαστήματα.

Η διαδικασία της προετοιμασίας έχει πολύ μεγάλη επιρροή στο τελικό αποτέλεσμα. Η μέθοδος της μίξης, ο καθορισμός των δονήσεων, ο απαερισμός, ο χρόνος ανάμειξης κτλ πρέπει να έχουν εξεταστεί πριν την έναρξη της πειραματικής διαδικασίας. Για παράδειγμα οι Seely και Dolan (1935) χρησιμοποιώντας υψηλής διαβάθμισης γύψο αγγειοπλαστικής τέχνης εξέτασαν την επίδραση του τρόπου της μίξης στην εφελκυστική αντοχή, δηλαδή του χρόνου που πέρασε από την τοποθέτηση του γύψου στο νερό έως τη στιγμή της ανάμειξης. Βρέθηκε ότι η αντοχή αυξήθηκε, όταν αυτός ο χρόνος ήταν 14 λεπτά και σταδιακά μειώθηκε με την υπέρβαση των 16 λεπτών.

Κατά την ωρίμανση είναι σημαντικό να απομακρύνεται το νερό από το δοκίμιο, επειδή η υγρασία προκαλεί σημαντική μείωση της αντοχής του υλικού. Με την προϋπόθεση ότι το υλικό είναι στεγνό, τα αποτελέσματα δείχνουν ότι δεν υπάρχει σημαντική διαφορά στην αντοχή του με την πάροδο του χρόνου. Οι διαθέσιμες πληροφορίες καταδεικνύουν μείωση της αντοχής ή του μέτρου ελαστικότητας, όταν τα δείγματα πάρθηκαν από τις πλευρές ή την κορυφή του καλουπιού.

Επίσης πρέπει να αναφερθεί ότι όταν χρησιμοποιούνται συνθετικά μίγματα, πρέπει να έχουν καθαριστεί απολύτως τα κοκκώδη πριν προστεθούν στο γύψο. Πολύ μικρές περιεκτικότητες αλάτων μπορεί να επιδράσουν σε μεγάλο βαθμό στις ιδιότητες της ανάμειξης, όπως για παράδειγμα να λειτουργήσουν ως επιβραδυντές.

Η αναλογία της θλιπτικής προς εφελκυστική αντοχή κυμαίνεται μεταξύ 2 και 8 και γι' αυτό δεν μπορούν να προσομοιώσουν πλήρως τους τύπους των πετρωμάτων.

Τόσο γραμμικές όσο και μη γραμμικές καμπύλες τάσης-τροπής έχουν παρατηρηθεί. Αυτή η συμπεριφορά εξαρτάται από τον τύπο του γύψου και τις συνθήκες των δοκιμών, όπως π.χ. είναι ο ρυθμός φόρτισης. Οι περισσότερες από τις μη γραμμικές καμπύλες περιλαμβάνουν μία γραμμική περιοχή, όταν η ένταση είναι χαμηλή και ο Stimpson ανέπτυξε το παρακάτω μαθηματικό μοντέλο:

$$\sigma = K_1 \cdot \varepsilon^2 + K_2 \cdot \varepsilon$$



για τη μη γραμμική περιοχή, όπου  $\sigma$  είναι η μονοαξονική θλιπτική τάση και  $K_1$ ,  $K_2$  είναι σταθερές που σχετίζονται με το μέτρο ελαστικότητας, που υπολογίζεται με τη βοήθεια της γραμμικής περιοχής των καμπύλων. Αυτή η σχέση υποδηλώνει και μία σχέση μεταξύ της τάσης και του τέμνοντος μέτρου ελαστικότητας. Έτσι σχεδιάζοντας το τέμνον μέτρο ελαστικότητας σε συνδυασμό με την τάση, είναι πολύ εφικτό να βρεθεί για ποια πετρώματα είναι δυνατή η προσομοίωση της μονοαξονικής θλιπτικής συμπεριφοράς από ένα ξηρό γύψο.

Σε αντίθεση με υλικά όπως οι ρητίνες, ο ωριμασμένος και ο νεπός γύψος δε θα κάνουν καλό δεσμό. Για να επιτύχει ο δεσμός θα πρέπει ο ωριμασμένος γύψος να τοποθετηθεί σε νερό, αλλά και πάλι η σύνδεση θα είναι πιο αδύναμη σε σχέση με ένα στερεό υλικό. Ο Stimpson (1969) έκανε μία σειρά δοκιμών Brazilian κατά την οποία οι επιφάνειες σύνδεσης αποτελούσαν την επιφάνεια φόρτισης που αποκάλυψαν μείωση της εφελκυστικής αντοχής των δειγμάτων κατά 50%. Ο Barron (1961) παρατήρησε ότι συνθετικές δοκοί από γύψο σχηματισμένες από ξεχωριστές πλάκες, που έχουν αναμειχθεί μεταξύ τους με στρώσεις ρητίνης, παρουσίασαν παραμορφωτική συμπεριφορά στην κάμψη ως μη ενωμένα στρώματα δοκού.

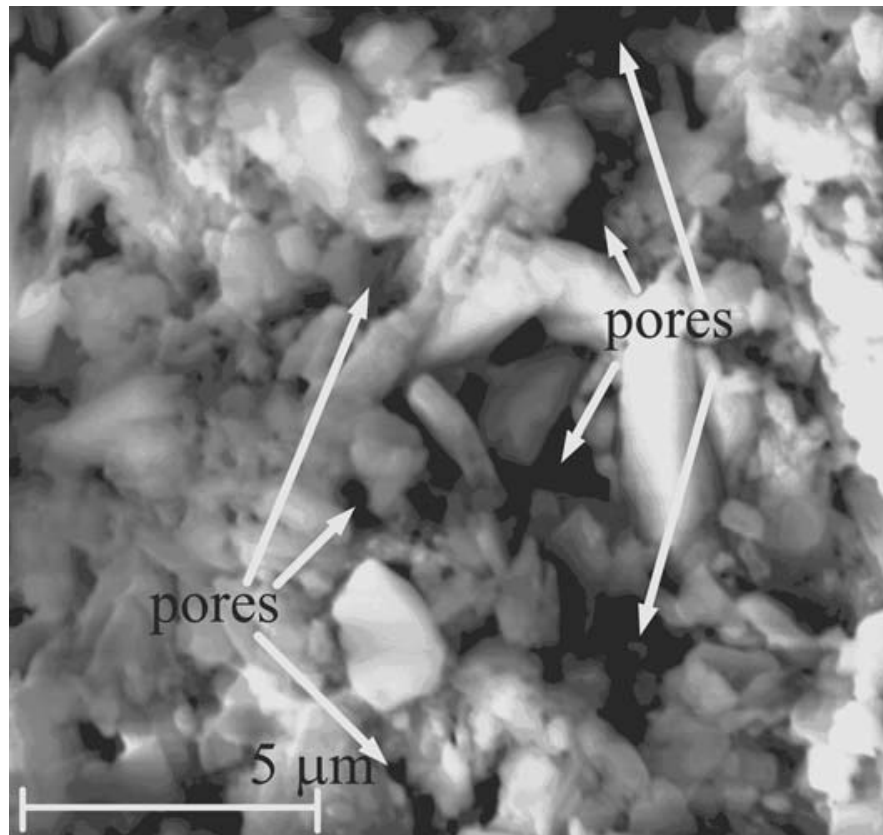
Σε πολλές εφαρμογές του ξηρού γύψου σε μοντέλα βραχοδυναμικής εμφανίζεται θραύση κατά τη μέγιστη αντοχή και αν και το μοντέλο παρουσιάζει ψαθυρή συμπεριφορά δεν έχει αποδειχθεί ότι προσομοιώνει απολύτως τη θραύση ενός πετρώματος. Αυτό ενισχύεται και από πρόσφατα πειράματα του εργαστηρίου μηχανικής πετρωμάτων του MIT (π.χ. Wang και Einstein, 2009). Λόγω της απουσίας υψηλής ακρίβειας κριτηρίων αστοχίας για ψαθυρά υλικά είναι δύσκολο να εξαχθούν ασφαλή συμπεράσματα. Ο Rortje (1967) υποθέτοντας ένα τροποποιημένο κριτήριο Griffith για ένα πέτρωμα προσπάθησε να καθιερώσει τις παραμέτρους που θα μπορούσαν να μοντελοποιηθούν και σε αυτές συμπεριλαμβάνονται η μονοαξονική θλιπτική και εφελκυστική αντοχή και δύο συντελεστές τριβής. Για τον υπολογισμό των συντελεστών τριβής προτάθηκαν διάφορες μέθοδοι. Η πιο ολοκληρωμένη έρευνα για τη μοντελοποίηση της θραύσης του γύψου έγινε από τον Duggan (1941), ο οποίος δοκίμασε σε 4 διαφορετικές εντάσεις κοίλους λεπτότοιχους κυλίνδρους γύψου.

Άλλα ενδεικτικά στοιχεία δείχνουν, ότι η διαδικασία θραύσης του γύψου δε μοιάζει με αυτή των πετρωμάτων. Από έρευνα για την διαφοροποίηση της μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής σε κυλίνδρους διαμορφωμένου γύψου με αναλογία μήκους-διαμέτρου μεταξύ 0,5 και 3 βρέθηκε ότι ενώ τα περισσότερα πετρώματα παρουσιάζουν μία μεγάλη μείωση της

αντοχής με την αύξηση αυτής της αναλογίας ακόμη και κατά 100%, ο γύψος παρουσίασε σταδιακή γραμμική μείωση στην αντοχή κατά 20%. Οι Martin και Murphy (1963) προέβλεψαν την παραμόρφωση, αλλά όχι και τη διάταξη της θραύσης σε μοντέλα γύψου που υποβλήθηκαν σε δυναμική καταπόνηση με χρήση εκρηκτικών, και κατέληξαν ότι περαιτέρω παράμετροι συμπεριλαμβανομένης και της διάρκειας θραύσης θα πρέπει να συμπεριλαμβάνονται στην ανάλυση. Ο Stimpson εκτέλεσε δοκιμές ακουστικής εκπομπής σε μοντέλα γύψου και βρήκε αμελητέα ακουστική δραστηριότητα έως τη θραύση, το οποίο διαφέρει από τα περισσότερα ψαθυρά πετρώματα, τα οποία πριν τη θραύση αρχίζουν να εκπέμπουν ελαστικά κύματα πίεσης.

Αυτά τα αποτελέσματα ταιριάζουν με την έρευνα του Gramberg (1965), ο οποίος κατηγοριοποιεί την δομική συμπεριφορά, σε μονοαξονική θλίψη, του γύψου στην ίδια ομάδα με το γυαλί και την πορσελάνη.

Άλλα στοιχεία σχετίζονται με τη μικροσκοπική δομή του γύψου. Αυτός εμφανίζεται ως τρισδιάστατο δίκτυο ινωδών ή πλακωδών κρυστάλλων, οι οποίοι διαχωρίζονται με ανώμαλα ανοίγματα (π.χ Wong και Einstein 2009).



Εικόνα 2-3. Δομή του γύψου στο μικροσκόπιο (πηγή: Wong και Einstein 2009).

Κάτω από τριαξονικές συνθήκες ο ξηρός γύψος έχει παρόμοιο τρόπο αστοχίας με αυτόν των πετρωμάτων, για παράδειγμα όσον αφορά τον τρόπο θραύσης, δηλαδή αξονική κατάκλαση, διατμητική θραύση, διαρροή με σχηματισμό του χαρακτηριστικού βαρελοειδούς, ενώ η γωνία τριβής είναι μικρότερη από αυτή των ψαθυρών πετρωμάτων.

Σχετικά με την εφαρμογή του ξηρού γύψου στην προσομοίωση σκυροδέματος, ο Brock υποστηρίζει ότι η θεωρούμενη ομοιότητα στηρίζεται στη αντίληψη για την ψαθυρότητα του σκυροδέματος. Όμως, σημειώνει ότι, αν οι δοκιμές θλίψης εκτελεστούν με ελεγχόμενη παραμόρφωση σε δύσκαμπτη συσκευή φόρτισης τότε προκαλούνται μεγάλες παραμορφώσεις χωρίς θραύση του υλικού. Η αυξημένη ολκιμότητα που προέκυψε από αυτά τα πειράματα ενισχύει την άποψη ότι το σκυρόδεμα δε μπορεί να προσομοιωθεί με τον ξηρό γύψο. Πειράματα σε υγρό δοκίμιο γύψου που καλύπτεται από Shellac παρουσιάζει καλύτερη προσομοίωση με το σκυρόδεμα και γι' αυτό έχει χρησιμοποιηθεί σε μελέτες σκυροδέματος για κατασκευές και γέφυρες. Ο λόγος θλιπτικών και εφελκυστικών αντοχών είναι περίπου όμοιος με του σκυροδέματος (8-10). Τα μοντέλα δοκιμάζονται 24-48 ώρες μετά την σκλήρυνσή τους.

Άλλοι ερευνητές έχουν πειραματιστεί με διάφορα πληρωτικά με σκοπό την παραγωγή ασθενέστερων ή και πιο πυκνών υλικών.

Για τη μείωση των παραμενουσών τάσεων οι Durelli και Jacobsen (1962) χρησιμοποίησαν ένα ειδικό γύψο με ρυθμό διαστολής κατά την ωρίμανση της κλίμακας του 0.0004 αντί για 0.0025 που έχει ο συνήθης γύψος. Μελετήθηκαν διάφορες φυσικές συνθήκες και διεργασίες για την επιρροή τους στην αντοχή. Αυτές περιλαμβάνουν την ηλικία του δοκιμίου, την περιεκτικότητα σε υγρασία, την θέση του στο καλούπι, την πυκνότητά του, το βαθμό ωρίμανσης, το ρυθμό της φόρτισης, το χρόνο φόρτισης, τη διαδρομή της φόρτισης κ.ά. Οι πιο βασικές παρατηρήσεις είναι η αύξηση κατά 7-24% της καμπτικής αντοχής πρισματικών δοκών που έχουν προ-φορτιστεί δέκα φορές στο 80-90% της μέγιστης αντοχής, η μη εξάρτηση της αντοχής στο ρυθμό της φόρτισης και η άμεση σχέση μεταξύ αντοχής και της εντατικής βαθμίδας.

Ο Hobbs (1966) βρήκε ότι μείγματα με γύψο (plaster of Paris) και ρητίνη Shellac είναι χαμηλής πυκνότητας και μεγάλου πορώδους, λόγω της μεγάλης ποσότητας νερού που απαιτείται για την ανάδευση του μείγματος.

Με την προσθήκη 10% κατά βάρος lime (CaO) σε γύψο “plaster of Paris” ο Vorobyev (1963) μείωσε την αντοχή και αύξησε το λόγο των μονοαξονικών θλιπτικών και εφελκυστικών αντοχών.

Η αντοχή και το μέτρο ελαστικότητας κάθε γύψου είναι κατά πολύ εξαρτώμενη από το πορώδες. Εάν προστεθεί ένα συστατικό που αυξάνει το πορώδες, η αντοχή και το μέτρο ελαστικότητας θα μειωθούν. Τέτοιο συστατικό είναι π.χ. η γη διατόμων (ή αλλιώς διατομίτης). Γενικά το μέτρο ελαστικότητας κυμαίνεται μεταξύ 0.5 GPa και 10 GPa, ο λόγος Poisson μεταξύ 0.17 και 0.25, και ο λόγος μονοαξονικής θλιπτικής προς εφελκυστικής αντοχής είναι παρόμοια με του σκυροδέματος. Η σχέση μεταξύ αντοχής και μέτρου ελαστικότητας είναι τέτοια, που για όλες τις αντοχές κάτω από ίδιες συνθήκες η οριακή τροπή είναι σχεδόν ίδια. Το μίγμα γύψος/cellite δεν έχει ούτε γραμμική ούτε τελείως ελαστική συμπεριφορά. Σε χαμηλές πιέσεις το μέτρο ελαστικότητας μπορεί να εκφραστεί ως συνάρτηση του χρόνου από την εφαρμογή της φόρτισης. Έχουν εφαρμοσθεί διάφορες τεχνικές, όπως η περιθλάση με ακτίνες X, η θερμική ανάλυση, και η πετρογραφική εξέταση, για την ανακάλυψη χημικών αντιδράσεων που πραγματοποιούνται μεταξύ του γύψου και του διατομίτη. Πάντως καμία από αυτές τις τεχνικές δεν απέδειξε την πραγματοποίηση τέτοιων αντιδράσεων.

Σε μεγάλη περιεκτικότητα διατομίτη το υλικό δεν είναι ψαθυρό και πέρα από την αδυναμία παραλαβής μεγαλύτερων φορτίων είναι δύσκολο να παρατηρηθούν με γυμνό μάτι σημάδια της αστοχίας των κυλίνδρων. Η συμπίεση γίνεται ένας σημαντικός μηχανισμός και προκαλεί μόνιμες παραμορφώσεις. Παρ'όλα αυτά τα φθηνά υλικά, η ευκολία παρασκευής, και το εύρος των ιδιοτήτων κάνουν τη χρήση του γύψου με διατομίτη ιδιαίτερα διαδεδομένη.

Σε μία άλλη κατηγορία υλικών, που δεν έχουν ως βάση το γύψο, τα ψαθυρά κεραμικά, που προτάθηκαν από τον Benito (1960), δεν έχουν ερευνηθεί εκτενώς λόγω του κόστους και της δυσκολίας διαχείρισης.

Οι Bortz και Wade (1967) αξιολόγησαν τρία ψαθυρά υλικά - μία λάβα, ένα κεραμικό με αλουμίνα και ένα γραφίτη- και τελικά επέλεξαν το γραφίτη για λεπτομερείς πειραματικές μελέτες ψαθυρών υλικών. Αυτόν ήταν ελαφρώς ανελαστικός, αλλά ομοιογενής στη δομή με ισοτροπικές ιδιότητες, ήταν εύκολος στη διαχείριση και είχε ικανοποιητική αντοχή και μέτρο ελαστικότητας.

Ο πάγος κάτω από γρήγορη φόρτιση είναι ψαθυρός και χρησιμοποιήθηκε ως υλικό σε μοντέλα για τη μελέτη εκρήξεων. Αν και δεν έχει ερευνηθεί πλήρως ως υλικό φυσικών μοντέλων, οι ιδιότητες του έχουν εξεταστεί εκτενώς σε έρευνες που σχετίζονται με κατασκευές στον αρκτικό κύκλο. Ο πολυκρυσταλλικός πάγος παρουσιάζει στιγμιαία ελαστικότητα και ιξωδοελαστικό και πλαστικό ερπυσμό κάτω από συνθήκες σταθερής φόρτισης. Υπό συνθήκες απότομης φόρτισης είναι ελαστικός με γραμμική σχέση του μέτρου ελαστικότητας και της θερμοκρασίας, δηλαδή με μείωση της θερμοκρασίας το μέτρο ελαστικότητας αυξάνεται. Η ακριβής επίδραση εξαρτάται από το είδος της πολυκρυσταλλικής δομής, την καθαρότητα κτλ. Η μονοαξονική αντοχή εξαρτάται από το μέγεθος των κόκκων, την θερμοκρασία, την καθαρότητα, τον προσανατολισμό των κόκκων και την τεχνική της δοκιμής. Ο καθαρός πάγος είναι συνήθως πιο αδύναμος από έναν μη καθαρό. Σε θερμοκρασίες κοντά στο σημείο τήξης και σε κανονικές πιέσεις η μονοαξονική εφελκυστική και θλιπτική αντοχή είναι όμοιες, με αποτέλεσμα ο πάγος να προσομοιώνει τα μέταλλα, όμως σε χαμηλότερες θερμοκρασίες η εφελκυστική αντοχή αυξάνεται πιο αργά από τη θλιπτική. Έτσι σε θερμοκρασία π.χ.  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ , ο λόγος θλιπτικής προς εφελκυστική είναι 3.5, προκειμένου για πάγο σε λίμνη.

Το απλό τσιμεντένεμα (πάστα τσιμέντου) για την προσομοίωση ιζηματογενών πετρωμάτων, που ερευνήθηκε από τον Hobbs (1966), απορρίφθηκε λόγω της δυσκολίας να επιτευχθεί χαμηλή αντοχή μαζί με ψαθυρότητα, καθώς και σταθερή αντοχή. Σε άλλη έρευνα του Brock (1964) βρέθηκε ότι κάτω από μονοαξονική θλίψη κυλινδρικών δοκιμίων η ογκομετρική τροπή αυξάνεται μέχρι τη μέγιστη αντοχή ενώ η αντιστροφή στην καμπύλη της ογκομετρικής τροπής, που παρατηρείται σε πολλά πετρώματα, ήταν απύσχα.

Το γυαλί είναι πολύ ψαθυρό, γραμμικώς ελαστικό υλικό με φωτοελαστικές ιδιότητες. Ο Hoek (1964) χρησιμοποίησε το γυαλί ως υλικό σε μοντέλα προσομοίωσης υπόγειων εκσκαφών, επειδή δίνει εμφανείς ισοκλινείς, και παρουσιάζει αυξημένη αντοχή και ελαστικές ιδιότητες. Η δυσκολία επεξεργασίας του γυαλιού έχει ξεπεραστεί με τη χρήση υπερηχητικών τεχνικών κοπής.

#### **2.4.5. Μη πλαστικά-μη μεταλλικά-μη ψαθυρά**

Η χρησιμότητα των υλικών αυτής της ομάδας οφείλεται στις μεγάλες παραμορφώσεις που υφίστανται από μικρής έντασης φορτίσεις. Η έλλειψη της ψαθυρής συμπεριφοράς αποκλείει την άμεση εφαρμογή τους σε μελέτες θραύσης. Με την ικανότητα παραγωγής εξαιρετικά χαμηλών μέτρων ελαστικότητας (μικρότερο από 10kPa) οι μεγάλες

παραμορφώσεις που μπορούν να συμβούν καθιστούν το μοντέλο γεωμετρικά μη γραμμικό, κάτι το οποίο πρέπει να αποφευχθεί. Χαρακτηριστικό γνώρισμα αυτών των υλικών, όσον αφορά τη προσομοίωση πετρωμάτων, είναι ο υψηλός λόγος Poisson που κυμαίνεται μεταξύ 0.40 και 0.50.

Πεπιεσμένος φελλός σε φυλλώδη μορφή είναι διαθέσιμος για την κατασκευή φυσικών μοντέλων με τη συγκόλληση των φύλλων. Η συμπεριφορά τέτοιων μοντέλων τείνει να είναι ανισότροπη και ο λόγος Poisson χαμηλός (0.05-0.1). Η συμπεριφορά του φελλού υπό υδροστατική πίεση είναι ανόμοια με αυτή των περισσότερων πετρωμάτων. Για παράδειγμα ο αποσαθρωμένος γρανίτης παρουσιάζει αύξηση της ακαμψίας με αύξηση των υδροστατικών πιέσεων, ενώ ο φελλός γίνεται πιο εύκαμπτος.

Το χαρτόνι είναι συνήθως ένα ανισότροπο υλικό. Οι Braithwaite και Williams (1963) το χρησιμοποίησαν για ποσοτικές έρευνες δονήσεων.

Ο Hoffman (1964) χρησιμοποίησε ένα ασυνήθες τεχνητό αφρώδες υλικό. Η πρόσφυση μεταξύ των στρώσεων του υλικού αυξήθηκε κάτω από σταθερή πίεση και σε σχέση με το μέτρο παραμορφωσιμότητας, οι εφελκυστικές και θλιπτικές αντοχές ήταν ιδιαίτερα υψηλές.

Απλά φυσικά μοντέλα της μηχανικής πετρωμάτων με πλαστική συμπεριφορά μπορούν να κατασκευαστούν από πλαστελίνη και πηλό.

Όλα τα μίγματα φυσικού καουτσούκ/πληρωτικών που εξετάστηκαν από τον Καρνον (1934), παρουσίασαν μη γραμμικές σχέσεις φόρτισης και παραμόρφωσης, μεγάλη ανισοτροπία και υψηλό λόγο Poisson.

Η ζελατίνη είναι ένα φωτοελαστικό, οργανικό και χαμηλής ελαστικότητας μέσο. Η εφαρμογή της σε πολλούς τομείς εξηγείται από το φθινό κόστος και τις φωτοελαστικές ιδιότητές της (υπό ίδιον βάρος και μόνο προκαλεί φωτοελαστικά φαινόμενα).

Πολλά μέσα προετοιμασίας και λίπανσης του καλουπιού για τα μοντέλα ζελατίνης έχουν προταθεί, αλλά κανένα δεν παρουσιάζει συγκεκριμένα πλεονεκτήματα. Πάντως οι περισσότεροι ερευνητές προσθέτουν γλυκερίνη, η οποία αυξάνει την αντοχή, την ελαστικότητα και επεκτείνει το χρόνο ζωής του υλικού. Η ζελατίνη επειδή είναι πρωτεΐνη υπόκειται σε βακτηριδιακή δράση και γι'αυτό έχουν προταθεί διάφορα χημικά ως συντηρητικά. Μερικά προβλήματα που παρουσιάζονται είναι η ζημιά που προκαλείται στη ζελατίνη και οι ανώμαλες φωτοελαστικές πτυχές που σχηματίζονται στις άκρες εξ' αιτίας

της αφυδάτωσης. Ο Cuykendall (1939) παρατήρησε συστολή ξήρανσης κατά 15% στις διαστάσεις, όταν ένας κύβος περιεκτικότητας 12% σε ζελατίνη είχε αποθηκευτεί για έξι ημέρες σε θερμοκρασία 40 °F. Η ευαισθησία στη θερμοκρασία είναι ένας άλλος σημαντικός παράγοντας. Επίσης, ο δεσμός μεταξύ υλικών που πήζουν ξεχωριστά είναι πτωχός.

Οι περισσότερες αναλύσεις των μοντέλων ζελατίνης υποθέτουν γραμμικές ελαστικές ιδιότητες. Επιπλέον οι Shepherd και Sweet (1932) βρήκαν ότι μεταξύ του 8 και 24% των συγκεντρώσεων ζελατίνης τα μοντέλα ακολουθούσαν το νόμο του Hooke μέχρι την αστοχία τους. Περαιτέρω έρευνες έδειξαν ότι υπάρχει σημείο καμπής στην καμπύλη τάσης-τροπής κατά το μονοαξονικό εφελκυσμό. Οι Richards και Mark (1966) απέδειξαν τη χρονικά εξαρτημένη συμπεριφορά του μείγματος ζελατίνης/γλυκερίνης/νερού και ότι είναι δυνατό να περιγραφεί η συμπεριφορά του υλικού με ένα ιξωδοελαστικό νόμο. Οι ιξωδοελαστικές σταθερές των μοντέλων μπορεί να υπολογιστούν πειραματικά.

Δεν έχει επιλυθεί ικανοποιητικά ακόμα το πρόβλημα του υψηλού λόγου Poisson (0.5). Το στιγμιαίο μέτρο ελαστικότητας κυμαίνεται μεταξύ 0.007 και 0.14 MPa.

## **2.5. Η ανισοτροπία των φυσικών μοντέλων και η συμπεριφορά των ασυνεχειών**

Πολλοί ερευνητές έχουν κατασκευάσει ανισότροπα μέσα με την σύνθεση λεπτών στρωμάτων με διαφορετικές ιδιότητες. Επίσης, η συμπεριφορά των ασυνεχειών μπορεί να μοντελοποιηθεί σε μοντέλα της μηχανικής πετρωμάτων, η προσέγγιση που ακολουθείται είναι η εισαγωγή μεταξύ δύο στρώσεων ενός υλικού που θα καταστήσει μειωμένη τη γωνία της εσωτερικής τριβής σε σχέση με αυτή ενός κανονικού πετρώματος.

Τα μοντέλα του Fumagalli (1963, 1967) με μεγάλες ασυνέχειες (όπως μεγάλα ρήγματα), αναπαριστούν επίσης και μικρές ασυνέχειες προσαρμόζοντας τα μηχανικά χαρακτηριστικά του υλικού που προσομοιώνει το στερεό πέτρωμα. Ανεξάρτητα από το πόσο σφικτά έρχονται σε επαφή μεταξύ τους τα τεμάχια του μοντέλου το ένα δίπλα στο άλλο, το άνοιγμα εξακολουθεί να είναι πολύ μεγάλο και έτσι συμπεραίνεται ότι οι ασυνέχειες του σχεδιαζόμενου μοντέλου δε πρέπει να σχεδιάζονται ακριβώς ίδιες με το πρωτότυπο πρόβλημα. Οι λείες επιφάνειες των ανεξάρτητων τεμαχίων δεν αναπαριστούν τη μέγιστη και παραμένουσα διατμητική αντοχή των ασυνεχειών του πετρώματος, αλλά η εισαγωγή κόλλας παρέχει αυτή την σημαντική ιδιότητα.

Σε όλα τα παραδείγματα που περιγράφονται από τον Stimpson (1970) είναι εμφανές ότι η πραγματική τραχύτητα των ασυνεχειών του πετρώματος δεν προσομοιώνεται και τα τοιχώματα των επιφανειών είναι μακροσκοπικά επίπεδα. Ο Krsmanovic (1966) παρατήρησε τη δυσκολία να αυξήσει τη γωνία τριβής των ασυνεχειών πάνω από τις 45 μοίρες. Σε χαμηλές ορθές τάσεις οι τιμές της γωνίας τριβής μπορούν να ξεπεράσουν τις 65 μοίρες. Η λύση αυτού του προβλήματος ήταν η παραγωγή συμπλεγμένων ασυνεχειών με μικρά βήματα μήκους 5-10mm. Αυτές οι επιφάνειες παρουσίασαν γωνία τριβής που είναι ανάλογη της ορθής τάσης και κυμαίνεται στις 40-65 μοίρες.

Ο Barton προσπάθησε να μοντελοποιήσει την επιφάνεια των ασυνεχειών όπως παρουσιάζονται στη φύση με σκοπό να προσομοιώσει τη μέγιστη και παραμένουσα διατμητική αντοχή και τη διασταλτικότητα. Οι επιφάνειες των ασυνεχειών παρήχθησαν με εφελκυστική θραύση των υλικών του μοντέλου και προσομοιώνουν πλήρως την μέγιστη και παραμένουσα διατμητική αντοχή των επιφανειών ασυνέχειας των πετρωμάτων.



### **3. ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΚΑΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΥΛΙΚΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ**

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφεται η ανάπτυξη υλικού για χρήση σε φυσικά μοντέλα με κυκλικές και τετραγωνικές οπές, που φορτίστηκαν σε μονοαξονική θλίψη. Περιγράφεται η σύνθεση και η διαδικασία παρασκευής του υλικού καθώς και οι μηχανικές του ιδιότητες. Με βάση την επισκόπηση των υλικών που χρησιμοποιούνται στα φυσικά μοντέλα για προβλήματα μηχανικής των πετρωμάτων, επιλέχθηκε ένα κοκκώδες υλικό από τσιμεντοκονίαμα, ώστε να έχει αντοχές συγκρίσιμες με αυτές ενός πετρώματος και να παρουσιάζει και διασταλτική συμπεριφορά.

#### **3.1. Σύνθεση**

Το τσιμεντοκονίαμα, ένα μείγμα που αποτελείται από άμμο, τσιμέντο και νερό, επιλέχθηκε ως το υλικό των φυσικών μοντέλων, επειδή είναι ψαθυρό, έχει υψηλή αναλογία θλιπτικής και εφελκυστικής αντοχής, είναι φθινό, εύκολο στη μορφοποίηση και απλό στην επεξεργασία, στην ανάμειξη και στην ωρίμανση.

Οι αναλογίες των συστατικών που χρησιμοποιήθηκαν είναι οι εξής:

Τσιμέντο (26,15%)

Άμμος (55,26%)

Νερό (18,43%)

Η διαδικασία ανάμειξης είναι απλή. Σε μία λεκάνη τοποθετούμε την ποσότητα άμμου, τσιμέντου και νερού που χρειαζόμαστε και την αναμειγνύουμε μηχανικά μέχρι να γίνει το μείγμα ομοιόμορφο και ομοιογενές. Στη συνέχεια τοποθετούμε το μείγμα σε καλούπια μεγέθους και σχήματος της επιλογής μας. Αφήνουμε σε αυτά το μείγμα για τρεις ημέρες, και κατόπιν το βγάζουμε από τα καλούπια και το αφήνουμε σε λεκάνη που είναι γεμάτη με νερό βρύσης. Αφού περάσουν πέντε ημέρες βγάζουμε τα δοκίμια από το νερό και τα αφήνουμε να στεγνώσουν σε θερμοκρασία δωματίου.

### 3.2. Προετοιμασία κύβων για δοκιμές θλίψης

Για τον προσδιορισμό της αντοχής του τσιμεντοκονιάματος εκτελέστηκαν δοκιμές θλίψης σε κύβους διαστάσεων 5 cm x 5 cm x 5 cm. Ο κάθε κύβος έχει όγκο  $V=0,05^3 \text{ m}^3$ . Άρα για 20 κύβους που θέλουμε να κατασκευάσουμε, ο συνολικός όγκος είναι  $V_{\text{total}}=20*0.05^3=0.0025\text{m}^3$

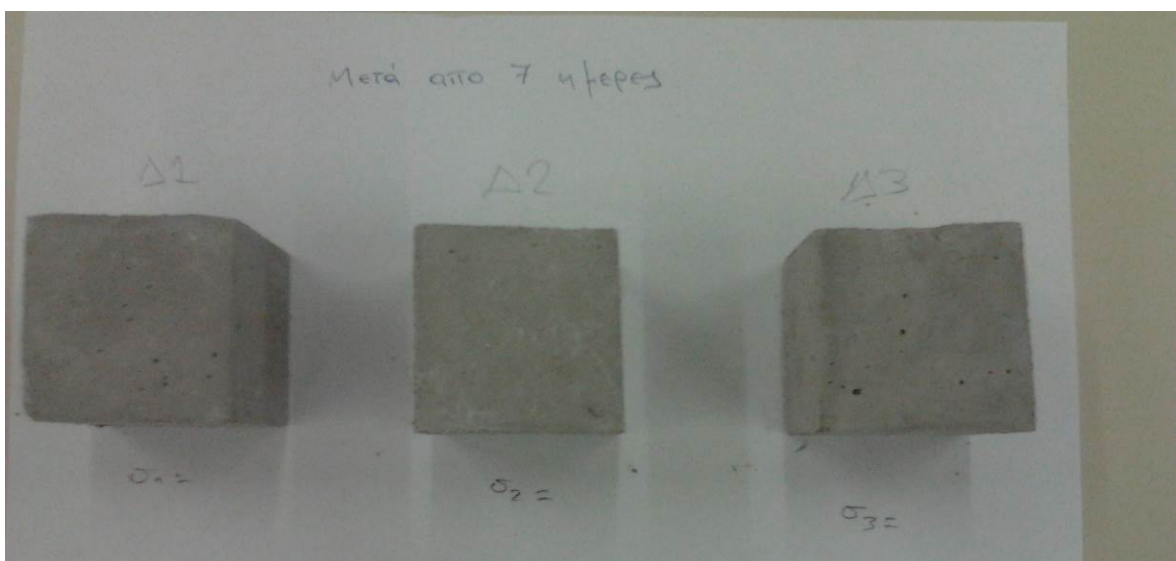
Το ειδικό βάρος είναι  $\gamma=2500\text{kg/m}^3$ . Ισχύει η σχέση  $\gamma=M/V$  άρα το συνολικό βάρος  $M=6,5\text{kg}$  περίπου.

Οι αναλογίες κατά βάρος για το μίγμα μας είναι 2.1 άμμος, 1 τσιμέντο και 0.4 νερό. Άρα το βάρος είναι  $2.1+1+0,4=3,5\text{kg}$ .

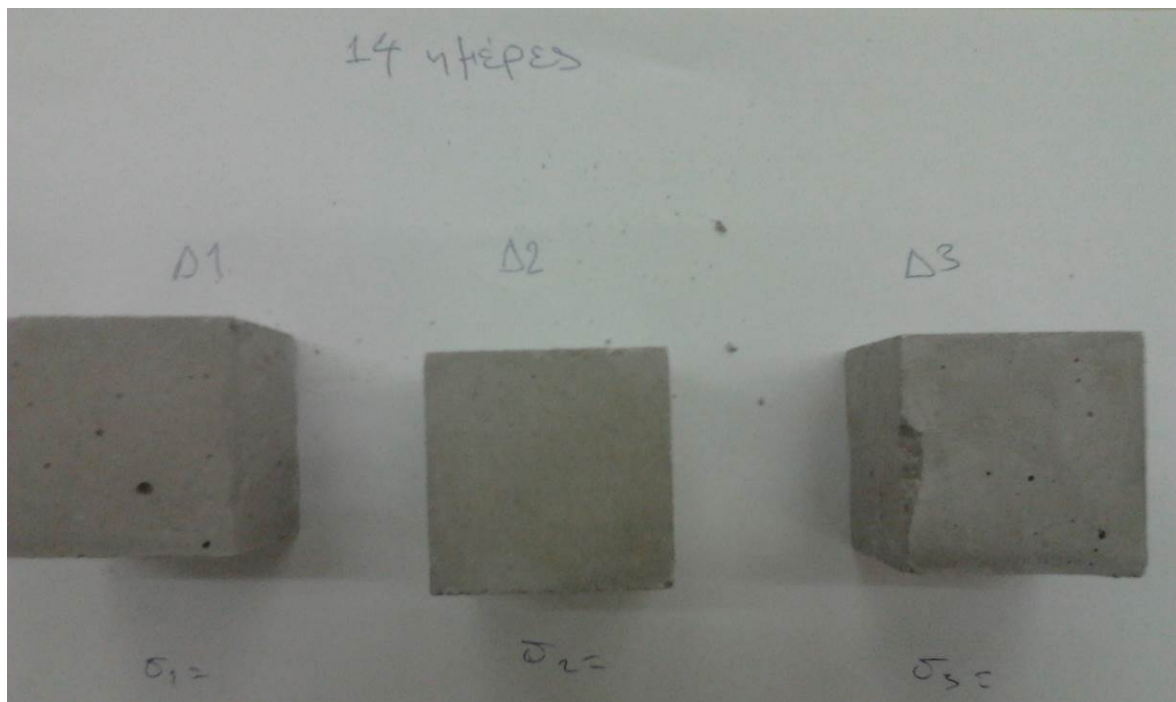
Με απλή μέθοδο των τριών και για  $M=6,5\text{kg}$  χρειαζόμαστε 3.9kg άμμο, 1.85 kg τσιμέντο και 0.875kg νερό.

