



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

**ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΕΡΓΩΝ»**

**ΤΜΗΜΑ: ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ-ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ: ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΔΙΑΝΟΙΞΗΣ ΣΗΡΑΓΓΩΝ**

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**«ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΚΑΙ ΤΟΥ ΤΡΟΠΟΥ
ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΡΩΓΜΑΤΩΜΕΝΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΤΕΧΝΗΤΩΝ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ»**

ΗΛΙΑΣ ΜΑΡΡΑΣ

ΜΗΧΑΝΙΚΟΣ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

ΝΟΜΙΚΟΣ ΠΑΥΛΟΣ, ΕΠΙΚΟΥΡΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ (ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ)

ΣΟΦΙΑΝΟΣ ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΣ, ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

ΛΟΥΠΑΣΑΚΗΣ ΚΩΣΤΑΝΤΙΝΟΣ, ΕΠΙΚΟΥΡΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

ΑΘΗΝΑ, ΑΠΡΙΛΙΟΣ 2014

Πρόλογος

Για την ομαλή διεξαγωγή της μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας μου θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέπων Επίκουρο Καθηγητή της σχολής Μηχανικών Μεταλλείων - Μεταλλουργών, Κύριο Παύλο Νομικό, τόσο για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε αναθέτοντας μου το συγκεκριμένο θέμα, όσο και για το ενδιαφέρον του και την επιστημονική υποστήριξη καθ' όλη τη διάρκεια της συνεργασίας μας.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Κύριο Γιώργο Παπαντωνόπουλο, Δρ. Μηχανικός Μεταλλείων - Μεταλλουργών για τη πολύτιμη βοήθεια που μου πρόσφερε όποτε χρειάστηκε κατά την εκτέλεση των δοκιμών στο εργαστήριο διάνοιξης σηράγγων.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον θείο μου, Ευάγγελο Μάρρα για την βοήθεια που πρόσφερε κατασκευάζοντας μου τα καλούπια για την διεξαγωγή των πειραμάτων.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου για την πολύτιμη και απαραίτητη υποστήριξη τους τόσο ηθική όσο και υλική καθ' όλη την διάρκεια του μεταπτυχιακού προγράμματος.

Περιεχόμενα

1. Εισαγωγή.....	9
1.1 Ορισμοί.....	9
1.2 Μηχανική συμπεριφορά βραχώμαζας.....	10
1.3 Θεωρίες και Κριτήρια αστοχίας.....	10
1.4 Εργαστηριακές δοκιμές.....	16
1.4.1 Μονοαξονική θλίψη πετρώματος.....	17
1.5 Διαδικασία καταστροφής στη θλιπτική δοκιμή.....	18
1.5.1 Έξι τύποι καταστροφής στις μονοαξονικές δοκιμές θλίψης.....	19
1.6 Δοκιμή Υπερήχων.....	21
2.Ανασκόπηση προγενέστερων εργαστηριακών πειραμάτων.....	24
2.1 Εισαγωγή.....	24
2.2 Πειράματα δοκιμών μονοαξονικής θλίψης.....	24
2.2.1 Δοκιμές των Goldstein et al. (1966).....	24
2.2.2 Δοκιμές του Lama (1974).....	25
2.2.3. Δοκιμές των Singh et al. (2002).....	27
2.2.4. Δοκιμές των Yang, Chen και Huang (1998).....	29
2.2.5. Πείραμα των Chen Xin, Liao Zhihong και Peng Xi (2012).....	31
2.2.6 Πείραμα των P.H.S.W. Kulatilake, W. He, J. Um, H. Wang (1997).....	39
2.3 Πειράματα διαξονικών και τριαξονικών δοκιμών.....	43
2.3.1 Πείραμα των Brown(1970), Brown and Trollope(1970), Brown and Hudson(1972).....	43
2.3.2 Πειράματα των Einstein et al.(1970) και Einstein and Hirschfield (1973).....	44
2.3.3 Πειράματα των Landanyi και Archambault (1972,1980).....	45
2.3.4 Πειράματα των Bandis et al.(1981) και Bandis (1990).....	45
2.3.5 Πειράματα των Szymakowski et al. (2003).....	46
2.3.6 Πειράματα των Meyers και Priest (1992).....	46
2.3.7 Πειράματα των Kulatikale et al. (2001).....	46
2.3.8 Πειράματα των Sint Jan και Prudencio (2003).....	47
2.3.9 Πειράματα των Yaji (1984) και Arora (1987).....	47
2.3.10 Πειράματα των Reik και Zacas (1978).....	48

2.3.11 Πειράματα των M. Prudencio και M. Van Sint Jan (2007).....	48
2.3.12 Πειράματα των Muller.....	48
3. ΑΚΟΥΣΤΙΚΗ ΕΚΠΟΜΠΗ.....	52
3.1 Εισαγωγή.....	52
3.2 Εφαρμογές της Τεχνικής της Ακουστικής Εκπομπής.....	53
3.2.1 Φαινόμενο Kaiser.....	54
3.3 Σήματα Ακουστικής Εκπομπής.....	55
3.4 Εξασθένηση και θόρυβος.....	58
3.5 Τεχνικές παρακολούθησης ΑΕ.....	59
3.6 Εντοπισμός θέσης της πηγής.....	60
3.7 Συστήματα Παρακολούθησης.....	61
3.7.1 Αισθητήρες και προενισχυτές.....	61
3.7.2 Μονάδα επεξεργασίας.....	62
3.8 Επίδραση του επιβαλλόμενου φορτίου στην ΑΕ.....	64
3.9 Μελέτη της εξέλιξης της αστοχίας με εντοπισμό της θέσης της πηγής ΑΕ.....	67
3.10 Εγκατάσταση μορφοτροπέων σε μονοαξονικές δοκιμές.....	68
4. Προετοιμασία δοκιμών και Χαρακτηρισμός Υλικού.....	72
4.1 Εισαγωγή.....	72
4.2 Εφελκυστική Αντοχή Υλικού.....	74
4.3 Ταχύτητα διάδοσης διαμήκους κύματος.....	80
4.4 Εργαστηριακός προσδιορισμός της απώλειας μάζας.....	81
4.5 Προσδιορισμός αντοχής σε Κάμψη.....	81
4.6 Μονοαξονική θλιπτική αντοχή σε δοκίμια σχήματος κύβου.....	82
4.7 Προσδιορισμός μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής σε κυλινδρικά δοκίμια.....	84
4.8 Μονοαξονική θλιπτική αντοχή πρισματικών δοκιμών.....	87
5. Δοκιμές σε δοκίμια με λείες ασυνέχειες.....	96
5.1 Εισαγωγή.....	96
5.2 Δοκίμια με κλίση ασυνεχειών 0°.....	97
5.3 Δοκίμια με κλίση ασυνεχειών 20°.....	99
5.4 Δοκίμια με κλίση επιπέδου ασυνέχειας 30°.....	104
5.5 Δοκίμια με κλίση ασυνέχειας 40°.....	109
5.6 Δοκίμια με επίπεδο ασυνέχειας 50°.....	114

5.8 Δοκίμια με 5 επίπεδες ασυνέχειες.	116
5.8.1 Εισαγωγή.....	116
5.8.2 Δοκίμια με 5 επίπεδα ασυνεχειών κλίσης 0°	117
5.8.3 Δοκίμια με κλίση ασυνεχειών 10°	120
5.8.4 Δοκίμια με κλίση ασυνεχειών με 20°	124
5.8.5 Δοκίμια με κλίση ασυνεχειών 30°	128
6. Δοκίμια με μια ασυνέχεια με τραχύτητα.	131
6.1 Δοκίμια με κλίση ασυνέχειας 30°	132
6.1.1 Δοκίμιο JRC30A.	132
6.1.2 Δοκίμιο JRC30B.	141
6.1.3. Δοκίμιο JRC30C.	146
6.2 Δοκίμια με κλίση ασυνέχειας 40°	153
6.2.1 Δοκίμιο JRC40A.	153
6.2.2 Δοκίμιο JRC40B.	158
6.2.3 Δοκίμιο JRC40C.	164
6.3 Δοκίμια με κλίση ασυνέχειας 50°	169
6.3.1. Δοκίμιο JRC 50A.	169
6.3.2. Δοκίμιο JRC50B.	175
7. Συμπεράσματα.....	184
8. Βιβλιογραφία	186

Περίληψη

Η παρούσα μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε με σκοπό την διερεύνηση του τρόπου αστοχίας και την επιρροή στην αντοχή δοκιμίων τεχνητών πετρωμάτων με ασυνέχειες. Για τη πραγματοποίηση των πειραμάτων κατασκευάστηκαν ξύλινα καλούπια με εγκοπές ώστε με τη βοήθεια πλαστικών φύλλων να κατασκευάζεται η ασυνέχεια με προκαθορισμένο επίπεδο κλίσης.

Ως υλικό προσομοίωσης χρησιμοποιήθηκε οικοδομικός γύψος ταχείας πήξης, καθ' όλη τη διάρκεια των πειραμάτων διατηρήθηκε σταθερός ο λόγος νερού με γύψο ώστε τα μίγματα να έχουν όσο γίνεται περισσότερο παρόμοιες ιδιότητες.

Στο πρώτο στάδιο έγινε μια σειρά δοκιμών για το χαρακτηρισμό του υλικού σε αντοχή κάμψης, εφελκυστική αντοχή και μονοαξονική θλιπτική αντοχή καθώς και του μέτρου ελαστικότητας και του λόγου Poisson.

Εν συνεχεία στο δεύτερο στάδιο του πειράματος μελετήθηκε ο τρόπος αστοχίας και η μεταβολή της αντοχής των δοκιμίων για μια εμμένουσα λεία ασυνέχεια.

Στο τρίτο στάδιο του πειράματος μελετήθηκε ο τρόπος αστοχίας και η μεταβολή της αντοχής των δοκιμίων για 5 εμμένουσες ασυνέχειες.

Στο τέταρτο και τελευταίο στάδιο μελετήθηκε ο τρόπος αστοχίας και η μεταβολή της αντοχής σε δοκίμια με εμμένουσες ασυνέχειες με τραχύτητα.

Για την διεξαγωγή συμπερασμάτων χρησιμοποιήθηκε η τεχνική της ακουστικής εκπομπής καθώς και η βιντεοσκόπηση των πειραμάτων.

Abstract

This postgraduate thesis carried out to study the failure modes and the strength of jointed rock mass models.

For the experimental needs we constructed wooden casts with dents so we are able to make a specimen with persistent joint with the appropriate dip angle.

We select for modeling material plaster and we keep the same rate for water and plaster so we are able to meet the law of similarity.

In the first step of experiment we conducted some experiments to characterize the material. So we have fundamental properties such as uniaxial compressive strength, tensile strength, modulus of elasticity and Poisson ratio and bending strength.

In the second stage of the experiment we study the failure mode and the strength for specimens with one smooth persistent discontinuity.

In the third stage we study the failure modes and the strength for specimens with five smooth persistent discontinuities.

In the last stage we study the failure modes and the strength for specimens with one persistent discontinuity with roughness.

For the observation of the failure modes we use the technic of acoustic emission and by recording with cameras the procedure of loading.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1. Εισαγωγή

1.1 Ορισμοί

Η γεωλογική – ποιοτική περιγραφή της συμπεριφοράς της βραχόμαζας με όρους όπως «καλή», «μέτρια» και «πτωχή», χρησιμοποιήθηκε για πολλά χρόνια για τον σχεδιασμό έργων μέσα ή πάνω σε πετρώματα. Οι εμπειρικές παρατηρήσεις και η γεωλογική περιγραφή οδήγησαν στον ασφαλή σχεδιασμό πολλών κατασκευών ωστόσο όσο το μέγεθος των έργων αυξανόταν τόσο αυξάνονταν και οι απαιτήσεις. Επομένως έγινε αντιληπτό ότι έπρεπε να χρησιμοποιηθούν μέθοδοι βασισμένες στην επιστήμη της μηχανικής. Η βραχόμαζα είναι το υλικό εντός του οποίου αναπτύσσονται δραστηριότητες, όπως υπόγειες ή επιφανειακές εκσκαφές, ευστάθεια πρανών, θεμελιώσεις κ.α. που εξετάζονται από τη μηχανική των πετρωμάτων.

Το πέτρωμα ορίζεται ως μια σύνθετη φυσική ύλη με ισχυρό βαθμό σύνδεσης των ορυκτών σε αντίθεση με τα εδάφη όπου αυτός ο βαθμός σύνδεσης είναι σημαντικά μικρότερος. Τα πετρώματα *in situ* παρουσιάζονται συνήθως ως ασυνεχή υλικά που συνίστανται από διακριτά άρρηκτα τεμάχια πετρώματος και ασυνέχειες. [1]

Ως ασυνέχεια ορίζεται οποιαδήποτε μηχανική διακοπή στη συνέχεια του πετρώματος, η οποία έχει μηδενική ή χαμηλή αντοχή σε εφελκυσμό. Ο όρος περιλαμβάνει τις διακλάσεις, τις στρώσεις, τα επίπεδα σχιστότητας και τα ρήγματα και αναφέρεται μόνον στις μακροσκοπικές ασυνέχειες. Ειδικότερα διάκλαση ονομάζεται κάθε θραύση του πετρώματος γεωλογικής προέλευσης και κατά μήκος της οποίας δεν υπάρχει μετακίνηση. Οι διακλάσεις μπορεί να είναι ανοιχτές, πληρωμένες ή ανασυγκολλημένες. Μία ομάδα παράλληλων διακλάσεων ονομάζεται σύνολο ή οικογένεια. Ρήγμα είναι μια θραύση κατά μήκος της οποίας υπάρχει εμφανής μετακίνηση από μερικά εκατοστά έως μερικά χιλιόμετρα. Το πλάτος κυμαίνεται από μερικά εκατοστά ως εκατοντάδες μέτρα. Τα τοιχώματα έχουν γραμμώσεις και είναι στυλπνά ολισθηρά και συχνά το πέτρωμα στα τοιχώματα είναι θρυμματισμένο, εξαλλοιωμένο και αποσαθρωμένο.