Αφού ανακατέψουμε το μείγμα μέχρι να γίνει ομοιόμορφο, το τοποθετούμε σε 7 καλούπια των 3 θέσεων το καθένα, τα οποία τα έχουμε αλείψει με λιπαντικό, για να αποφευχθεί η επικόλληση του μείγματος με το καλούπι.

Τα αφήνουμε να στεγνώσουν σε θερμοκρασία δωματίου για 3 ημέρες και στη συνέχεια βγάζουμε τους κύβους από τα καλούπια, και τα τοποθετούμε σε λεκάνη την οποία γεμίζουμε με νερό και αφήνουμε τα δείγματα στο νερό για 5 ημέρες. Από τους 20 κύβους χρησιμοποιούμε 4 για κάθε σειρά δοκιμών θλίψης με απόσταση των δοκιμών μία εβδομάδα.



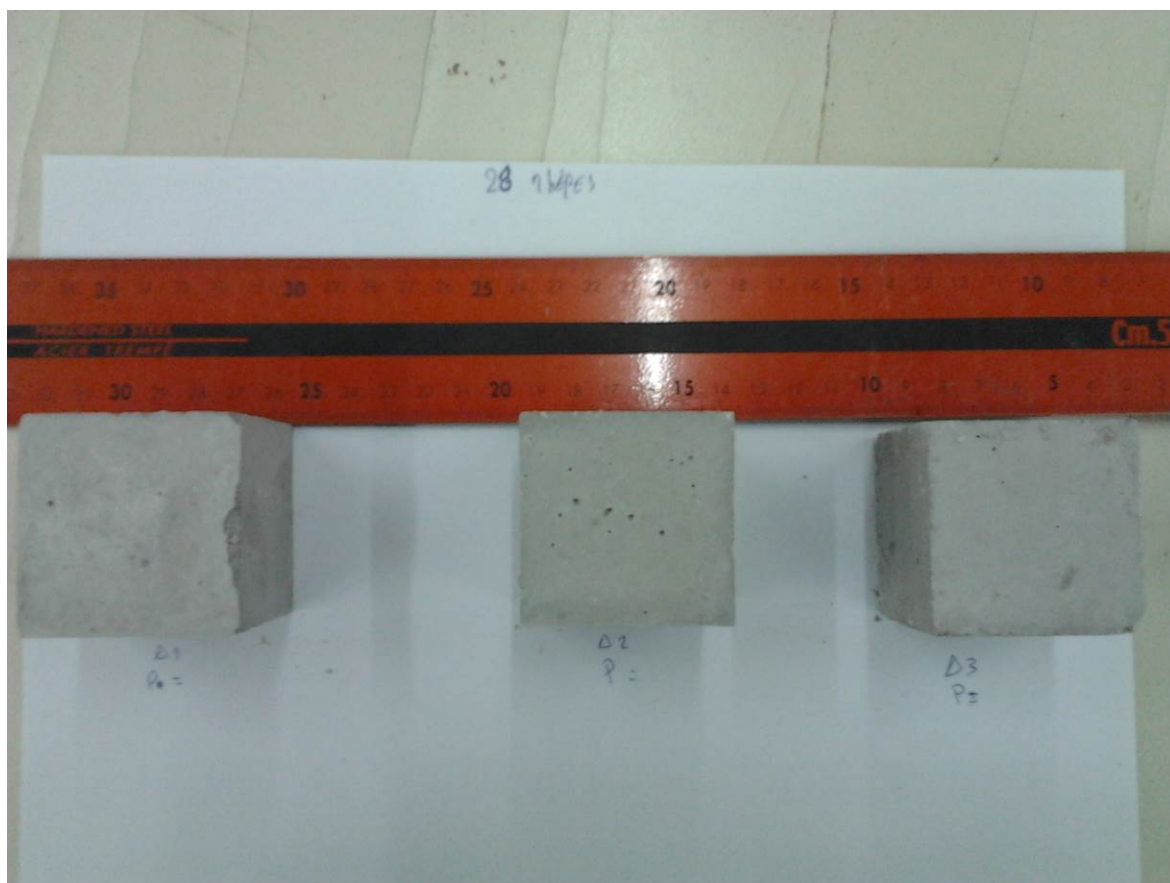
Εικόνα 3-1. Τα δοκίμια στις 7 ημέρες.



Εικόνα 3-2. Τα δοκίμια στις 14 ημέρες.



Εικόνα 3-3. Τα δοκίμια στις 21 ημέρες.



Εικόνα 3-4. Τα δοκίμια στις 28 ημέρες.

### 3.3. Προετοιμασία πρισμάτων για δοκιμές θλίψης

Κατασκευάσαμε 4 πρίσματα με διαστάσεις όπως στον παρακάτω πίνακα. Για κάθε πρίσμα υπολογίζουμε το εμβαδό της διατομής και την ισοδύναμη διάμετρο  $De$  που αντιστοιχεί στην διάμετρο ενός κύκλου με το ίδιο εμβαδό με εκείνο της διατομής του πρίσματος. Ο λόγος ύψους  $H$  προς ισοδύναμη διάμετρο  $De$  διατηρείται σταθερός στο 2.66.

Πίνακας 3-1. Διαστάσεις των πρισματικών δοκιμίων.

Αριθμ.	H (mm)	B (mm)	L (mm)	A (mm <sup>2</sup> )	De (mm)	H/De	V (m <sup>3</sup> )
1	150	50	50	2500	56.42	2.66	0.000375
2	150	50	50	2500	56.42	2.66	0.000375
3	225	75	75	5625	84.63	2.66	0.001266
4	225	75	75	5625	84.63	2.66	0.001266

Με τις ίδιες αναλογίες συστατικών όπως για τους κύβους αναμειγνύουμε μηχανικά μέχρι το μείγμα να γίνει ομοιογενές και στη συνέχεια το τοποθετούμε σε τέσσερα καλούπια των δύο παραπάνω διαστάσεων.



Εικόνα 3-5. Εικόνα από τα καλούπια των δοκιμίων.

Αφού αφήσουμε το μείγμα να στερεοποιηθεί στα καλούπια για τρεις ημέρες τοποθετούμε τα δοκίμια σε μία λεκάνη με νερό για επτά ημέρες.



Εικόνα 3-6. Τοποθέτηση των πρισμάτων σε νερό για 7 ημέρες.

Μετά το πέρας των επτά ημερών βγάζουμε τα δοκίμια από το νερό και τα αφήνουμε να στεγνώσουν. Μετά από 30 ημέρες υποβάλλονται σε δοκιμές φόρτισης, σε συνδυασμό με την καταγραφή της ακουστικής εκπομπής.



Εικόνα 3-7. Τα δοκίμια 3 και 4 μετά από 30 ημέρες.



Εικόνα 3-8. Τα δοκίμια 1 και 2 μετά από 30 ημέρες.

### 3.4. Δοκιμές αντοχής σε κύβους

#### 3.4.1. Περιγραφή πειραματικής διαδικασίας

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω δοκιμάζουμε την αντοχή σε θλίψη των κύβων ανά διάστημα 7 ημερών. Μέχρι και την 28<sup>η</sup> ημέρα οι δοκιμές πραγματοποιούνται σε μικρής δυναμικότητας χειροκίνητη πρέσας, ενώ την 42<sup>η</sup> ημέρα χρησιμοποιήσαμε αυτόματη πρέσα μέσης δυναμικότητας.

Πριν την έναρξη των δοκιμών προσέχουμε να τοποθετήσουμε τους κύβους στο κέντρο των πλακών φόρτισης της πρέσας, ώστε να κατανεμηθούν ομοιόμορφα οι φορτίσεις.

#### 3.4.2. Φωτογραφίες δοκιμών φόρτισης κύβων

- 7 ημέρες



Εικόνα 3-9. Το δοκίμιο στο χειροκίνητο πλαίσιο φόρτισης πριν τη δοκιμή μονοαξονικής θλίψης.



Εικόνα 3-10. Θραύση του δοκιμίου.

- 14 ημέρες



Εικόνα 3-11. Το δοκίμιο στο χειροκίνητο πλαίσιο φόρτισης πριν την έναρξη της δοκιμής μονοαξονικής θλίψης.





Εικόνα 3-12. Θραύση του δοκιμίου.

- 21ημέρες



Εικόνα 3-13. Το δοκίμιο στο χειροκίνητο πλαίσιο φόρτισης πριν την έναρξη της δοκιμής μονοαξονικής θλίψης.



Εικόνα 3-14. Θράυση του δοκιμίου.

- 28 ημέρες

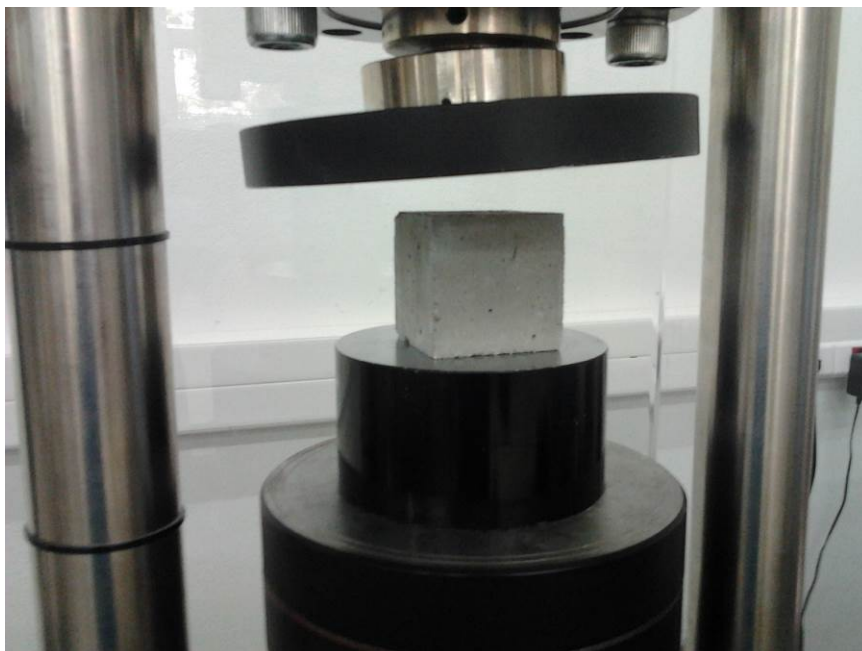


Εικόνα 3-15. Το δοκίμιο στο χειροκίνητο πλαίσιο φόρτισης πριν την έναρξη της δοκιμής μονοαξονικής θλίψης.

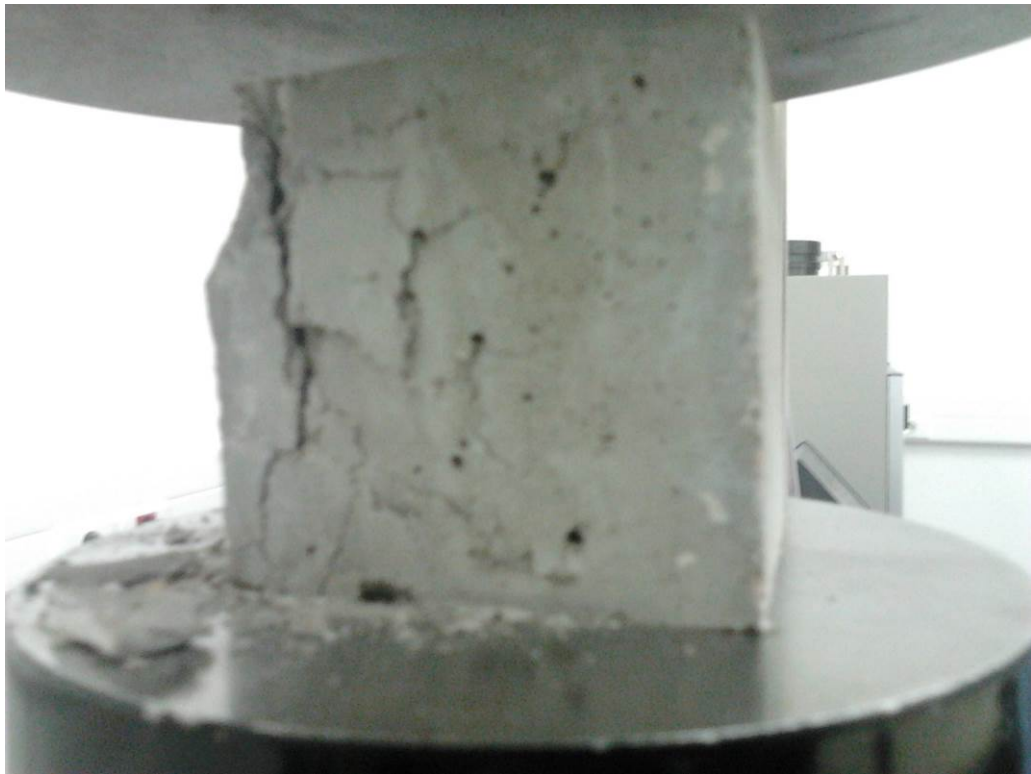


Εικόνα 3-16. Το δοκίμιο στο χειροκίνητο πλαίσιο φόρτισης πριν την έναρξη της δοκιμής μονοαξονικής θλίψης.

- 42 ημέρες



Εικόνα 3-17. Το δοκίμιο στο πλαίσιο φόρτισης 250 kN πριν την έναρξη της δοκιμής μονοαξονικής θλίψης.



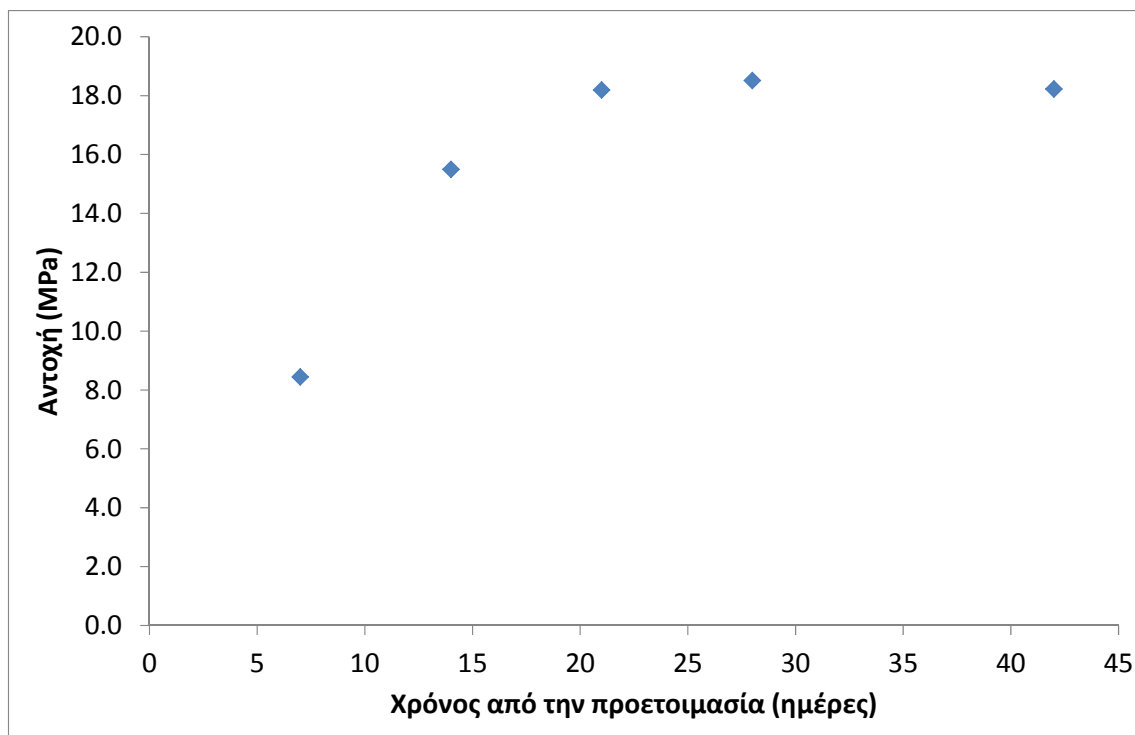
Εικόνα 3-18. Θράυση του δοκιμίου.

### 3.4.3. Σύνοψη αποτελεσμάτων και αξιολόγηση

Στον Πίνακα 3.2 δίνονται τα αποτελέσματα των δοκιμών μονοαξονικής θλίψης σε κύβους, ενώ στο διάγραμμα του Σχήματος 3.1 δίνεται η μεταβολή της αντοχής του κύβου συναρτήσει του χρόνου από την προετοιμασία.

Πίνακας 3-2. Αποτελέσματα της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη.

ημέρες	Φορτίο (kN)				$\sigma_c$ (MPa)
	$\Delta 1$	$\Delta 2$	$\Delta 3$	$\Delta 4$	
7	20.2	23.6	21.3	19.3	8.4
14	33.4	43.8	39.0		15.5
21	46.7	40.0	49.7		18.2
28	45.5	43.5	49.8		18.5
42	42.2	51.8	42.7	45.3	18.2



Σχήμα 3.1. Διάγραμμα μεταβολής της αντοχής του κύβου συναρτήσει του χρόνου από την προετοιμασία.

Παρατηρούμε ότι η αντοχή αυξάνεται μέχρι και την 21<sup>η</sup> ημέρα ενώ μετά το πέρας 21 ημερών η αντοχή των κύβων σταθεροποιείται και είναι λίγο μεγαλύτερη από 18MPa.

### 3.5. Δοκιμές θλίψης σε πρίσματα

#### 3.5.1. Περιγραφή πειραματικής διαδικασίας

Οι δοκιμές αντοχής στα πρίσματα πραγματοποιούνται στη πρέσα μεσαίας δυναμικότητας, για τα μικρού μεγέθους πρίσματα, και στη πρέσα μεγάλης δυναμικότητας, για τα μεγάλου μεγέθους πρίσματα. Σε αυτές τις δοκιμές πραγματοποιήθηκε και καταγραφή της ακουστικής εκπομπής. Όπως και στους κύβους κεντράrouμε τα δοκίμια στη πρέσα, για να επιτύχουμε ομοιόμορφη κατανομή των φορτίσεων.

#### 3.5.2. Καταγραφή ακουστικής εκπομπής

Η διαδικασία αστοχίας των δοκιμίων μελετήθηκε με τη μέθοδο της ΑΕ και σχεδιάστηκαν γραφήματα της δραστηριότητας ΑΕ και της μεταβολής της στο χρόνο.

Για τη μετατροπή των ελαστικών τασικών κυμάτων σε σήματα AE χρησιμοποιήθηκαν πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες της εταιρίας Physical Acoustics Corporation, τύπου PAC micro-100S και τύπου R15. Τα δεδομένα AE καταγράφηκαν από πολυκάναλο σύστημα AE οχτώ καναλιών τύπου PCI 8 της εταιρίας PAC, μέσω του σχετικού λογισμικού AE-Win και NOESIS 5.4 για H/Y. Κατά τη διάρκεια της καταγραφής, δεν επιβλήθηκε κανένα φίλτρο. Αξίζει να σημειωθεί ότι δεν καταγράφηκαν ανεπιθύμητα σήματα θορύβου RFI και EMI, ενώ με την επιλεγμένη τάση κατωφλίου διαχωρίζονται και φιλτράρονται πριν από την ανάλυση ενδεχόμενα σήματα θορύβου βάθους.

Οι MICRO – 100S είναι αισθητήρες ακουστικής εκπομπής μικρού μεγέθους. Οι διαστάσεις τους είναι 10x12 mm, το εύρος συχνοτήτων λειτουργίας είναι 200 - 950 kHz και η θερμοκρασία λειτουργίας είναι από -65 έως +177 °C. Οι R15 είναι κι αυτοί αισθητήρες ακουστικής εκπομπής με συχνότητα συντονισμού 150 kHz (δηλ., παρουσιάζουν μέγιστη ευαισθησία σε αυτήν τη συχνότητα). Οι διαστάσεις τους είναι 19x22 mm, το εύρος συχνοτήτων λειτουργίας είναι 50 - 200 kHz και η θερμοκρασία λειτουργίας είναι από -65 έως 175 °C. Το εξωτερικό περίβλημα των δύο τύπων αισθητήρων που χρησιμοποιήθηκαν είναι από ανοξείδωτο χάλυβα ενώ η βάση είναι κεραμική. Εσωτερικά φέρουν κατάλληλη επίστρωση που περιορίζει τα ανεπιθύμητα σήματα θορύβου RFI (Radio Frequency Interference) και EMI (Electromagnetic Interference). Συνδέονται με καλώδια SMA και επικολλούνται στην επιφάνεια του υλικού υπό εξέταση με κατάλληλο μέσο σύνδεσης που μπορεί να είναι μία μη τοξική, μη αγωγική, παχύρρευστη σιλικόνη, ρητίνη ή σιλικονούχο γράσο. Στην περίπτωση μας ως μέσο σύζευξης του αισθητήρα με το σκυρόδεμα χρησιμοποιήθηκε παχύρρευστη γέλη ultrasound transmission gel (eco supergel) ενώ η συνεχής επαφή με την επιφάνεια του δοκιμίου εξασφαλίστηκε μέσω ελαστικής ταινίας. Οι συχνότητες απόκρισης των αισθητήρων είναι τέτοιες ώστε να ελαχιστοποιείται ο θόρυβος από το περιβάλλον ενώ γενικότερα παρουσιάζουν καλά χαρακτηριστικά ευαισθησίας σε όλο το εύρος συχνοτήτων λειτουργίας τους.

Για την ενίσχυση του σήματος χρησιμοποιήθηκαν προ-ενισχυτές τύπου PAC 2/4/6, με δυνατότητα ενίσχυσης της έντασης του σήματος AE κατά 20/40/60 dB. Η επιλογή ενίσχυσης του εισερχόμενου σήματος γίνεται μέσω διακόπτη (Gain Select). Το πλάτος του σήματος AE που καταγράφεται στο σύστημα υπολογίζεται λογαριθμικά σύμφωνα με τη παρακάτω σχέση:

$dB = 20 \log (V_{max}/1\mu\text{volt}) - (\text{Ενίσχυση προ-ενισχυτή σε dB})$

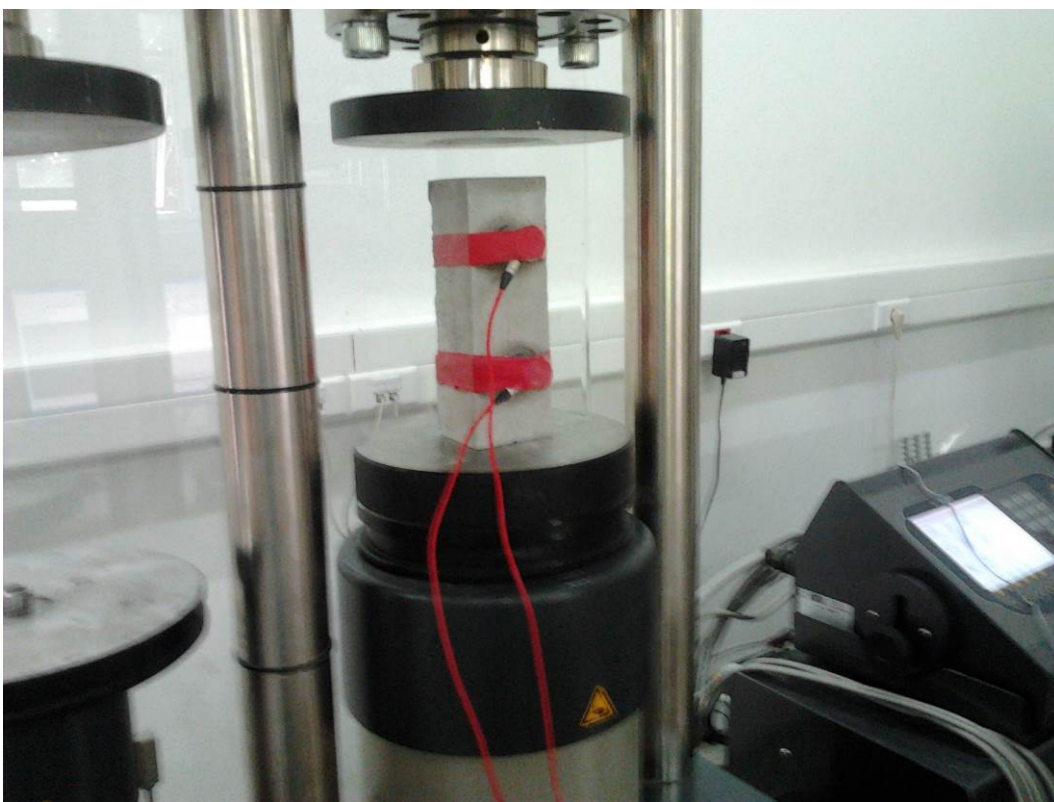
Όταν η ενίσχυση του σήματος ΑΕ ρυθμίζεται στα 20 dB τότε το συχνοτικό εύρος λειτουργίας κυμαίνεται από 10 kHz έως 2.5 MHz, όταν ρυθμίζεται στα 40 dB (συνήθης επιλογή) κυμαίνεται από 10 kHz - 2.0 MHz και όταν ρυθμίζεται στα 60 dB κυμαίνεται στα 10 kHz - 900 kHz. Το ρεύμα λειτουργίας είναι 30 mA και η σύνθετη αντίσταση 10 kΩ. Αυτός ο τύπος προ-ενισχυτών συνδέεται με αισθητήρες μονής εξόδου (απλοί αισθητήρες, single-ended) ή με διαφορικούς αισθητήρες (differential). Η σύνδεση φίλτρου δίδει τη δυνατότητα επιλογής του διερχόμενου σήματος (φιλτράρισμα) καθώς και ελαχιστοποίηση των ανεπιθύμητων θορύβων. Γενικά υπάρχουν φίλτρα διαχωρισμού χαμηλών συχνοτήτων (High Pass Filter), διαχωρισμού υψηλών συχνοτήτων (Low Pass) και ανοιχτού τύπου (Band Pass). Στα πλαίσια των δοκιμών που έγιναν επιλέγηκε ενίσχυση του εισερχόμενου σήματος ΑΕ στα 40 dB (συχνοτικό εύρος παρακολούθησης 10 kHz - 2.0 MHz).

Η περαιτέρω ανάλυση των καταγραφέντων σημάτων ΑΕ πραγματοποιήθηκε με τα λογισμικά πακέτα AE-Win Software και Noesis 5.4 τα οποία παρέχουν: Ταξινόμηση, προβολή και επεξεργασία στοιχείων σε πραγματικό χρόνο. Ομαδοποίηση, σύγκριση γραφημάτων και στατιστική ανάλυση. Προχωρημένη προβολή δεδομένων [π.χ. Histograms (2D, 3D), Scatters (point plots 2D, 3D), Bars κλπ.), αξιοποίηση και φιλτράρισμα. Προβολή κυματομορφών, φασματικών αναλύσεων FFT (Fast Fourier Transformation) και συχνοτικού περιεχομένου (Power Spectrum Analysis). Εντοπισμός της θέσης προέλευσης των σημάτων σε πραγματικό χρόνο, με γραμμικό εντοπισμό (Linear Location), με διδιάστατο εντοπισμό (2D Planar Location), τρισδιάστατο εντοπισμό (3D Planar Location) και εντοπισμό κατά ζώνες (Zonal Location). Εντοπισμό του προσανατολισμού των ρωγμών καθώς και την κατηγοριοποίηση του τύπου των ρωγμών (π.χ. εφελκυστικές ή διατμητικές ρωγμές) μέσω του προσδιορισμού του ταυυστή των ροπών (moment tensor analysis - sigma analysis).

### 3.5.3. Φωτογραφίες δοκιμών φόρτισης πρισμάτων

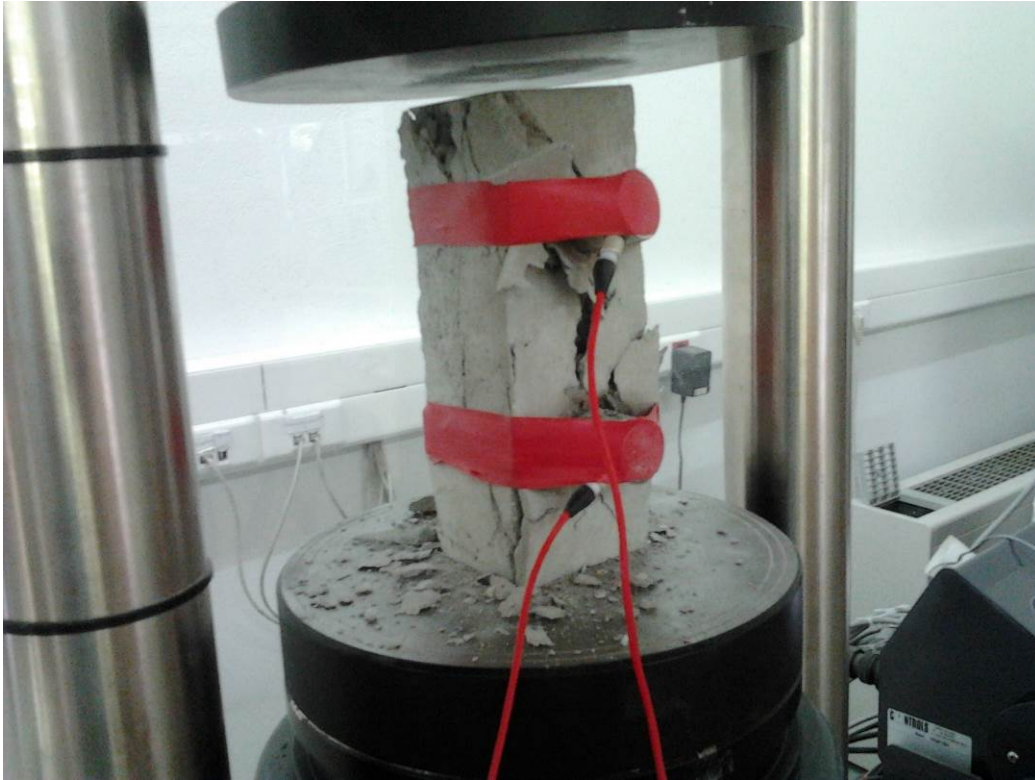


Εικόνα 3-19. Τοποθέτηση τζελ στο πρίσμα για τη βελτίωση της επαφής των αισθητήρων της ακουστικής εκπομπής με το υλικό.



Εικόνα 3-20. Το πρίσμα στο πλαίσιο φόρτισης δυναμικότητας 250 kN πριν την έναρξη της δοκιμής φόρτισης.





Εικόνα 3-21. Θραύση του δοκιμίου.



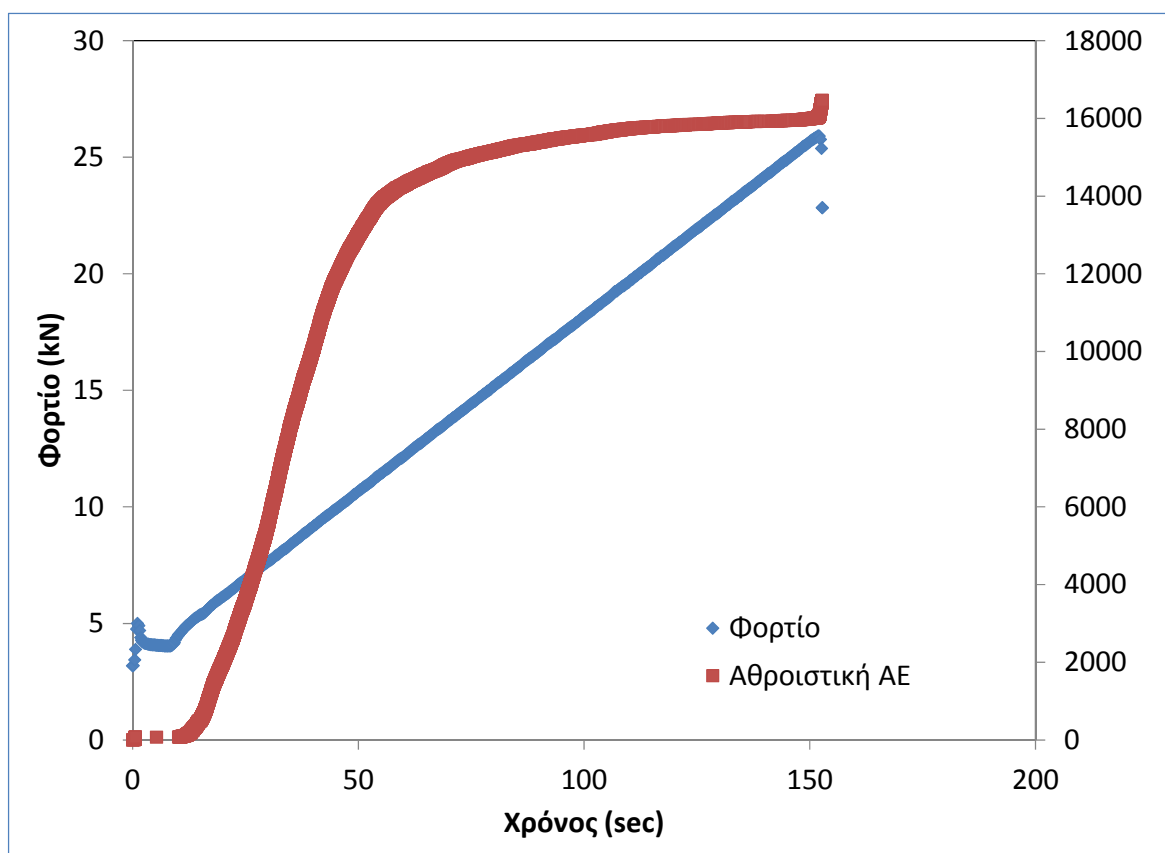
Εικόνα 3-22. Τοποθέτηση του πρίσματος στο πλαίσιο φόρτισης δυναμικότητας 5000 kN πριν την έναρξη της φόρτισης.



Εικόνα 3-23. Θραύση του δοκιμίου.

### 3.5.4. Πρίσμα #1

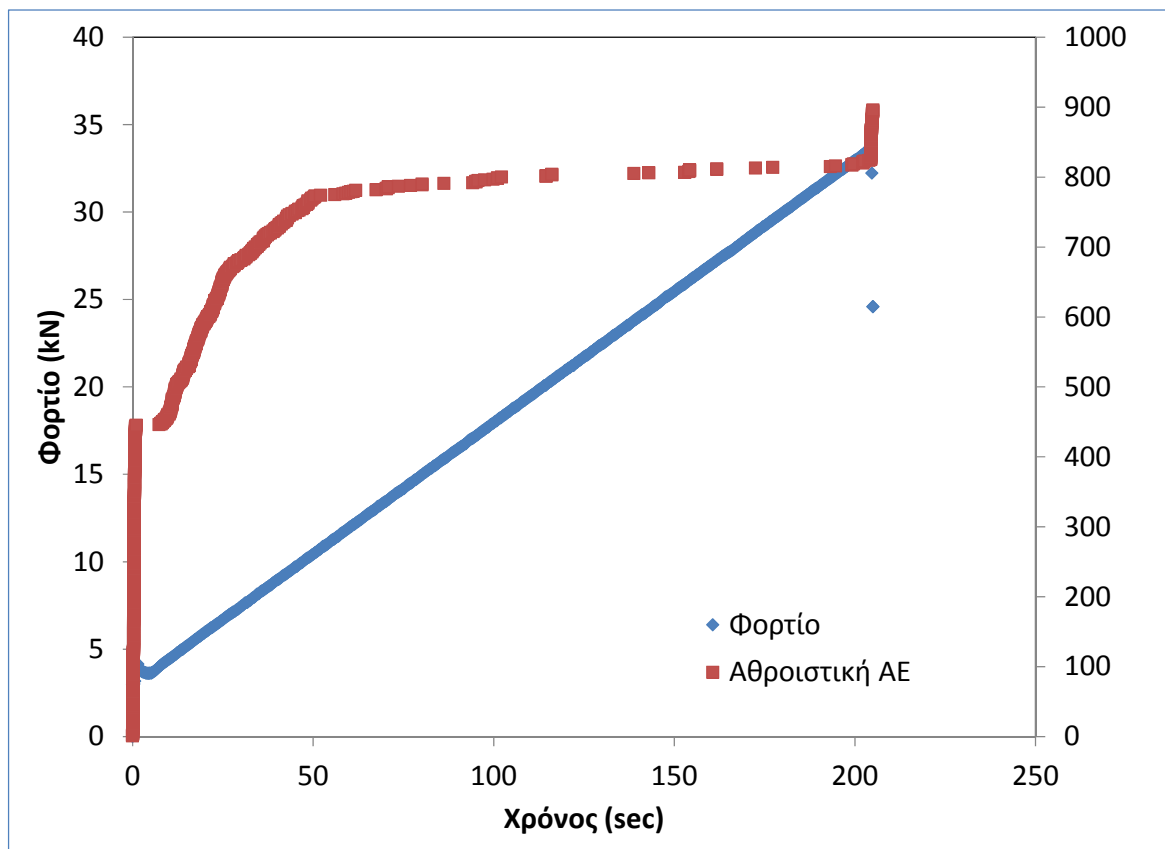
Στο Σχήμα 3.2 δίνεται το διάγραμμα φορτίου-χρόνου καθώς και το διάγραμμα αθροιστικής δραστηριότητας AE – χρόνου. Το μέγιστο φορτίο του δοκιμίου ήταν 25,7 kN. Οι αισθητήρες που χρησιμοποιήθηκαν για την καταγραφή της AE ήταν συχνότητας 150 kHz και έτσι καταγράφηκαν πολλά σήματα AE. Από το διάγραμμα AE-χρόνου προκύπτει μία μεγάλη και συνεχής αύξηση της AE με την αύξηση της φόρτισης μέχρι φορτίου 12 kN περίπου, ενώ στη συνέχεια ο ρυθμός έκλυσης AE μειώνεται. Αυτή η συμπεριφορά δεν αναμενόταν, και δεν αντικατοπτρίζει τη συμπεριφορά των πετρωμάτων σε αντίστοιχες θλιπτικές δοκιμές.



Σχήμα 3.2. Διάγραμμα φορτίου-χρόνου και AE- χρόνου για το πρίσμα #1.

### 3.5.5. Πρίσμα #2

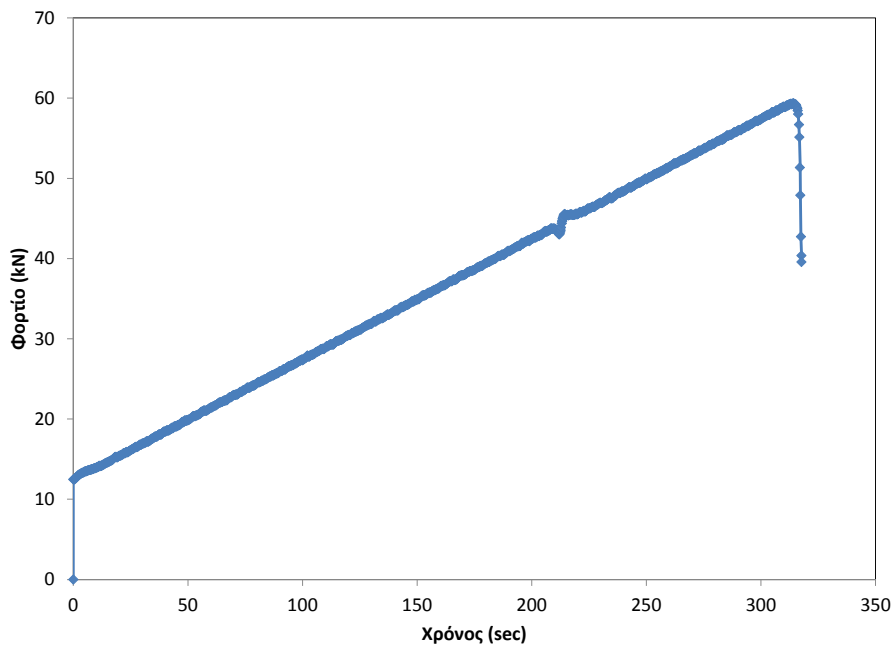
Στο Σχήμα 3.3 δίνεται το διάγραμμα φορτίου – χρόνου και αθροιστικής δραστηριότητας ΑΕ με το χρόνο της δοκιμής. Το μέγιστο φορτίο που καταγράφηκε ήταν 33,57 kN. Από το διάγραμμα ΑΕ-χρόνου προκύπτει μία μεγάλη και συνεχής αύξηση της ΑΕ με την αύξηση της φόρτισης μέχρι φορτίου 12 kN περίπου, ενώ στη συνέχεια ο ρυθμός έκλυσης ΑΕ μειώνεται. Αυτή η συμπεριφορά δεν αναμενόταν, και δεν αντικατοπτρίζει τη συμπεριφορά των πετρωμάτων σε αντίστοιχες θλιπτικές δοκιμές.



Σχήμα 3.3. Διάγραμμα φορτίου-χρόνου και ΑΕ – χρόνου για το πρίσμα #2.

### 3.5.6. Πρίσμα #3

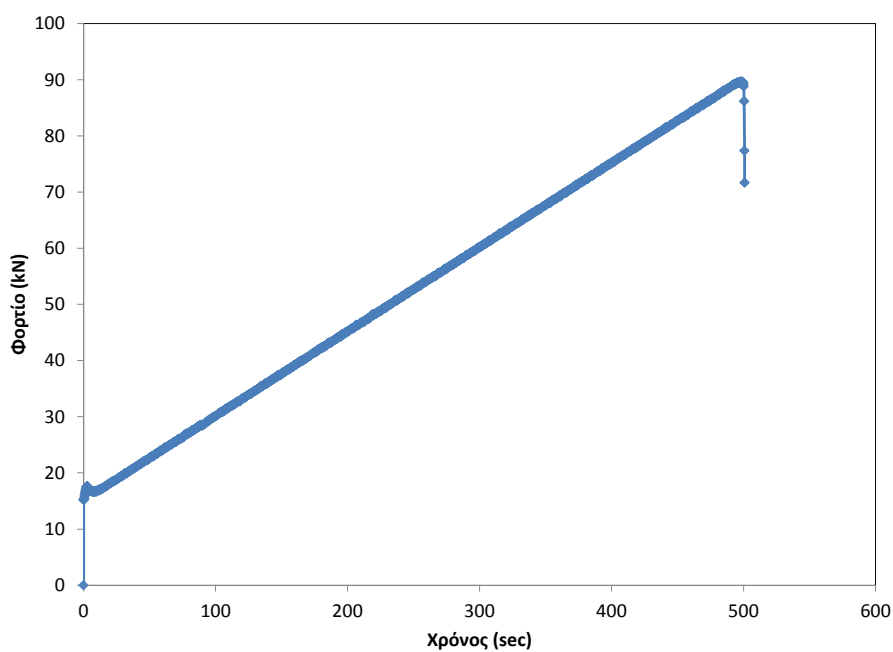
Στο Σχήμα 3.4 δίνεται το διάγραμμα φορτίου – χρόνου για τη δοκιμή μονοαξονικής θλίψης του πρίσματος #3. Στη συγκεκριμένη δοκιμή δεν καταγράφηκε το φορτίο σε σχέση με την ακουστική εκπομπή και συνεπώς δεν ήταν δυνατός ο συγχρονισμός της ΑΕ με τη δοκιμή θλίψης. Το μέγιστο φορτίο που καταγράφηκε ήταν 59,34 kN.



Σχήμα 3.4. Διάγραμμα φορτίου-χρόνου για το πρίσμα #3.

### 3.5.7. Πρίσμα #4

Στο Σχήμα 3.5 δίνεται το διάγραμμα φορτίου – χρόνου για τη δοκιμή μονοαξονικής θλίψης του πρίσματος #4. Στη συγκεκριμένη δοκιμή δεν καταγράφηκε το φορτίο σε σχέση με την ακουστική εκπομπή και συνεπώς δεν ήταν δυνατός ο συγχρονισμός της ΑΕ με τη δοκιμή θλίψης. Το μέγιστο φορτίο που καταγράφηκε ήταν 89,65 kN.



Σχήμα 3.5. Διάγραμμα φορτίου-χρόνου για το πρίσμα #4.

### 3.5.8. Σύνοψη αποτελεσμάτων και αξιολόγηση

Στον Πίνακα 3.3 δίνονται τα αποτελέσματα των δοκιμών μονοαξονικής θλίψης σε πρισματικά δοκίμια και ο υπολογισμός της μέσης αντοχής των δοκιμίων. Όπως παρατηρείται από αυτόν η αντοχή των πρισματικών δοκιμίων είναι μικρότερη από αυτή των κυβικών δοκιμίων. Ενώ στα κυβικά δοκίμια (λόγος  $H/D_e=0.89$ ) προσδιορίστηκε αντοχή 18.2 MPa, στα πρισματικά δοκίμια με λόγο  $H/D_e=2.66$  η αντοχή μειώνεται κατά τουλάχιστο 27%.

Πίνακας 3-3. Αποτελέσματα των δοκιμών και υπολογισμός της μέσης αντοχής των δοκιμίων.

Δοκίμιο	H (mm)	B (mm)	L (mm)	Φορτίο (kN)	$\sigma_c$ (MPa)	Μέση τιμή αντοχής (MPa)
Π1	150	50	50	25,91	10,36	11.89
Π2	150	50	50	33,57	13,43	
Π3	225	75	75	59.34	10.55	13.25
Π4	225	75	75	89.65	15.94	

## 4. ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΚΑΙ ΔΟΚΙΜΕΣ ΣΕ ΦΥΣΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΜΕ ΟΠΕΣ

### 4.1. Διαδικασία κατασκευής φυσικών δοκιμίων με ανοίγματα

Θέλουμε να κατασκευάσουμε φυσικά μοντέλα με κυκλικό άνοιγμα και με τετραγωνικό άνοιγμα. Τα μοντέλα με κυκλικό άνοιγμα θα έχουν διαστάσεις 15x15x5 cm ή 20x20x5 cm, ενώ η διάμετρος του ανοίγματος είναι 5,4 cm. Από τα δοκίμια με τετραγωνικό άνοιγμα όλα θα έχουν διαστάσεις 15x15x5 cm με τετραγωνικό άνοιγμα διαστάσεων 5x5 cm. Όλα τα φυσικά μοντέλα θα χρησιμοποιηθούν σε δοκιμές θλίψης σε συνδυασμό με τη χρήση ακουστικής εκπομπής.

Η διαδικασία κατασκευής είναι παρόμοια με αυτή των κύβων και των πρισμάτων. Η αναλογίες των συστατικών, η ανάμειξή τους, ο χρόνος παραμονής του μείγματος στα καλούπια, η εισαγωγή των δοκιμίων σε νερό και ο χρόνος στερεοποίησης-πήξης είναι ακριβώς ίδια με των παραπάνω. Η μόνη διαφορά στη κατασκευή βρίσκεται στο σχεδιασμό του ανοίγματος.

Το κυκλικό άνοιγμα των δοκιμίων σχεδιάζεται αρχικά στο μέσο των φυσικών μοντέλων με διάμετρο 5,4 cm.



Εικόνα 4-1. Καλούπι για προετοιμασία φυσικού μοντέλου με κυκλικό άνοιγμα.

Εκεί θα τοποθετήσουμε ένα μαρμάρινο κυλινδρικό δοκίμιο ίδιας διαμέτρου και στη συνέχεια θα τοποθετήσουμε το μείγμα, προσέχοντας να μη μετακινηθεί ο κύλινδρος. Επειδή αυτό έχει μία σχετική συνάφεια με το μείγμα τσιμεντοκονιάματος θα το περιτυλίξουμε με αλουμινόχαρτο, ώστε να αποφευχθεί τυχόν επικόλλησή του με το μείγμα κατά τη διάρκεια της αρχικής στερεοποίησης.

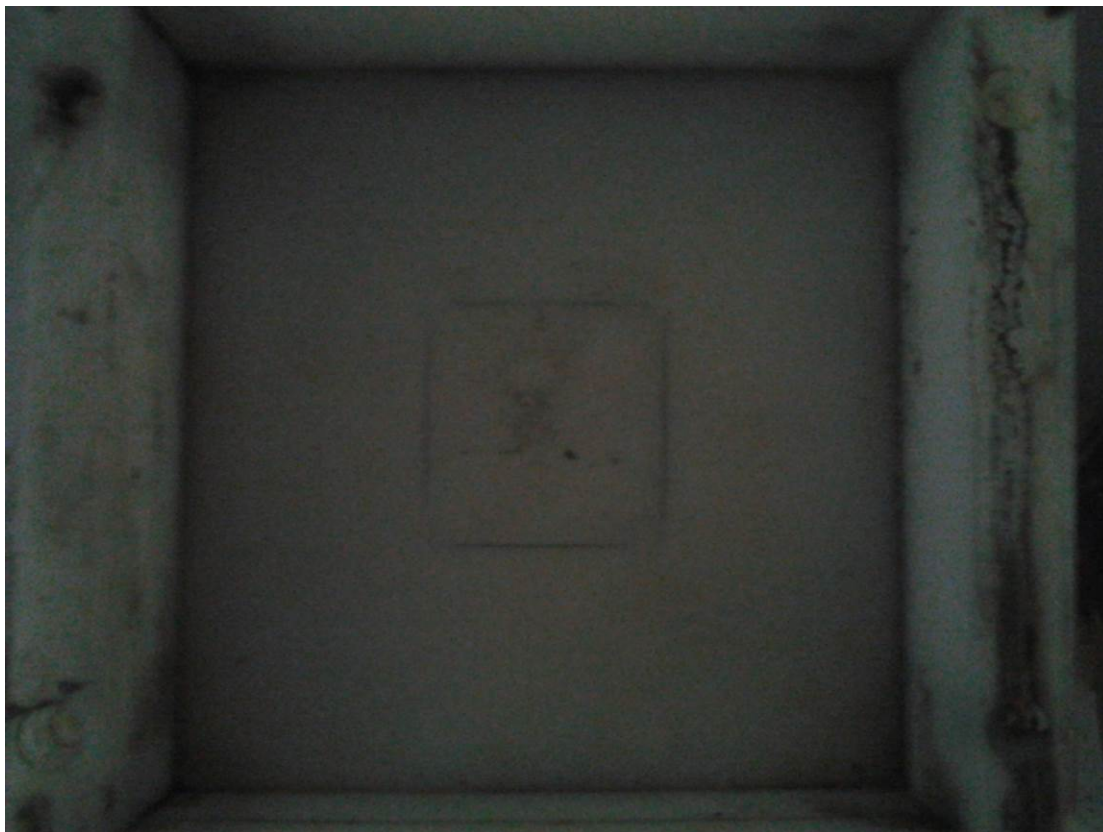


Εικόνα 4-2. Κατασκευή φυσικού μοντέλου με κυκλικό άνοιγμα.

Μετά την πάροδο τριών ημερών αφαιρούμε αρχικά τον κύλινδρο από το μοντέλο και στη συνέχεια αφαιρούμε το μοντέλο από το καλούπι και το τοποθετούμε σε νερό για 5 ημέρες. Το αφήνουμε να στερεοποιηθεί τελείως για 30 ημέρες οπότε και θα το δοκιμάσουμε σε θλίψη.

Για το σχεδιασμό των φυσικών μοντέλων με τετραγωνικό άνοιγμα θα ακολουθήσουμε ακριβώς την ίδια διαδικασία, μόνο που αυτή τη φορά για το σχεδιασμό του ανοίγματος θα χρησιμοποιήσουμε κύβους περιτυλιγμένους με αλουμινόχαρτο.





Εικόνα 4-3. Καλούπι για δημιουργία φυσικού μοντέλου με τετραγωνικό άνοιγμα.

#### 4.2. Φυσικό μοντέλο #1 με κυκλικό άνοιγμα

Αυτό το δοκίμιο τοποθετήθηκε κατευθείαν σε ένα πλαίσιο πολύ μεγάλης δυναμικότητας (5000 kN). Στην αρχή της φόρτισης, με την επαφή της πλάκας φόρτισης με το δοκίμιο η δύναμη που ασκήθηκε προκάλεσε κατευθείαν εφελκυστικές ρωγμές στο πάνω και στο κάτω μέρος του τοιχώματος της οπής. Έτσι, στα 37 sec της φόρτισης, που αντιστοιχεί με την αρχή της δοκιμής παρατηρούμε τις αρχικές εφελκυστικές ρωγμές.



Εικόνα 4-4. Στα 37 sec της βιντεοσκόπησης

Στα 41 sec της βιντεοσκόπησης, παρατηρήσαμε μικρές αποφλοιώσεις στα πλευρικά τοιχώματα του ανοίγματος. Στα 58 sec φαίνεται η περαιτέρω ανάπτυξη των εφελκυστικών ρωγμών, καθώς και περαιτέρω αποφλοιώσεις. Στα 92 sec διπλασιάζουμε το ρυθμό φόρτισης. Στα 114 sec εξελίσσονται αποφλοιώσεις στα πλευρικά τοιχώματα του ανοίγματος. Στα 134 sec η κάτω εφελκυστική ρωγή αρχίζει να κλείνει. Στα 159 sec

εμφανίζεται επιφανειακή αποφλοίωση στη κάτω μεριά και η διατομή έχει έντονα ρωγματοωθεί. Στα 180 και 183 sec παρατηρούνται αποφλοιώσεις στη δεξιά μεριά. Πλέον το φυσικό μοντέλο βρίσκεται στην τελική φάση φόρτισης, όπου πραγματοποιούνται συνεχόμενες αποφλοιώσεις, ανάπτυξη των παλαιότερων ρωγματώσεων καθώς και νέων κοντά στο κυκλικό άνοιγμα. Στα 219 και στα 237 sec η αποφλοίωση στο άνοιγμα του φυσικού μοντέλου συνεχίζεται. Στα 240 sec πραγματοποιείται αποφλοίωση στο κυκλικό άνοιγμα. Στα 300 sec φαίνεται η αποφλοίωση - συρρίκνωση δεξιά και αριστερά του ανοίγματος. Στα 321,334 και 367 sec φαίνονται παρακάτω μερικές από τις αποφλοιώσεις δεξιά και αριστερά στο κυκλικό άνοιγμα. Στα 379 sec το δοκίμιο φθάνει στη μέγιστη αντοχή του, χωρίς όμως να υποστεί κατάρρευση.



Εικόνα 4-5. Στα 41 sec της βιντεοσκόπησης



Εικόνα 4-6. Στα 58 sec



Εικόνα 4-7 Στα 114 sec



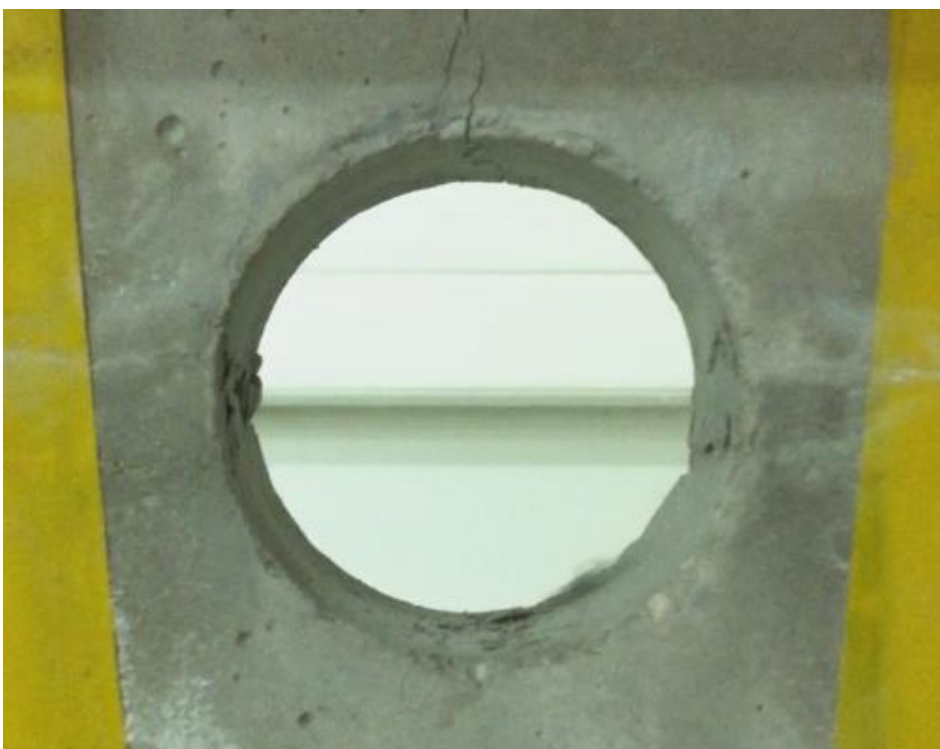
Εικόνα 4-8 Στα 134 sec



Εικόνα 4-9 Στα 159 sec



Εικόνα 4-10 Στα 180 sec



Εικόνα 4-11 Στα 183 sec



Εικόνα 4-12 Στα 219 sec



Εικόνα 4-13 Στα 240 sec



Εικόνα 4-14 Στα 300 sec



Εικόνα 4-15 Στα 321 sec





Εικόνα 4-16 Στα 334 sec



Εικόνα 4-17 Στα 367 sec



Εικόνα 4-18 Στα 379 sec

### 4.3. Φυσικό μοντέλο #2 με κυκλικό άνοιγμα

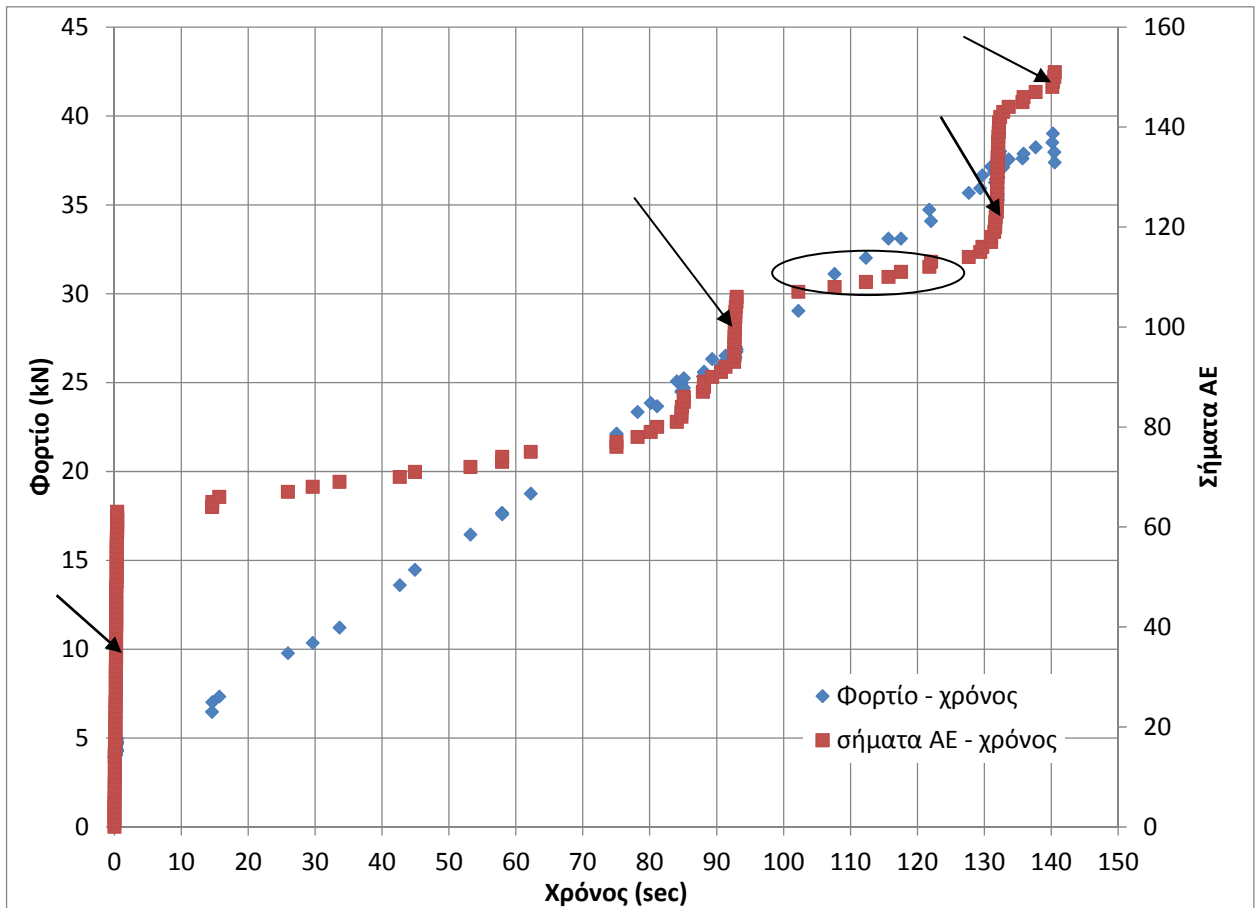
Αυτό το φυσικό μοντέλο, όπως φαίνεται και στη φωτογραφία έχει κάποιες αρχικές κατασκευαστικές ατέλειες, που δημιουργήθηκαν κατά την απομάκρυνση του κυλινδρικού μαρμάρινου δοκιμίου. Η φόρτιση του δοκιμίου έγινε σχεδόν κάθετα προς αυτές τις κατασκευαστικές ατέλειες, ώστε να επηρεάσουν όσο το δυνατόν λιγότερο τα αποτελέσματα



Εικόνα 4-19. Φυσικό μοντέλο #2, με κατασκευαστικές ατέλειες.

Στο Σχήμα 4.1 δίνεται το διάγραμμα φορτίου-χρόνου και αθροιστικής δραστηριότητας ΑΕ- χρόνου. Παρατηρούμε ότι τα σήματα ΑΕ ως προς το χρόνο απεικονίζουν με μεγάλη ακρίβεια τα φαινόμενα που συμβαίνουν κατά τη διάρκεια της φόρτισης στο φυσικό μοντέλο.

Με την έναρξη της φόρτισης παρατηρείται σχεδόν ταυτόχρονα η ανάπτυξη εφελκυστικών ρωγμών στην πάνω και στην κάτω πλευρά του κυκλικού ανοίγματος του φυσικού μοντέλου, οι οποίες φαίνονται καθαρά στα 2 sec της φόρτισης. Αυτές οι ρωγμές αποτυπώθηκαν ως απότομη αύξηση των σημάτων ΑΕ στο παραπάνω διάγραμμα στα 0-1 sec.



Σχήμα 4.1. Διάγραμμα φορτίου-σημάτων ΑΕ ως προς το χρόνο.



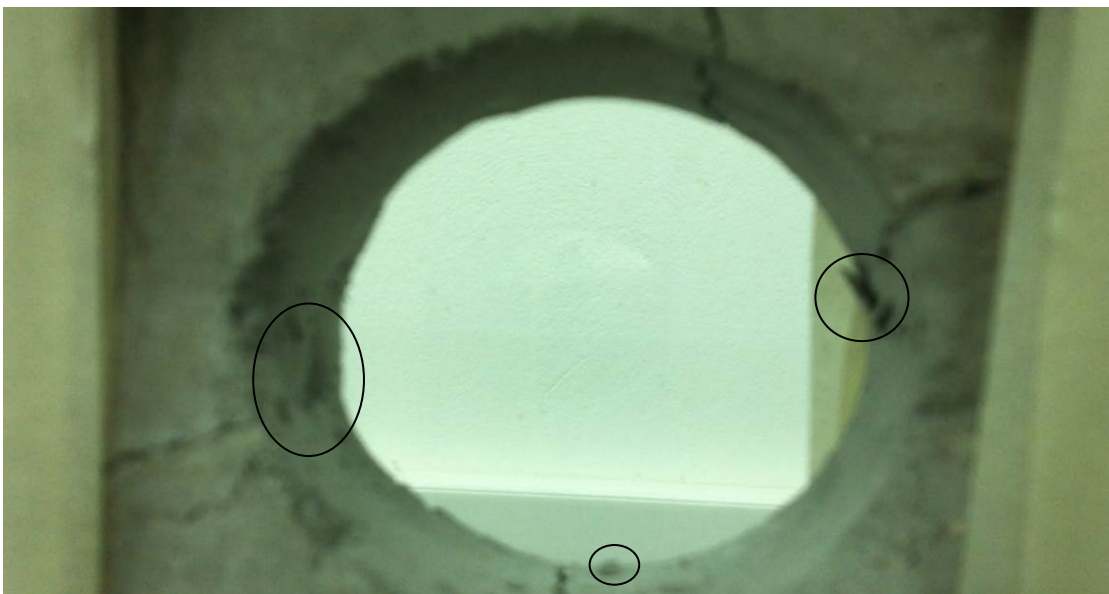
Εικόνα 4-20. Στα 2 sec

Στη συνέχεια παρατηρούμε ότι στα 95 sec της δοκιμής πραγματοποιείται αποφλοιώση στο κυκλικό άνοιγμα στη δεξιά μεριά της διατομής του κυκλικού ανοίγματος, η οποία απεικονίζεται επίσης με απότομη αύξηση των σημάτων της ΑΕ στα 92 sec στο διάγραμμα.



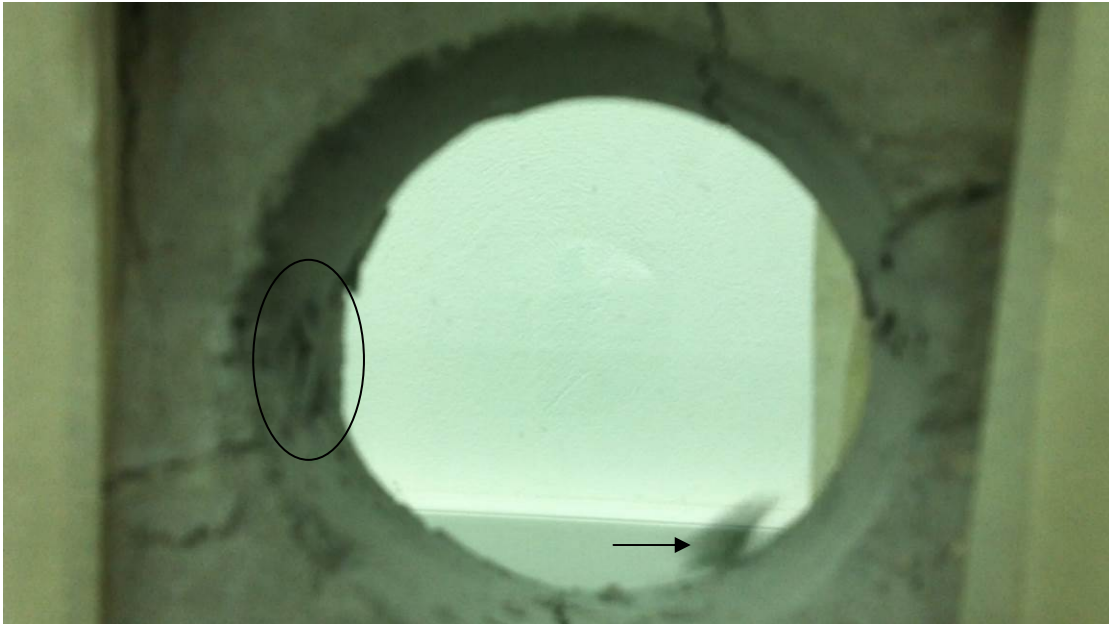
Εικόνα 4-21. Στα 95 sec.

Στα 112-125 sec συνεχίζονται οι μικρές αποφλοιώσεις στο φυσικό άνοιγμα του δοκιμίου, οι οποίες καταγράφονται από την ακουστική εκπομπή με σποραδικά σήματα.

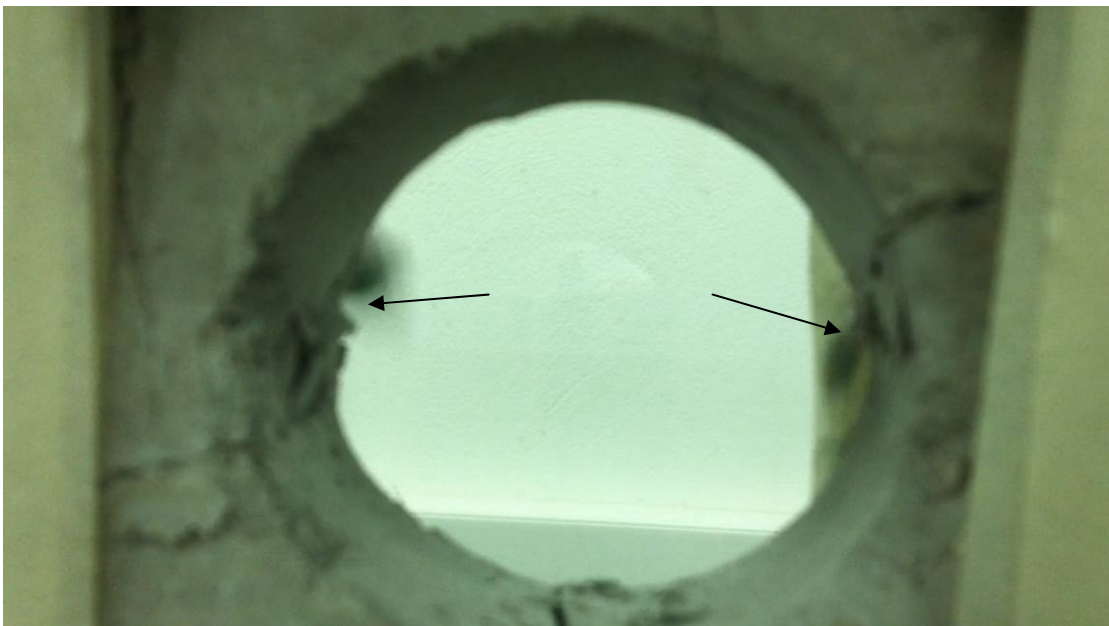


Εικόνα 4-22. Στα 115 sec.

Από τα 130 sec παρατηρούμε έντονες αποφλοιώσεις στο κυκλικό άνοιγμα, οι οποίες απεικονίζονται στο διάγραμμα της ΑΕ.



Εικόνα 4-23. Στα 130 sec.



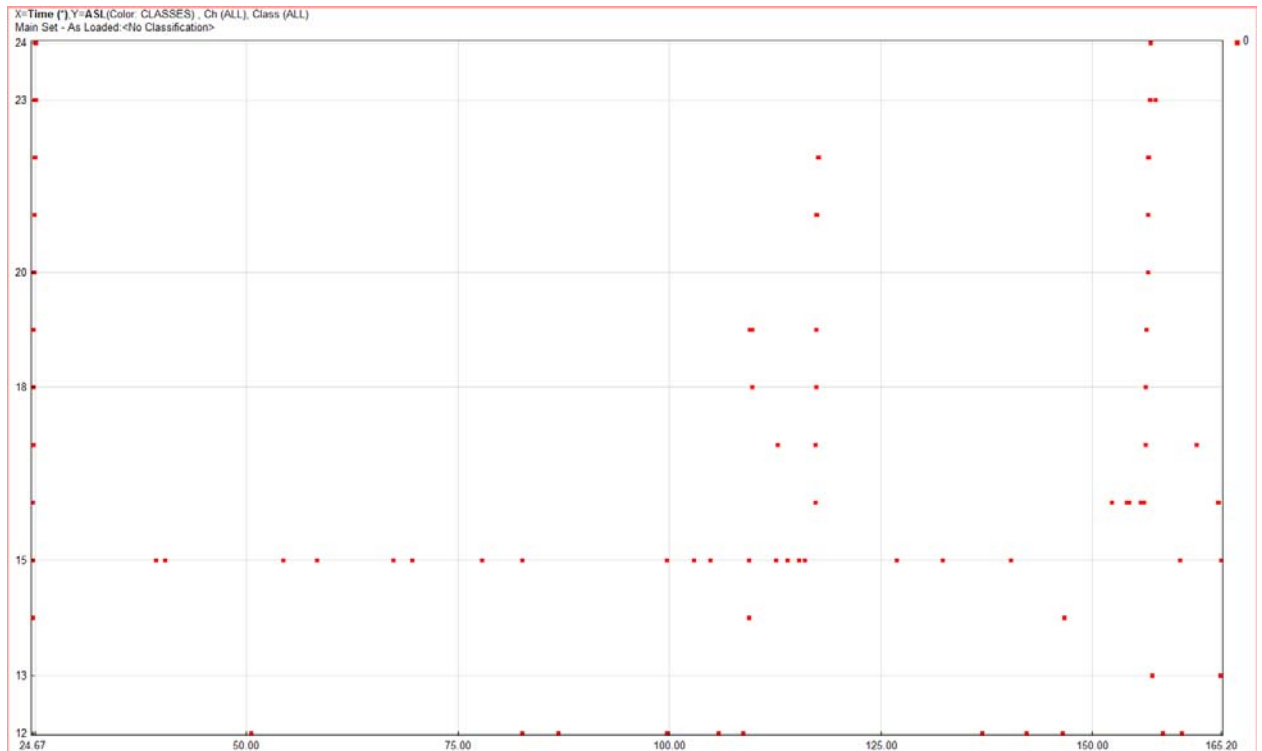
4-24. Στα 138 sec.

Στα 140 sec το φυσικό μοντέλο φθάνει στη μέγιστη αντοχή του, ενώ ταυτόχρονα υπόκειται σε θραύση με κατάρρευση του ανοίγματος. Αυτή καταγράφεται στο παραπάνω διάγραμμα.