Για τον χαρακτηρισμό των ασυνεχειών αλλά και της δομής της βραχόμαζας η Διεθνής Εταιρεία Βραχομηχανικής έχει επιλέξει τις εξής παραμέτρους. Προσανατολισμός, περιγράφει τη διεύθυνση κλίσης και την κλίση του επιπέδου της ασυνέχειας. Απόσταση ορθή, είναι η κάθετη απόσταση μεταξύ διαδοχικών ασυνεχειών. Χαρακτηρίζονται εξαιρετικά πυκνές <20mm και εξαιρετικά αραιές >6m. Εμμογή, είναι το μήκος του ίχνους μιας ασυνέχειας και δίνει ένα μέτρο χωρικής έκτασης. Αριθμός συνόλων, ο αριθμός των συνόλων που συνιστούν το σύστημα ή την οικογένεια ασυνεχειών της βραχόμαζας. Μέγεθος τεμάχους, η διάσταση βραχώδους τεμάχους που προκύπτει από τα διατεμνόμενα σύνολα ασυνεχειών. Τραχύτητα, αναφέρεται στην εγγενή τραχύτητα της ασυνέχειας και συνεισφέρει στη διατμητική αντοχή αυξάνοντας την γωνία τριβής. Αντοχή τοιχώματος, είναι η θλιπτική αντοχή του πετρώματος των γειτονικών τοιχωμάτων της ασυνέχειας. Άνοιγμα η κάθετη απόσταση μεταξύ γειτονικών τοιχωμάτων της ασυνέχειας το οποίο είναι πληρωμένο με νερό ή αέρα. Πλήρωση, είναι το υλικό που γεμίζει το άνοιγμα της ασυνέχειας συνήθως από το μητρικό πέτρωμα. Διήθηση, είναι η ροή του νερού και η εμφάνιση υγρασίας ή μεμονωμένα σε ασυνέχειες ή στο σύνολο της βραχόμαζας. [2]

Η σημασία της παρουσίας των ασυνεχειών στη μηχανική συμπεριφορά του πετρώματος είναι μεγάλη καθώς όλες οι μηχανικές ιδιότητες του πετρώματος σε αυτές τις επιφάνειες είναι μειωμένες σε σχέση με αυτές του άρρηκτου πετρώματος. Επομένως η παρουσία των ασυνεχειών υποβαθμίζει την ποιότητα του συνόλου της μάζας του πετρώματος και ως εκ τούτου την αντοχή

του. Αντοχή της βραχόμαζας είναι η ικανότητα να ανθίσταται στις φορτίσεις που δέχεται. Η ποικιλία των εντατικών καταστάσεων αλλά και η δομή της βραχόμαζας συμβάλουν στο να αναπτύσσονται διάφοροι μηχανισμοί αστοχίας. Η συμπεριφορά της βραχόμαζας εν γένει είναι πολύπλοκη με παραμορφώσεις και ολισθήσεις να συμβαίνουν κατά μήκος των ασυνεχειών σε συνδυασμό με παραμορφώσεις και αστοχίες του άρρηκτου πετρώματος. Οι πειραματικές δοκιμές και οι παρατηρήσεις έχουν οδηγήσει σε πλήθος, εμπειρικών κυρίως προσεγγίσεων είτε με τη μορφή ταξινομήσεων της βραχόμαζας είτε με την μορφή κριτηρίων αστοχίας. [1]

1.2 Μηχανική συμπεριφορά βραχόμαζας.

Ως μηχανική συμπεριφορά βραχόμαζας νοείται η απόκριση της βραχόμαζας κατά την αλλαγή της εντατικής της κατάστασης, όπως κατά την θεμελίωση κάποιου έργου ή την ανακατανομή του τασικού πεδίου όπως συμβαίνει στην εκσκαφή υπόγειων ανοιγμάτων. Οι βασικές παράμετροι που καθορίζουν τη μηχανική συμπεριφορά της βραχόμαζας είναι η αντοχή, και η παραμορφωσιμότητα. Η αντοχή της βραχόμαζας εξαρτάται από την αντοχή του άρρηκτου πετρώματος και την αντοχή και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των ασυνεχειών καθώς και τη παρουσία νερού.

Η παραμορφωσιμότητα της βραχόμαζας καθορίζεται από τις ελαστικές σταθερές του άρρηκτου πετρώματος και από τη παρουσία και τη παραμορφωσιμότητα των ασυνεχειών της. Το γεγονός ότι η ρωγματωμένη βραχόμαζα δεν συμπεριφέρεται γραμμικά ελαστικά οδήγησε στη χρήση του μέτρου παραμορφωσιμότητας αντί του μέτρου ελαστικότητας.

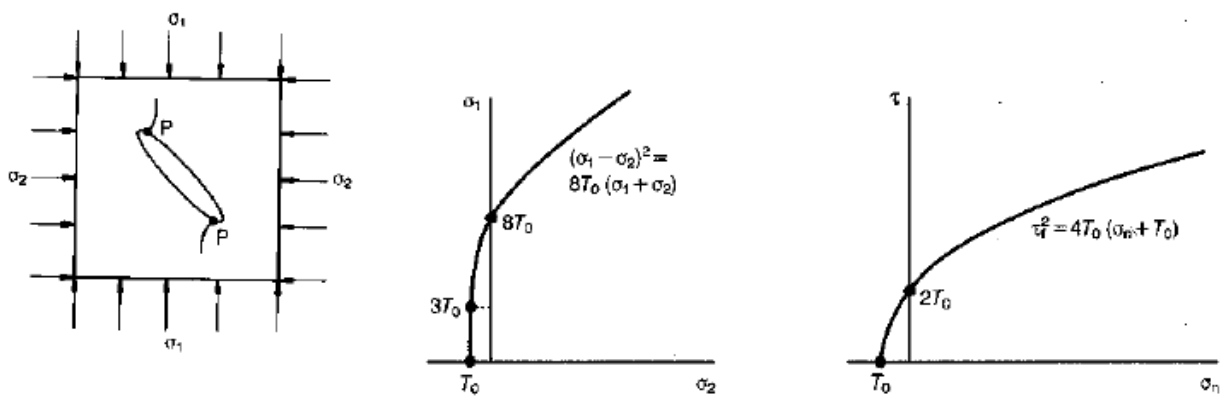
Η μηχανική συμπεριφορά της βραχόμαζας διαφοροποιείται ανάλογα με την δομή της. Η δομή της βραχόμαζας σε σχέση με τη μηχανική συμπεριφορά διακρίνεται γενικά σε βραχόμαζα χωρίς ασυνέχειες με ισότροπη συμπεριφορά εξαρτώμενη από άρρηκτο πέτρωμα, σε κερματισμένη βραχόμαζα με ανισότροπη συμπεριφορά και τέλος σε κατακερματισμένη βραχόμαζα με ισότροπη συμπεριφορά.

Η μεθοδολογία επίλυσης προβλημάτων απόκρισης βραχόμαζας σε στατικές ή δυναμικές φορτίσεις διαφοροποιείται ανάλογα με τη δομή της. Αν η πυκνότητα των ασυνεχειών είναι αραιή σε σχέση με τις διαστάσεις του προβλήματος, ή είναι πολύ μεγάλη έτσι ώστε η βραχόμαζα να μπορεί να θεωρηθεί ως κατακερματισμένο υλικό, τότε η βραχόμαζα θεωρείται ως ισοδύναμο συνεχές μέσο και χρησιμοποιούνται μέθοδοι της μηχανικής του συνεχούς μέσου. Αντιθέτως η ύπαρξη μιας ασυνέχειας ή ένας μικρός αριθμός ασυνεχειών τότε το πρόβλημα συχνά ανάγεται στη μελέτη ολίσθησης ενός στερεού σώματος πάνω στις ασυνέχειες και η επίλυση του προβλήματος γίνεται με μεθόδους ανάλυσης οριακής ισορροπίας. [1]

1.3 Θεωρίες και Κριτήρια αστοχίας.

Η εντατική κατάσταση ενός υλικού μπορεί να αναχθεί σε μορφή τέτοια ώστε να είναι δυνατή η σύγκριση με αντίστοιχα μεγέθη της αντοχής του. Ως εκ τούτου αναπτύχθηκαν διάφορες θεωρίες που περιγράφουν με μαθηματικό τρόπο τις συνθήκες αστοχίας ενός υλικού κάτω από δεδομένη εντατική και παραμορφωσιακή κατάσταση. Οι τρόποι αστοχίας των πετρωμάτων είτε κατά την εξέταση τους στο φυσικό πεδίο είτε κατά την διάρκεια εργαστηριακών δοκιμών είναι κυρίως αστοχία σε διάτμηση και σε εφελκυσμό. Στο πίνακα 1.1 παρατίθενται τα πιο γνωστά κριτήρια αστοχίας άρρηκτου πετρώματος.

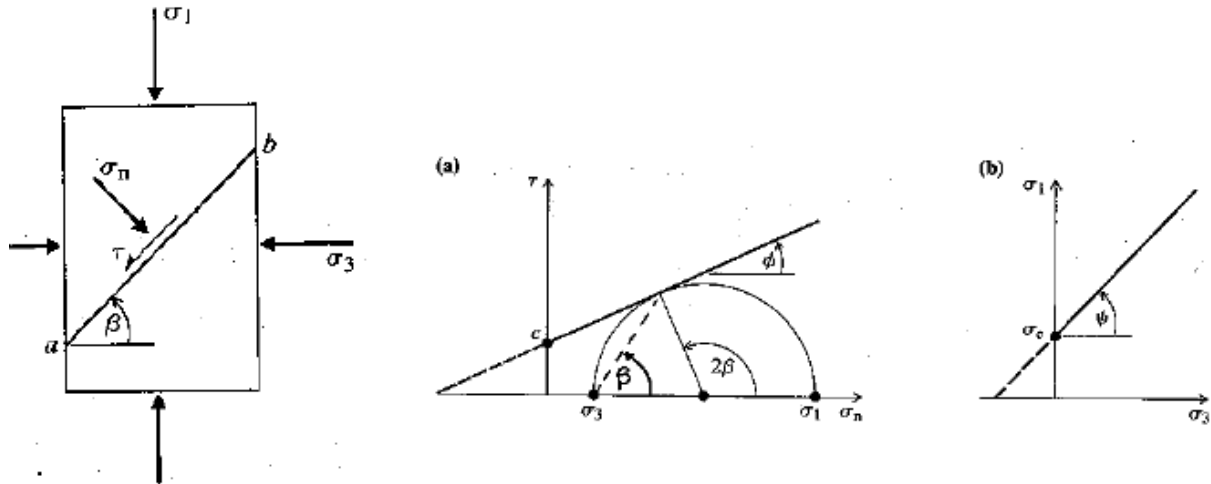
Σύμφωνα με τη θεωρία του Griffith σε ψαθυρά υλικά, δημιουργούνται μακροσκοπικές ρωγμές όταν οι τάσεις στα άκρα μικροσκοπικών ρωγμών, που περιέχει το υλικό, ξεπεράσουν την εφελκυστική αντοχή του. Στα πετρώματα τέτοιες μικροσκοπικές ρωγμές υπάρχουν στις επαφές των ορυκτών τους ή εντός των κόκκων ως αποτέλεσμα γεωλογικών καταπονήσεων. Τη θεωρία του την εφάρμοσε αρχικά σε πλάκα υποκείμενη σε μονοαξονική εφελκυστική τάση που περιείχε ελλειπτική ρωγή με άξονα κάθετο στη διεύθυνση φόρτισης. Στη συνέχεια εφάρμοσε τη θεωρία του και σε πλάκα όπου υπόκειται σε θλιπτικές τάσεις. Στο σχήμα 1.1 φαίνεται η περιβάλλουσα Griffith σε άξονες κυρίων τάσεων, καθώς και σε διατμητικών και ορθών τάσεων. Η θεωρία προβλέπει τη μονοαξονική θλιπτική τάση κατά την επέκταση της ρωγμής, ίση με οκτώ φορές την εφελκυστική αντοχή του άρρηκτου πετρώματος.



Σχήμα 1.1:Ιδεατή ρωγή και περιβάλλουσα αστοχίας Griffith.

Παρά το ότι δίνει μια περιβάλλουσα αντοχής, μορφής τέτοιας, που παρατηρείται κατά την εξέταση δοκιμών πετρώματος, δεν προσφέρει ένα καλό ομοίωμα συμπεριφοράς. Αν και το συγκεκριμένο κριτήριο δεν εφαρμόζεται στη πράξη, είναι ιδιαίτερης σημασίας γιατί αποτέλεσε τη πρώτη θεωρητική προσέγγιση του προβλήματος της αντοχής των πετρωμάτων και ήταν αρχική ιδέα για την ανάπτυξη νέων μοντέλων αστοχίας. [2]

Σύμφωνα με το γραμμικό κριτήριο Mohr – Coulomb η αστοχία συμβαίνει όταν σε ένα οποιαδήποτε επίπεδο του πετρώματος η διατμητική τάση ξεπεράσει τη διατμητική αντοχή, η οποία είναι συνάρτηση της ορθής τάσης σ_n σε αυτό το επίπεδο. Η διατμητική αντοχή εξαρτάται από τη γωνία εσωτερικής τριβής και την συνοχή. Το κριτήριο γράφεται : $\tau = c + \sigma \tan\phi$. Το κριτήριο Mohr- Coulomb προβλέπει την διατμητική αστοχία ενός δοκιμίου πετρώματος που υποβάλλεται σε τριαξονική θλίψη σε επίπεδο, στο οποίο η γωνία β , μεταξύ της καθέτου στο επίπεδο και της σ_1 , δίνεται συναρτήσει την γωνία εσωτερικής τριβής ϕ : $\beta = 45 + \frac{\phi}{2}$. Στην πράξη, έχει παρατηρηθεί πειραματικά ότι στη περίπτωση μονοαξονικής θλιπτικής φόρτισης η αστοχία λαμβάνει χώρα σε επίπεδα παράλληλα σε σχέση με τη διεύθυνση της φόρτισης, ως αποτέλεσμα εφελκυστικής αστοχίας του υλικού (αξονική κατάκλαση) λόγω επαγόμενων εφελκυστικών τάσεων.



Σχήμα 1.2: Περιβάλλουσα Mohr - Coulomb.