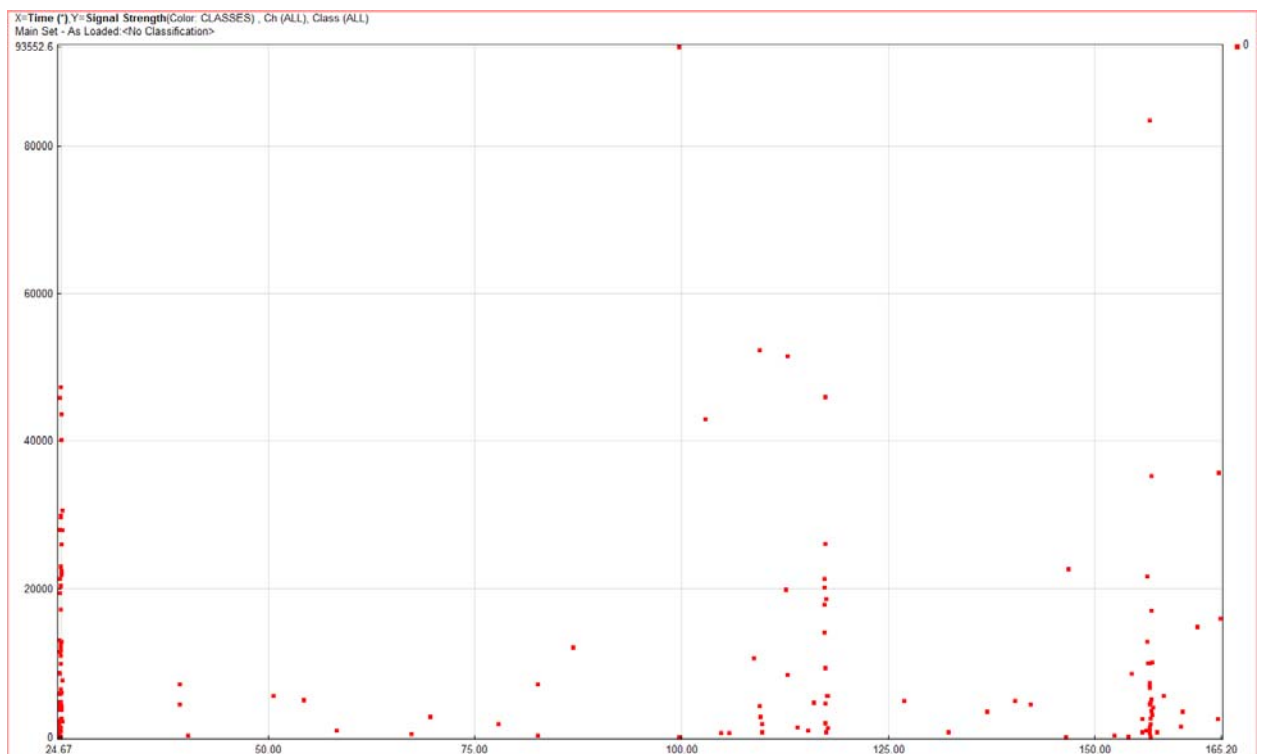


Εικόνα 4-25. Θραύση στα 140 sec της δοκιμής.

Το διάγραμμα των σημάτων ΑΕ ως προς το χρόνο επιβεβαιώνεται και από τα υπόλοιπα διαγράμματα του προγράμματος Noises και συγκεκριμένα από τα διαγράμματα ASL/χρόνο, signal strength/χρόνο. (Προσέχουμε ότι σε αυτά τα διαγράμματα ο χρόνος έναρξης είναι στα 24,67 sec).



Σχήμα 4.2. Διάγραμμα μέσης στάθμης του σήματος.



Σχήμα 4.3. Διάγραμμα έντασης σήματος (Signal strength).

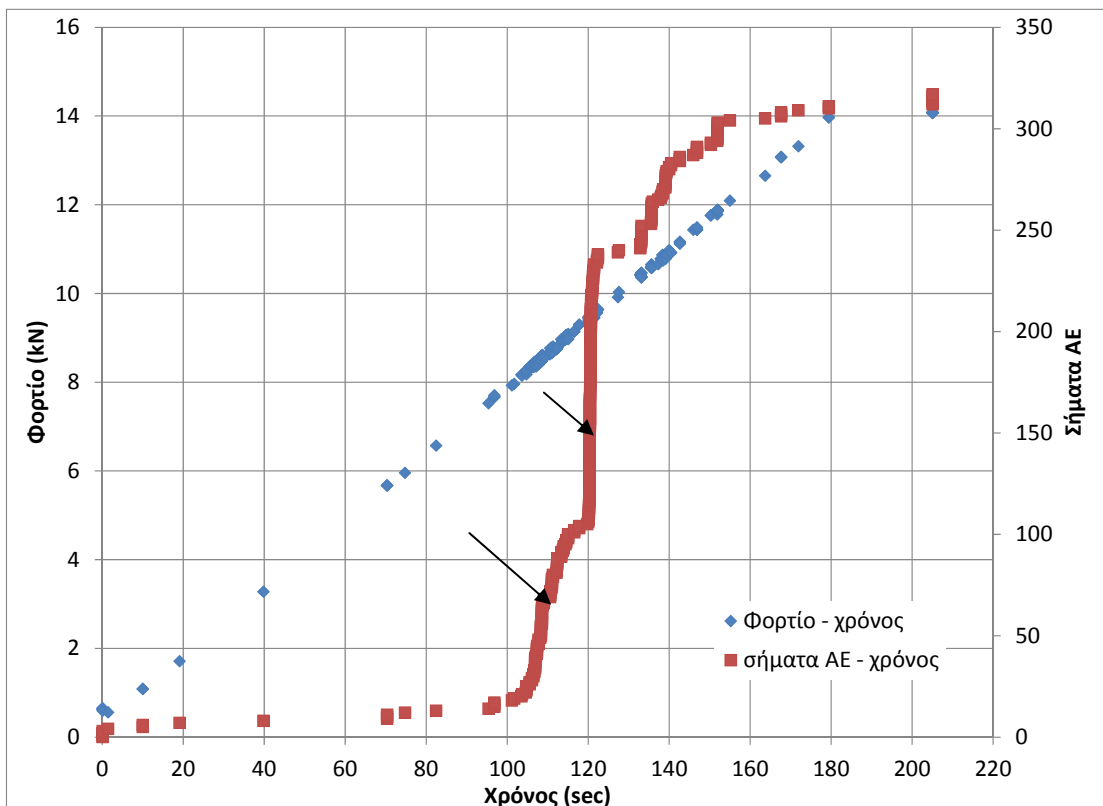


#### 4.4. Φυσικό μοντέλο #3 με κυκλικό άνοιγμα

Στην επόμενη εικόνα φαίνεται το φυσικό μοντέλο 3 και στο Σχήμα 4.4 το διάγραμμα φορτίου και ακουστικής εκπομπής με το χρόνο.

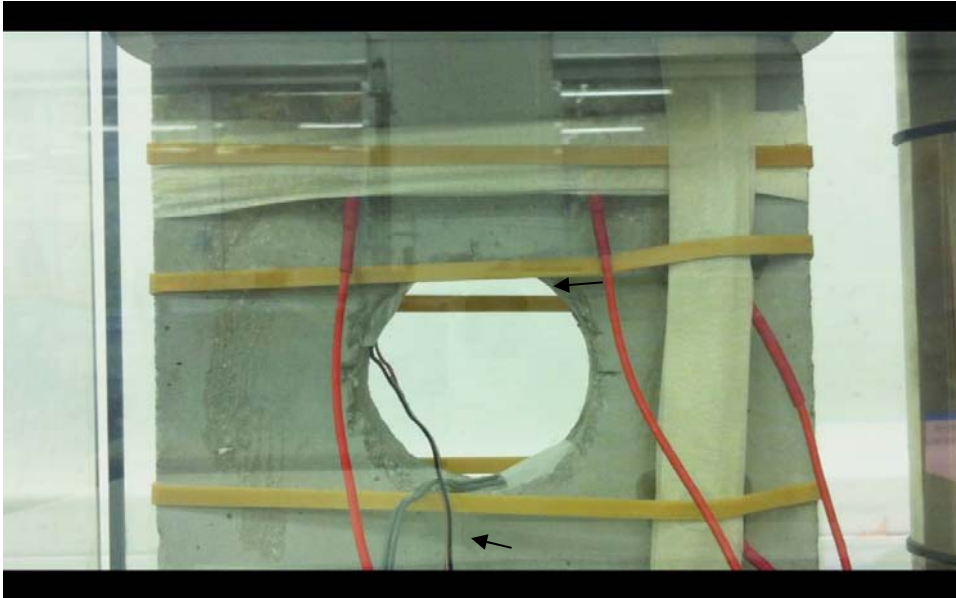


Εικόνα 4-26. Πριν τη φόρτιση.



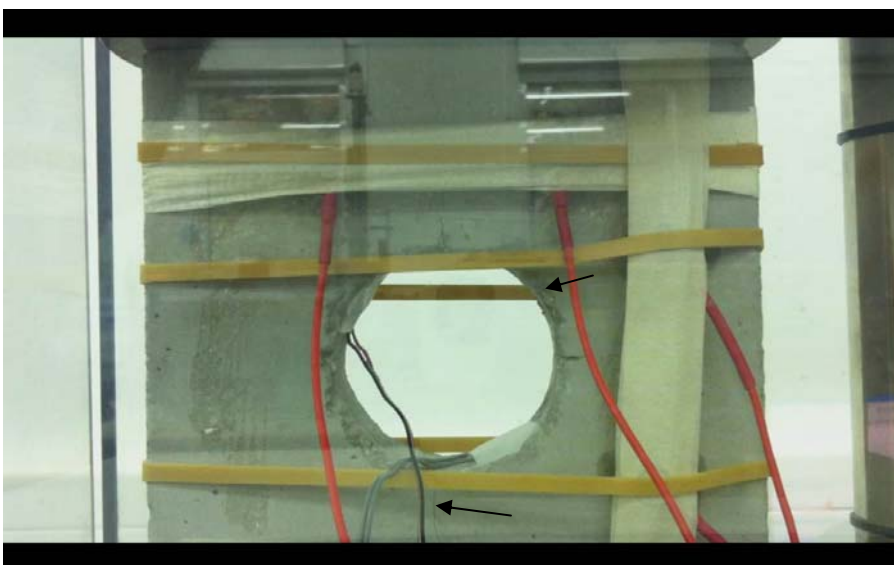
Σχήμα 4.4. Διάγραμμα σημάτων ακουστικής εκπομπής και φορτίου ως προς το χρόνο.

Με την έναρξη της δοκιμής φόρτισης δε παρατηρούμε κάποια αξιόλογη μεταβολή στο φυσικό μοντέλο. Περίπου στα 111 sec αρχίζει να αναπτύσσεται εφελκυστική ρωγμή στο κάτω τοίχωμα του δοκιμίου, η οποία όπως φαίνεται από το παραπάνω διάγραμμα έχει καταγραφεί από την ακουστική εκπομπή με μια σχεδόν απότομη αύξηση των σημάτων της. Η εφελκυστική ρωγμή στο επάνω τοίχωμα αχνοφαίνεται.



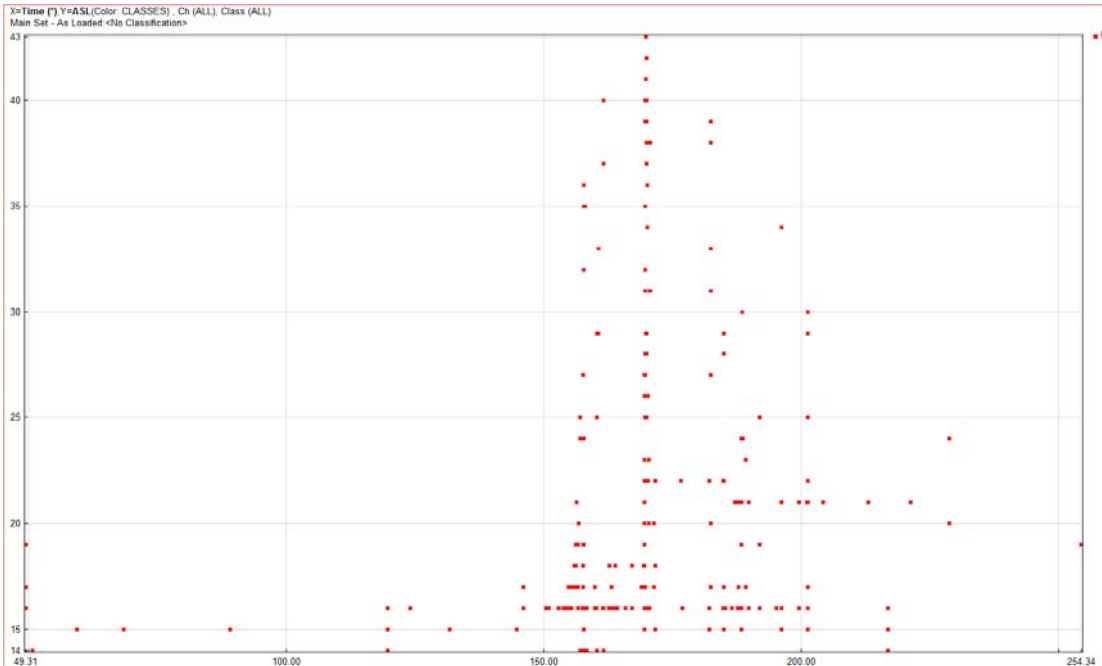
Εικόνα 4-27. Στα 111 sec

Στα 120 sec είναι πλέον ανεπτυγμένη η εφελκυστική ρωγμή στην πάνω μεριά του δοκιμίου, η εξέλιξη της οποίας επίσης καταγράφεται από την ακουστική εκπομπή, όπως φαίνεται στο διάγραμμα.

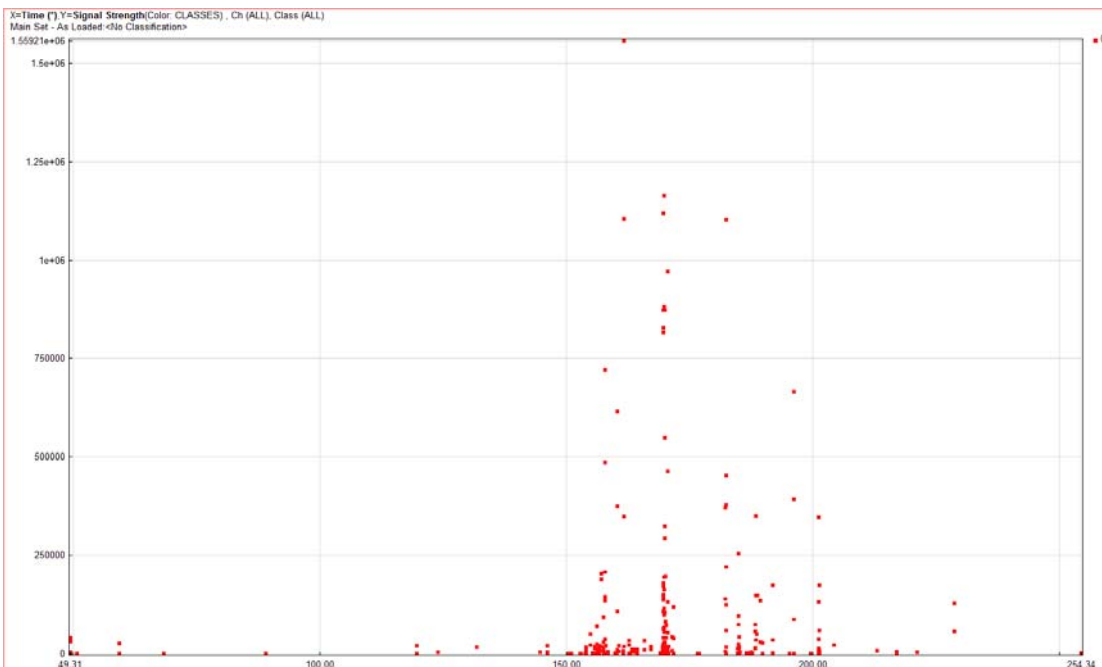


Εικόνα 4-28. Στα 120 sec

Το αρχικό διάγραμμα επιβεβαιώνεται και από τα υπόλοιπα διαγράμματα του προγράμματος noises.

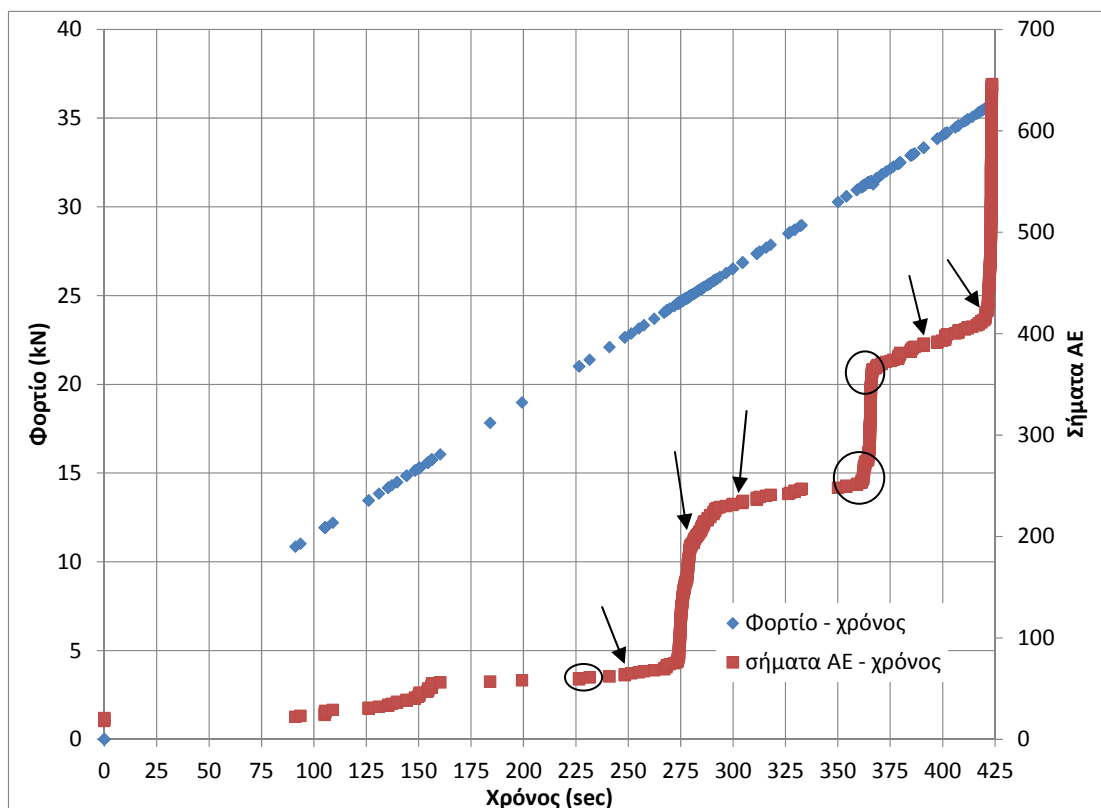


Σχήμα 4.5 διάγραμμα μέσης στάθμης σήματος ΑΕ



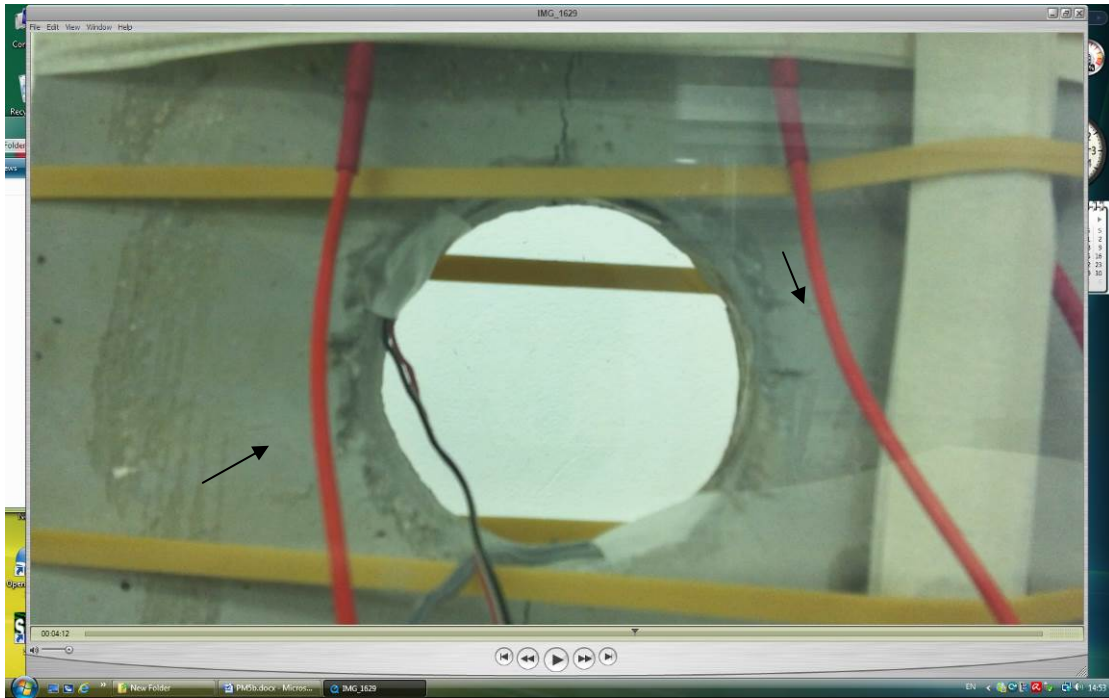
Σχήμα 4.6 Διάγραμμα έντασης σήματος ΑΕ

Στη συνέχεια τοποθετούμε το φυσικό μοντέλο σε πρέσα μεγαλύτερης δυναμικότητας, ώστε να επιτευχθεί η θραύση του δοκιμίου. Το διάγραμμα φορτίου και ΑΕ ως προς το χρόνο δίνεται στο Σχήμα 4.7.



Σχήμα 4.7. Διάγραμμα σημάτων ΑΕ-φορτίου ως προς το χρόνο.

Έως τα 220 sec δε παρατηρούμε καμία μεταβολή στο δοκίμιο. Στα 226 sec πραγματοποιείται μία μικρή αποφλοιώση αριστερά του εξωτερικού τοιχώματος του δοκιμίου, η οποία έχει εντοπιστεί από την ακουστική εκπομπή. Στη συνέχεια στα 246 sec προκαλούνται μικρές ρωγμές στα δεξιά και αριστερά του τοιχώματος.



Εικόνα 4-29. Στα 246 sec

Στα 285 sec προκαλείται πάλι αποφλοίωση στην αριστερή μεριά του δοκιμίου. Και αυτή εντοπίζεται από την ακουστική εκπομπή.



Εικόνα 4-30. Στα 285 sec

Περίπου στα 310 sec βλέπουμε ότι η ρωγμή στο δεξιό εξωτερικό τοίχωμα έχει επεκταθεί.



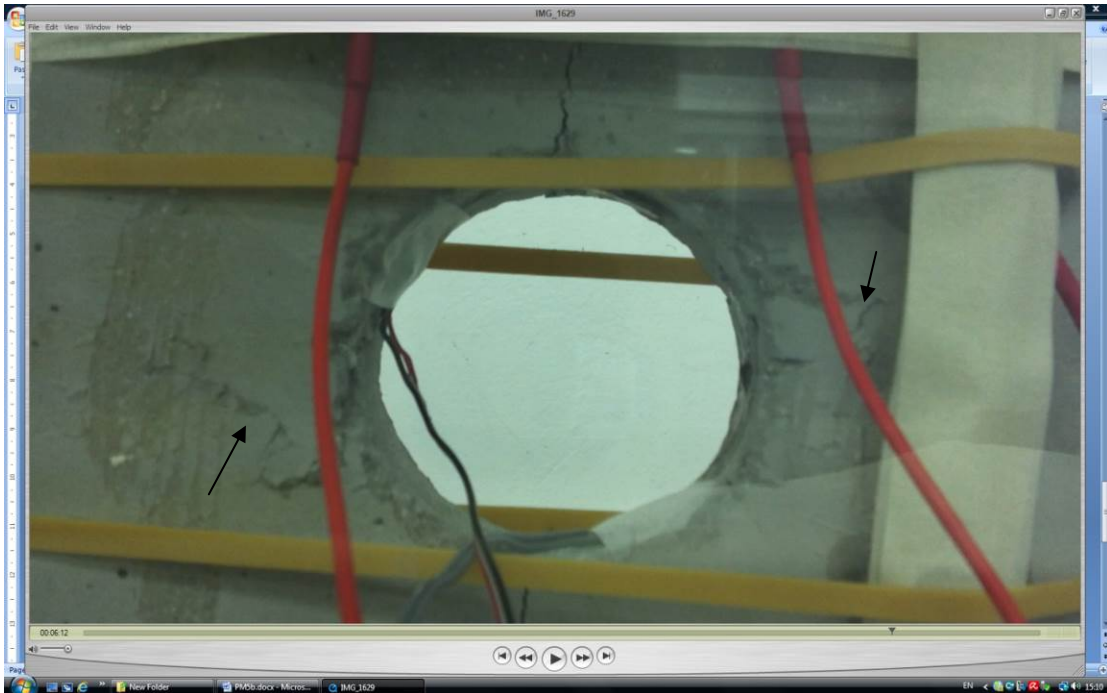
Εικόνα 4-31. Στα 310 sec

Στα 359 sec έχουμε την πρώτη αποφλοίωση εσωτερικά της διατομής, ενώ παράλληλα εξελίσσονται και τα φαινόμενα πλευρικά του ανοίγματος.



Εικόνα 4-32. Στα 359 sec

Στα 362 και 369 sec παρατηρούμε τις ρωγματώσεις αριστερά και δεξιά στο τοίχωμα να έχουν αναπτυχθεί.



Εικόνα 4-33. Στα 369 sec

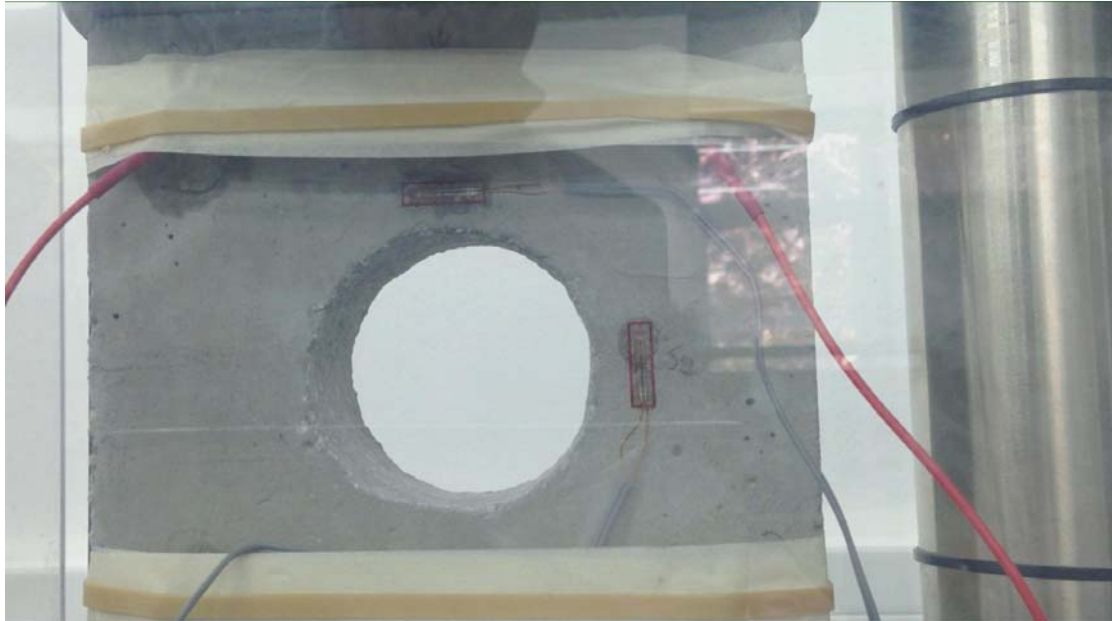
Στο 397 πραγματοποιείται αποφλοίσωση αριστερά στο άνοιγμα. Τέλος στα 424 sec το δοκίμιο υπόκειται σε θραύση, όπως φαίνεται και από το διάγραμμα της ακουστικής εκπομπής.



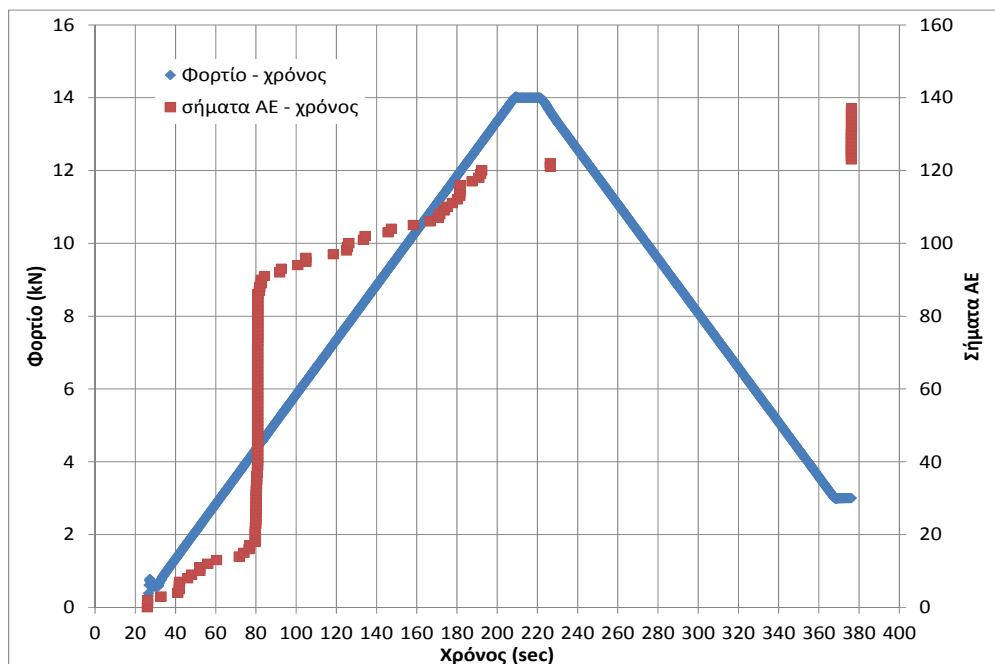
Εικόνα 4-34. Θραύση στα 424 sec

#### 4.5. Φυσικό μοντέλο #4 με κυκλικό άνοιγμα

Αρχικά τοποθετούμε το φυσικό μοντέλο στο πλαίσιο φόρτισης δυναμικότητας 15 kN. Στη συνέχεια θα το τοποθετήσουμε στο πλαίσιο φόρτισης δυναμικότητας 250 kN. Διάγραμμα φορτίου και ΑΕ ως προς το χρόνο πήραμε μόνο για τη φόρτιση στο πλαίσιο των 15 kN.



Στο πρώτο στάδιο του πειράματος θα φορτίσουμε το δοκίμιο και στη συνέχεια θα το αποφορτίσουμε σταδιακά, ώστε να παρατηρήσουμε τυχόν ακουστικές δραστηριότητες κατά την αποφόρτισή του.

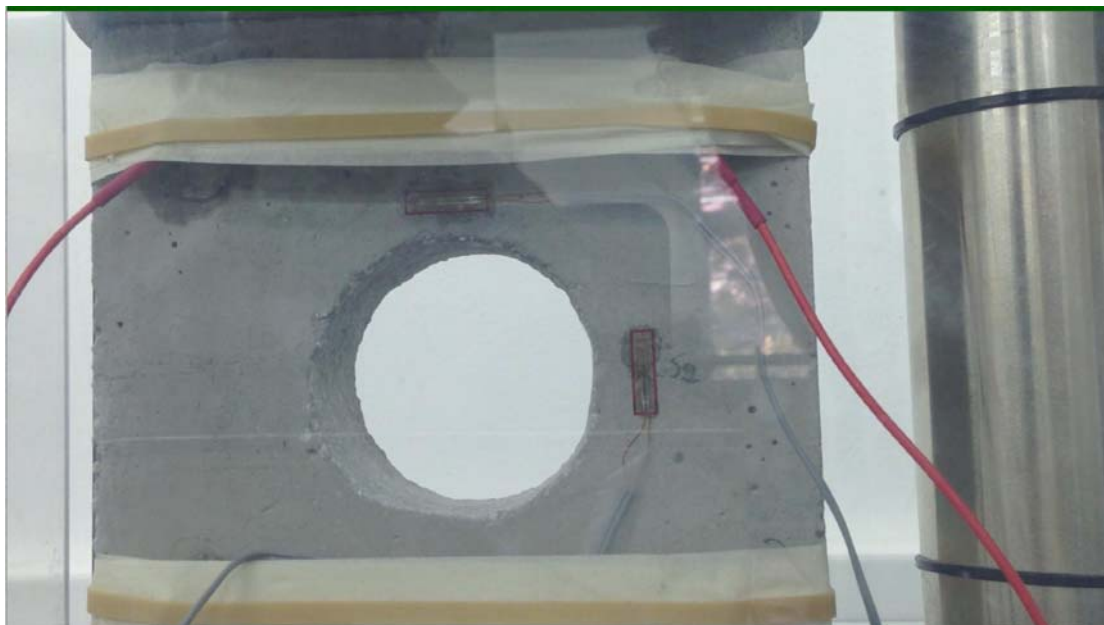


Σχήμα 4.8. Διάγραμμα φορτίου-σημάτων ΑΕ ως προς το χρόνο.



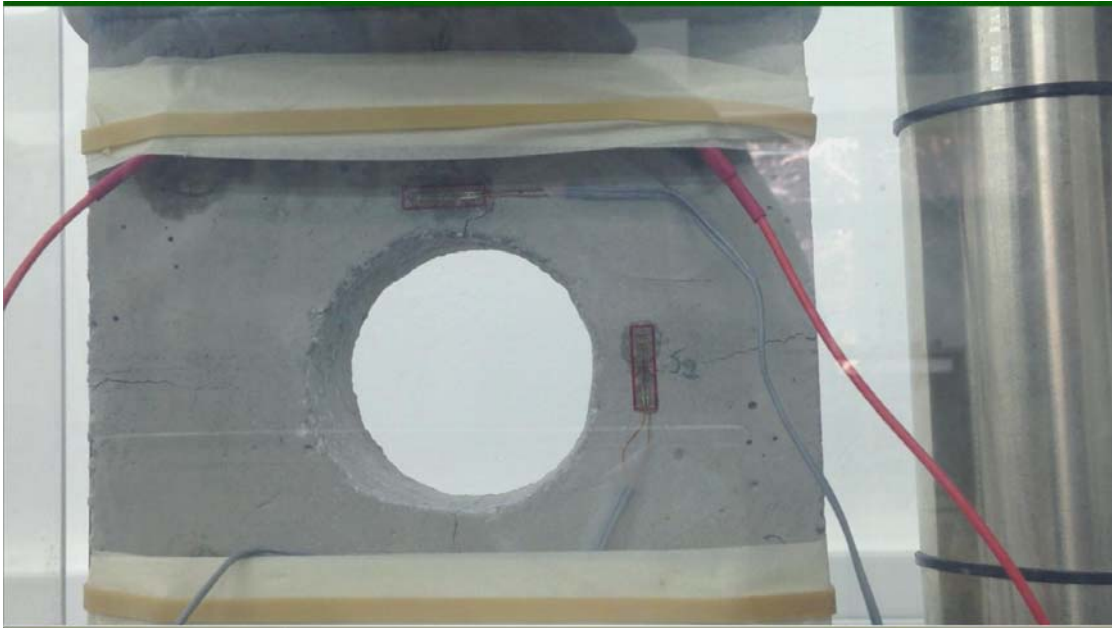
Στο παραπάνω διάγραμμα απεικονίζεται το φορτίο και τα σήματα ακουστικής εκπομπής ως προς το χρόνο. Όπως και στις προηγούμενες δοκιμές η ακουστική εκπομπή καταγράφει με ακρίβεια τα γεγονότα που συμβαίνουν κατά τη δοκιμή φόρτισης.

Με την έναρξη της δοκιμής δε παρατηρούμε κάποια ορατή μεταβολή στο φυσικό μοντέλο αν και η ακουστική εκπομπή από τα 22 sec καταγράφει κάποια δραστηριότητα.



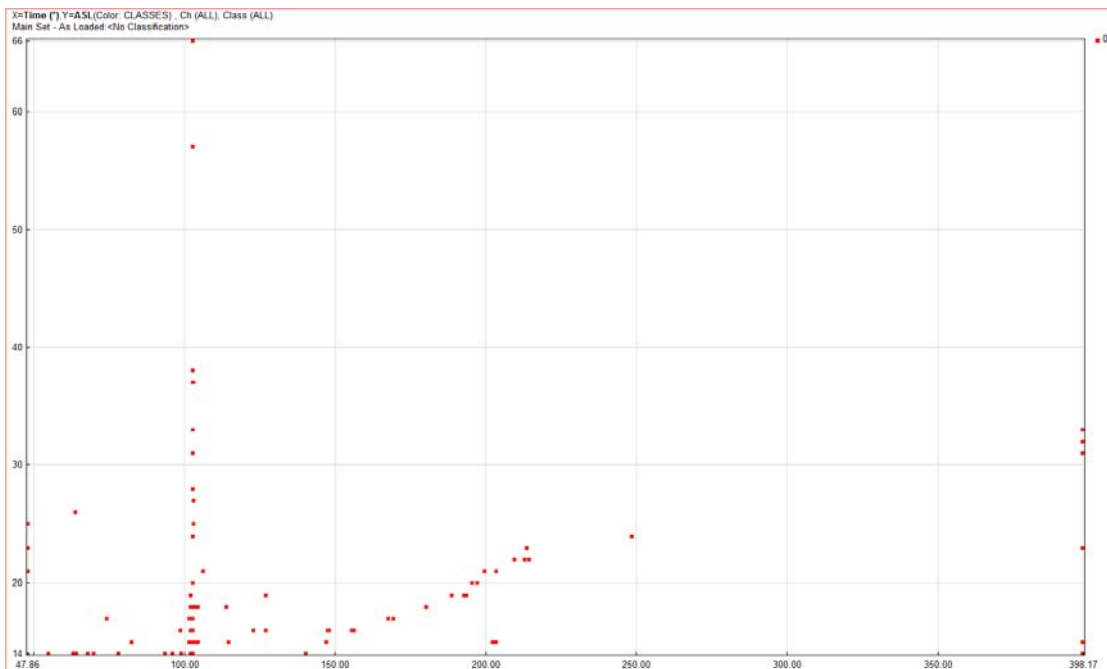
Εικόνα 4-35. Στα 60 sec της δοκιμής.