Σύμφωνα τους Hoek και Brown, μετά από μια σειρά τριαξονικών δοκιμών, η σχέση των κυριών τάσεων δεν είναι γραμμική κατά την αστοχία αλλά ακολουθεί ένα παραβολικό νόμο. Το κριτήριο τους διατυπώνεται ως εξής : $\sigma_1' = \sigma_3' + \sigma_{ci} \left(m_i \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + 1 \right)^{0.5}$ όπου:

σ_1' - η μέγιστη κύρια (ενεργός) τάση κατά την αστοχία

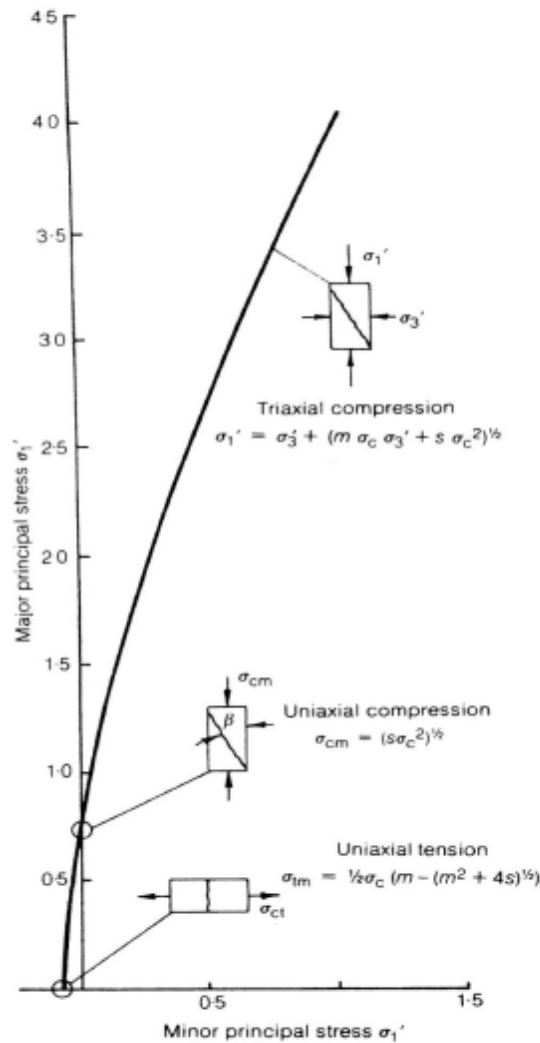
σ_3' - η ελάχιστη κύρια (ενεργός) τάση κατά την αστοχία

σ_{ci} - η αντοχή του πετρώματος σε μονοαξονική θλίψη

m_i - παράμετρος του πετρώματος που συνδέεται με την αλληλεμπλοκή των κόκκων του.

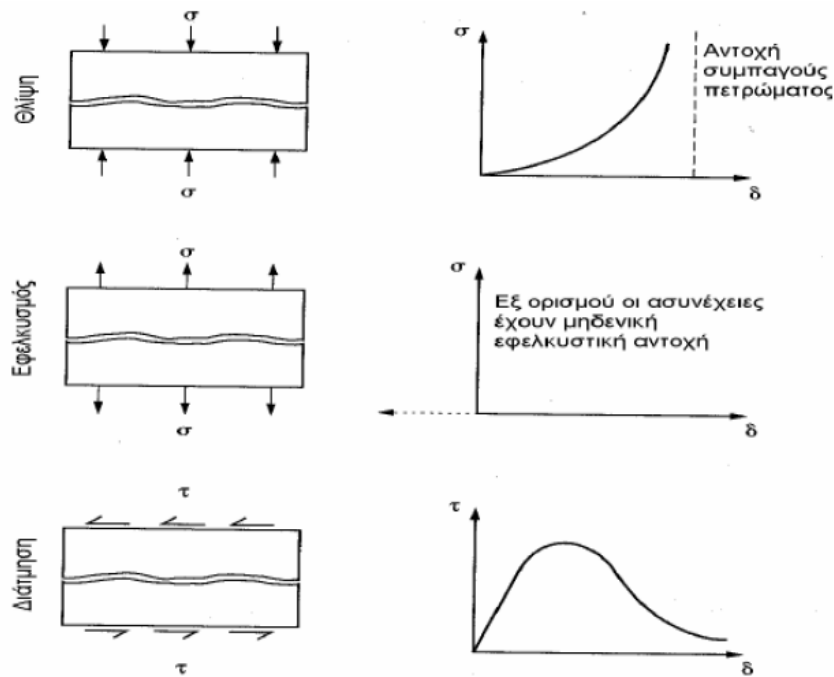
Murell (1963)	$\tau^2_{oc1} = 8T_0\sigma_{oc1}$	Επέκταση της θεωρίας Griffith σε 3 διαστάσεις
Fairhurst (1964)	$\frac{(\sigma_1 - \sigma_3)^2}{(\sigma_1 + \sigma_3)^2} = -2(m-1)^2 K \left[1 + \frac{2K}{(\sigma_1 + \sigma_3)} \left(\left(\frac{m-1}{2} \right)^3 - 1 \right) \right]$	Εμπειρική γενίκευση του κριτηρίου Griffith
Hobbs (1966)	$\sigma_1 = B \sigma_3^b + \sigma_c$	Αποτελέσματα εργαστηριακών δοκιμών
Hoek (1968)	$\sigma_1 - \sigma_3 = 2C + A(\sigma_1 + \sigma_3)^B$	Αποτελέσματα εργαστηριακών δοκιμών
Franklin (1971)	$\sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_c^{1-B} (\sigma_1 + \sigma_3)^B$	Αποτελέσματα εργαστηριακών δοκιμών σε 500 δοκίμια
Bieniawski (1974)	$\sigma_1 = K\sigma_3^A + \sigma_c$	Αποτελέσματα εργαστηριακών δοκιμών σε 700 δοκίμια (5 τύποι πετρωμάτων)
Yoshinaka & Yamabe (1980)	$\sigma_1 - \sigma_2 = \alpha K(q)(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)^b$	Αποτελέσματα εργαστηριακών δοκιμών σε μαλακά πετρώματα
Hoek & Brown (1980)	$\sigma_1 - \sigma_3 = \sqrt{m\sigma_c\sigma_3 + s\sigma_c^2}$	Αποτελέσματα δοκιμών και εφαρμογή της θεωρίας Griffith
Kim & Lade (1984)	$\left(\frac{I_1^3}{I_3} - 27 \right) \left(\frac{I_1}{p\sigma} \right)^m = \eta_1$	Αποτελέσματα εργαστηριακών δοκιμών (αργά σε σκυρόδεμα και εδάφη)
Johnston (1985)	$\frac{\sigma_1}{\sigma_c} = \left[\frac{M}{B} \frac{\sigma_3}{\sigma_c} + 1 \right]^B$	Αποτελέσματα εργαστηριακών δοκιμών σε μαλακά πετρώματα
Desai & Salami (1987)	$J_2 = \left(-\frac{\alpha}{\alpha_0} I_1^n + \gamma I_1^2 \right) (1 - \beta S r)^m$	Πολυωνομική επέκταση σε όρους αποκλινοσάν των τάσεων
Michelis (1987)	$\ln \left(\frac{q^2}{f_0^2} + a_1 p \frac{q}{f_0} + a_2 p^2 \right) = a_4 \ln \left(\frac{2q / p f_0 + a_1 - a_3}{2q / p f_0 + a_1 + a_3} \right) + \ln a_5$	Αναλυτική και πειραματική εξέταση της επιφανείας αστοχίας

Πίνακας 1.1 : Κριτήρια αστοχίας άρρηκτου πετρώματος (Hudson and Harrison, 1997)



Σχήμα: 1.3 Περιβάλλουσα αστοχίας του κριτηρίου Hoek - Brown. (Hoek 1983)

Τα παραπάνω κριτήρια ισχύουν για την περίπτωση όπου η αστοχία οφείλεται σε θραύση του άρρηκτου πετρώματος. Όμως, η αντοχή της βραχώμαζας εξαρτάται και από τη μηχανική συμπεριφορά των ασυνεχειών. Η συμπεριφορά μια ασυνέχειας σε θλίψη, εφελκυσμό και διάτμηση φαίνεται με τα παρακάτω γραφήματα:



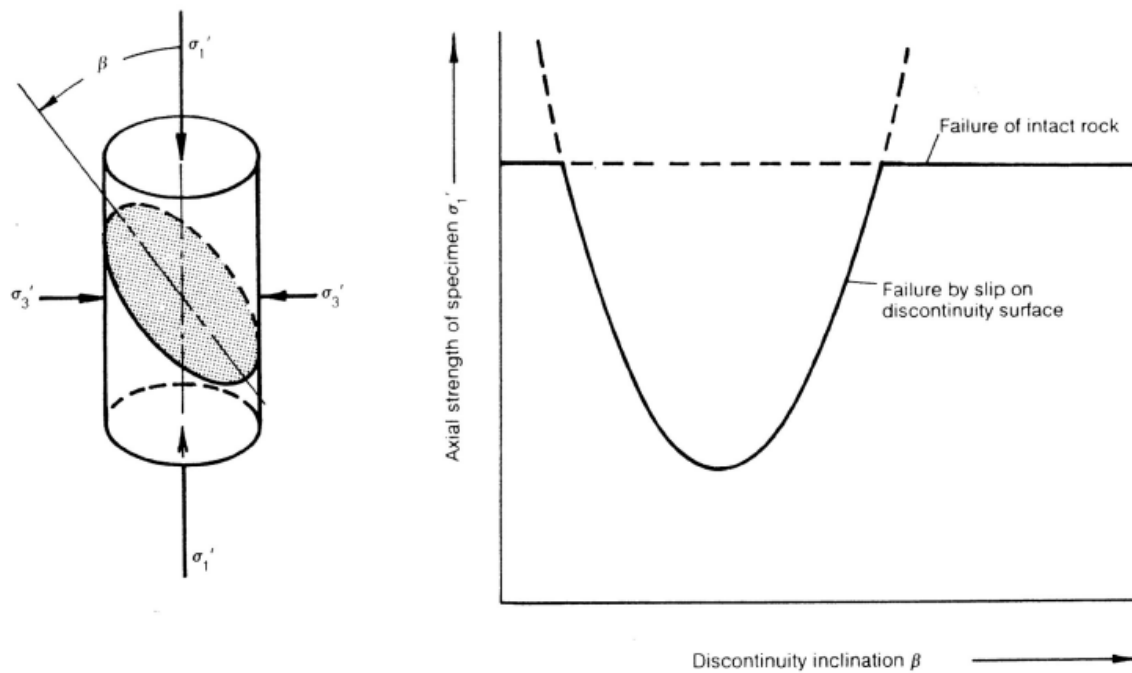
Σχήμα 1.4: Συμπεριφορά ασυνέχειας σε θλίψη, εφελκυσμό και διάτμηση.

Σύμφωνα με την εμπειρική σχέση του Barton (1973, 1976) υπολογίζεται η διατμητική αντοχή μιας ασυνέχειας ως εξής: $\tau = \sigma_n \tan (\varphi_b + JRC \log_{10} (\frac{JCS}{\sigma_n}))$ όπου JRC είναι ο συντελεστής τραχύτητας της ασυνέχειας και JCS η ισοδύναμη θλιπτική αντοχή του τοιχώματος της ασυνέχειας. Η σχέση είναι ιδιαίτερα χρήσιμη λόγω της υπολογιστικής ευχέρειας που προσφέρει καθώς περιλαμβάνει σχετικά εύκολα μετρήσιμα μεγέθη και έχει αποδειχθεί ότι παρουσιάζει πολύ καλή προσαρμογή σε αποτελέσματα δοκιμών διάτμησης σε ασυνέχειες.

Η αντοχή δοκιμίου πετρώματος που περιέχει μια ασυνέχεια υπολογίζεται από την θεωρία του ενός επιπέδου αδυναμίας (Jaeger, 1969) . Σύμφωνα με αυτή τη θεωρία η τάση που εφαρμόζεται στο πέτρωμα που περιέχει επίπεδο ασυνέχειας, αναλύεται σε ορθή και διατμητική τάση πάνω στο επίπεδο της ασυνέχειας. Εν συνεχεία εφαρμόζεται το κριτήριο αστοχίας Mohr - Coulomb και εξετάζεται η δυνατότητα ολίσθησης . Η αντοχή της βραχώμαζας εξαρτάται από αυτήν του άρρηκτου πετρώματος ή της ασυνέχειας.

$$(\sigma_1 - \sigma_3) = \frac{2(c_w + \sigma_3 \tan \varphi)}{(1 - \cot \beta_w \tan \varphi_w) \sin(2\beta_w)} \geq 0$$

Όπου c_w και φ_w συνοχή και γωνία εσωτερικής τριβής αντίστοιχα. Με την αρχή της επαλληλίας η θεωρία αυτή μπορεί να επεκταθεί και σε πετρώματα με περισσότερες ασυνέχειες διαφορετικής κλίσης.



Σχήμα 1.5: Αντοχή πετρώματος με μια ασυνέχεια (Jaeger and Cook,1969).

Οι εμπειρικές σχέσεις υπολογίζουν την αντοχή της βραχόμαζας σε διάφορες εντατικές καταστάσεις και αντιστοιχούν στη δεύτερη κατηγορία μεθόδων για την εκτίμηση της αντοχής του πετρώματος. Οι περισσότερες χρησιμοποιούν παραμέτρους αντοχής άρρηκτου πετρώματος, όπου εύκολα υπολογίζονται μέσω εργαστηριακών δοκιμών, και υιοθετούν κάποιο σύστημα ταξινόμησης με το οποίο ουσιαστικά απομειώνουν τα μηχανικά χαρακτηριστικά του πετρώματος. Τέτοιο εμπειρικό κριτήριο είναι αυτό των Hoek και Brown (1980). Χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της αντοχής άρρηκτου πετρώματος σε μονοαξονικές και τριαξονικές συνθήκες αλλά και της κερματισμένης βραχόμαζας η οποία πρέπει να παρουσιάζει ισότροπη συμπεριφορά. Για τη περιγραφή του άρρηκτου πετρώματος λαμβάνει υπόψη δυο παραμέτρους αντοχής ενώ για τη βραχόμαζα χρησιμοποιείται επιπλέον μειωτικός παράγοντας λόγω παρουσίας των ασυνεχειών. Ο παράγοντας αυτός αντιστοιχεί σε βραχόμαζα που ταξινομείται σύμφωνα με το σύστημα GSI.

Τέλος οι αριθμητικές μέθοδοι στα προβλήματα της βραχομηχανικής χρησιμοποιήθηκαν από το 1970 όμως σημαντικό ρόλο διαδραμάτισε η εξέλιξη των υπολογιστικών συστημάτων σε επίπεδο υλικού αλλά και λογισμικού. Οι πιο γνωστές είναι η μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών και η μέθοδος των διακριτών στοιχείων.[1]

1.4 Εργαστηριακές δοκιμές.

Τα πειράματα γίνονται είτε σε φυσικά ομοιώματα βραχόμαζας είτε σε επιτόπου δοκιμές είτε σε εργαστηριακές δοκιμές με δοκίμια πετρώματος μεγέθους τέτοιου ώστε να περιλαμβάνεται αντιπροσωπευτικός αριθμός ασυνεχειών. Από τα πειράματα προκύπτουν τόσο ποιοτικά όσο και

ποσοτικά συμπεράσματα. Ποσοτικά εννοείται ο υπολογισμός της αντοχής της βραχόμαζας μέσω διατύπωσης ενός εμπειρικού κριτηρίου σύμφωνα με τα αποτελέσματα των δοκιμών. Ποιοτικά εννοείται στην κατανόηση της επίδρασης των διάφορων παραγόντων στην αντοχή της βραχόμαζας αλλά και στην παρατήρηση των μηχανισμών αστοχίας.