Στα 81 sec εμφανίζονται ταυτόχρονα οι εφελκυστικές ρωγμές στο πάνω και κάτω μέρος του δοκιμίου και ρωγμές στην αριστερή και δεξιά πλευρά. Η ακουστική εκπομπή έχει εντοπίσει αυτή τη δραστηριότητα, η οποία καταγράφεται στο παραπάνω διάγραμμα με σχεδόν κατακόρυφη μεταβολή της κλίσης της ευθείας.



Εικόνα 4-36. Στα 81 sec της δοκιμής.

Στη συνέχεια δε παρατηρούμε κάποια ορατή μεταβολή, αν και καταγράφονται σήματα από την ακουστική εκπομπή μέχρι τα 185 sec και αποφορτίζουμε σταδιακά το δοκίμιο, ενώ η ακουστική εκπομπή δεν εντοπίζει κάποια δραστηριότητα. Το πρώτο στάδιο της δοκιμής ολοκληρώνεται στα 378 sec.

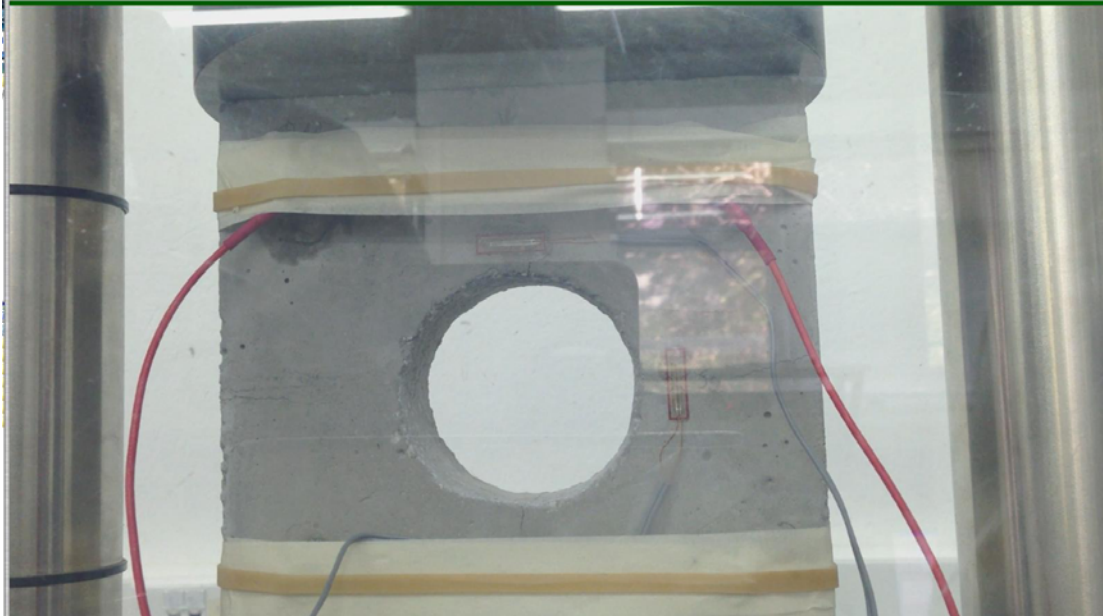


Σχήμα 4.9. Διάγραμμα ASL του προγράμματος noises.

Λαμβάνοντας υπόψη ότι ο χρόνος εκκίνησης του προγράμματος καθυστερεί περίπου 22 sec παρατηρούμε ότι στα 81 sec της δοκιμής η μέση στάθμη του σήματος ως προς το 89

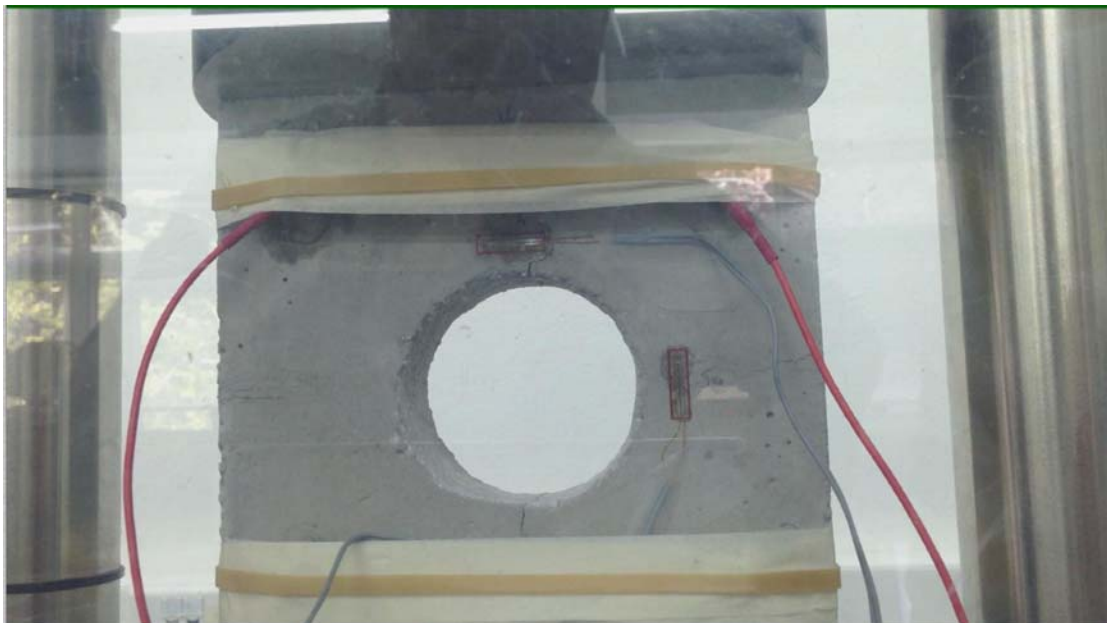
χρόνο αυξάνεται ενώ στη συνέχεια μειώνεται έως τα 185 sec. Στα 210 sec που ξεκινά το στάδιο της αποφόρτισης δεν καταγράφεται η μέση στάθμη του σήματος, υποδηλώνοντας ότι δεν συντελείται κάποια δραστηριότητα.

Τοποθετούμε το δοκίμιο στο πλαίσιο φόρτισης δυναμικότητας 250 kN.



Εικόνα 4-37. Στα 0 sec της νέας δοκιμής.

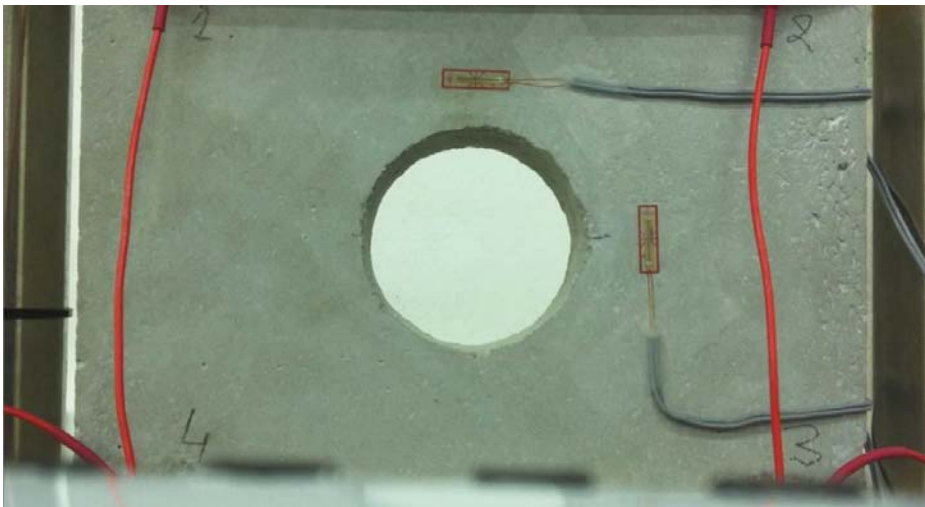
Στα 312 sec πάνω από το strain gauge σχηματίζεται μία νέα ρωγμή δίπλα από την εφελκυστική.



Εικόνα 4-38. Στα 312 sec της δοκιμής.

#### 4.6. Φυσικό μοντέλο #5 με κυκλικό άνοιγμα

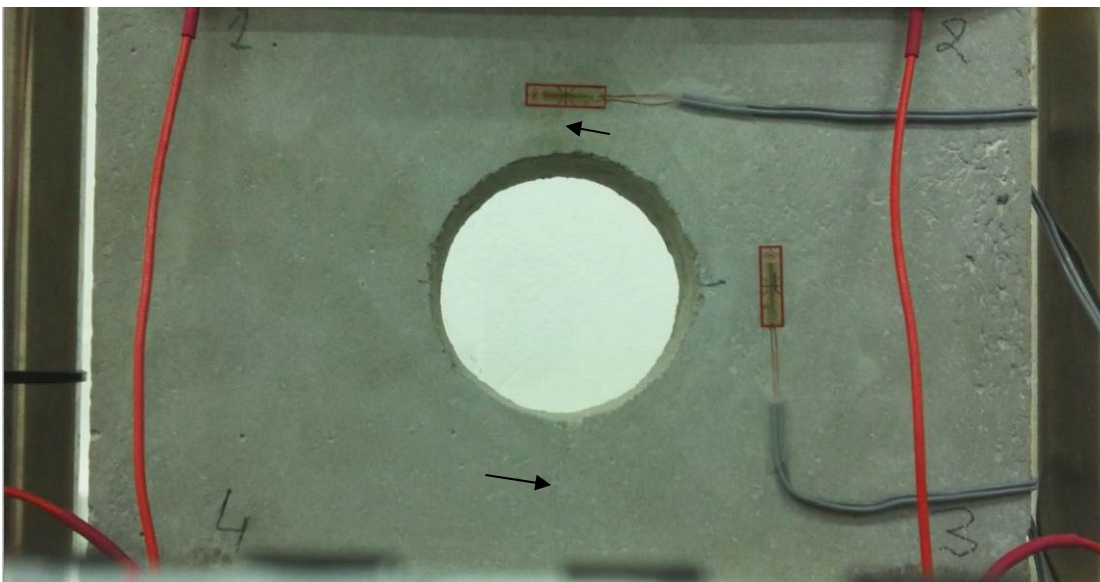
Τοποθετούμε το φυσικό μοντέλο στο πλαίσιο φόρτισης δυναμικότητας 250 kN.



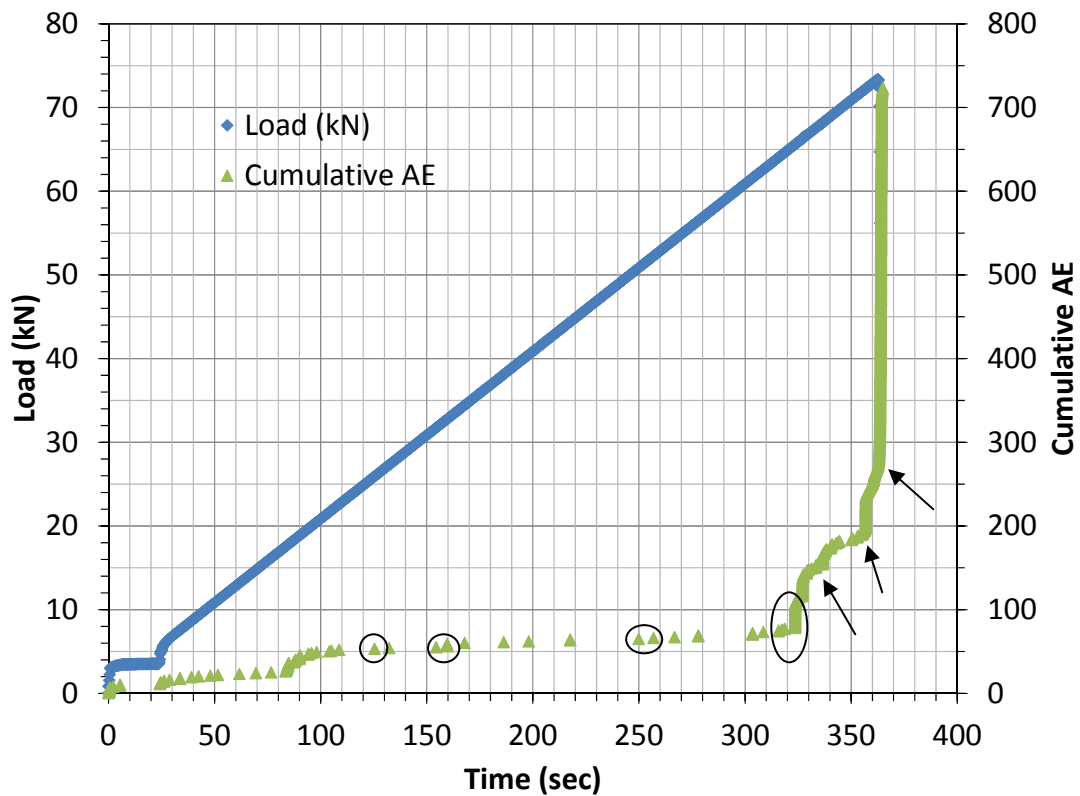
Εικόνα 4-39. Πριν τη δοκιμή φόρτισης

Αυτή η δοκιμή περιλαμβάνει μόνο ένα στάδιο φόρτισης έως τη θραύση του δοκιμίου και θα παρατηρήσουμε τις ακουστικές δραστηριότητες που θα συμβούν.

Στα 121 sec αρχίζουν να εμφανίζονται οι εφελκυστικές ρωγμές κάθετα του κυκλικού ανοίγματος.

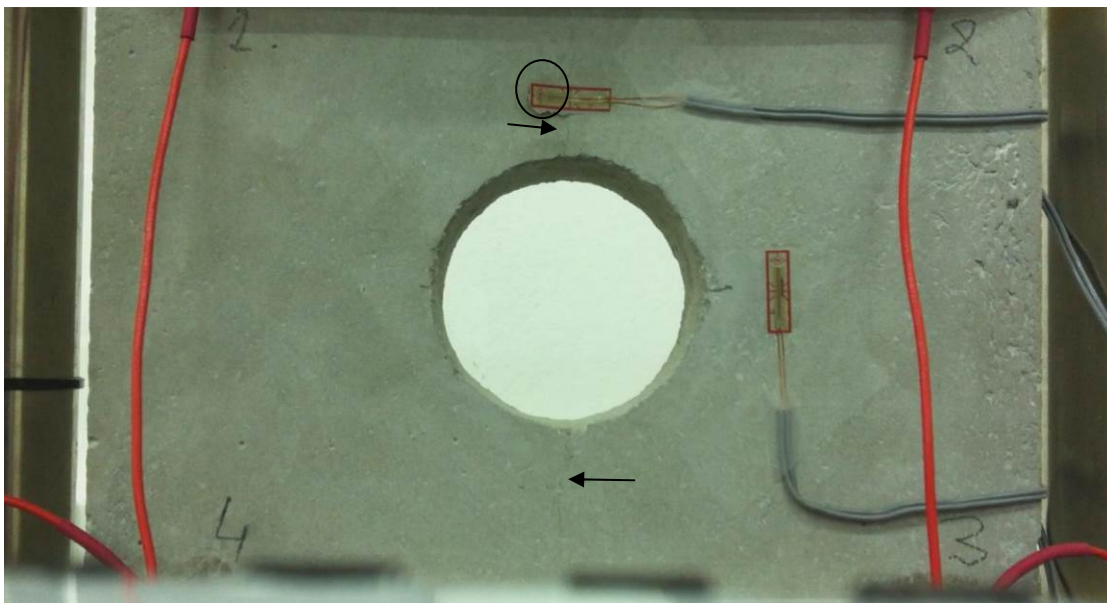


Εικόνα 4-40. Στα 121 sec



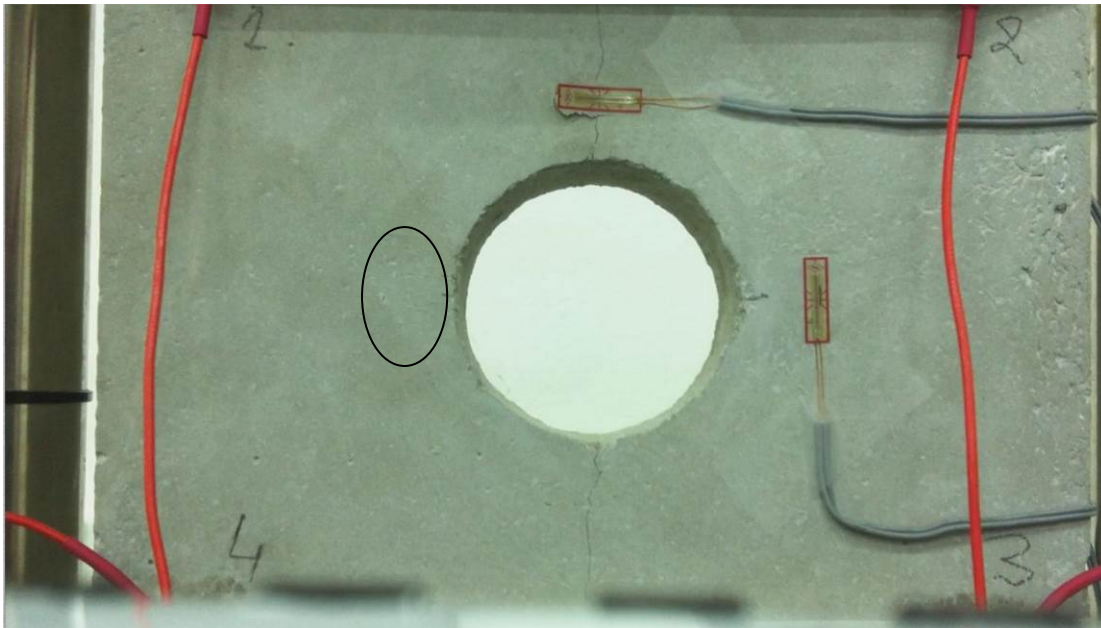
Σχήμα 4.10. Διάγραμμα σημάτων ΑΕ-φορτίου ως προς το χρόνο

Οι παραπάνω εφελκυστικές ρωγμές αναπτύσσονται και φαίνονται πλέον καθαρά στα 162 sec, ενώ σε αυτό το χρόνο λόγω της ρωγμής προκαλείται η αποκόλληση του strain gauge πάνω από το κυκλικό άνοιγμα.



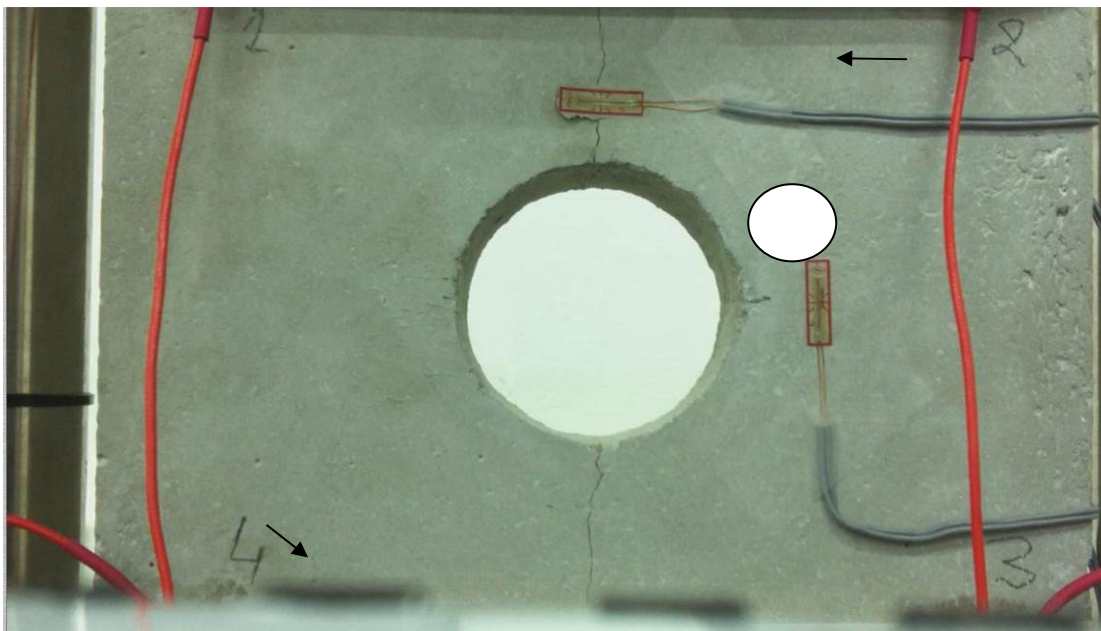
Εικόνα 4-41. Στα 162 sec

Στα 255 sec ξεκινά μια ελαφρά εξωτερική αποφλοΐωση στα αριστερά του ανοίγματος, η οποία και εξελίσσεται.



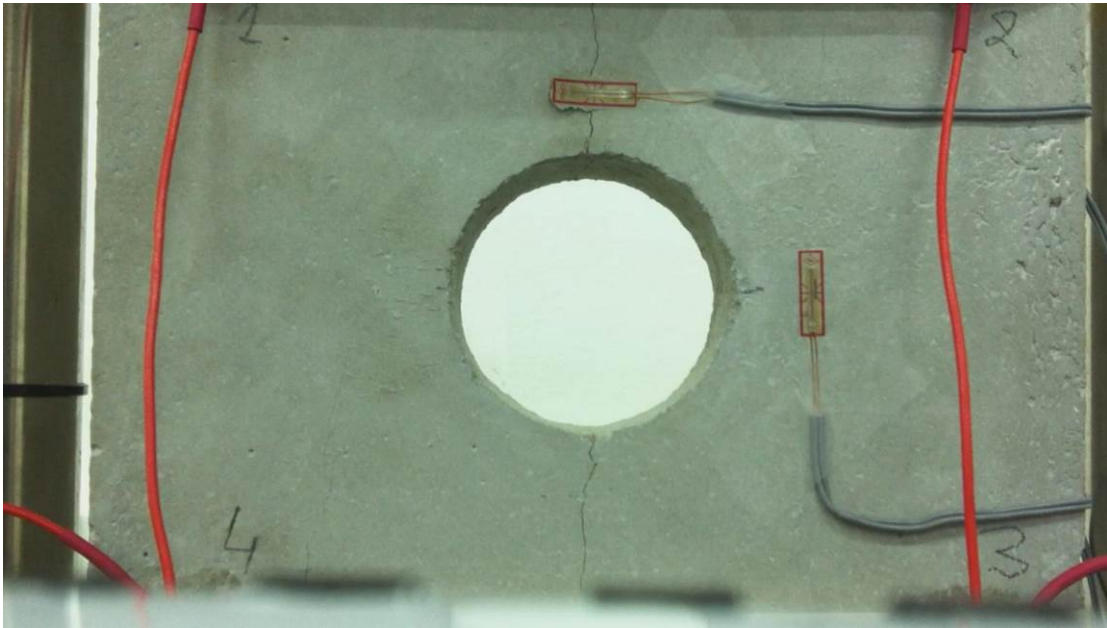
Εικόνα 4-42. Στα 268 sec

Στα 328 sec εμφανίζονται ταυτόχρονα οι απομονωμένες ρωγμές στα άκρα του δοκιμίου, ενώ παράλληλα φαίνεται πλέον καθαρά η εξέλιξη της παραπάνω εξωτερικής αποφλοΐωσης. Παράλληλα φαίνεται και η εξωτερική αποφλοΐωση αριστερά.



Εικόνα 4-43. Στα 328 sec

Στη παρακάτω φωτογραφία φαίνονται πιο καθαρά μαζί με τις αποφλοιώσεις.

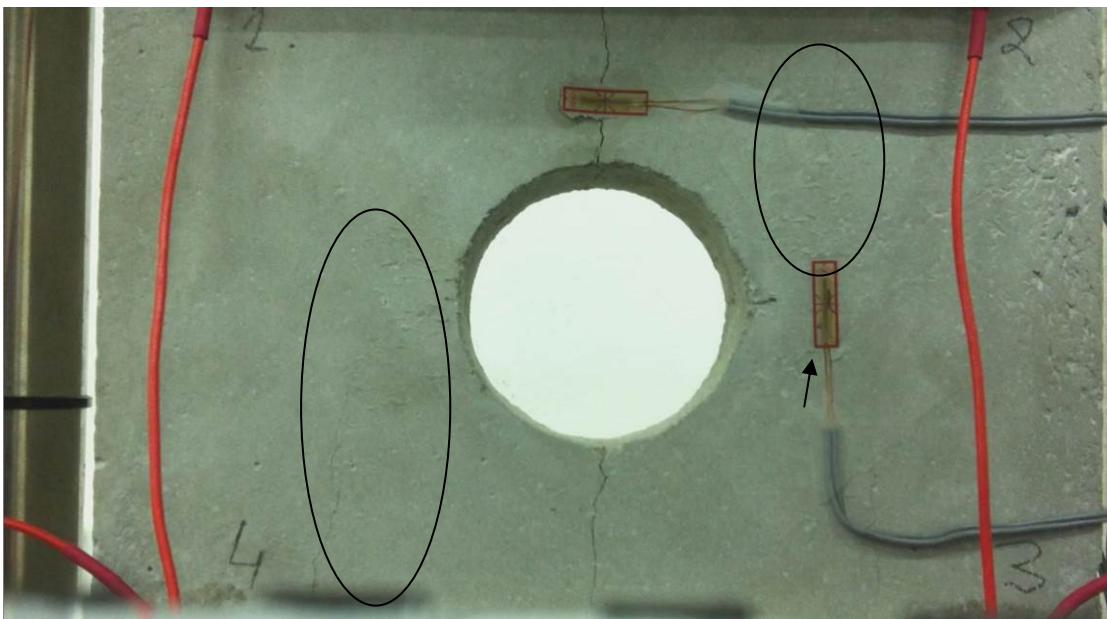


Εικόνα 4-44. Στα 340 sec

Στα 340 sec είναι πλέον ξεκάθαρες οι εξωτερικές αποφλοιώσεις γύρω από το κυκλικό άνοιγμα.

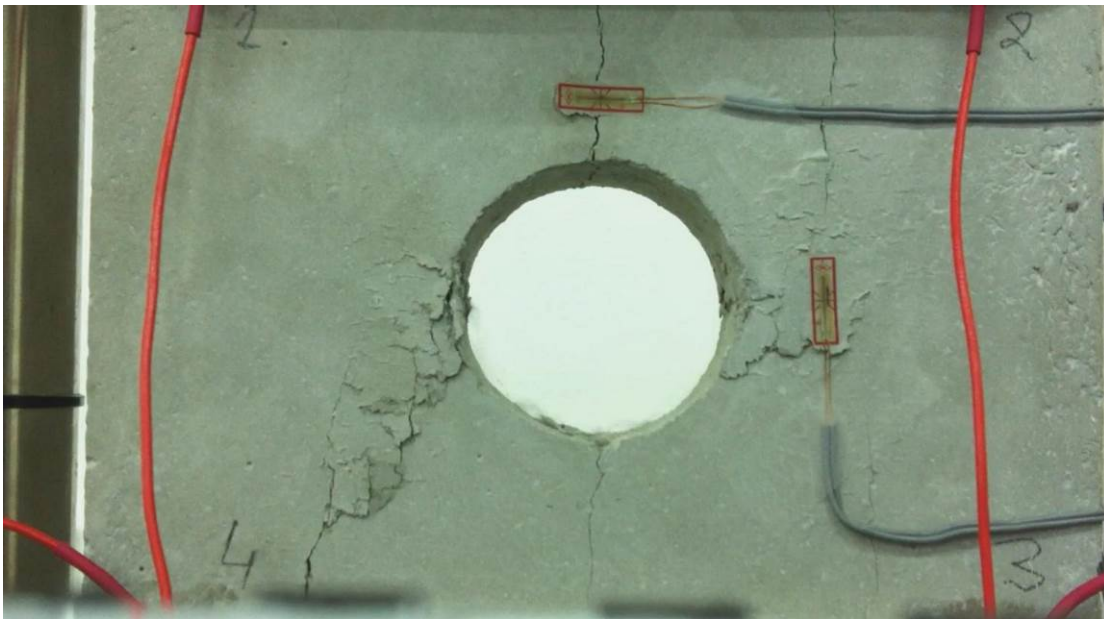
Στα 342 sec παρατηρείται ελαφριά αποφλοίωση εσωτερικά του ανοίγματος.

Στα 343 sec εμφανίζεται καινούρια ρωγμή ακριβώς κάτω από το strain gauge δεξιά του ανοίγματος.



Εικόνα 4-45. Στα 343 sec

Η θραύση γίνεται στα 363 sec όπως φαίνεται και στη παρακάτω φωτογραφία.

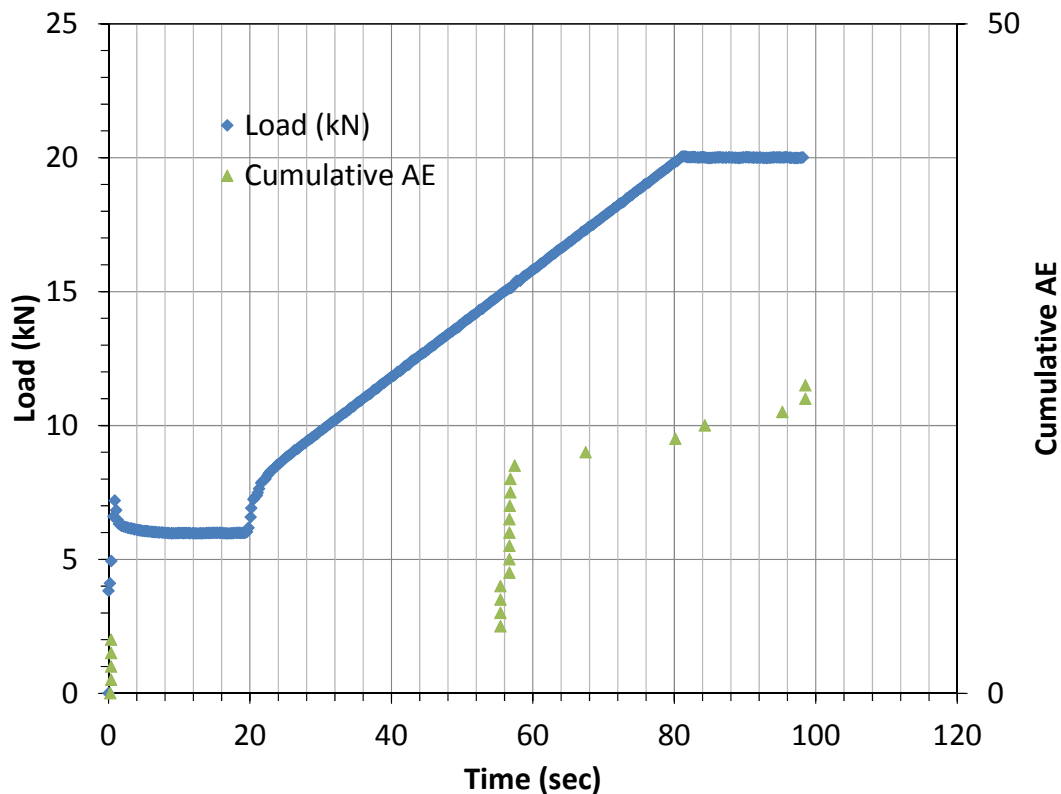


Εικόνα 4-46. Θραύση στα 363 sec

#### 4.7. Φυσικό μοντέλο #6 με κυκλικό άνοιγμα

Το πείραμα αυτό διαχωρίζεται σε τρεις φάσεις. Αρχικά τοποθετούμε το φυσικό μοντέλο στο πλαίσιο φόρτισης δυναμικότητας 15 KN, ώστε να παρατηρήσουμε τον σχηματισμό της εφελκυστικής ρωγμής και ύστερα το τοποθετούμε στο πλαίσιο φόρτισης δυναμικότητας 250 kN για να παρατηρήσουμε τα φαινόμενα που εξελίσσονται έως την τελική του θραύση. Στη συνέχεια επειδή η θραύση δεν ήταν ιδιαίτερα ορατή ξαναφορτίζουμε το δοκίμιο στο ίδιο πλαίσιο.

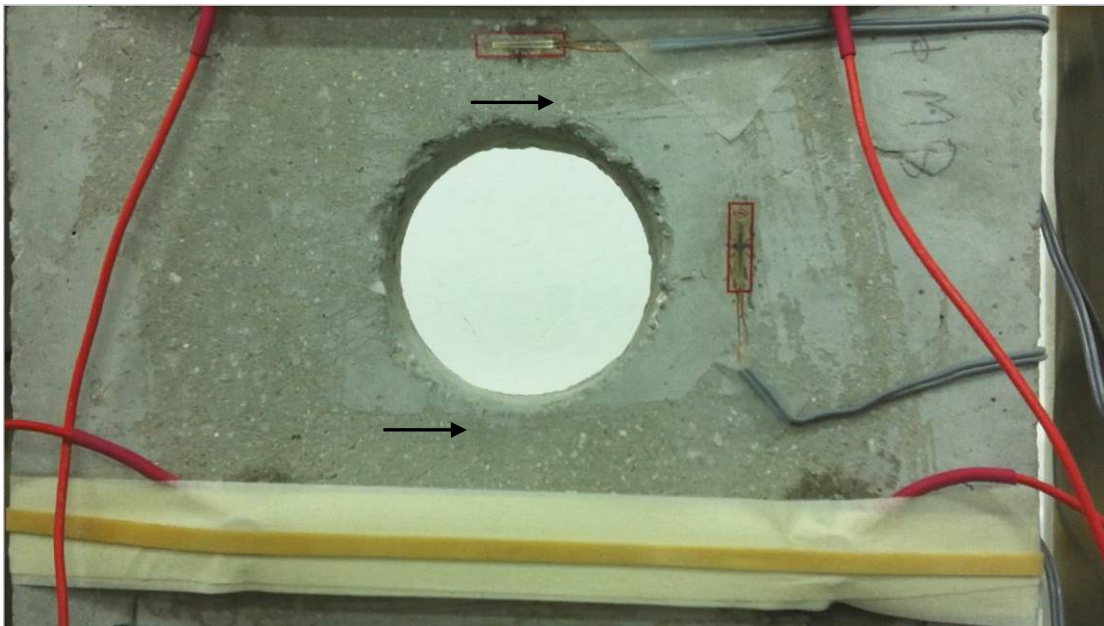




Σχήμα 4.11. Διάγραμμα σημάτων AE-φορτίου ως προς το χρόνο

Παραπάνω δίνεται το διάγραμμα των σημάτων της ακουστικής εκπομπής και της φόρτισης ως προς το χρόνο στο πρώτο στάδιο της φόρτισης. Και σε αυτή την περίπτωση η ακουστική εκπομπή στέλνει σήματα ακουστικής δραστηριότητας των γεγονότων που εξελίσσονται κατά τη φόρτιση του δοκιμίου.

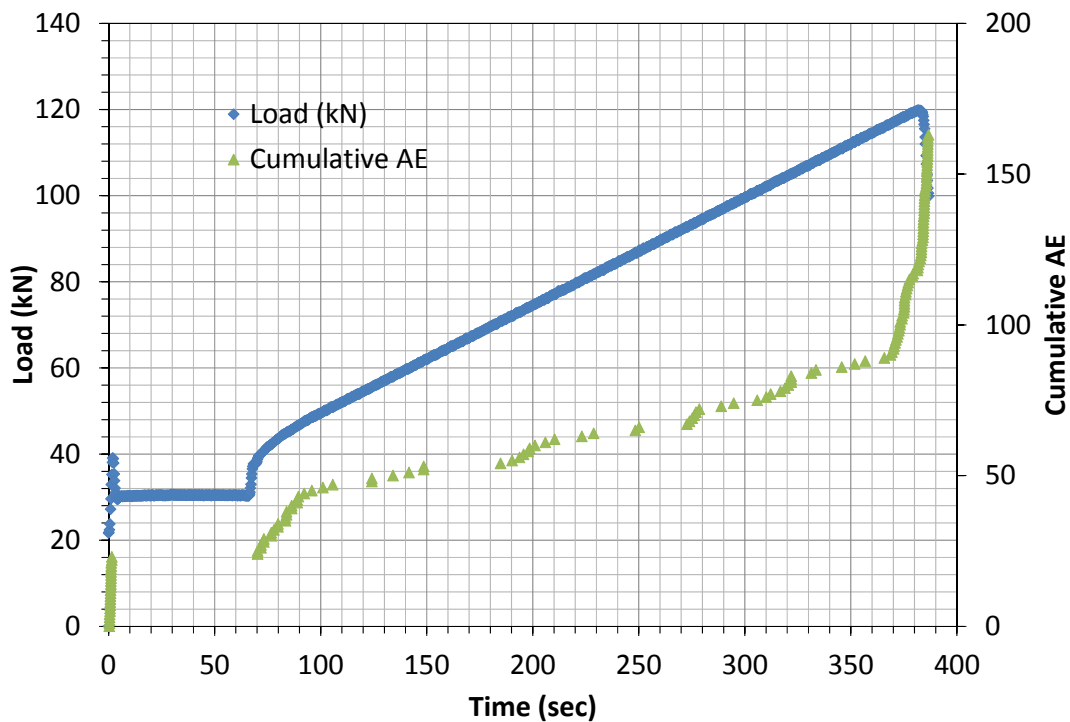
Στα 63 sec σχηματίζεται εφελκυστική ρωγμή, η οποία δεν είναι ιδιαίτερα ορατή, στην περιοχή κάτω από το κυκλικό άνοιγμα και στη συνέχεια στα 67 sec εμφανίζεται η ρωγμή πάνω από το κυκλικό άνοιγμα. Αυτό αποτυπώνεται στο παραπάνω διάγραμμα των σημάτων της ακουστικής εκπομπής, η οποία όπως και στα προηγούμενα δοκίμια εντοπίζει τα γεγονότα λίγο πριν γίνουν ορατά.