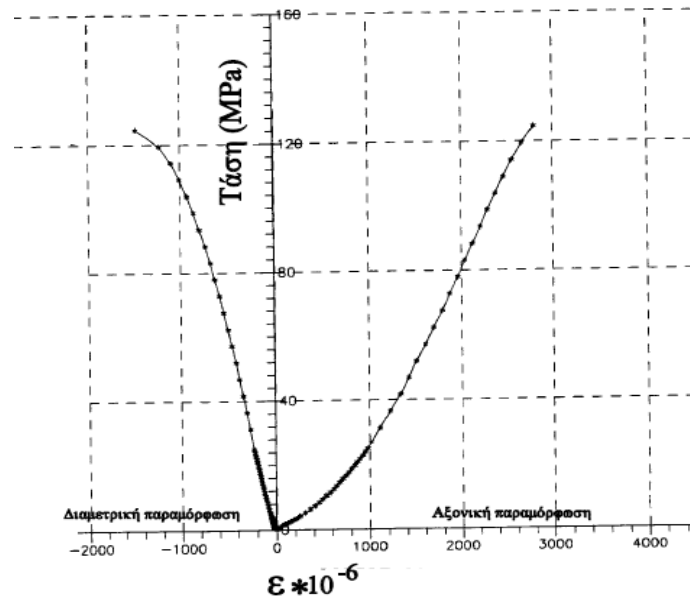
Εργαστηριακές δοκιμές πραγματοποιούνται και σε φυσικά μοντέλα από τεχνητά πετρώματα, τα οποία κατασκευάζονται από υλικά όπως γύψος ή τσιμέντο και με κατάλληλους μηχανισμούς διακόπτεται η συνέχεια τους με τρόπο τέτοιο ώστε να δημιουργείται ένα σύνολο από τεμάχια το οποίο θεωρείται ότι αναπαριστά τη βραχόμαζα. Τα τεμάχια αντιπροσωπεύουν το άρρηκτο τμήμα της βραχόμαζας και οι διεπιφάνειες μεταξύ των τεμαχίων τις ασυνέχειες. Τα πλεονεκτήματα των δοκιμών σε φυσικά μοντέλα είναι το μειωμένο κόστος εφαρμογής τους και δεν είναι τόσο πολύπλοκες και χρονοβόρες. Το μειονέκτημα τους είναι ότι το υλικό που δημιουργείται δεν είναι αποτέλεσμα γεωλογικών διαδικασιών με αποτέλεσμα η προσομοίωση της βραχόμαζας να είναι προσεγγιστική, ιδιαίτερα όσο αναφορά τη μηχανική συμπεριφορά των ασυνεχειών.

Ιστορικά πολλοί ερευνητές έχουν πραγματοποιήσει τέτοιες δοκιμές ώστε να παρατηρήσουν κυρίως τον τρόπο αστοχίας και το πώς η αντοχή και η παραμορφωσιμότητα επηρεάζονται από τον αριθμό και το προσανατολισμό των ασυνεχειών.[1]

1.4.1 Μονοαξονική θλίψη πετρώματος.

Η συνηθέστερα εκτελούμενη εργαστηριακή δοκιμή είναι αυτή της μονοαξονικής θλίψης σε δοκίμια από πυρήνες γεωτρήσεων με σκοπό να υπολογιστεί η αντοχή του πετρώματος, δηλαδή η μέγιστη τάση την οποία ένα πέτρωμα δύναται να αντέξει.

Από την δοκιμή προκύπτει επίσης διάγραμμα ενεργών τάσεων – τροπών και έτσι υπολογίζεται το μέτρο ελαστικότητας (Young's Modulus) και ο λόγος Poisson. Σε περίπτωση που δεν υφίσταται πίεση του νερού των πόρων η ενεργή τάση ταυτίζεται με τη δρώσα αξονική δύναμη διαιρεμένη με την επιφάνεια φόρτισης του δοκιμίου. Συνήθως η μέτρηση των παραμορφώσεων επιτυγχάνεται με τοποθέτηση μετρητών παραμόρφωσης (strain gauges) που επικολλώνται με χρήση ειδικής κόλλας. Ο κατακόρυφος μετρητής μετράει την αξονική παραμόρφωση ενώ ο οριζόντιος μετράει την διαμετρική παραμόρφωση. Ο ρυθμός φόρτισης πρέπει να είναι σταθερός και επιλέγεται έτσι ώστε η θραύση να επιτυγχάνεται σε 5 με 10 λεπτά. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται ένα τυπικό διάγραμμα τάσεων – παραμορφώσεων.



Σχήμα 1.6: Διάγραμμα τάσεων - παραμορφώσεων πετρώματος.

Από τη καμπύλη τάσης - τροπής υπολογίζεται το εφαπτομενικό μέτρο ελαστικότητας E_t ως η κλίση της ευθείας που εφάπτεται στην καμπύλη αξονικής τάσης - τροπής στο 50% της μέγιστης τιμής της τάσης. Το μέσο μέτρο ελαστικότητας $E_{\text{μεσ}}$ υπολογίζεται από τη μέση κλίση του ευθύγραμμου χονδρικά τμήματος της καμπύλης. Το τέμνον μέτρο ελαστικότητας E_T υπολογίζεται ως η κλίση της ευθείας για τιμές τάσεις 0 έως 50% της μέγιστης τιμής της τάσης. Τέλος ο λόγος Poisson υπολογίζεται από τις καμπύλες αξονικής τάσης - αξονικής τροπής και αξονικής τάσης - διαμετρικής τροπής ως εξής: [2]

$$\nu = -\frac{\Delta\sigma/\Delta\varepsilon_\alpha}{\Delta\sigma/\Delta\varepsilon_d}$$

1.5 Διαδικασία καταστροφής στη θλιπτική δοκιμή

Στη δοκιμή μονοαξονικής θλίψης το φορτίο αυξάνεται μέχρι την αστοχία του δοκιμίου. Κατά την διάρκεια της φόρτισης μετρώνται οι ακουστικές εκπομπές με τις οποίες επιτυγχάνεται η παρακολούθηση του φαινομένου της δημιουργίας και της εξέλιξης των ρωγμών. Σε διαφορετικού τύπου πετρώματα η διαδικασία διαφέρει ποσοτικά αλλά όχι ποιοτικά. Η συνολική διαδρομή φόρτισης διακρίνεται σε τρεις μεγάλες επιμέρους διαδρομές A, B, C και μια πολύ μικρή D. Η τέταρτη αναφέρεται στην αστοχία.

Η πρώτη διαδρομή A αναφέρεται στην άρρηκτη φάση του πετρώματος. Δύναται να αποτελεί το 30 έως 70% της συνολικής διαδρομής φόρτισης.

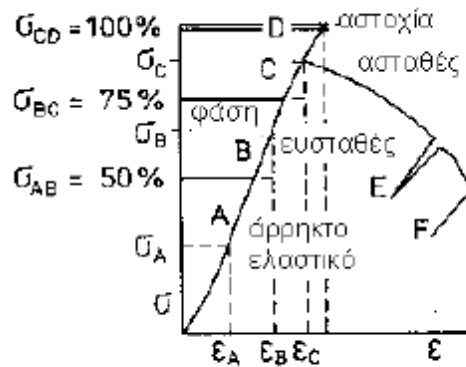
Η δεύτερη επιμέρους διαδρομή B αναφέρεται στην κατακλαστική ευσταθή φάση. Στην αρχή της διαδρομής συμβαίνουν οι πρώτες εσωτερικές ρωγματώσεις που προκαλούν και τη δομική

αλλαγή του δοκίμιου. Εφόσον στη φάση αυτή το φορτίο παραμένει σταθερό, δε συμβαίνει καμία περαιτέρω ρωγμάτωση. Εν τούτοις, το μέτρο ϵ και ο λόγος Poisson αλλάζουν λίγο σαν αποτέλεσμα της δομικής αλλαγής. Επιτυγχάνεται μια κατακλαστική πλαστό-ελαστική ισορροπία.

Η τρίτη επιμέρους διαδρομή C αναφέρεται στη κατακλαστική ασταθή φάση. Στη φάση αυτή, η δημιουργία και διάδοση των ρωγματώσεων δεν σταματά αν το φορτίο παραμένει σταθερό. Το δοκίμιο είναι ασταθές και με τη πάροδο του χρόνου θα αστοχήσει. Προκειμένου να αποφευχθεί η διαδικασία της καταστροφής το φορτίο θα πρέπει να μειωθεί. Τότε το δοκίμιο παρότι δομικά πολύ αλλαγμένο ομοιάζει με συμπαγές και ελαστικό. Και στη περίπτωση αυτή επιτυγχάνεται μια κατακλαστική πλαστό-ελαστική ισορροπία για μειωμένο φορτίο. (σημεία E, F).

Η τέταρτη διαδρομή D αναφέρεται στη φάση αστοχίας του δοκίμιου. Στις προηγούμενες φάσεις συμβαίνουν μόνο πρωτογενείς ρωγματώσεις. Στη τέταρτη φάση αρχίζουν να συμβαίνουν και άλλα δευτερογενή φαινόμενα θραύσης. Η φέρουσα ικανότητα του δοκίμιου χάνεται ολοσχερώς.

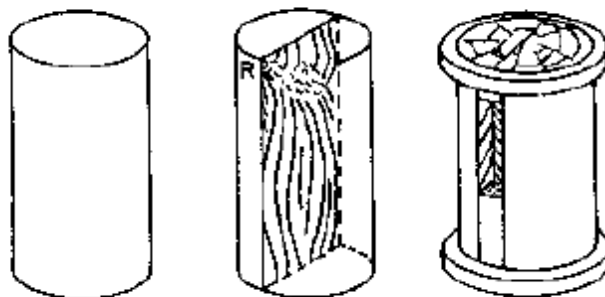
Σα γενικός κανόνας μπορεί να ληφθεί ότι η διαδρομή φόρτισης A καλύπτει περίπου 50% της συνολικής διαδρομής, η διαδρομή B το 25%, η C το 24% και η D το 1%. [2]



Σχήμα 1.7: Τυπικό διάγραμμα σ-ε για συμπαγή σκληρά πετρώματα.

1.5.1 Έξι τύποι καταστροφής στις μονοαξονικές δοκιμές θλίψης.

Ο πρώτος τύπος χαρακτηρίζεται από αστοχία με απότομη σχιστώδη θραύση. Το υλικό συμπεριφέρεται σχεδόν ελαστικά και στο τέλος αστοχεί εκρηκτικά κατακερματισμένο. Φαινόμενα διάτμησης δεν παρατηρούνται. Το πιο πολύ εμφανιζόμενο φαινόμενο θραύσης στη φύση είναι αξονικός σχισμός που προκαλείται από επαγωγή.



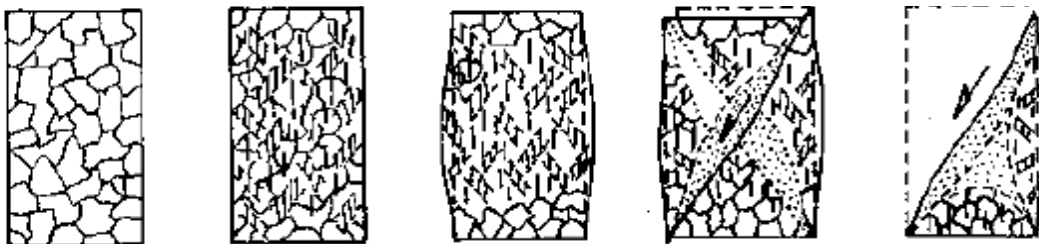
Σχήμα 1.8: Αστοχία με απότομη σχιστώδη θραύση. R σημείο έναρξης της θραύσης.

Ο δεύτερος τύπος χαρακτηρίζεται από αστοχία από λυγισμό και αποφλοιώση. Η αστοχία εμφανίζεται συχνά με τη διαμόρφωση κώνων που δημιουργούνται από αποφλοιώση και ακολουθούνται από δευτερογενή διάτμηση του υπολειπόμενου τμήματος. Οι υπάρχουσες ρωγματώσεις προκαλούν τις αξονικές ρωγμές που δημιουργούν τη κατάκλαση.



Σχήμα 1.9: Αστοχία Γρανίτη από λυγισμό και αποφλοιώση.

Ο τρίτος τύπος χαρακτηρίζεται από αστοχία σε διάτμηση. Πρωτογενή φαινόμενα που εμπεριέχουν πολλαπλές διατμήσεις και τα δευτερογενή τη διατμητική ζώνη μετά από εσωτερικό θρυμματισμό. Κάθε διατμητική ζώνη δομείται από κλιμακωτές τοποθετημένες διακριτές ρωγμές. Αυτές οι ζώνες μικρό-διάτμησης διαμορφώνονται και στο εσωτερικό του δοκιμίου. Η διεύθυνση τους είναι λοξή ως προς τον άξονα θλίψης. Αυτό το φαινόμενο ονομάζεται πολυδιατμητική ή συνδυασμένη κατάκλαση. Στις περισσότερες περιπτώσεις αναπτύσσεται προς μια κατεύθυνση διάτμησης με έντονο θρυμματισμό του εσωτερικού του δοκιμίου.



Σχήμα 1.10: Αστοχία Μαρμάρου σε διάτμηση.

Η τέταρτη περίπτωση αφορά ψαμμίτες από κόκκους χαλαζία και ισχυρό συνδετικό υλικό. Δημιουργούνται ζώνες πολλαπλής διάτμησης και συμπεριφέρεται σαν το τρίτο τύπο καταστροφής.

Η Πέμπτη περίπτωση αποτελείται από ψαμμίτες με ασθενή υλικό συγκόλλησης. Σε θλίψη υφίστανται διάτμηση πολύ γρήγορα.

Τέλος ο έκτος τύπος αφορά αργιλικά λεπιωμένα ασφατικά ιζήματα. Στα άκρα κοντά στις πλάκες φόρτισης θλίβονται κάθετα στη λεπίωση. Δημιουργούν μικρές διατμήσεις μέσα στις λεπίδες λεπίωσης. Οι λεπίδες διαχωρίζονται σε διακριτά στοιχεία σχήματος ρόμβου και διαστέλλονται πλευρικά.[2]

1.6 Δοκιμή Υπερήχων.

Η δοκιμή αυτή χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της ταχύτητας διάδοσης των ελαστικών κυμάτων σε εργαστηριακές δοκιμές μηχανικής πετρωμάτων. Αποτελεί μια μη καταστροφική δοκιμή ελέγχου της ομοιογένειας και της ποιότητας του υπό εξέταση δοκιμίου. Επίσης η ταχύτητα διάδοσης του υπερηχητικού παλμού μπορεί να συσχετιστεί με τις ελαστικές παραμέτρους και την πυκνότητα του δοκιμίου. Η συσκευή που χρησιμοποιείται ονομάζεται Pundit 7 (Portable Ultrasonic non-Destructive Digital Indicating Tester) είναι φορητή και χρησιμοποιείται για δοκιμές τόσο στο ύπαιθρο όσο και στο εργαστήριο. Αποτελείται από την κεντρική μονάδα, 2 μορφοτροπείς 54KHz, 2 μορφοτροπείς P και S 1MHz και τα απαραίτητα παρελκόμενα όπως καλώδια και υλικό επαφής κλπ.



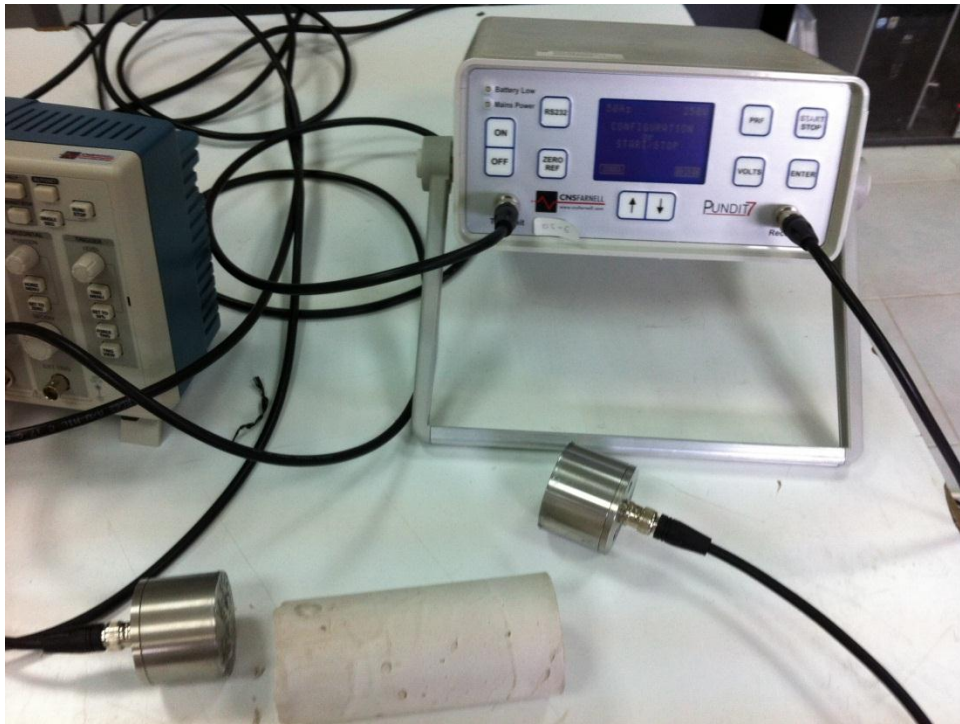
Φωτογραφία 1.1: Κεντρική μονάδα.

Οι δοκιμές περιλαμβάνουν τη συσκευή Pundit 7 του οίκου CNS Electronics Ltd.(1985) και ένα ζεύγος πιεζοηλεκτρικών ακροδεκτών με δυνατότητα παραγωγής υπερήχου 54 kHz το οποίο προσαρμόζεται στη συσκευή. Το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο, στο οποίο βασίζουν τη λειτουργία τους οι ακροδέκτες, βασίζεται σε ιδιότητα των κρυστάλλων χαλαζία ή συνθετικών κρυστάλλων, οι οποίοι όταν παραμορφώνονται παράγουν ηλεκτρικό φορτίο. Το φαινόμενο αυτό λειτουργεί και αντιστρόφως : δηλαδή όταν εφαρμόζεται στους κρυστάλλους αυτούς ένα ηλεκτρικό δυναμικό ο κρύσταλλος παραμορφώνεται.

Οι δυο ακροδέκτες τοποθετήθηκαν στα δοκίμια όπως φαίνεται στη παρακάτω φωτογραφία. Η καλή επαφή εξασφαλίζεται με την λεία επιφάνεια των δοκιμίων και με τη προσθήκη κατάλληλου gel. Έτσι μετρήθηκε ο χρόνος που κάνει ο παραγόμενος υπέρηχος να διανύσει την απόσταση μεταξύ του πομπού, που εκπέμπει τον υπέρηχο (transmitter), και του δέκτη (Receiver). Η ένδειξη δίνεται σε ms από το όργανο. Αρχικά προσδιορίζεται ο χρόνος του κυκλώματος συμπεριλαμβανομένων των μορφοτροπέων και στη συνέχεια πραγματοποιούνται οι

μετρήσεις στο δοκίμιο. Η τελική ταχύτητα διάδοσης των Ρ κυμάτων δίνεται από τη παρακάτω σχέση: [3]

$$\text{ταχύτητα διάδοσης} \left(\frac{m}{s} \right) = \frac{\text{Μήκος δοκιμίου} (m)}{\text{Διορθωμένος χρόνος διάδοσης} (s)}$$



Φωτογραφία 1.2: Κεντρική μονάδα μαζί με ακροδέκτες

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΠΡΟΓΕΝΕΣΤΕΡΩΝ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΩΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ

2. Ανασκόπηση προγενέστερων εργαστηριακών πειραμάτων

2.1 Εισαγωγή

Αρκετοί ερευνητές έχουν πραγματοποιήσει μέχρι σήμερα πειράματα για να παρατηρήσουν τόσο τον τρόπο αστοχίας όσο και το πώς η αντοχή και η παραμορφωσιμότητα επηρεάζονται από την ύπαρξη αλλά και το προσανατολισμό ασυνεχειών σε ρωγματωμένα δοκίμια. Τα πειραματικά δεδομένα αναφέρονται είτε σε φυσικά ομοιώματα βραχόμαζας, τα οποία μορφώνονται με κάποιο υλικό και έπειτα διακόπτεται η συνέχεια τους με τρόπο ώστε να προσομοιώνεται η κερματισμένη βραχόμαζα, είτε σε εργαστηριακές δοκιμές σε δοκίμια πετρώματος τα οποία περιέχουν ικανό αριθμό ασυνεχειών. Παρά το γεγονός ότι αυτές οι πειραματικές μελέτες έχουν αξιόλογα αποτελέσματα σε πολλές περιπτώσεις γίνονται απλουστεύσεις για να εκτελεστούν επιτυχώς τα πειράματα.[1]

2.2 Πειράματα δοκιμών μονοαξονικής θλίψης.

2.2.1 Δοκιμές των Goldstein et al. (1966)

Οι Goldstein et al.(1966) πραγματοποίησαν τις πρώτες δοκιμές σε φυσικά δοκίμια, κατασκευασμένα από γύψο, για να μελετήσουν την συμπεριφορά της βραχόμαζας. Πραγματοποίησαν δοκιμές ανεμπόδιστης θλίψης αφού αρχικά είχαν διαμορφώσει ασυνέχειες στα δοκίμια. Από τα αποτελέσματα των δοκιμών κατέληξαν στον εμπειρικό τύπο :

$$\frac{\sigma_{cm}}{\sigma_{ce}} = a + b\left(\frac{l}{L}\right)^e$$

Όπου $e < 1$, $b = (1 - a)$

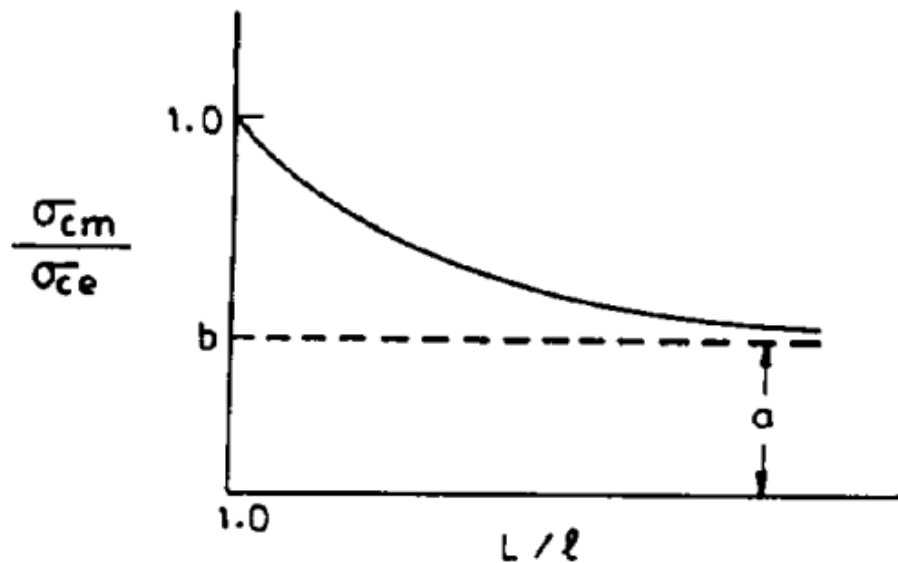
L- Μήκος του δείγματος

l- Απόσταση των ασυνεχειών

σ_{cm} - Αντοχή σε θλίψη της μάζας του υλικού

σ_{ce} - Αντοχή σε θλίψη του άρρηκτου υλικού

Από τα πειράματα συμπεράναν ότι η μείωση του μεγέθους του τεμάχους του άρρηκτου υλικού έχει ως αποτέλεσμα την μείωση της αντοχής του ομοιώματος μέχρι ενός ορίου. [1]



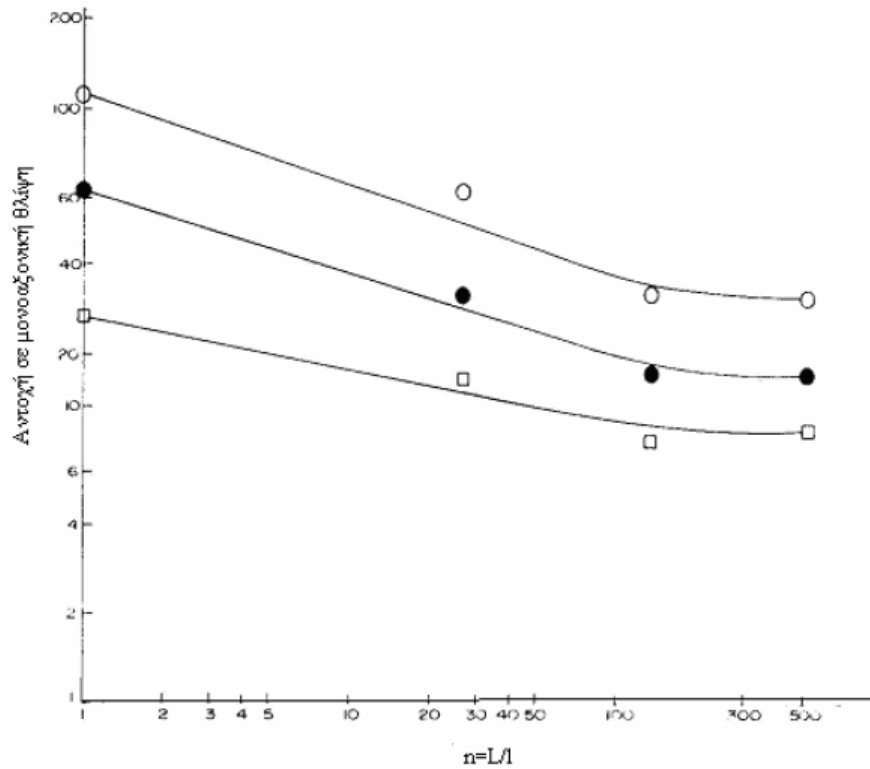
Σχήμα 2.1 : Σχέση αντοχής βραχόμαζας, ανηγμένης προς την αντοχή του άρρηκτου υλικού, με το μέγεθος του άρρηκτου τεμάχους, εκφραζόμενο από το λόγο L/l .

2.2.2 Δοκιμές του Lama (1974)

Ο Lama μελέτησε την επίδραση της πυκνότητας των ασυνεχειών στην αντοχή και τη παραμορφωσιμότητα εκτελώντας εκτεταμένο αριθμό δοκιμών σε φυσικά ομοιώματα για διάφορα υλικά. Ταξινόμησε τα δοκίμια του σε τρεις ομάδες. Η πρώτη αποτελείται από δοκίμια με κατακόρυφες ασυνέχειες, η δεύτερη με οριζόντιες ασυνέχειες και η τρίτη ομάδα από ορθογώνια τεμάχια υλικού.

Από την πειραματική διαδικασία ο Lama συμπέρανε ότι η αντοχή των δοκιμών σε σχέση με αυτή του άρρηκτου υλικού μειωνόταν έως και 30% για τις κατακόρυφες και τις οριζόντιες ασυνέχειες. Τα δοκίμια με τις κατακόρυφες ασυνέχειες αστοχούσαν με αποκόλληση των ασυνεχειών ενώ για αυτά με τις οριζόντιες ασυνέχειες είχαμε τη δημιουργία εφελκυστικών ρωγμών.

Για την τρίτη κατηγορία δοκιμών ο Lama συσχέτισε την αντοχή με τον αριθμό n των τεμαχών του άρρηκτου υλικού. Όπως φαίνεται και στο σχήμα η αντοχή σταθεροποιείται σε ένα αριθμό περίπου 150 τεμαχών άρρηκτου υλικού για τρία διαφορετικά υλικά, αφού πρώτα έχει υποστεί μείωση με την αύξηση των ασυνεχειών.