Εικόνα 4-47. Στα 67 sec

Μέχρι και την ολοκλήρωση της πρώτης φάσης της δοκιμής δε παρατηρούμε κάποια ορατή μεταβολή στο δοκίμιο, εκτός από το ‘κλείσιμο’ των εφελκυστικών ρωγμών μετά την αποφόρτιση.

Στη συνέχεια τοποθετούμε το δοκίμιο στο πλαίσιο φόρτισης δυναμικότητας 250 kN.



Σχήμα 4.12. Διάγραμμα σημάτων ΑΕ-φορτίου ως προς το χρόνο

Το παραπάνω διάγραμμα των σημάτων ΑΕ-φόρτισης ως προς το χρόνο αντιστοιχεί στο δεύτερο στάδιο της φόρτισης.

Με την νέα φόρτιση επανεμφανίζονται οι προηγούμενες εφελκυστικές ρωγμές, των οποίων η ανάπτυξη είναι το μοναδικό ορατό φαινόμενο που εξελίσσεται έως τα 219 sec, όπου εμφανίζεται ρωγμάτωση κοντά στο δεξί strain gauge.



Εικόνα 4-48. Στα 219 sec

Στα 337 sec πραγματοποιείται εξωτερική αποφλοίωση δεξιά από το κυκλικό άνοιγμα.



Εικόνα 4-49. Στα 337 sec

Στα 355 sec αναπτύσσεται νέα ρωγμή, αυτή τη φορά στα αριστερά του κυκλικού ανοίγματος.

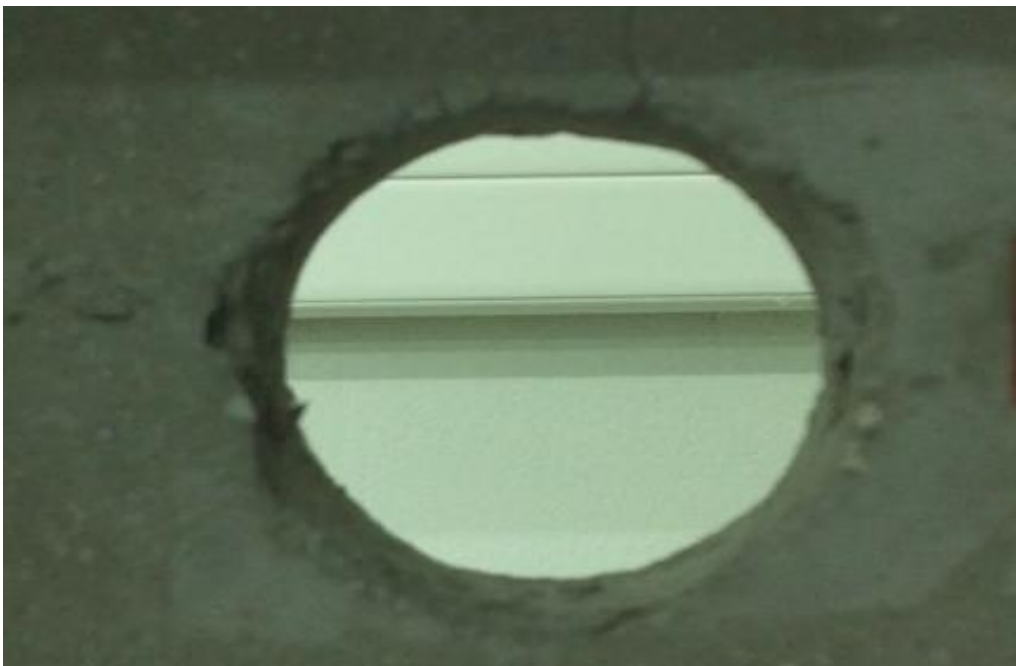


Εικόνα 4-50. Στα 355 sec

Στη συνέχεια το δοκίμιο εισέρχεται στο στάδιο της αποφλοίωσης, η οποία ξεκινά από τα 359 sec έως και την τελική θραύση του φυσικού μοντέλου.



Εικόνα 4-51. Στα 359 sec



Εικόνα 4-52. Στα 377 sec

Το φυσικό μοντέλο υπόκειται σε θραύση στα 392 sec.

#### 4.8. Φυσικό μοντέλο #1 με τετραγωνικό άνοιγμα

Το φυσικό μοντέλο πριν τη φόρτιση.



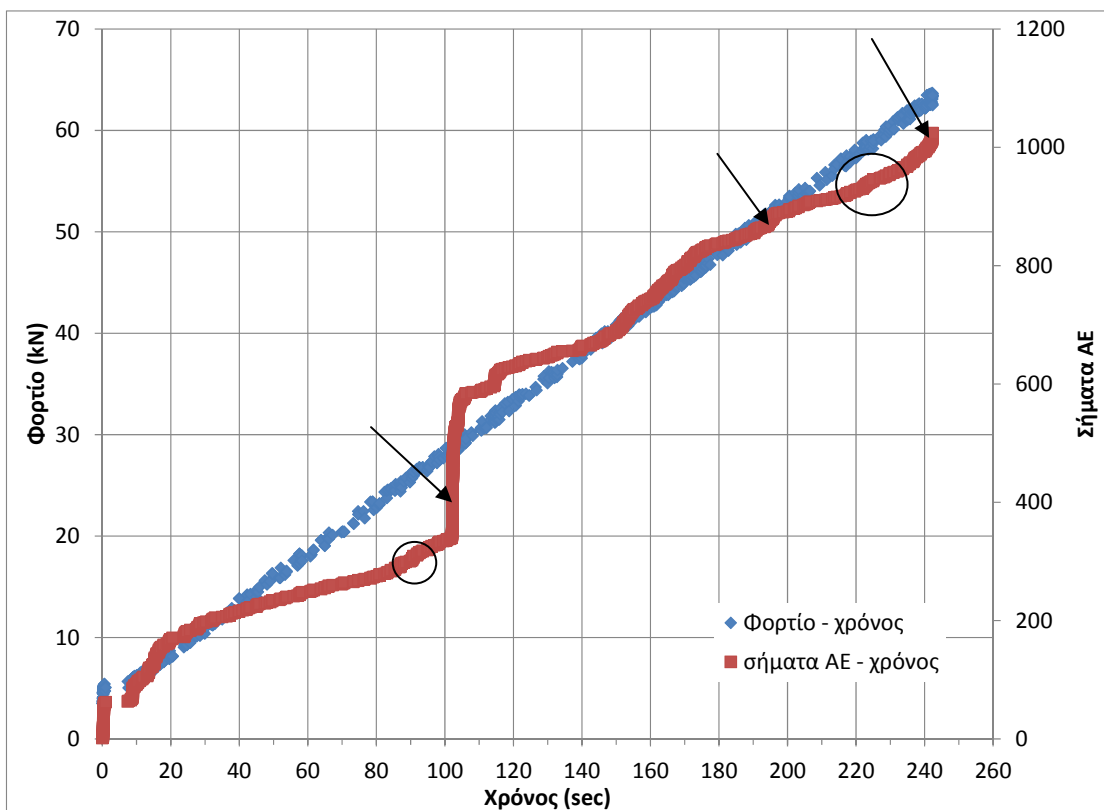
Εικόνα 4-53. Πριν τη φόρτιση

Το παραπάνω φυσικό μοντέλο θα δοκιμαστεί σε μονοαξονική θλίψη στο πλαίσιο φόρτισης δυναμικότητας 250 kN έως την τελική του θραύση.

Αρχικά δε συμβαίνει κάποια αξιόλογη μεταβολή στο φυσικό μοντέλο. Στα 95 sec παρατηρούνται οι εφελκυστικές ρωγμές που αναπτύσσονται στην κάτω και πάνω πλευρά του δοκιμίου, οι οποίες αποτυπώνονται στο παραπάνω διάγραμμα της ακουστικής εκπομπής με κατακόρυφη αύξηση της καμπύλης των σημάτων.



Εικόνα 4-54. Στα 95 sec



Σχήμα 4.13. Διάγραμμα σημάτων ΑΕ-φορτίου ως προς το χρόνο

Στο 102 sec παρατηρούμε την εξέλιξη των εφελκυστικών ρωγμών, οι οποίες πλέον είναι έντονα ανεπτυγμένες.



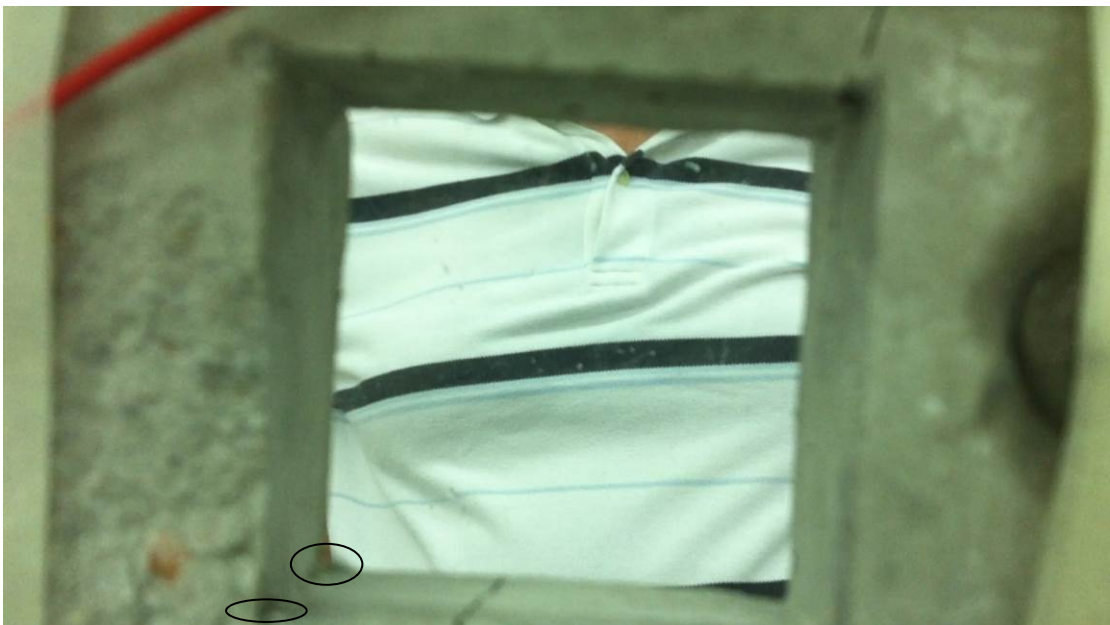
Εικόνα 4-55. Στα 102 sec

Στα 208 και 209 sec στην άκρη του ανοίγματος στη κάτω μεριά συμβαίνει μια μικρή αποκόλληση και αμέσως μετά στην άλλη άκρη της κάτω πλευράς (δε φαίνεται καθαρά στη παρακάτω εικόνα), οι οποίες καταγράφονται από την ακουστική εκπομπή.



Εικόνα 4-56. Στα 209 sec

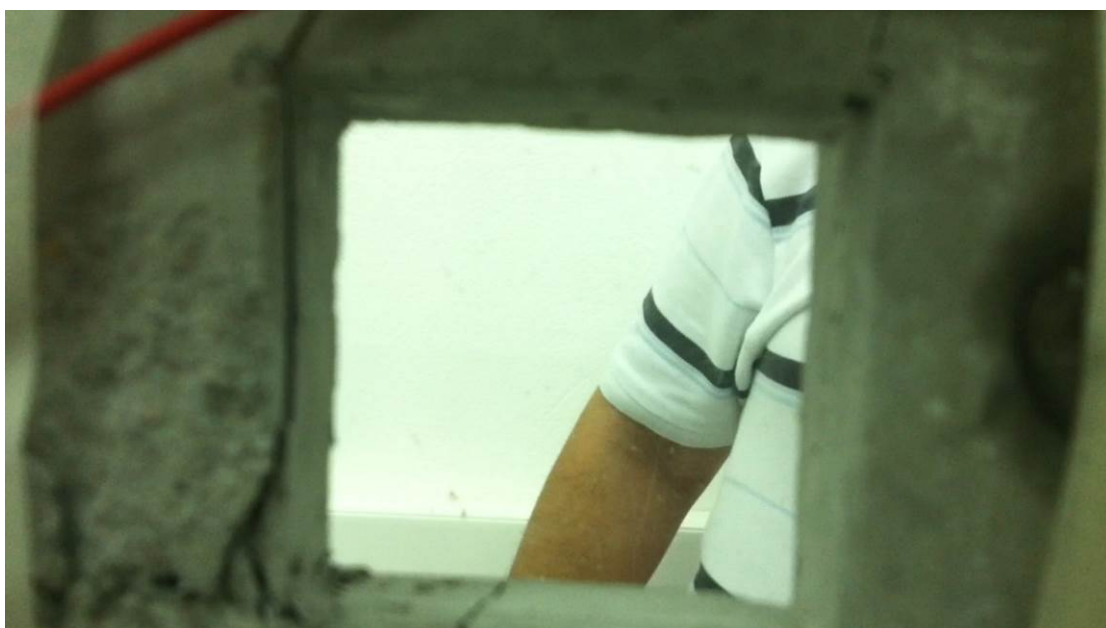
Στα 230 sec παρατηρούνται αποκολλήσεις κατά μήκος της αριστερής βάσης του ανοίγματος.



Εικόνα 4-57. Στα 230 sec

Στα 244 sec γίνεται η θραύση του δοκιμίου. Αυτή καταγράφεται από την ακουστική εκπομπή.

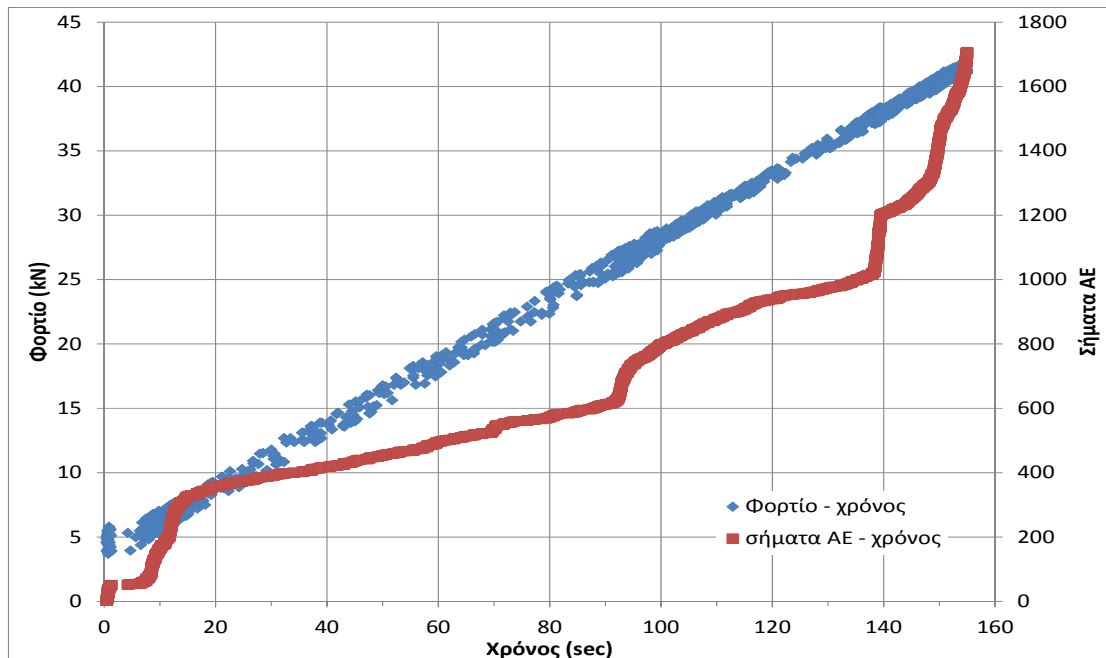




Εικόνα 4-58. Θραύση στα 244 sec

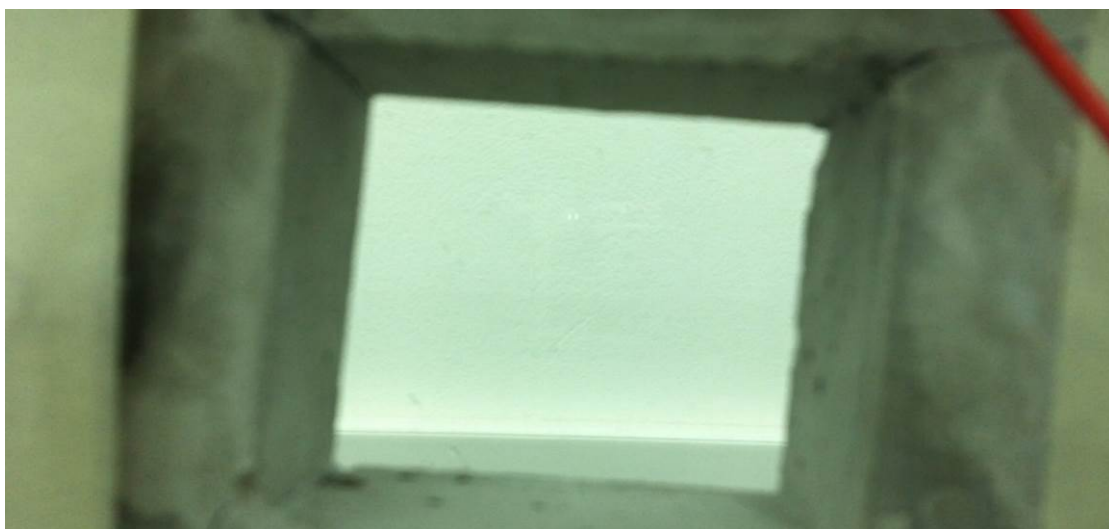
#### 4.9. Φυσικό μοντέλο #2 με τετραγωνικό άνοιγμα

Τοποθετούμε το δοκίμιο στο πλαίσιο φόρτισης δυναμικότητας 250 kN. Η δοκιμή περιλαμβάνει μόνο ένα στάδιο φόρτισης του φυσικού μοντέλου, στο οποίο έχουμε τοποθετήσει αισθητήρες ακουστικής εκπομπής.



Σχήμα 4.14. Διάγραμμα σημάτων ΑΕ-φορτίου ως προς το χρόνο

Στο παραπάνω διάγραμμα απεικονίζονται το φορτίο και τα σήματα της ακουστικής εκπομπής ως προς το χρόνο. Η Α.Ε εντοπίζει τα φαινόμενα που πραγματοποιούνται κατά τη διάρκεια της φόρτισης του φυσικού μοντέλου.



Εικόνα 4-59. Πριν τη φόρτιση

Στα 16 sec αρχίζει να αναπτύσσεται η πρώτη εφελκυστική ρωγμή στο κάτω μέρος, η οποία αντιστοιχεί με την αύξηση της κλίσης της ευθείας στο διάγραμμα στα 15 sec περίπου.



Εικόνα 4-60. Στα 16 sec

Στα 105 sec παρατηρείται αποφλοίωση στο δεξί μέρος του ανοίγματος.



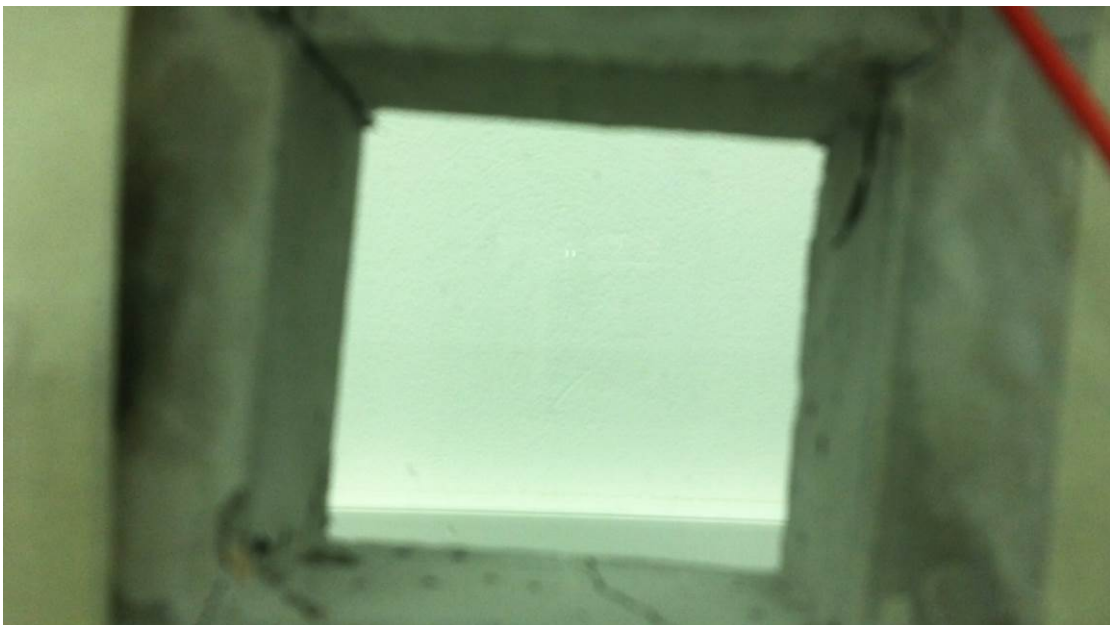
Εικόνα 4-61. Στα 105 sec

Στα 116 sec παρατηρούνται αποκολλήσεις στο βάθος αριστερά του ανοίγματος και στα 122 sec ακριβώς απέναντι.



Εικόνα 4-62. Στα 122 sec

Στα 134 sec και στα 150 sec συνεχίζονται οι αποκολλήσεις στο δοκίμιο.



Εικόνα 4-63. Στα 134 sec



Εικόνα 4-64. Στα 150 sec

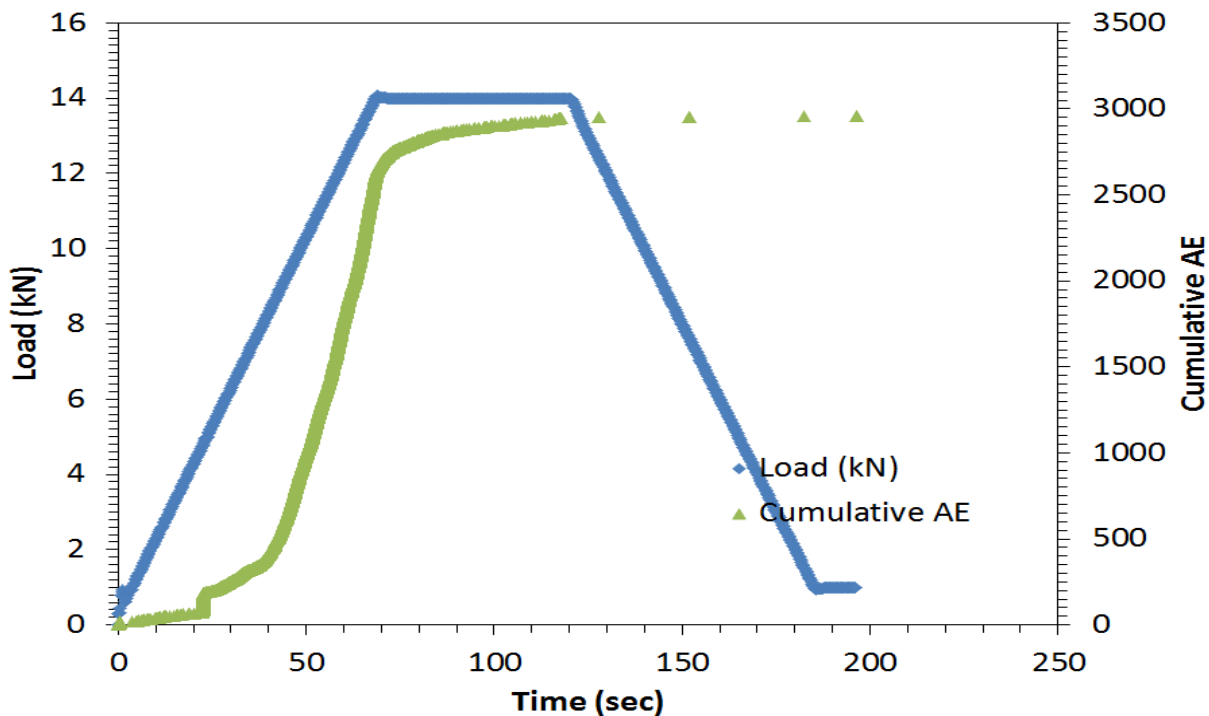
Στα 156 sec το φυσικό μοντέλο υπόκειται σε θραύση.



Εικόνα 4-65. Θραύση στα 156 sec

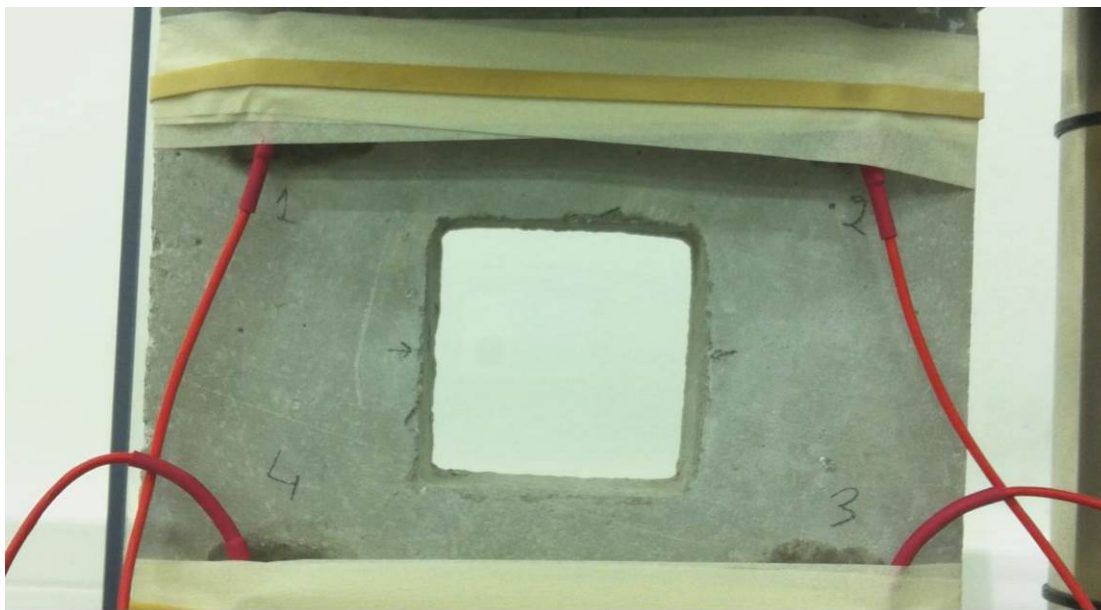
#### 4.10. Φυσικό μοντέλο #3 με τετραγωνικό άνοιγμα

Σε αυτή τη δοκιμή αρχικά φορτίζουμε το δοκίμιο με το πλαίσιο φόρτισης δυναμικότητας 15 kN και στη συνέχεια στο πλαίσιο φόρτισης δυναμικότητας 250 kN.



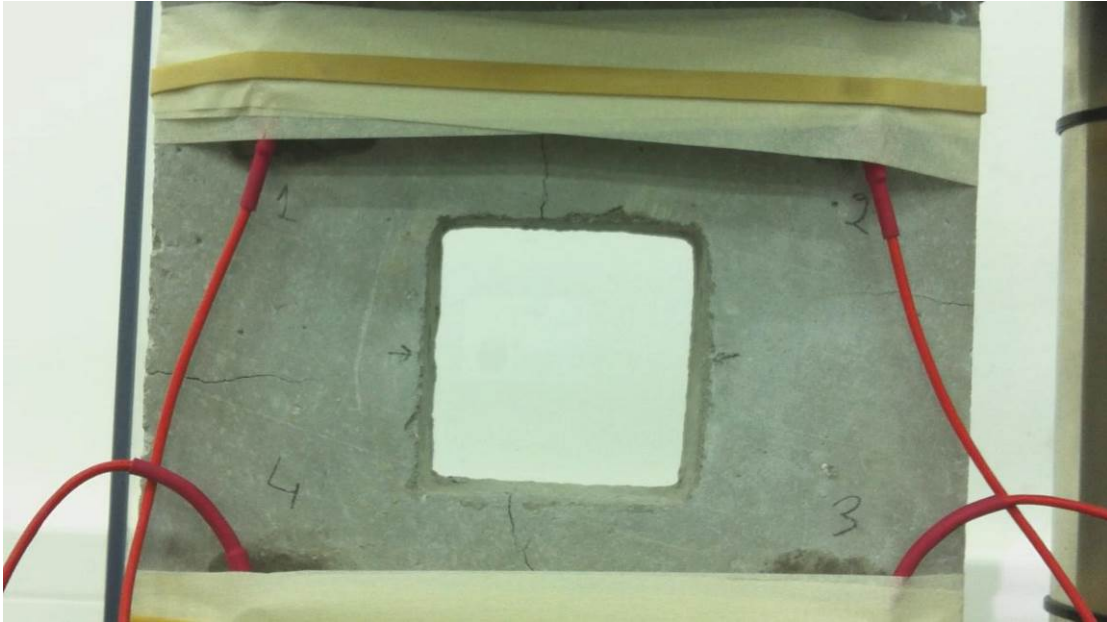
Σχήμα 4.15. Διάγραμμα σημάτων ΑΕ-φορτίου ως προς το χρόνο

Παραπάνω δίνεται το διάγραμμα του φορτίου και των σημάτων της ακουστικής εκπομπής ως προς το χρόνο στο πρώτο στάδιο της φόρτισης.



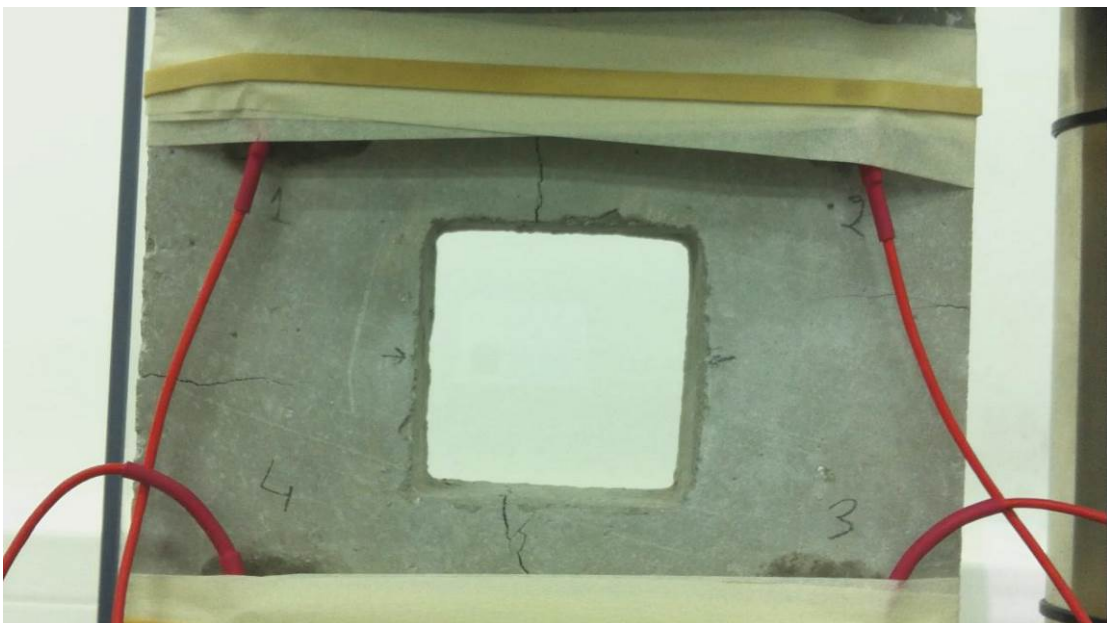
Εικόνα 4-66. Το δοκίμιο πριν τη φόρτιση

Στα 25 sec της φόρτισης σχηματίζονται οι εφελκυστικές ρωγμές κάθετα στην πάνω και κάτω πλευρά του ανοίγματος, όπως φαίνεται και στη φωτογραφία παρακάτω. Τα σήματα της ακουστικής εκπομπής έχουν εντοπίσει αυτή την εξέλιξη από τα 23 sec, όπως φαίνεται και στο διάγραμμα, με σχεδόν κατακόρυφη κλίση της ευθείας.



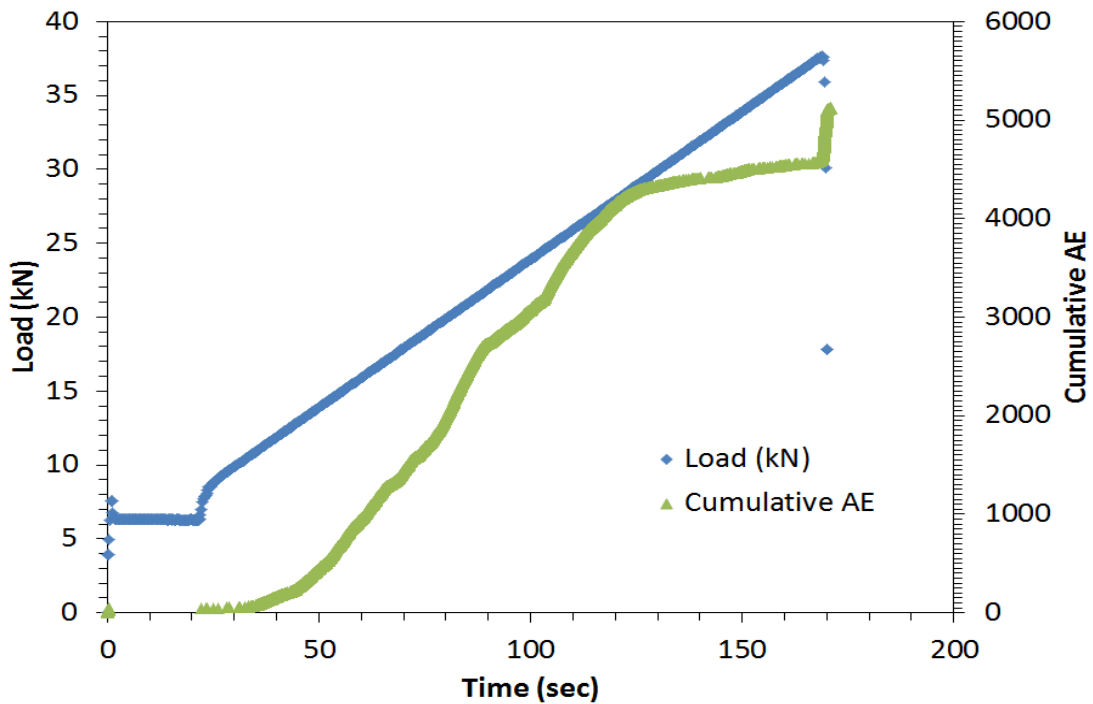
Εικόνα 4-67. Στα 25 sec

Στη συνέχεια η μόνη ορατή δραστηριότητα που εξελίσσεται είναι η ανάπτυξη των ρωγμών και πιο συγκεκριμένα η ανάπτυξη της ρωγμάτωσης στο κάτω τμήμα του δοκιμίου. Το πρώτο στάδιο της δοκιμής ολοκληρώνεται στα 198 sec.



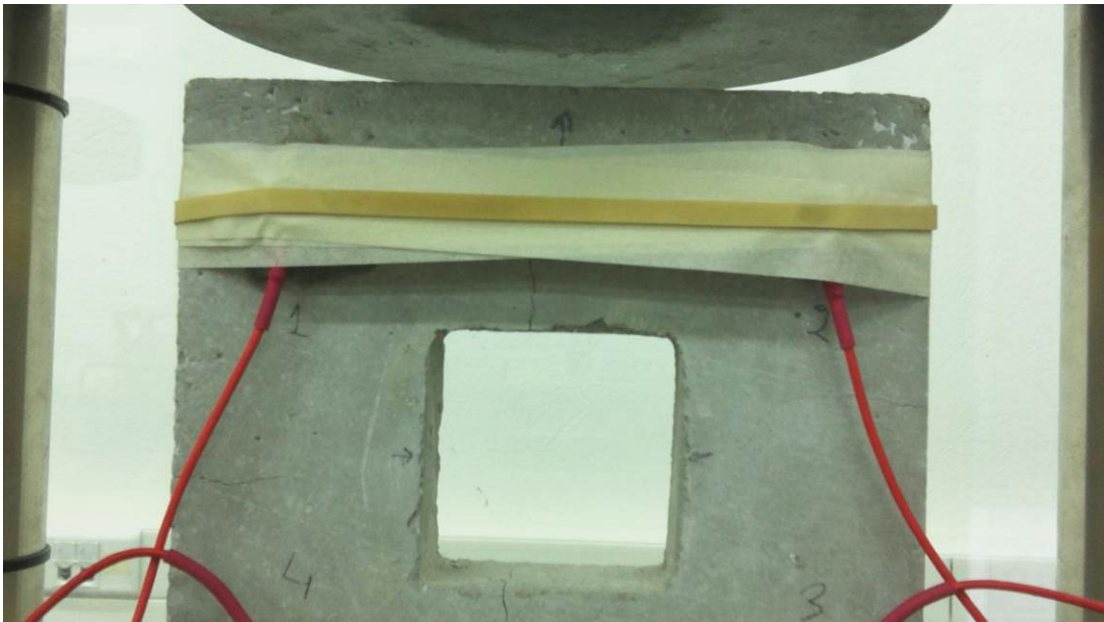
Εικόνα 4-68. Στα 198 sec

Στη συνέχεια τοποθετούμε το φυσικό μοντέλο στο πλαίσιο δυναμικότητας 250 kN, ώστε να παρατηρήσουμε τα γεγονότα που θα συμβούν έως την τελική θραύση του.