Σχήμα2.2: Επίδραση του αριθμού των ασυνεχειών στην αντοχή των δοκιμίων. (Lama, 1974)

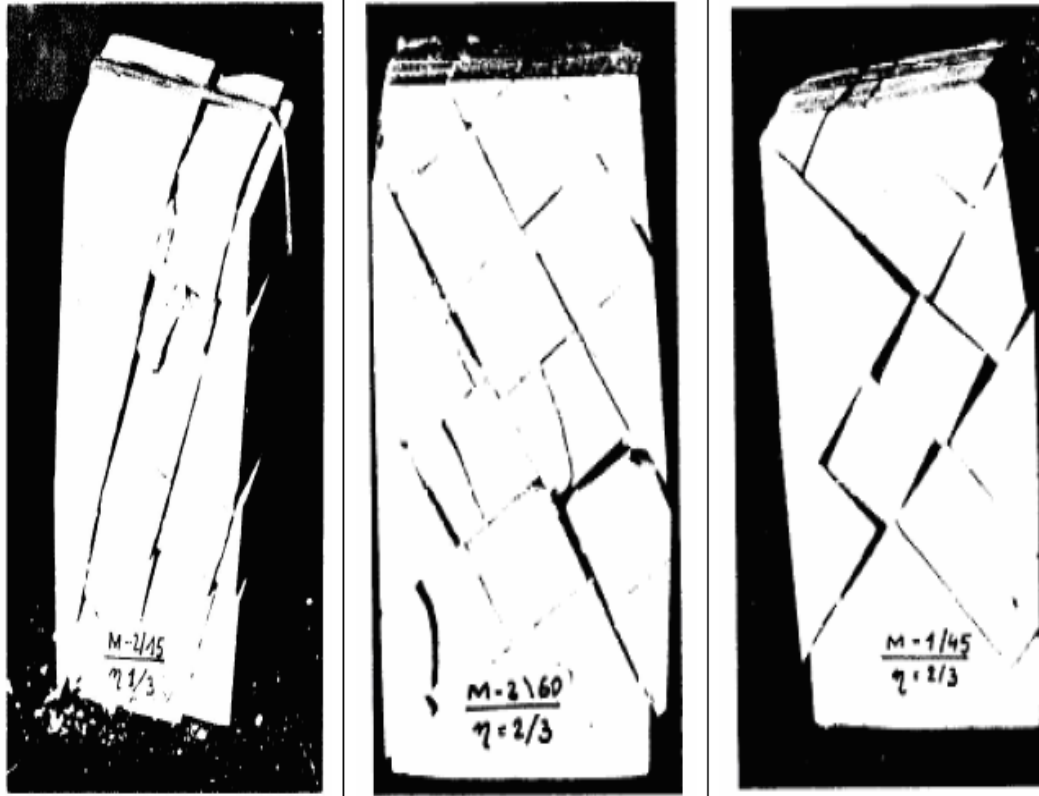
Ο ίδιος ερευνητής πραγματοποίησε δοκιμές ανεμπόδιστης θλίψης σε φυσικά δοκίμια με κεκλιμένες ασυνέχειες, με κλίση 15°, 30°, 45°, 60° ως προς την διεύθυνση φόρτισης και εμμονή $\chi=2/3$ και $1/3$. Συμπεράνε ότι η κλίση και η εμμονή των ασυνεχειών επηρέαζε πολύ την αντοχή των δοκιμίων.

Τα αποτελέσματα των πειραμάτων οδήγησαν στον εξής εμπειρικό τύπο:

$$\sigma_c = K + \left(\frac{L}{l}\right)^u$$

Όπου σ_c η αντοχή, K η αντοχή του δοκιμίου που περιέχει πάνω από 150 ασυνέχειες, u σταθερά, L το μήκος της βραχόμαζας και l το μήκος του άρρηκτου υλικού.

Ο τρόπος αστοχίας των δοκιμίων φαίνεται στη παρακάτω φωτογραφία:[1]

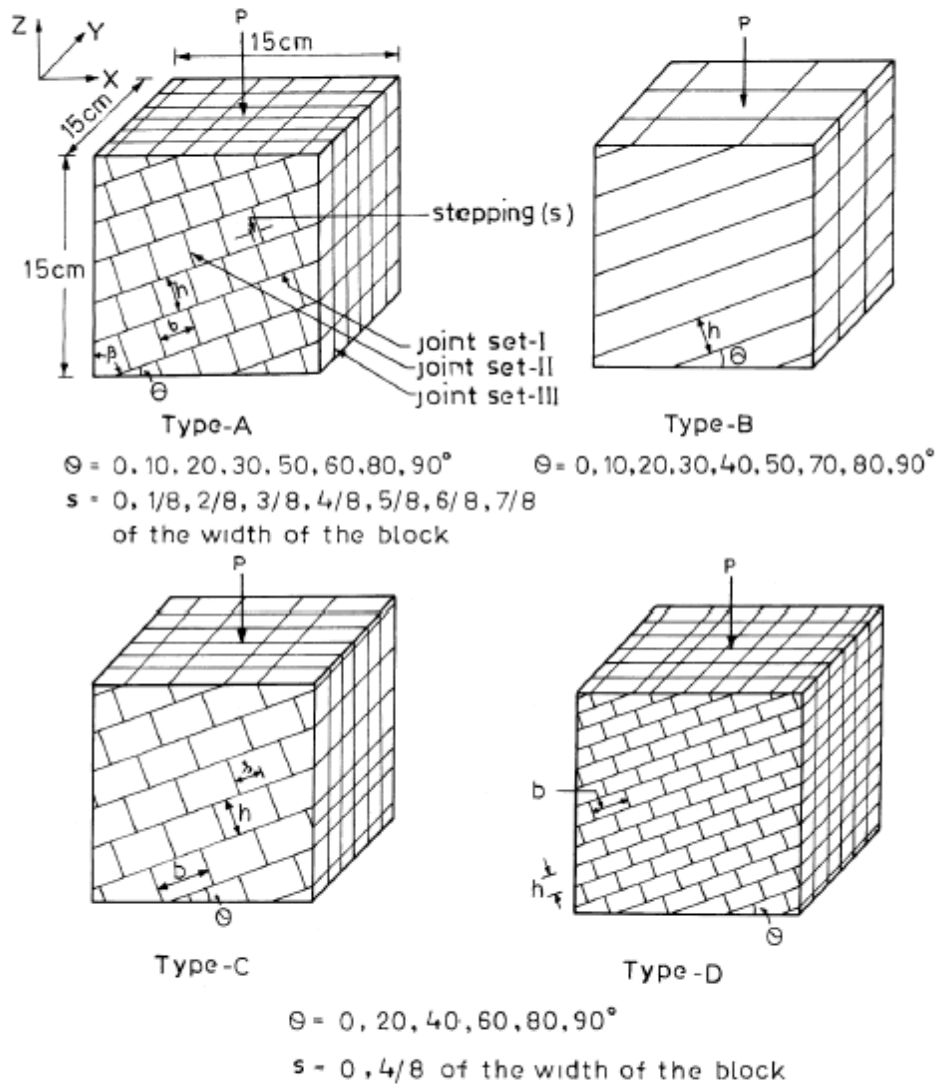


Φωτογραφία 2.1: Μηχανισμοί αστοχίας για δοκίμια με κεκλιμένες ασυνέχειες.

2.2.3. Δοκιμές των Singh et al. (2002)

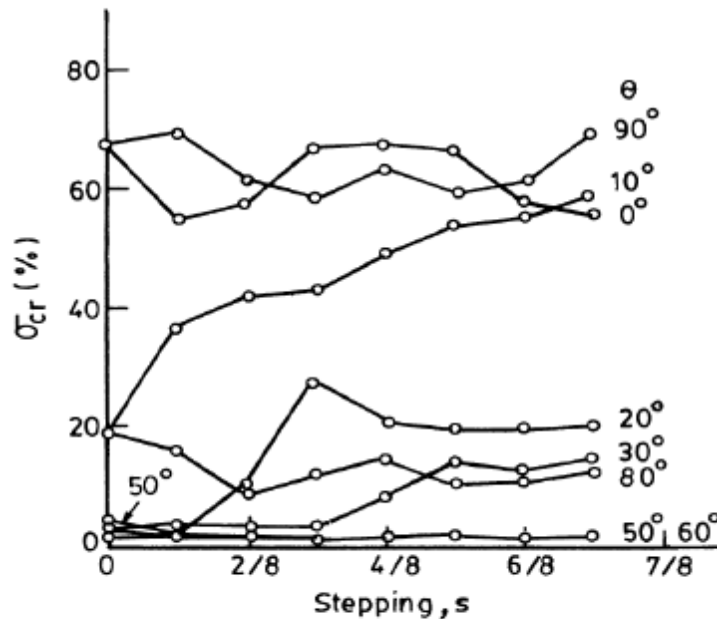
Οι M. Singh et al.(2002) εκτέλεσαν δοκιμές μονοαξονικής θλίψης, με επιβολή σταθερού φορτίου ώστε να έχει διάρκεια 20 min, σε φυσικά δοκίμια διαστάσεων 15x15x15 cm και αποτελούνταν κατά μέσο όρο από 260 κύβους πλευράς 2.5 cm και δημιούργησαν διάφορους συνδυασμούς συστημάτων ασυνεχειών.

Το δοκίμιο τύπου A αποτελούνταν από τρία συστήματα ασυνεχειών. Οι ασυνέχειες συστήματος I είναι εμμένουσες και έχουν γωνία κλίσης θ ως προς την οριζόντιο. Οι ασυνέχειες του συστήματος II είναι κάθετες στις αντίστοιχες του συστήματος I και έχουν βήμα s στην απόσταση κατά τη κλίση τους. Οι ασυνέχειες του συστήματος III παραμένουν πάντα κατακόρυφες και κάθετες.



Σχήμα 2.3: Απεικόνιση τύπων δοκιμών M Singh et al (2002).

Τα αποτελέσματα των πειραμάτων έδειξαν διάφορους μηχανισμούς αστοχίας όπως αξονικές κατακλάσεις του άρρηκτου υλικού, διατμητική αστοχία του άρρηκτου υλικού και τέλος περιστροφή των τεμαχών και ολισθήσεις κατά μήκος των ασυνεχειών. Παράλληλα συμπέρανε τη σημαντική επίδραση της αλληλεμπλοκής των τεμαχών στο μηχανισμό αστοχίας των δοκιμών. Η οποία οδηγεί σε αύξηση της αντοχής για γωνίες μεταξύ 0° έως 30°. Αυτό συμβαίνει γιατί σε αυτές τις γωνίες ο μηχανισμός αστοχίας ελέγχεται από την αντοχή του άρρηκτου πετρώματος, με το βαθμό αλληλοκλειδώματος των τεμαχών να έχει σημαντικό ρόλο. [1]

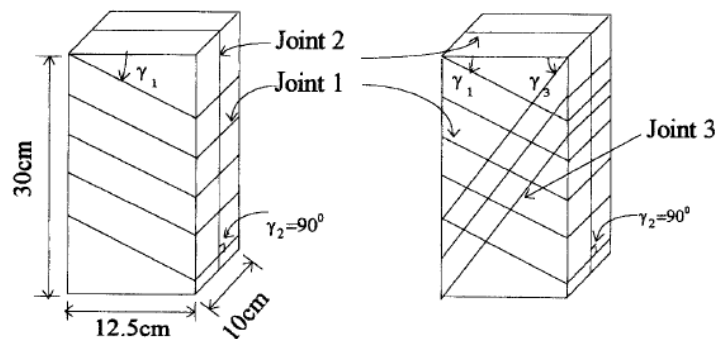


Σχήμα 2.4: Συσχέτιση βαθμού αλληλεμπλοκής με αντοχή των δοκιμίων.

2.2.4. Δοκιμές των Yang, Chen και Huang (1998).

Για την κατασκευή των δοκιμίων για την διεξαγωγή των πειραμάτων χρησιμοποιήθηκε μίγμα από γύψο, άμμο και νερό σε αναλογία 1:0.25:0.92 κατά βάρος. Ως εκ τούτου προέκυψε ένα υλικό με τα εξής χαρακτηριστικά: Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη $\sigma_c=7.63$ MPa. Αντοχή σε εφελκυσμό $\sigma_t=1.05$ MPa. Μέτρο ελαστικότητας $E= 4554$ MPa. Λόγος Poisson $\nu=0.19$. Μοναδιαίο βάρος 1.05 gr/cm³ και γωνία εσωτερικής τριβής $\phi=31^\circ$.

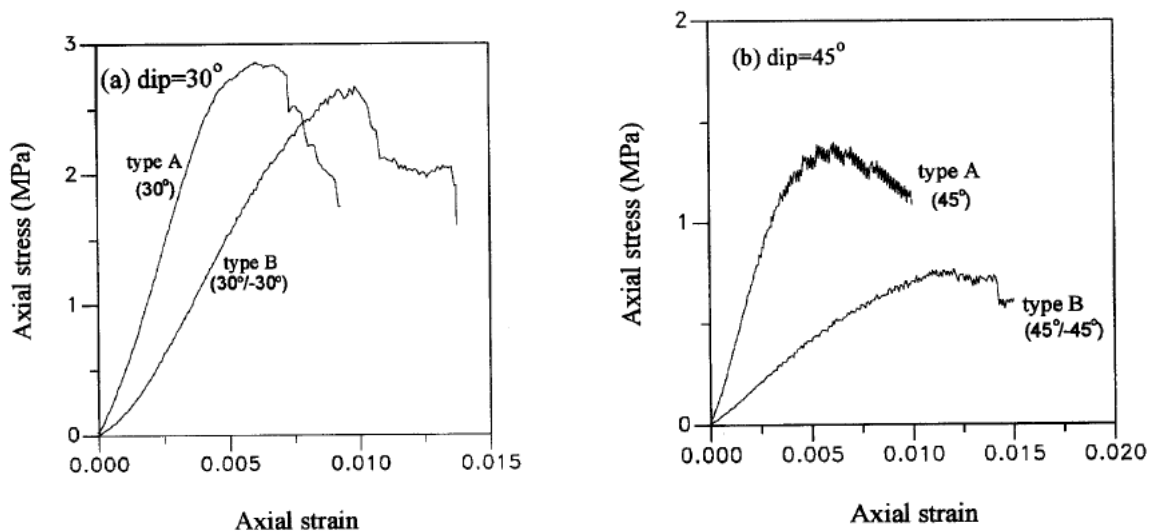
Κατασκευάστηκαν δυο τύποι δοκιμίων διαστάσεων 12,5x10x30 cm. Και στα δυο μοντέλα το πρώτο σύνολο ασυνεχιών ποικίλει με γωνία κλίσης από 0° έως 90°. Ενώ το δεύτερο σύνολο είναι πάντα κάθετο και παράλληλο με τη διεύθυνση φόρτισης. Στο τύπο Β δοκιμίων υπάρχει και τρίτο σύνολο ασυνεχιών πάλι με γωνία κλίσης 10° έως 90° αλλά συμμετρικό ως προς το πρώτο. Λόγο του ότι το δεύτερο είναι παράλληλο με τη διεύθυνση φόρτισης η εξέταση για αλληλεπίδραση μεταξύ τους περιορίζεται μεταξύ του πρώτου και του τρίτου συνόλου.



Σχήμα 2.5: Δυο τύποι μοντέλων: Τύπος Α με 2 συστήματα και τύπος Β με τρία συστήματα ασυνεχιών

Τα αποτελέσματα του πειράματος έδειξαν ότι ο προσανατολισμός των ασυνεχειών στα δοκίμια έχει σαφή επίδραση στην αντοχή τους, με την αντοχή των άρρηκτων δοκιμίων να είναι μεγαλύτερη από αυτή των ρωγματωμένων και το μέτρο ελαστικότητας των ρωγματωμένων δοκιμίων να φτάνει μόλις το 40% αυτού του άρρηκτου. Οι χαμηλότερες αντοχές εμφανίστηκαν για γωνίες ($50^\circ - 75^\circ$) ενώ για γωνίες κλίσης ασυνεχειών ($0^\circ - 30^\circ$) ήταν πολύ ψηλότερη. Για τα δοκίμια τύπου B και για μεγάλες κλίσεις των ασυνεχειών η αντοχή ήταν μικρότερη από τον τύπο A. Αυτό φανερώνει και την αλληλεπίδραση του πρώτου και του τρίτου συνόλου ασυνεχειών.

Οι τρόποι αστοχίας των δοκιμίων χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες. Αξονικός σχισμός όπου συμβαίνει ένας κάθετος διαχωρισμός στο άρρηκτο υλικό και από τα διαγράμματα τάσης - παραμόρφωσης διακρίνεται ψαθυρή συμπεριφορά. Ολίσθηση σε ένα προϋπάρχον επίπεδο αδυναμίας, αντίθετα από τα διαγράμματα τάσης - παραμόρφωσης διακρίνεται ελαστική συμπεριφορά. Τέλος παρατηρήθηκε και ένας τρίτος, μικτός τύπος αστοχίας όπου είναι συνδυασμός των δύο παραπάνω.



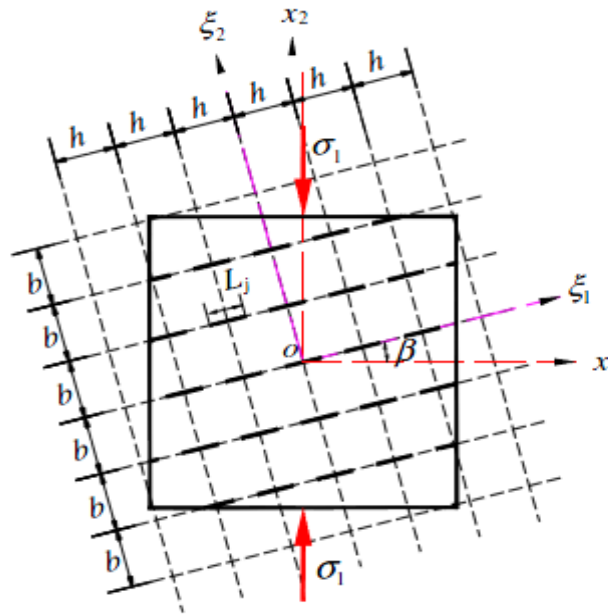
Σχήμα 2.6: Σύγκριση διαγραμμάτων τάσης - τροπής μεταξύ των δύο τύπων μοντέλων για γωνία κλίσης ασυνεχειών 30° και 45° .

Όταν τα δοκίμια αστοχούν σε αξονικό σχισμό η αντοχή των δύο τύπων είναι παρόμοια καθώς κυρίαρχο ρόλο παίζει η αντοχή του άρρηκτου υλικού. Για τον ίδιο λόγο οι αντοχές είναι παρόμοιες και στην περίπτωση που έχουμε αστοχία με ολίσθηση. Όταν όμως συμβαίνει μικτού τύπου αστοχία η αντοχή του τύπου B μειώνεται κατά 50%. Αυτό υποδηλώνει ότι η αλληλεπίδραση των δυο συνόλων ασυνεχειών είναι σημαντική. Κάθε κίνηση που λαμβάνει μέρος από την αρχική διαμόρφωση του δοκιμίου έχει ως συνέπεια τη τροποποίηση του μηχανισμού αστοχίας.

Για περεταίρω ταξινόμηση της αλληλεπίδρασης μεταξύ των ομάδων των ασυνεχειών ερευνήθηκε δείγμα με δύο κεκλιμένα σύνολα ασυνεχειών όχι συμμετρικά μεταξύ τους. Παρατηρήθηκε ότι η αντοχή οριζόταν από το ποίο αδύναμο επίπεδο ολίσθησης. [5]

2.2.5. Πείραμα των Chen Xin, Liao Zhihong και Peng Xi (2012)

Τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν για την διεξαγωγή του πειράματος ήταν διαστάσεων 15x15x5 cm. Ένα σύνολο παράλληλων διακοπτόμενων ανοιχτών ρωγμών δημιουργήθηκε με ίση απόσταση (spacing) b και ύψους h στα 5mm, με τη βοήθεια μεταλλικών ελασμάτων όπως φαίνεται και στο παρακάτω διάγραμμα :

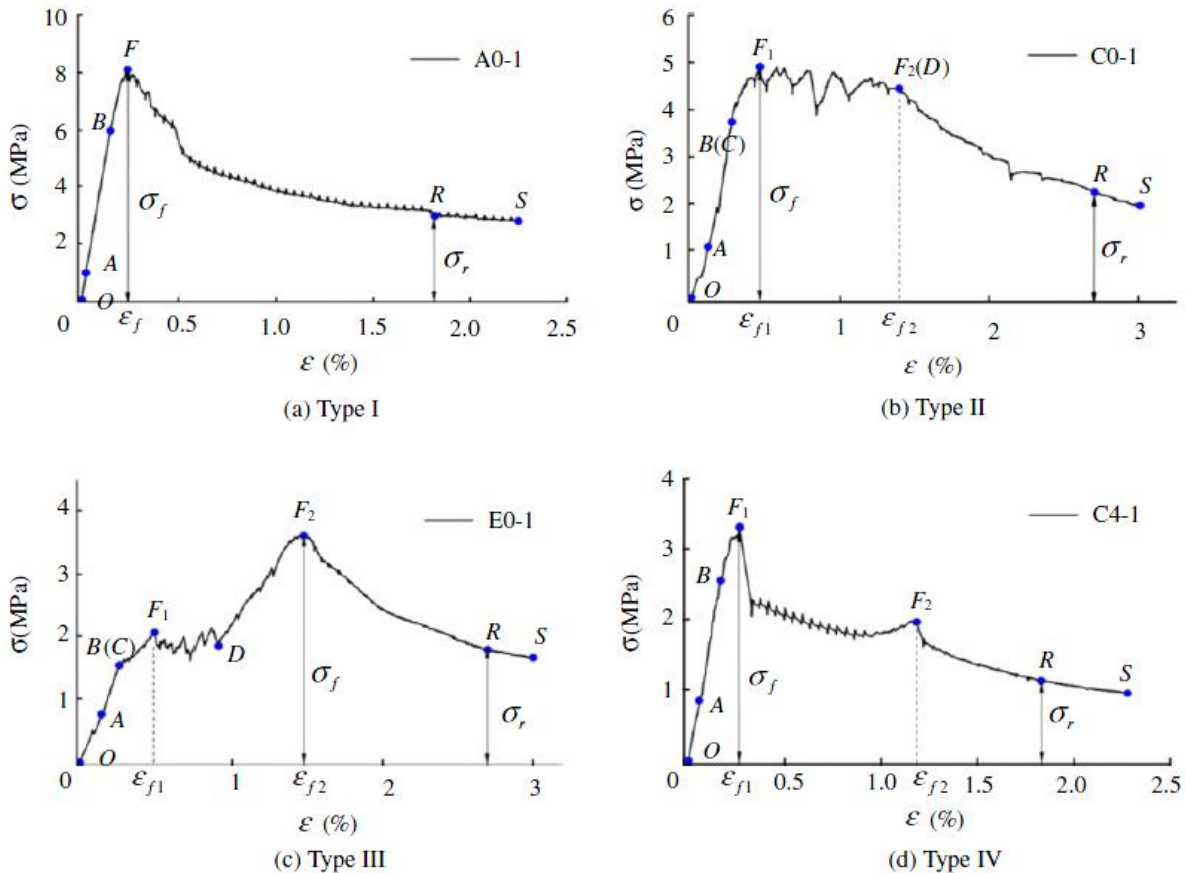


Σχήμα 2.7: Διάγραμμα όπου απεικονίζονται οι γεωμετρικές παράμετροι των ασυνεχειών.

Ορίστηκε ως συντελεστής εμμονής των ασυνεχειών η αναλογία του συνόλου με τα επίπεδα των ασυνεχειών. Πήρε τιμές 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 με μήκος ρωγμών 0.6, 1.2, 1.8, 2.4 cm. Η γωνία κλίσης των ασυνεχειών ορίστηκε από 0° έως 90° ανά 15° κάθε φορά.

Το δείγμα φτιάχτηκε από μίγμα με αναλογία γύψου/νερό 1:0.6 κατά όγκο. Πραγματοποιήθηκαν δοκιμές χαρακτηρισμού του υλικού όπου προέκυψαν οι παρακάτω ιδιότητες: Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη $\sigma_c=8.51$ MPa. Αντοχή σε εφελκυσμό $\sigma_t=1.44$ MPa. Μέτρο ελαστικότητας $E=2.56$ GPa. Λόγος Poisson $\nu=0.11$. Συνοχή $c=2.2$ MPa. Γωνία εσωτερική τριβής του υλικού $\varphi_r=38^\circ$ και γωνία εσωτερικής τριβής της ασυνέχειας $\varphi_j=37^\circ$. Όλα τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν σε σερβοϋδραυλική μονάδα με ρυθμό επιβολής μετατόπισης της πλάκας φόρτισης 0.0025 mm/s.

Από τις καμπύλες τάσεις - παραμόρφωσης ταξινομήθηκαν τέσσερις κατηγορίες. Η πρώτη με μια κορυφή. Η δεύτερη μειώνεται μετά από ένα διάστημα πολλαπλών κορυφών. Η τρίτη όπου μετά από ένα διάστημα πολλών κορυφών η αντοχή αυξάνεται μέχρι τη μέγιστη τιμή. Τέλος η τέταρτη κατηγορία όπου μετά τη μέγιστη τιμή η αντοχή μειωνόταν με ένα διάστημα πολλών κορυφών.



Σχήμα 2.8: Διαγράμματα των τεσσάρων κατηγοριών συμπεριφορών δοκιμών.

Ο πρώτος τύπος παρατηρήθηκε για μικρό δείκτη εμμονής $k=0.2$ και για δοκίμια άρρηκτα αλλά και αυτά με κλίση ασυνεχειών είτε πολύ μικρή $\beta=0-15^\circ$ ή πολύ μεγάλη $\beta=75-90^\circ$. Αποτελείται από πέντε στάδια όπως φαίνεται και στο διάγραμμα. Το OA που χαρακτηρίζεται από αύξηση του μέτρου ελαστικότητας λόγω κλεισίματος μικρορωγμών. Δεύτερο στάδιο γραμμικά ελαστικό AB όπου παραμόρφωση έγκειται στη συμπίεση του υλικού του δοκιμίου. Τρίτο στάδιο παραμόρφωσης BF όπου έχουμε αρχική διάδοση ρωγμών μέχρι να φτάσει την μέγιστη αντοχή στο σημείο F. Έπειτα το στάδιο μετά την αστοχία FR όπου οι ρωγμές συγχωνεύονται και το δοκίμιο διαχωρίζεται σε κομμάτια αντί να έχει συμπαγή μορφή. Τέλος το τμήμα RS όπου επιτυγχάνεται η παραμένουσα αντοχή λόγω της τριβής μεταξύ των τεμαχών.

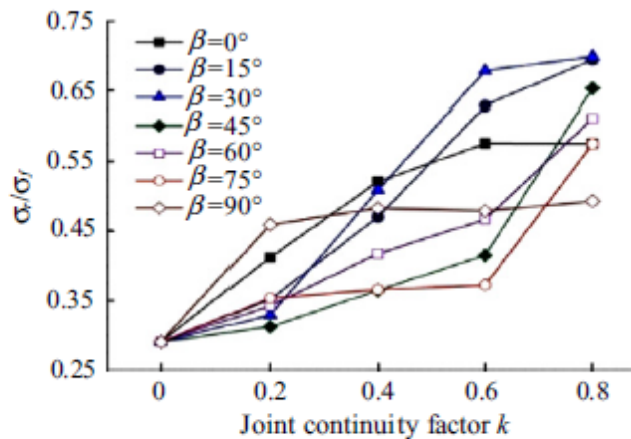
Ο δεύτερος τύπος παρουσιάστηκε σε δοκίμια με μεσαίες και μεγάλες τιμές εμμονής $k=0.4, 0.6, 0.8$ και για μικρές γωνίες κλίσης ασυνεχειών. Σε αυτό διακρίνουμε το σημείο B όπου είναι το τέλος της γραμμικής ελαστικής φάσης και συμπίπτει με το σημείο C όπου είναι η αρχή του κλεισίματος των προϋπάρχουσων μικρορωγμών. Έπειτα το στάδιο CD όπου παρατηρούνται πολλές κορυφές λόγω κλεισίματος των προϋπαρχόντων ρωγμών. Οι πολλαπλές κορυφές ακολουθούνται από το στάδιο DR όπου έχουμε το τελευταίο σχηματισμό αστοχίας. Τέλος ακολουθεί το στάδιο RS της παραμένουσας αντοχής.

Ο τρίτος τύπος παρατηρήθηκε στα δοκίμια με τη μεγαλύτερη εμμονή 0.8 και για χαμηλές γωνίες κλίσης των ασυνεχειών. Όπως φαίνεται και στο διάγραμμα τα πρώτα τρία στάδια είναι

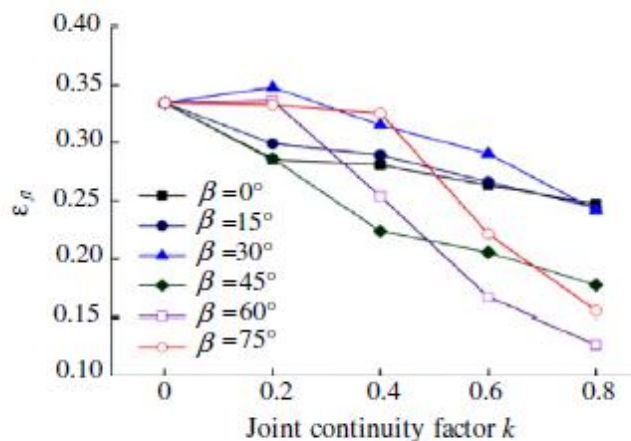
παρόμοια με αυτά του δεύτερου τύπου. Δηλαδή το κοίλο μέρος OA, γραμμικά ελαστικό AC και πολλαπλών κορυφών CD. Μετά από αυτό παρατηρήθηκε συμπεριφορά κράτυνσης DF₂, ακολουθεί το μετά την αστοχία αρχικό στάδιο F₂R και τέλος το στάδιο της παραμένουσας αντοχής RS.