Σχήμα 4.16. Διάγραμμα σημάτων ΑΕ-φορτίου ως προς το χρόνο

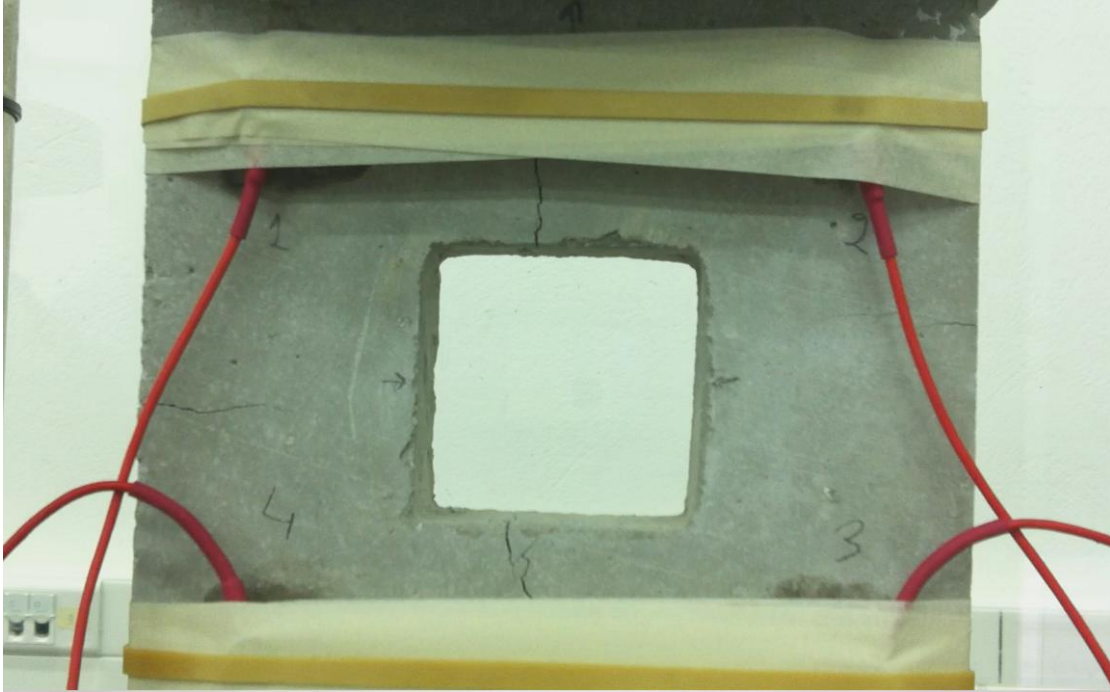
Στη παρακάτω φωτογραφία φαίνεται το δοκίμιο πριν την έναρξη της φόρτισης στο δεύτερο πλαίσιο.



Εικόνα 4-69. Πριν τη φόρτιση

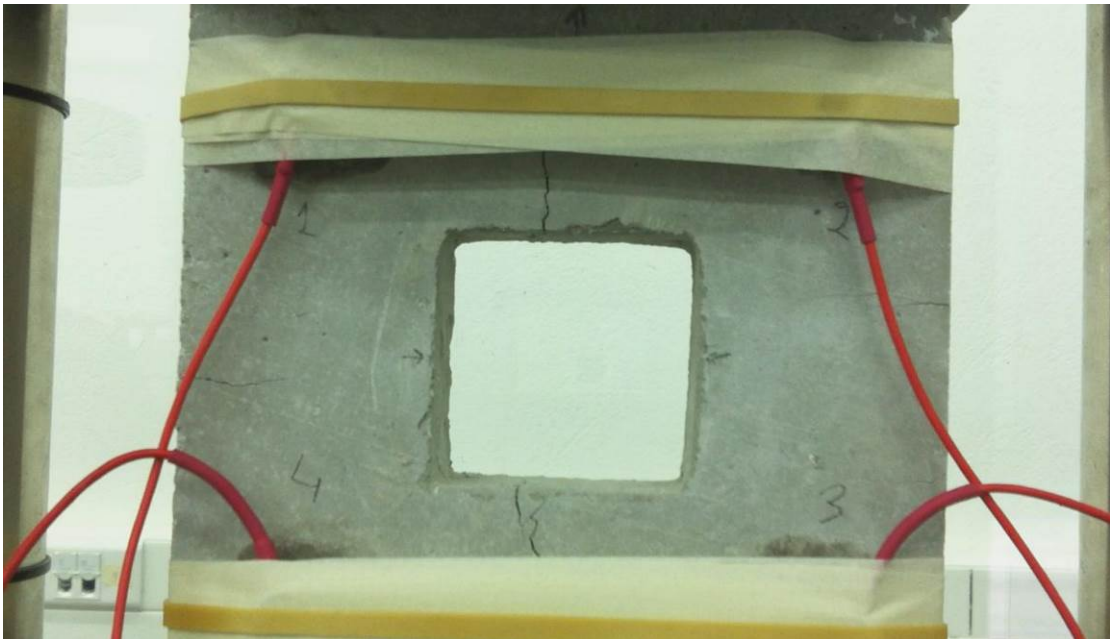


Στα 45 sec της φόρτισης εξελίσσεται αποφλοΐωση στο τετραγωνικό άνοιγμα, η οποία στέλνει ακουστικά σήματα, όπως φαίνεται και στο παραπάνω διάγραμμα.



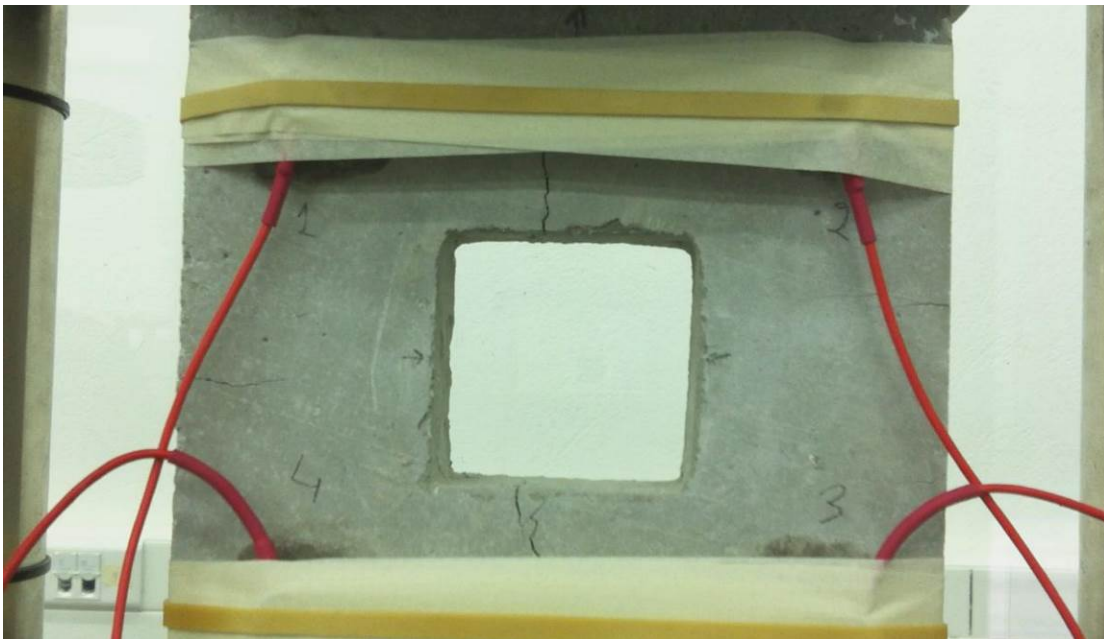
Εικόνα 4-70. Στα 45 sec

Στα 72 sec πραγματοποιείται εξωτερική αποφλοΐωση αριστερά από το άνοιγμα.



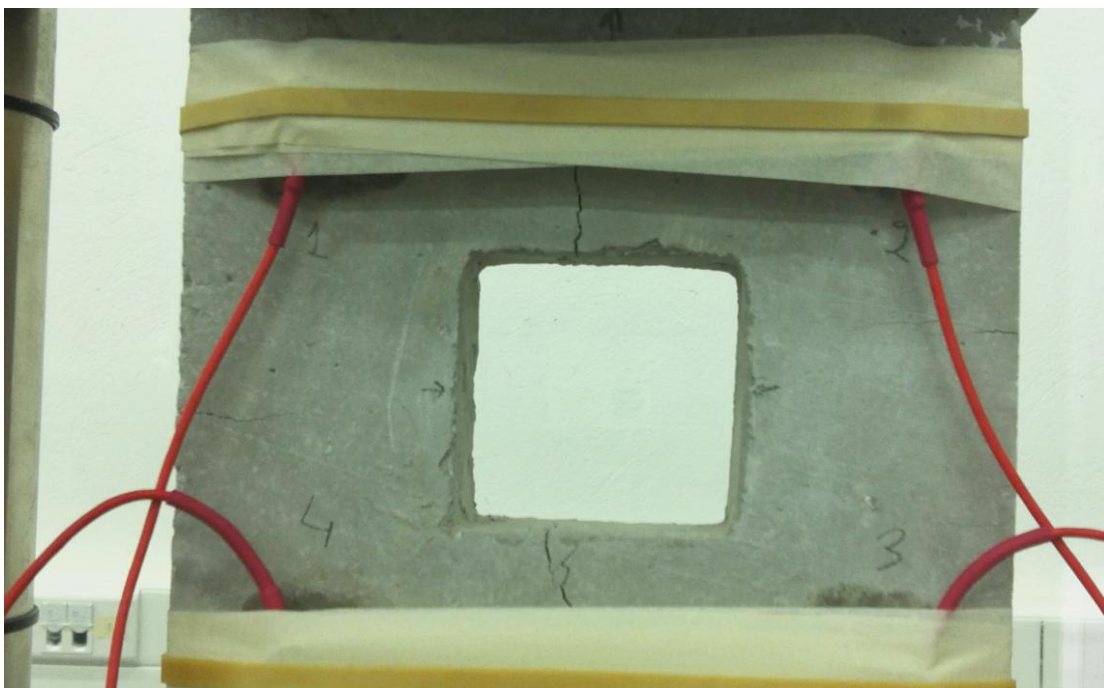
Εικόνα 4-71. Στα 72 sec

Στα 74 sec εντοπίζουμε ξανά αποφλοίωση στο τετραγωνικό άνοιγμα.



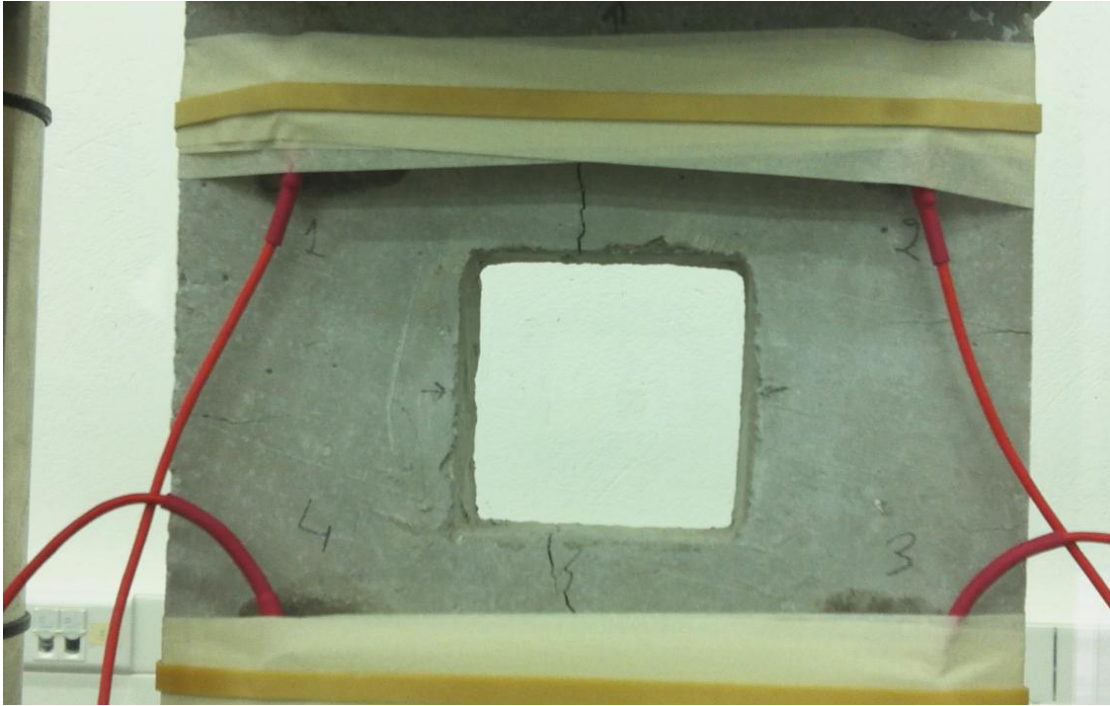
Εικόνα 4-72. Στα 74 sec

Στα 80 sec αναπτύσσεται ρωγμή αριστερά από το κυκλικό άνοιγμα.



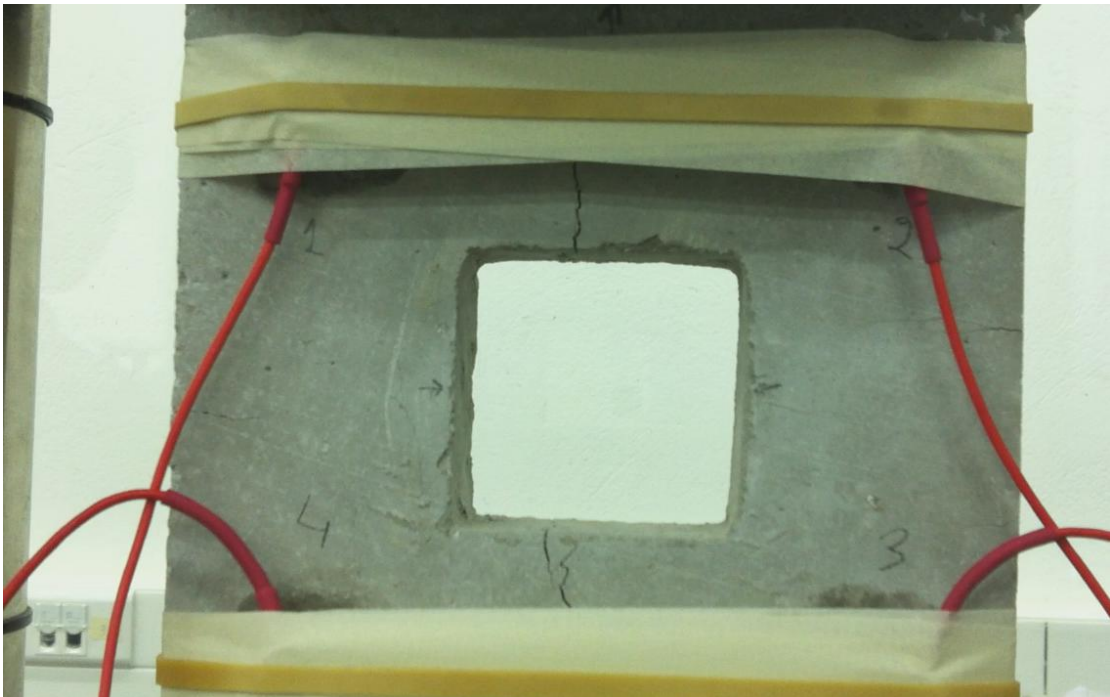
Εικόνα 4-73. Στα 80 sec

Στα 88 sec πραγματοποιείται spooling στη κάτω και αριστερή περιοχή του ανοίγματος. Σε αυτό το χρόνο αλλάζει αισθητά η κλίση της ευθείας που αντιστοιχεί στα σήματα της ακουστικής εκπομπής στο διάγραμμα.



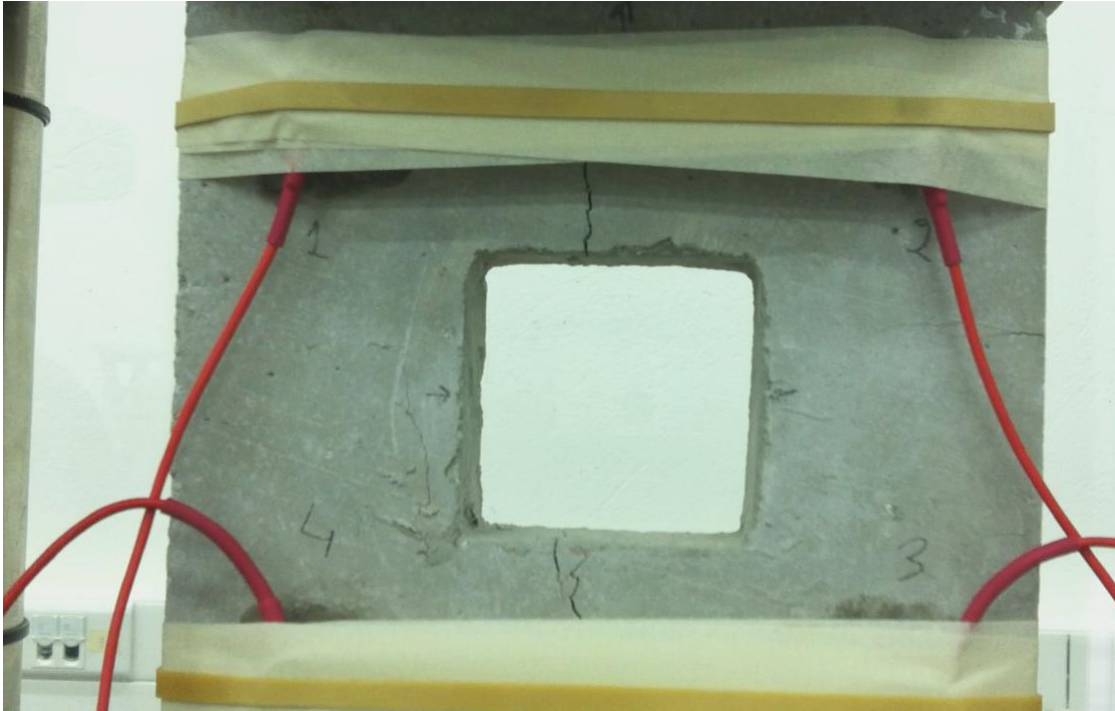
Εικόνα 4-74. Στα 88 sec

Στα 93 sec συνεχίζεται το spooling στην κοιλότητα, ενώ παράλληλα ξεκινά εξωτερική αποφλοίωση στη δεξιά πλευρά του δοκιμίου.



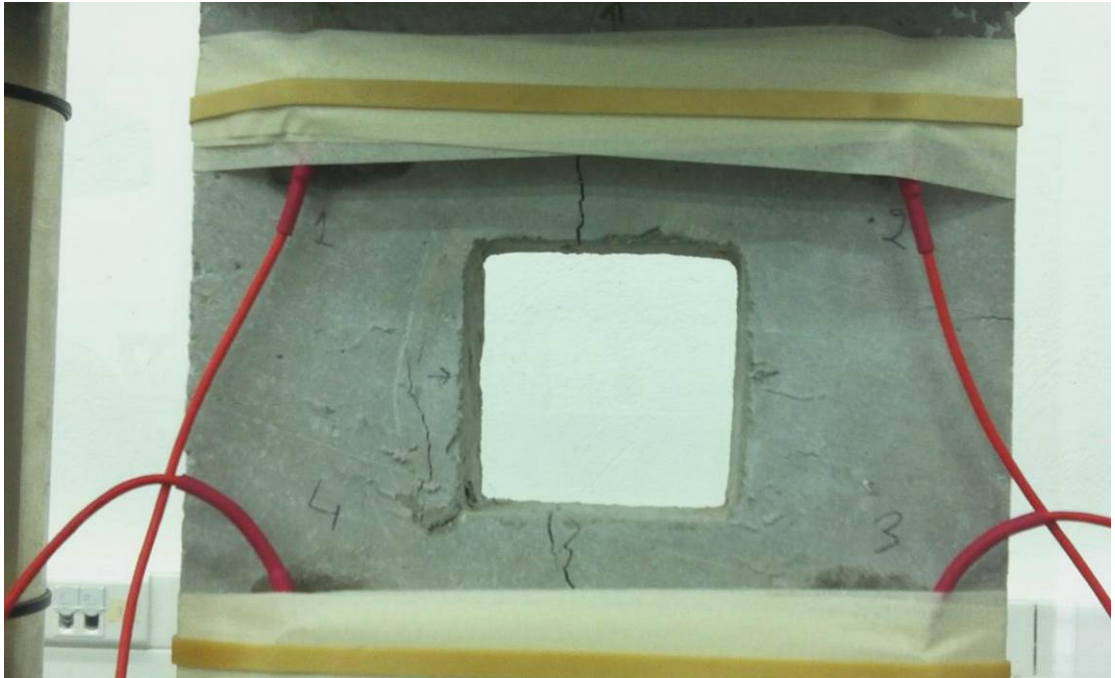
Εικόνα 4-75. Στα 93 sec

Στα 106 και 110 sec επαναλαμβάνεται η αποφλοίωση στο τετραγωνικό άνοιγμα.



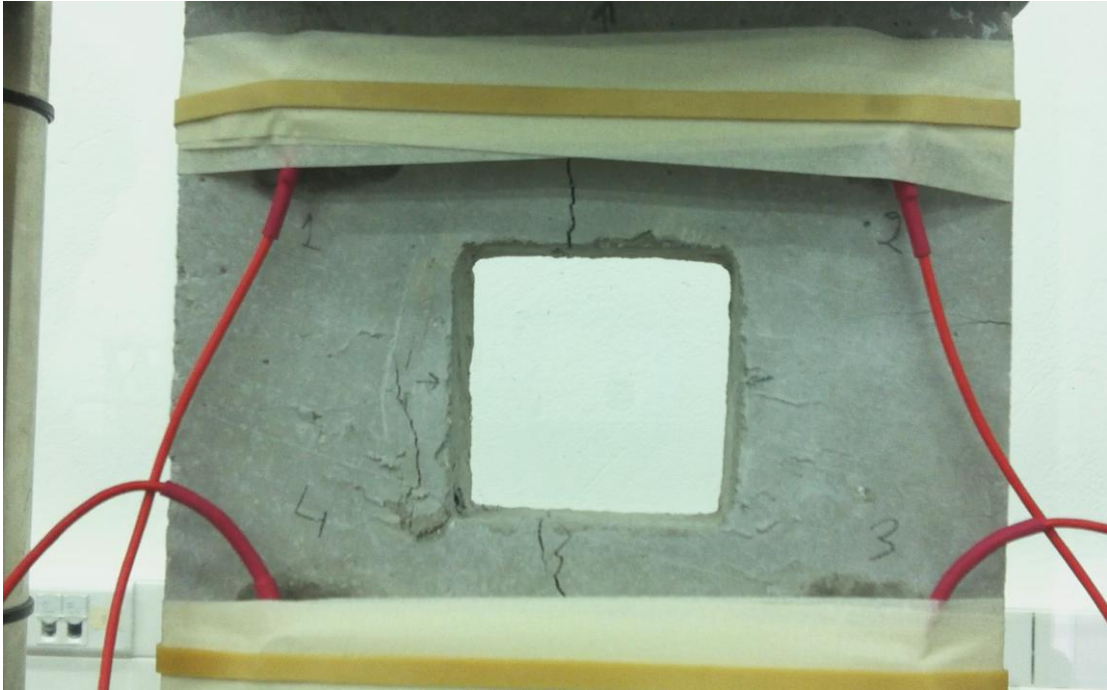
Εικόνα 4-76. Στα 106 sec

Στα 124 sec παρατηρούμε την εξωτερική αποφλοίωση στην αριστερή πλευρά του δοκιμίου.



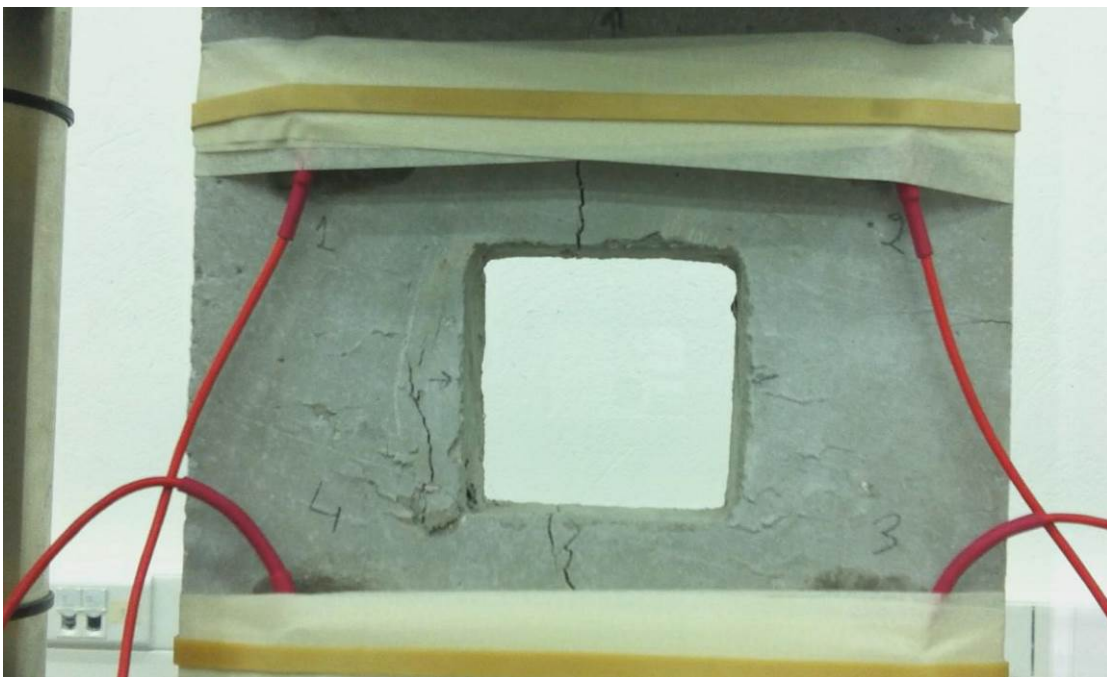
Εικόνα 4-77. Στα 124 sec

Στα 129 sec της φόρτισης αναπτύσσεται μία νέα ρωγμή, αυτή τη φορά εσωτερικά στη δεξιά κοιλότητα.



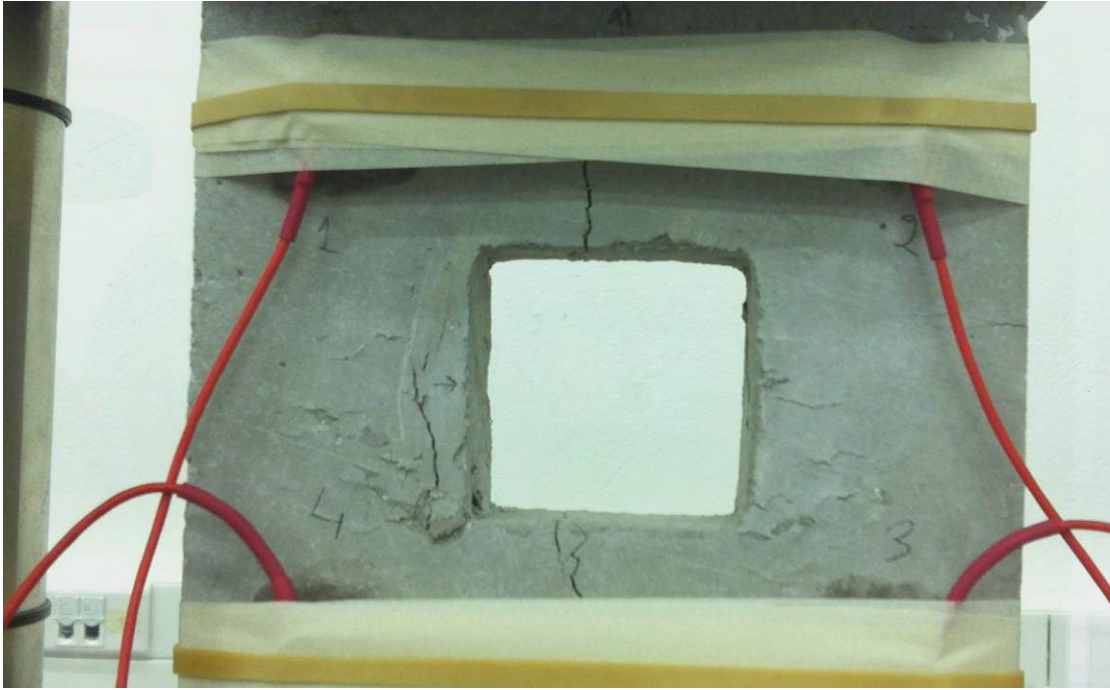
Εικόνα 4-78. Στα 129 sec

Στα 133, 141 και 144 sec συνεχίζουν να συμβαίνουν εξωτερικές αποφλοιώσεις στα αριστερά του ανοίγματος.



Εικόνα 4-79. Στα 141 sec

Στα 149 sec εκτός από την αριστερή πλευρά, παρατηρούμε και τις εξωτερικές αποφλοιώσεις στη δεξιά πλευρά του δοκιμίου.

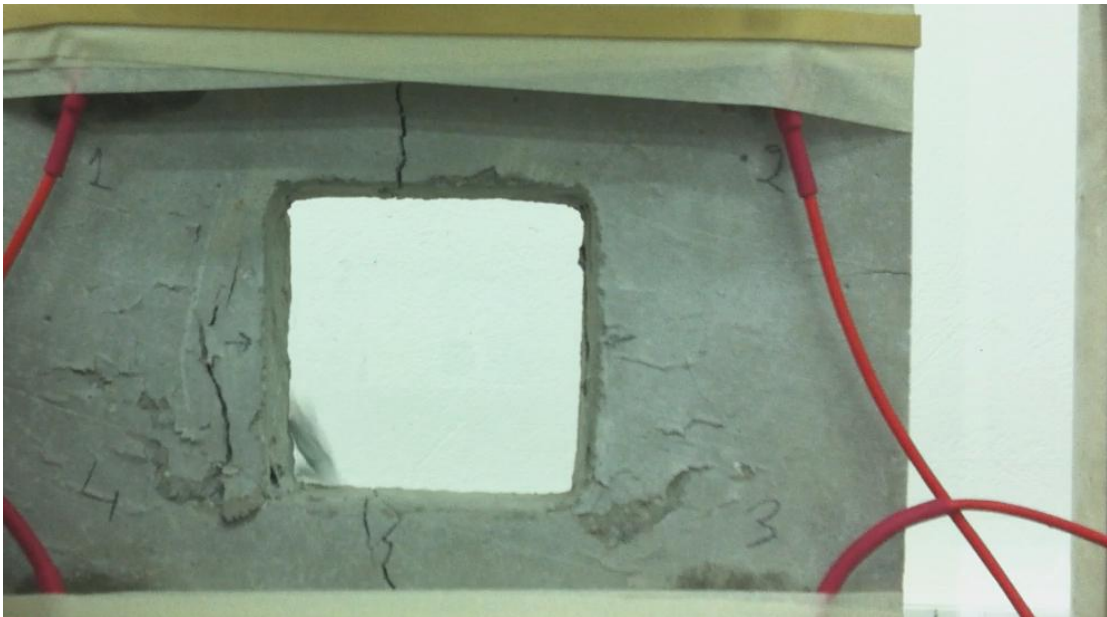


Εικόνα 4-80. Στα 149 sec

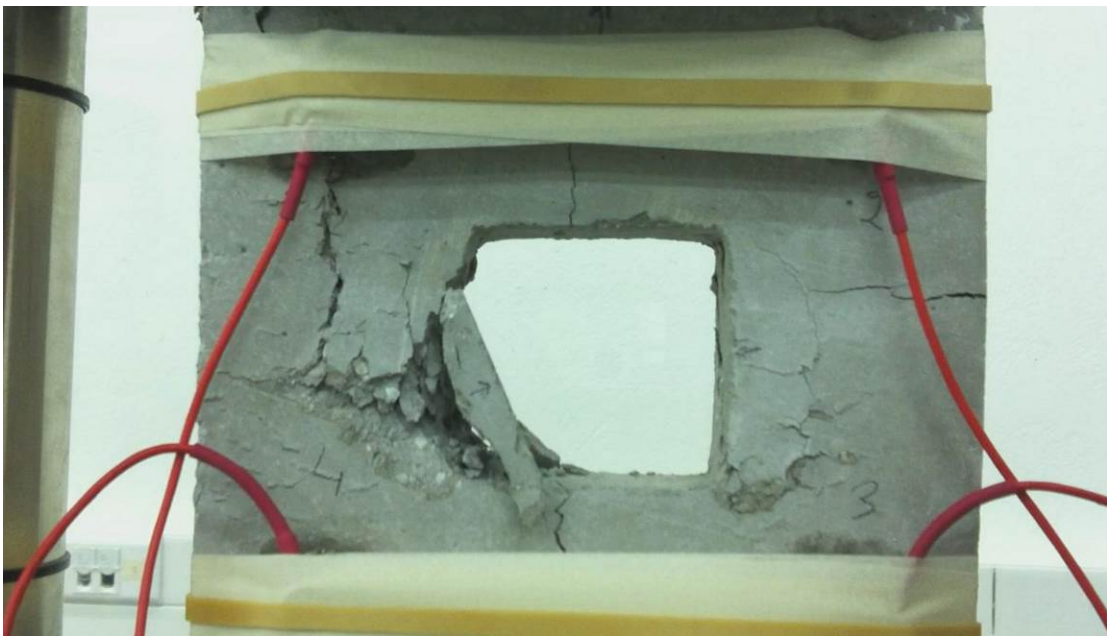
Από τα 155 sec το δοκίμιο εισέρχεται στη τελική φάση πριν τη θραύση του, η οποία περιλαμβάνει συνεχές αποφλοιώσεις μέχρι τα 169 sec, όπου συμβαίνει η τελική θραύση.



Εικόνα 4-81. Στα 155 sec



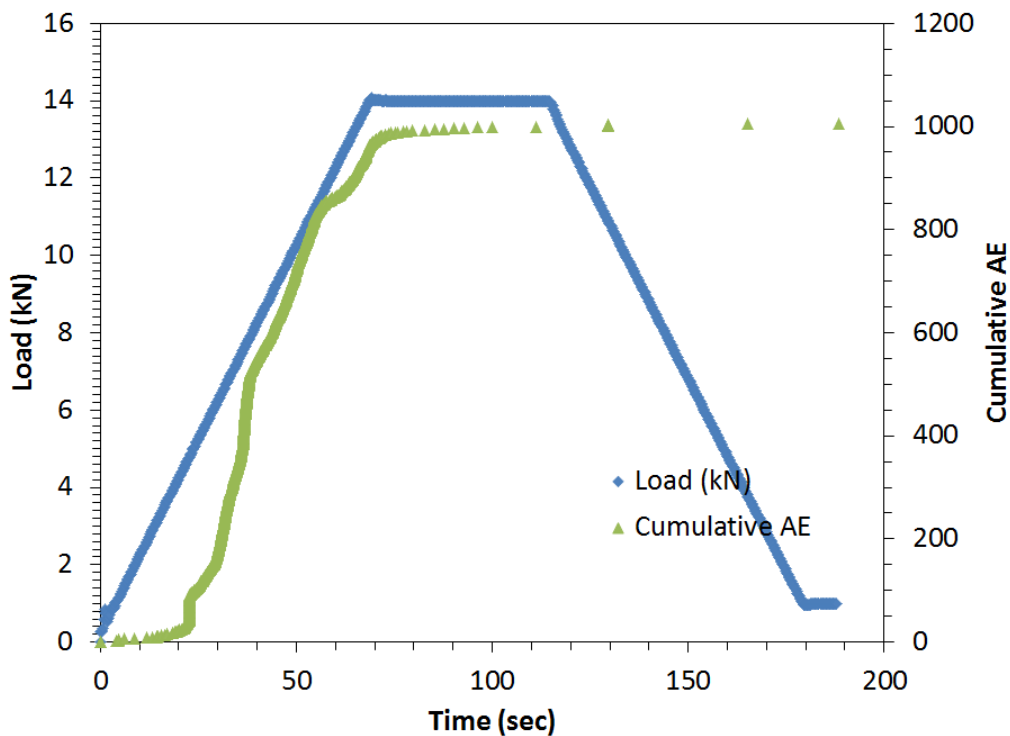
Εικόνα 4-82. Στα 161 sec



Εικόνα 4-83. Θραύση στα 169 sec

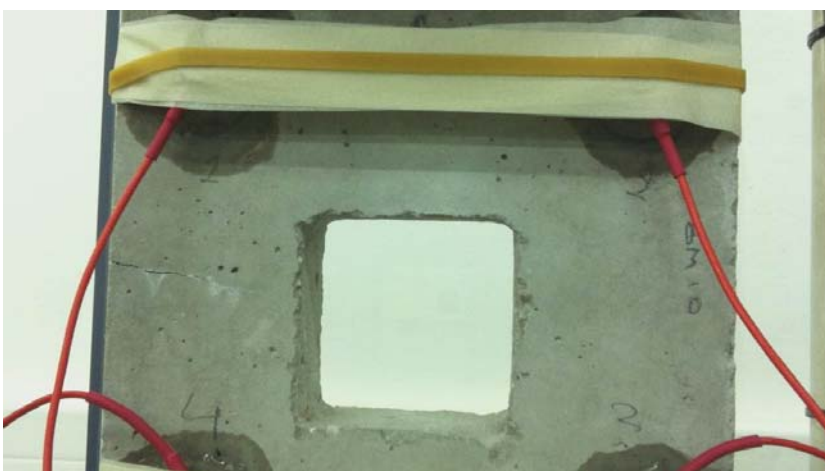
#### 4.11. Φυσικό μοντέλο #4 με τετραγωνικό άνοιγμα

Το δοκίμιο θα δοκιμαστεί σε δύο φάσεις φόρτισης. Αρχικά θα το τοποθετήσουμε στο πλαίσιο φόρτισης 15 kN, ώστε να παρατηρήσουμε την ανάπτυξη των εφελκυστικών ρωγμών και στη συνέχεια θα το τοποθετήσουμε στο πλαίσιο φόρτισης δυναμικότητας 250kN όπου θα το φορτίσουμε μέχρι την τελική του θραύση.



Σχήμα 4.17. Διάγραμμα σημάτων AE-φορτίου ως προς το χρόνο

Παραπάνω δίνεται το διάγραμμα του φορτίου και των σημάτων της ακουστικής εκπομπής ως προς το χρόνο, στο πρώτο στάδιο της δοκιμής φόρτισης.



Εικόνα 4-84. Πριν τη φόρτιση

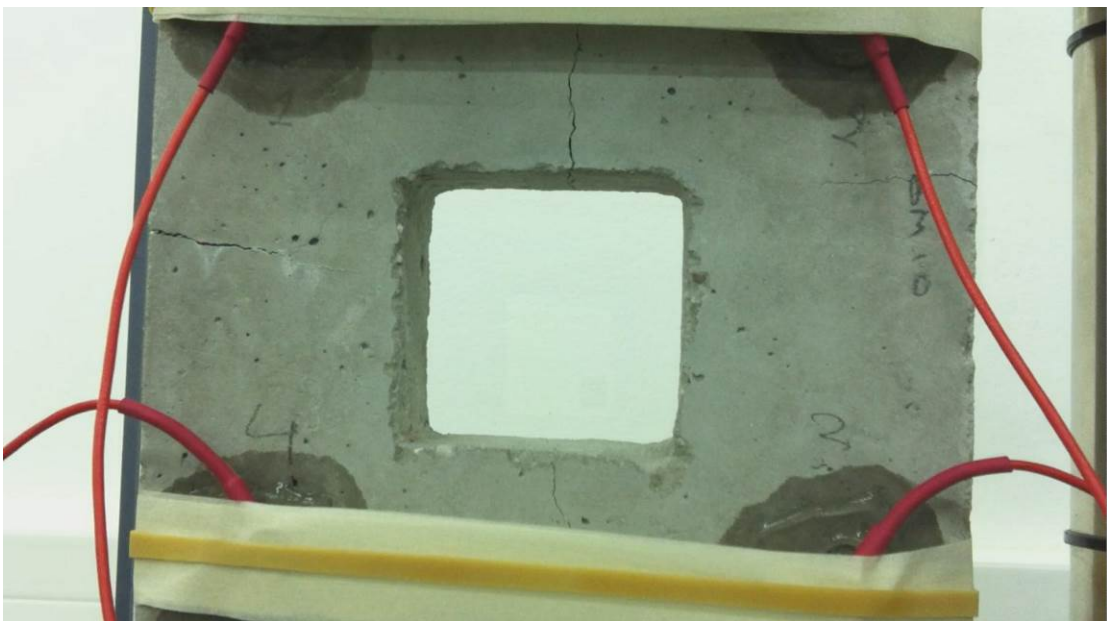


Στα 24 sec της φόρτισης σχηματίζονται ταυτόχρονα οι δύο εφελκυστικές ρωγμές κάθετα του τετραγωνικού ανοίγματος, ενώ σε αυτό το χρόνο σχηματίζεται και μία τρίτη ρωγμή δεξιά του ανοίγματος, η οποία οφείλεται σε κάμψη του δοκιμίου. Αυτές οι ρωγμές απεικονίζονται στο διάγραμμα με σχεδόν κατακόρυφη αύξηση της κλίσης της ευθείας των σημάτων της ΑΕ.



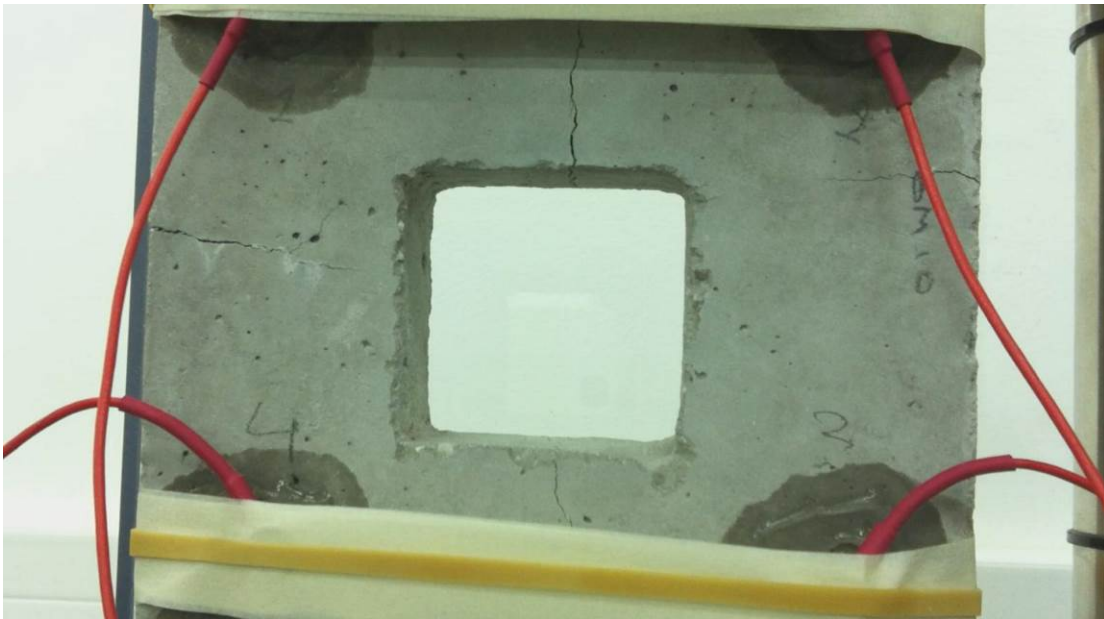
Εικόνα 4-85. Στα 24 sec

Στα 40 sec σχηματίζεται μία ρωγμή στα αριστερά του ανοίγματος. Η κλίση της ευθείας της ΑΕ σε αυτό το χρονικό σημείο μεταβάλλεται.



Εικόνα 4-86. Στα 40 sec

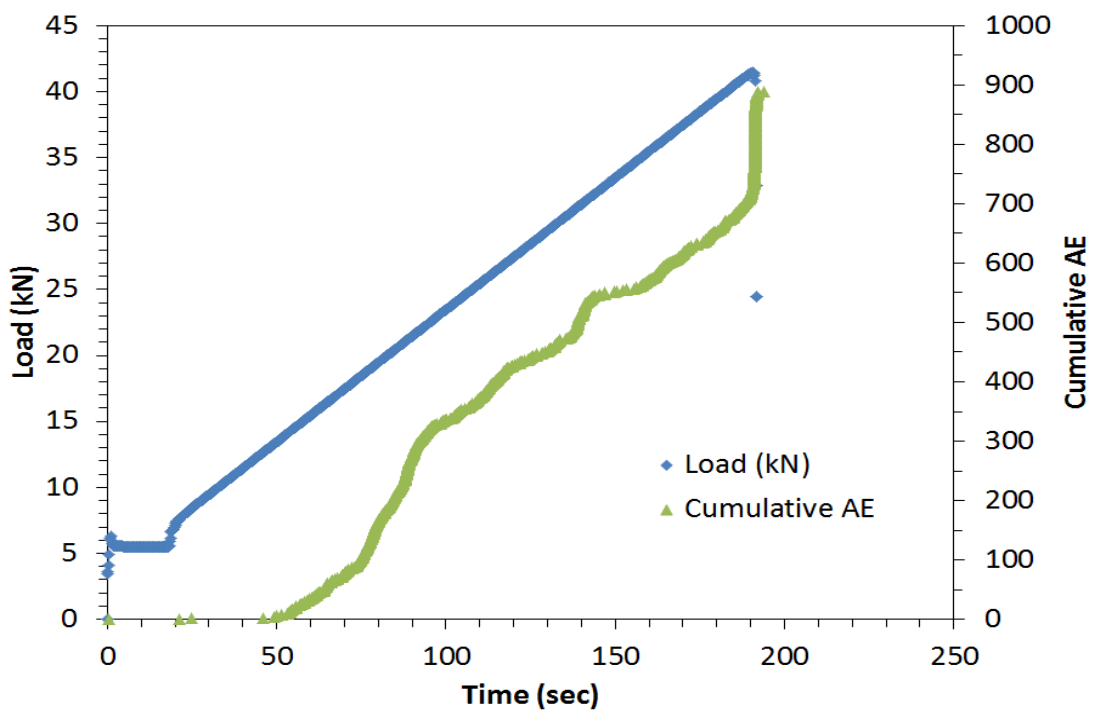
Στα 65 sec σχηματίζεται νέα ρωγμή στη δεξιά πλευρά του δοκιμίου. Η ΑΕ εντοπίζει και αυτό το γεγονός, όπως φαίνεται και στο διάγραμμα στον αντίστοιχο χρόνο.



Εικόνα 4-87. Στα 65 sec

Στη συνέχεια και μέχρι το τέλος του πρώτου σταδίου της φόρτισης δε παρατηρούμε κάποια ορατή μεταβολή στο δοκίμιο. Το στάδιο αυτό ολοκληρώνεται στα 184 sec.

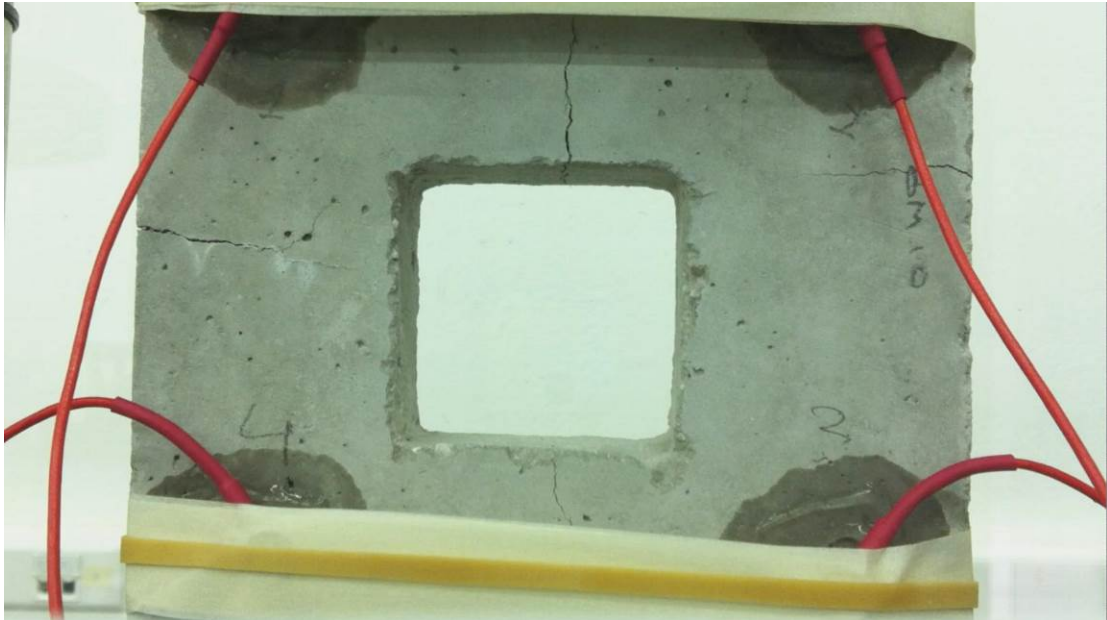
Τοποθετούμε το δοκίμιο στο πλαίσιο δυναμικότητας 250 kN.



Σχήμα 4.18. Διάγραμμα σημάτων ΑΕ-φορτίου ως προς το χρόνο

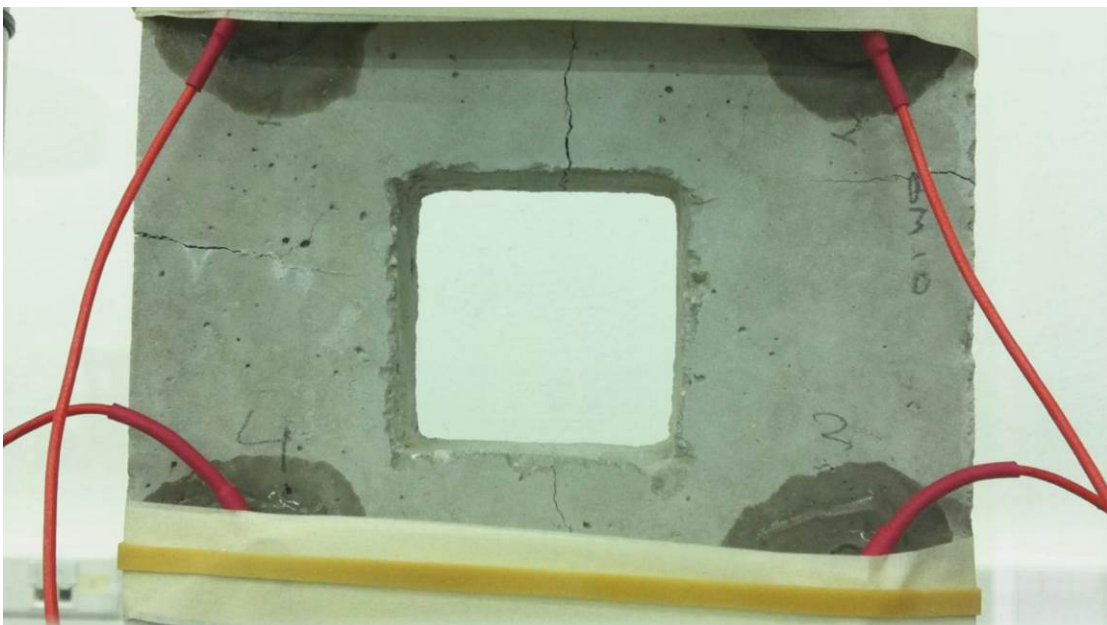
Το παραπάνω διάγραμμα απεικονίζει το φορτίο και τα σήματα της ΑΕ ως προς το χρόνο, στη δεύτερη και τελική φάση της φόρτισης.

Το δοκίμιο εισέρχεται σε αυτή τη φάση όπως φαίνεται παρακάτω.



Εικόνα 4-88. Πριν τη νέα φόρτιση

Στα 26 sec παρατηρούμε την ανάπτυξη μίας ρωγμής στα αριστερά του δοκιμίου κοντά στο τετραγωνικό άνοιγμα. Στο διάγραμμα αυτό αντιστοιχεί στα σποραδικά αρχικά σήματα της ΑΕ.



Εικόνα 4-89. Στα 26 sec

Στα 82 sec πραγματοποιείται μικρή αποφλοίωση στο τετραγωνικό άνοιγμα. Στον ίδιο χρόνο παρατηρούμε την επέκταση των ρωγματώσεων στα αριστερά του δοκιμίου. Τα σήματα της ΑΕ σύμφωνα με το διάγραμμα έχουν σταλεί στα 78 sec περίπου με μεταβολή της κλίσης της ευθείας τους.



Εικόνα 4-90. Στα 82 sec

Στα 92 sec αναπτύσσεται μία ρωγή στη δεξιά κοιλότητα.



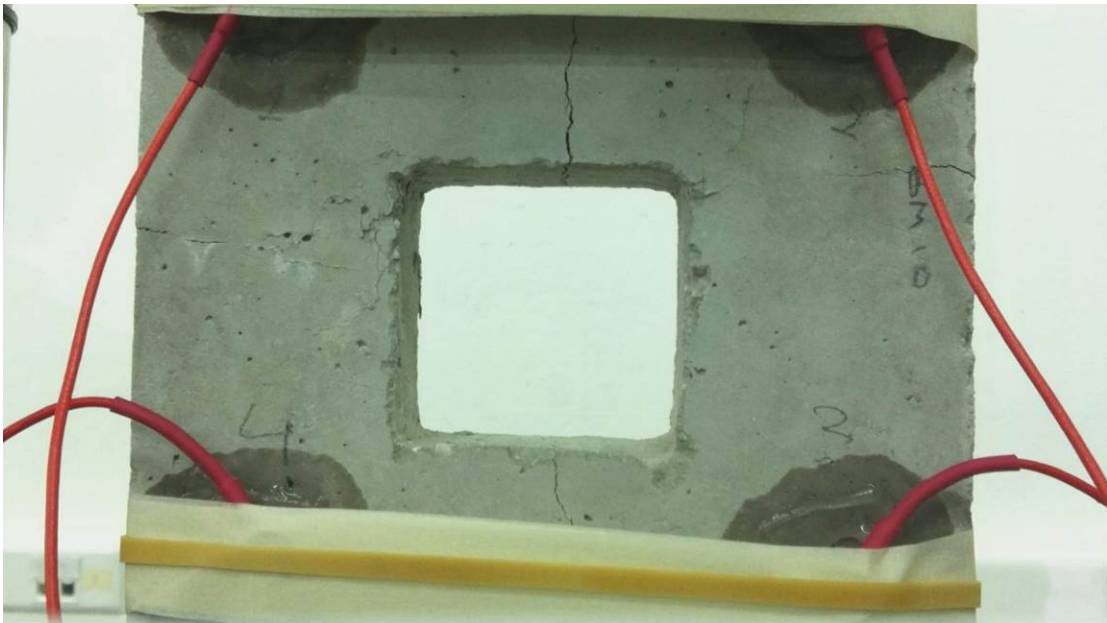
Εικόνα 4-91. Στα 92 sec

Στα 102 και στα 105 sec πραγματοποιείται αποφλοίωση στο τετραγωνικό άνοιγμα.



Εικόνα 4-92. Στα 102 sec

Στα 110 sec φαίνεται η εξέλιξη των ρωγματώσεων παράλληλα του ανοίγματος.



Εικόνα 4-93. Στα 110 sec

Στα 146 sec φαίνεται η εξωτερική αποφλοΐωση στο αριστερό τμήμα του φυσικού μοντέλου.



Εικόνα 4-94. Στα 146 sec

Στη συνέχεια εξελίσσεται συνεχές spoiling στη κοιλότητα του δοκιμίου στα 152, 154 και 159 sec, ενώ παράλληλα παραμορφώνεται έντονα και το τοίχωμα. Το δοκίμιο εισέρχεται στη φάση της τελικής θραύσης.



Εικόνα 4-95. Στα 152 sec

Στα 165 sec πραγματοποιείται εξωτερική αποφλοίωση στο αριστερό τοίχωμα και στη συνέχεια στα 170 sec πραγματοποιείται ξανά αποφλοίωση.



Εικόνα 4-96. Στα 170 sec

Στη συνέχεια εντείνονται τα παραπάνω γεγονότα με αποτέλεσμα την τελική θραύση του φυσικού μοντέλου στα 192 sec.



Εικόνα 4-97. Θραύση στα 192 sec

## 5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία εξετάσθηκε η ανάπτυξη και εξέλιξη της ρωγμάτωσης γύρω από οπές που συντελείται κατά την μονοαξονική φόρτιση φυσικών μοντέλων τσιμεντενέματος για προσομοίωση υπόγειων εκσκαφών. Το τσιμεντένεμα παρασκευάσθηκε από άμμο, τσιμέντο και νερό σε αναλογίες 2.1:1:0.4 κατά βάρος. Η αντοχή του τσιμεντενέματος από δοκιμές θλίψης σε κύβους ακμής 5 cm προέκυψε 18.2 MPa στις 21 ημέρες, σταθερή μέχρι και τις 42 ημέρες. Η αντοχή πρισματικών δοκιμών με λόγο ύψους προς ισοδύναμη διάμετρο 2.66 MPa προέκυψε μειωμένη κατά τουλάχιστο 27 % σε σχέση με την αντοχή των κυβικών δοκιμών. Η ακουστική δραστηριότητα, που καταγράφηκε σε δοκιμές θλίψης πρισματικών δοκιμών, εκκινούσε από την αρχή της φόρτισης, ενώ ο ρυθμός έκλυσης ΑΕ μειώθηκε σε ένα ενδιάμεσο στάδιο της φόρτισης και αυξήθηκε περαιτέρω τη στιγμή της αστοχίας των δοκιμών.

Εξετάσθηκαν η συμπεριφορά φυσικών μοντέλων με κυκλικές και τετραγωνικές οπές, οι οποίες δημιουργήθηκαν με αφαίρεση ενός κυλινδρικού και τετραγωνικού μέσου αντίστοιχα. Κατά την παρασκευή των φυσικών μοντέλων, η αφαίρεση των μέσων (κύλινδροι, κύβοι) που δημιουργούν τις αντίστοιχες οπές, προκαλεί ελαφρές ρωγματώσεις στο τελικό δοκίμιο. Αυτές οι ρωγματώσεις επηρεάζουν σε κάποιο βαθμό την αντοχή του μοντέλου, αλλά όχι την παρατήρηση των εξελίξεων που συμβαίνουν κατά την φόρτιση του μοντέλου. Εκτός της πρώτης πειραματικής δοκιμής, χρησιμοποιήθηκε η τεχνική της ακουστικής εκπομπής για λεπτομερέστερη παρατήρηση των γεγονότων που συμβαίνουν κατά την φόρτιση.

Η σειρά της εξέλιξης των φαινομένων ρωγμάτωσης που συντελούνται κατά την φόρτιση σε μονοαξονική θλίψη είναι η εξής:

- i. Εμφάνιση εφελκυστικών ρωγμών στο πάνω και κάτω μέρος οπής. Στα φυσικά μοντέλα με κυκλικό άνοιγμα τις περισσότερες φορές αυτές εμφανίζονται κοντά στο κέντρο της διατομής.
- ii. Απομονωμένες ρωγμές, οι οποίες όμως εμφανίσθηκαν σε λίγες περιπτώσεις.
- iii. Επιφανειακές αποφλοιώσεις, σε όλα σχεδόν τα μοντέλα.



iv. Αποφλοιώσεις εσωτερικά του ανοίγματος, σε όλα τα μοντέλα. Στα φυσικά μοντέλα με τετραγωνικό άνοιγμα η αποφλοίωση συμβαίνει κυρίως στις άκρες της βάσης της διατομής.

v. Τελική θραύση του φυσικού μοντέλου.

Οι εφελκυστικές ρωγμές εμφανίζονται συνήθως μέχρι τα 15 kN περίπου και γι' αυτό το λόγο είναι προτιμότερο το φυσικό μοντέλο να φορτιστεί σε δύο στάδια. Αρχικά σε πλαίσιο δυναμικότητας 15 kN για καλύτερη παρατήρηση της εξέλιξής της και στη συνέχεια σε πλαίσιο μεγαλύτερης δυναμικότητας ώστε να παρατηρηθεί η θραύση.

Τέλος, διαπιστώθηκε ότι η ακουστική εκπομπή κατά την εξέλιξη των ρωγματώσεων και των αποφλοιώσεων εκπέμπει σήματα, τα οποία προηγούνται της οπτικής εμφάνισης των γεγονότων.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

TROLLOPE D. H. The stability of trapezoidal openings in rock masses. *Rock Mech. Engng Geol.* 4, 232-241 (1966).

FRANKLIN J. A. *A Strength Criterion for Rock*, Imperial College, Rock Mechanics Research Report, No. 6, Interdepartmental Rock Mechanics Project (1968).

BIENIAWSKI Z. T. Mechanism of brittle fracture of rock, Part I Theory of the fracture process. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 4, 395-406 (1967).

BARRON K. *The Bonding of Plaster Slabs by Epoxy Resins--Wabana Model Study*, Report No. 4, Department of Mines and Technical Surveys, Mines Branch, Ottawa, Fuels and Mining Practice Division, Internal Report, FMP 61/111-MIN (1961).

BARTON N. Προσωπική επικοινωνία με τον STIMPSON (αναφέρεται από τον STIMPSON 1970), Λονδίνο 1968.

BAYLEY H. G. Gelatin as a photoelastic material. *Nature, Lond.* 183, 1757-1758 (1959).

BEAUJOINT N. and BOUCHE B. Etudes de Barrages sur Modelés Réduits en Mortier de Plâtre, *Proceedings of the Symposium on Models of Structures*, Madrid 1959, *R.I.L.E.M. Bull.* No. 8, 16-26 (1960).

BELL R. T. and CURRIE J. B. Photoelastic experiments related to structural geology. *Proc. geol. Ass. Can.* 15, 33-51 (1964).

BELOUSSOV V. V. Tectonophysical investigations. *Bull. geol. Soc. Am.* 71, 1255-1270 (1960).

BENITO C. Scales, Materials and Manufacturing Processes, *Proceedings of the Symposium on Models" of Structures*, Madrid 1959, *R.I.L.E.M. Bull.* No. 8, 5-14 (1960).

BENITO C. and MORENO A. *Estudios Fotoelasticos Tridimensionales con Modelos de Gelatina*, Lab. Central Ensayo de Mat. de Const., Pub. No. 73, Madrid (1960).

BENITO C. Essais Comparatifs pour le Choix d'une Forme Résistante, *Proceedings of the Symposium on Shell Research*, Delft, pp. 282-286 (1961).

BESHIR B. A. C. *Model Materials for Structural Concrete Analysis*, M.Sc. Report, Imperial College of Science and Technology', London (1967).

BORTZ S. A. and WADE T. B. Analysis and Review of Mechanical Testing Procedures for Brittle Materials, *Proceedings of the Seminar on Mechanical Testing Procedures for Brittle Materials*, Chicago (1967).

BRAITHWAITE J. C. and WILHAMS R. *The Use of Scale Models in Predicting the Behaviour of Complex Structures*, Paper read to the North-East Coast Institution of Engineers and Shipbuilders, January (1963).

BROCK G. C. Direct models as an aid to reinforced concrete design. *Engineering, Lond.* 187, 468-470 (1959).

BROCK G. C. Effect of shear on ultimate strength of rectangular beams with tensile reinforcements. *J. Am. Concr. Inst.* 31, 619-638 (1960).

BROCK G. C. Predicting the Plasticity of Reinforced Concrete Shell Structures by Model Experiment, *Proceedings of the Symposium on Non-classical Shell Problems*, Warsaw, pp. 1101-1110 (1964).

BROCK G. C. Reinforced plaster models for bridge structures. *Highw. Publ. Wks.* 36, 6-10 (1968).

BROWN E. T. and TPOLLOPE D. H. The failure of linear brittle materials under effective tensile stress. *RockMech. Engng Geol.* 5, 229-241 (1967).

B. J. CARTER, E. Z. LNTAI AND A. PETUKHOV. Primary and remote fracture around cavities,. *Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr*, 15, 21-40 (1991)

B. J. CARTER. Size and Stress Gradient Effects on Fracture Around Cavities. *Rock Mech. Rock Engng.* 25 (3), 167—186 (1992).

CASIEL Y., BARRON G. and HAMB P. Scale Model Study of Hydraulic Fracturing (in French), *Comptes Rendusdu Deuxieme Colloque de l'Assoeiation de Recherche sur les Techniques de Forage et de Production*, pp.167 186 (1965).

CLEVETT M. L., JR and BARRY J. D. *A Qualitative Gelatin Stress Analysis of the Effectiveness of various Ground Anchoring Devices*, Technical Report QMRD-5, Headquarters Quartermasler's Research and Development Command, Natick, Mass. (1955).

CURRIE J. B., PATNODE H. W. and TRUMP R. P. Development of folds in sedimentary strata. *Bull. geol. Soc.Ant.* 73, 655-674 (1962).

CUYKENDALL T. R. Gelatin Models, *Proceedings of the Eastern Photoelastieity Conference*, Cornell University, Ithaca, New York, pp. 13-17 (1939).

CUYKENDALL T. R. Gelatin photoelastic models. *Cornell Engr* 6, 8-10; 22 (1940).

DURELLI A. J. and JACOBSEN R. H. Brittle material failure as indicators of stress concentration factors. *Exp. Mech.* 2, 65-74 (1962).

EVERS J. F., PRESTON F. W., SADIQ S. and SWIFT G. W. Preparation and testing of low permeability mediato meet scaling requirements for gas reservoir modelling, *Soc. Petrol. Engrs J.* 7, 189-194 (1967).

FUMAGALLI E. Communication sur les Materiaux pour Modeles Statique de Barrages en B6ton, *Proceedings of the Fifth International Congress on Large Dams*, Paris, Vol. 4, pp. 1039-1074 (1955a).

FUMAGALLI E. *Suitable Materials for Static and Dynamic Tests on Models of Concrete Dams*, A translation of the communication in French by Ing. Fumagalli to the Fifth International Conference on Large Dams, Paris (1955) by the Cement and Concrete Association (1955b).

FUMAGALLI E. Modules Geomecaniques des Reservoirs Artificiels: Materiaux, Technique d'Essais, Exemples de Reproduction sur Modeles, *Proceedings of the Symposium on Concrete Dam Models*, Lisbon, Sections 2.1-2.28 (1963).

FUMAGALLI E. *Model Simulation of Rock Mechanics Problems*, Rock Mechanics Course, University of Swansea, Preprint (1967).

GARNER N. E. and GATUN C. Experimental study of crater formation in plastically deforming synthetic rocks. *J. Petrol Technol.* 1025-1030 (1963).

HASHIN Z. The Moduli of an Elastic Solid containing Spherical Particles of another Elastic Material, *Proceedings of LU.T.A.M. Symposium on Non-Homogeneity in Elasticity and Plasticity*, Warsaw, pp.463-478 (1959).

HEATH L. J. Variations in permeability and porosity of synthetic oil reservoir rocks--methods of control. *Soc. Petrol. Engrs J.* 5, 329-332 (1965).

HOBBS D. W. Scale model studies of strata movement around mine roadways. Apparatus, technique and some preliminary results. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 3, 101-127 (1966).

HOBBS D. W. Behaviour and simulation of sedimentary rocks. *J. Strain Anal.* 2, 307-316 (1967).

HOBBS D. W. Scale model studies of strata movement around mine roadways--I. The dependence of roadway closure upon rock strength. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 5, 219-236 (1968).

HOEK E. Rock Fracture around Mining Excavations, *Proceedings of the Fourth International Conference on Strata Control and Rock Mechanics*, Henry Krumb School of Mines, pp. 334-348 (1964).

HOFFMAY H. The Effects of Direction of Working and Rate of Advance on the Scale-Deformation of Self loaded Stratified Model of a Large Body of Ground, *Proceedings of the Fourth International Conference on Strata Control and Rock Mechanics*, Henry Krumb School of Mines, pp. 397-411 (1964).

INGRAFFEA A. R., 'Discrete fracture propagation in rock laboratory tests and finite element analysis'. Ph. D. Dissertation, University of Colorado, Boulder, Colorado, (1977).

ΚΑΤΣΙΚΟΓΙΑΝΝΗ Π, ΝΟΜΙΚΟΣ ΠΠ, ΣΟΦΙΑΝΟΣ ΑΙ. «Ακουστική Εκπομπή στη Μηχανική Πετρωμάτων», Ορυκτός Πλούτος 145, 9-24 (2007).

KARPOV A. V. Materials for use in structural engineering models with particular reference to rubber compounds. *Proc. Am. Soc. Test. Mater.* 4, 663-692 (1934).

KRSMANOVIC D. and MILIC S. Model Experiments on Pressure Distribution in some Cases of a Discontinuum, *Proceedings of the 14th Symposium of the International Society of Rock Mechanics*, Salzburg, pp. 72-87(1963).

KLERCK P.A., SELLERS E.J. , OWEN D.R.J. Discrete fracture in quasi-brittle materials under compressive and tensile stress states. *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.* 193 (2004) 3035–3056.

KRISMANOVIC n., TUFO i. and LANGOF Z. Shear Strength of Rock Masses and Possibilities of its reproduction on Models, *Proceedings of the First Congress of the International Society of Rock Mechanics*, Lisbon, Vol. 1, pp. 537-542 (1966).

KUZNETSOV G. N., BUD'KO N. N., FILIPPOVA A. k. and SHKLYARSKII i. F. *The Study of Rock Pressure Manifestations by using Models*, Extract pp. 81-100 only of Section 5--"Technology of manufacturing materials bonded by low temperature melting binders", Moscow, 1959. National Coal Board Translating and Interpreting Branch (1959).

E. Z. LAJTAI , V. N. LAJTAI, 'The collapse of cavities', *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 12, 81-86 (1975).

MARTIN C. W. *Influence of Depth and Shape of Charge on Crater Formation in Plaster*, M.Sc. Thesis, Iowa State University (1959).

MARTIN C. W. and MURPHY G. Model prediction of fractures due to explosives. *Proc. Am. Soc. cir. Engrs* 89, *Engng Mech. Div.* 133-150 (1963).

MOGI K. Magnitude-frequency relation for elastic shocks accompanying fractures of various materials and some related problems in earthquakes. *Bull. Earthq. Res. Inst. Tokyo Univ*, 40, 831-853 (1962),

MOGI K. The fracture of a semi-infinite body caused by an inner stress origin and its relation to the earthquake phenomena. *Bull. Earthq. Res. Inst. Tokyo Univ.* 40, 815-829 (1962); 41, 595-614 (1963).

MUHLFELLNER R. Static Tests performed on Small Scale Models of Arch Dams, *Proceedings of the Symposium on Concrete Dam Models*, Lisbon, Sections 11.1-11.14 (1963).

NEVILLE-POLLEY M. *Energy and Stress Distribution in Impacted Solid Cylinders*, Diploma of Imperial College (D.I.C.) Dissertation, Mining and Mineral Technology Dept. (1966).

NORTJE R. *First Progress Report on Comparison of Rock Failure around an Excavation in a Laboratory Model and in situ. Part II--Model Studies*, C.S.I.R. Report MEG 436 (1966).

NORTJE R. *Comparison of Rock Failure around an Excavation in a Laboratory Model and in situ*. C.S.I.R. Report, MEG 562, Contract Report, restricted (1967).

PATTON F. D. *Multiple Modes of Shear Failure in Rock and Related Materials*, Ph.D. Thesis, Univ. of Illinois (1966).

PRIEST M. S. and SHIH C. *Models of Concrete Arch Dams, Proceedings of the Symposium on Concrete Dam Models*, Lisbon, Sections 8.1-8.9 (1963).

RAMBERG H. *Note on model studies of folding of moraines in Piedmont glaciers. J. Glacial.* 5, 207-218 (1964).

RAMBERG H. and STEPHANSSON O. *Note on the centrifuged models of excavations in rocks. Tectonophysivs2*, 281-298 (1965).

RANGANATHAN B. V., SUBBA RAO K. S. and HEYDRY A. W. *Plaster mortar for small scale tests. J. Am. Conc. Tst.* 64, 594-601 (1967).

RICHARDS R., JR and MARK R. *Gelatin models for photoelastic analysis of gravity structures. Exp. Mech.* 6, 30-38 (1966).

ROARK J. and HARTENBERG R. S. *Predicting the strength of structures from tests on plaster models. Bull. Wis. Univ. Engng Exp. Stn* 81 (1935).

ROWE R. E. *Experimental Methods in the Study of the Behaviour of Shell Roofs, Proceedings of the World Conference on Shell Structures*, San Francisco, pp. 223-234 (1962).

ROWE R. E. and BASE G. D. *Model analysis and testing as a design tool. Proc. Instn cir. Engrs* 33, 183-199 (1966).

SABNIS G. M. and WHITE R. N. *A gypsum mortar for small scale models. J. Am. Concr. Inst.* 64, 767-773 (1967).

SAUCIER K. L. *Development of Material for Modelling Rock*, U.S. Army Waterways Experimental Station (Vicksby, Miss.), Misc. Paper 6-934 (1967).

SEELY F. B. and DOLAN T. J. *Stress concentrations at fillets, holes and keyways as found by the plaster model method. Bull. ILL Univ. Engng Exp. Sta.* 276 (1935).

SHEPHERD and SWEET *J. Am. chem. Soc.* 43 (1921).

ΣΟΦΙΑΝΟΣ ΑΙ. *Υποστήριξη Υπογείων Εκσκαφών*. Αθήνα 2010.

STIMPSON B. *Stress and Strain Analysis of Layered Rock Foundations with Particular Reference to the Farahnaz Pahlavi Dam, Iran*, Ph.D. London University (1969).

STIMPSON B. Modeling Materials for Engineering Rock Mechanics. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* Vol. 7, pp. 77-121. (1970).

TROLLOPE D. H. and BROWN D. H. Effective Stress Criteria of Failure of Rock Masses, *Proceedings of the First Congress of the International Society of Rock Mechanics*, Lisbon, Vol. I, pp. 515-519 (I~).

VOROBJEV B. M. Studies of strata movement and rock pressure on models. *J. Mines Metals. Fuels* 11, (10)1-12 (1963).

Wong LNY, Einstein HH (2009). Crack Coalescence in Molded Gypsum and Carrara Marble: Part 2—Microscopic Observations and Interpretation. *Rock Mech Rock Eng* (2009) 42:513–545