Τέλος ο τέταρτος τύπος παρατηρήθηκε για δοκίμια με μικρή εμμόνη ασυνεχειών και χαμηλές 30° κλίσεις ασυνεχειών και μεσαίες κλίσεις ασυνεχειών 45° - 60°. Τα πέντε στάδια της καμπύλης τάσης παραμόρφωσης είναι παρόμοια με αυτά του πρώτου σταδίου.

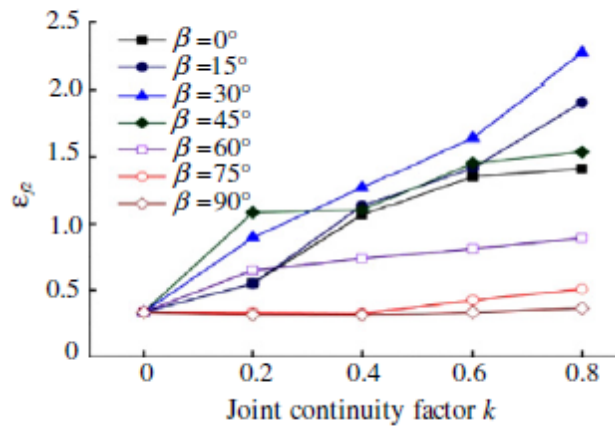
Σε αυτή τη μελέτη ο λόγος της παραμένουσας αντοχής με αυτή της μέγιστης (σ_r/σ_j) υιοθετήθηκε ως ένα μέτρο ποσοτικοποίησης της ολκιμότητας των δοκιμίων. Επίσης αξιολογήθηκαν ως βοηθητικοί παράγοντες οι παραμορφώσεις κατά την πρώτη και την τελευταία κορυφή της καμπύλης. Τα παρακάτω διαγράμματα δείχνουν για την ίδια κλίση το λόγο της παραμένουσας προς τη μέγιστη αντοχή με την αύξηση του συντελεστή εμμόνης των ασυνεχειών k καθώς και τη μεταβολή της παραμόρφωσης της πρώτης και τελευταίας κορυφής με το k .



Σχήμα 2.9: Διάγραμμα του λόγου της παραμένουσας προς τη μέγιστη αντοχή με το συντελεστή εμμόνης για διάφορες κλίσεις ασυνεχειών.

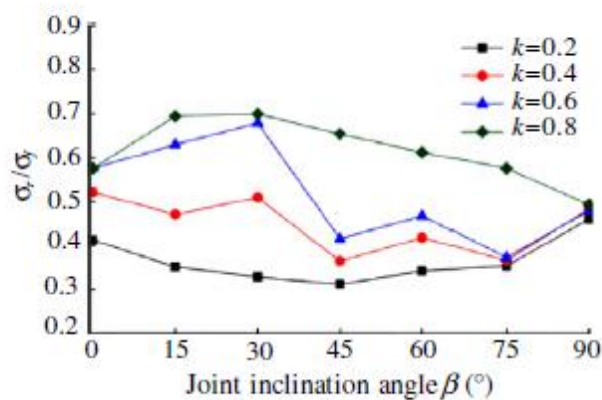


Σχήμα 2.10: Διάγραμμα παραμόρφωσης πρώτης κορυφής με το συντελεστή εμμόνης για διάφορες κλίσεις ασυνεχειών.

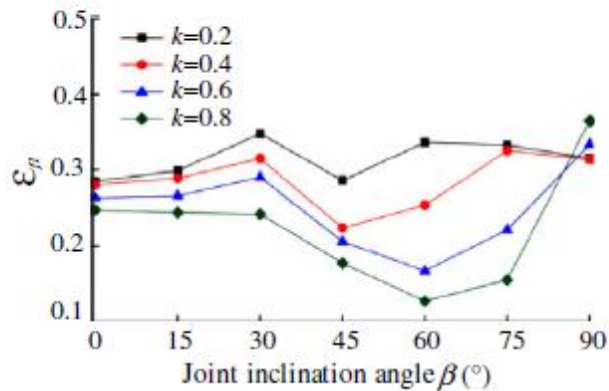


Σχήμα 2.11: Διάγραμμα της παραμόρφωσης τελευταίας κορυφής με το συντελεστή της εμμονής για διάφορες κλίσεις ασυνεχειών.

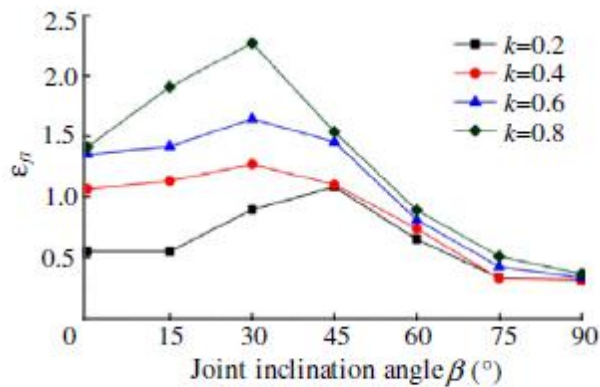
Τα επόμενα διαγράμματα δείχνουν το λόγο της παραμένουσας προς την μέγιστη αντοχή, την παραμόρφωση πρώτης και τελευταίας κορυφής σε σχέση με τη κλίση των ασυνεχειών για διάφορες τιμές του συντελεστή εμμονής k . Παρατηρούμε ότι για ίδια εμμονή οι άλλες τρεις μεταβλητές ποικίλουν με τη γωνία κλίσης σε λιγότερο διαφορετικό ρόλο. Η καμπύλη παραμένουσας προς μέγιστη αντοχής σε σχέση με τη γωνία κλίσης ασυνεχειών είναι κοίλη για μικρές τιμές k με τη μικρότερη τιμή να παρουσιάζεται για γωνία κλίσης 45° . Επίσης είναι κυρτή για μεγάλες τιμές k με μέγιστη τιμή για γωνία κλίσης ασυνεχειών 30° . Για ενδιάμεσες τιμές $k = 0.4-0.6$ είναι κυματοειδής. Για τη πρώτη κορυφή παραμόρφωσης με τη γωνία κλίσης αλλάζει η καμπύλη βαθμιαία από κυματοειδής σε σχήμα U με την αύξηση του παράγοντα k . Τη μικρότερη τιμή τη παίρνει για γωνίες κλίσης 45° .



Σχήμα 2.12: Διάγραμμα λόγου παραμένουσας προς μέγιστη αντοχή σε σχέση με τη γωνία κλίσης των ασυνεχειών και την εμμονή τους.

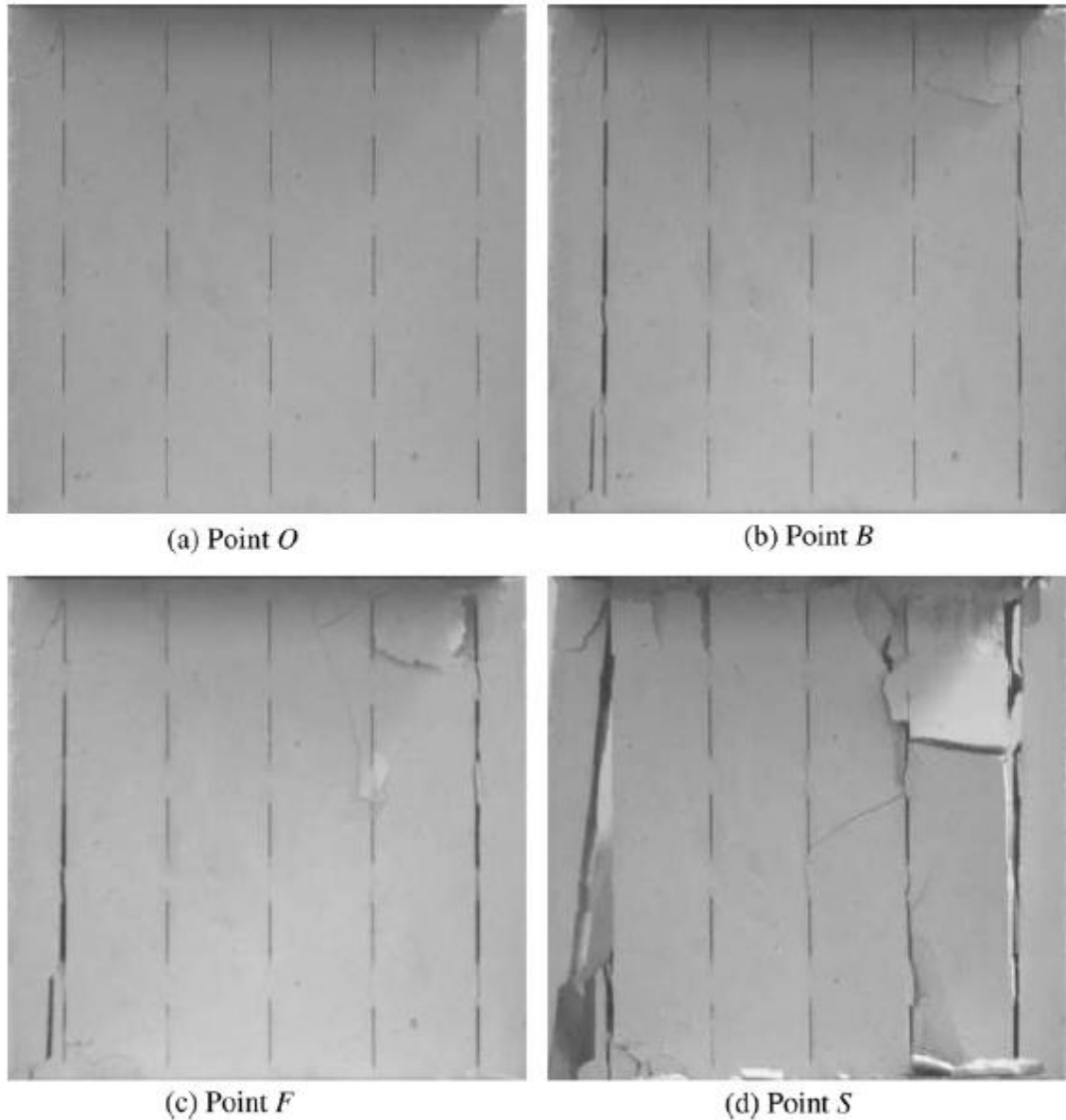


Σχήμα 2.13: Διάγραμμα παραμόρφωσης πρώτης κορυφής σε σχέση με την γωνία κλίσης και εμμονή ασυνεχειών.



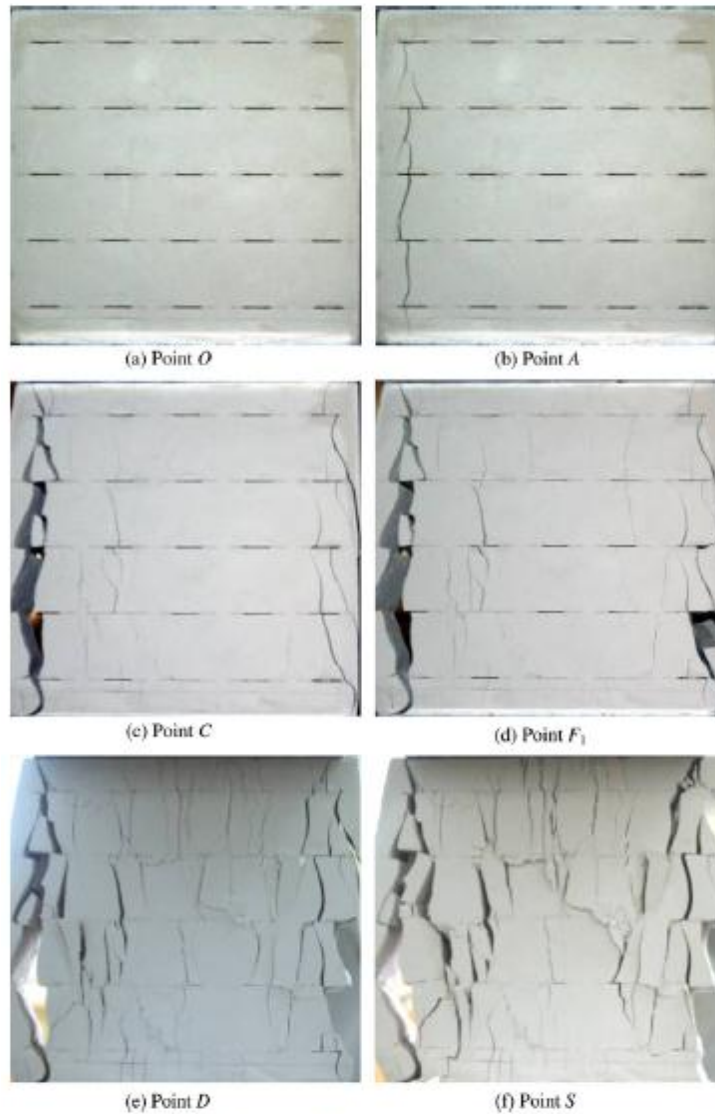
Σχήμα 2.14: Διάγραμμα παραμόρφωσης τελευταίας κορυφής σε σχέση με την γωνία κλίσης και την εμμονή ασυνεχειών.

Με τη βοήθεια βιντεοκάμερας κατά την διάρκεια των πειραμάτων ερευνήθηκε η σχέση μεταξύ της μη γραμμικής συμπεριφοράς τάσης-παραμόρφωσης και της λειτουργίας των ασυνεχειών. Για $k=0.6$ και γωνία κλίσης 90° το σημείο B αντιστοιχεί στο τέλος της γραμμικά ελαστικής περιοχής και οι υπάρχουσες ασυνέχειες σχεδόν κλείνουν. Στη μέγιστη αντοχή, σημείο F, οι προϋπάρχουσες ρωγμές στα δεξιά του δοκιμίου ενώνονται μεταξύ τους. Στο σημείο S της παραμένουσας αντοχής τα επίπεδα των εφελκυστικών ρωγμών ενώνονται και εν τέλει στο δοκίμιο απομένουν κάποιες κολώνες.



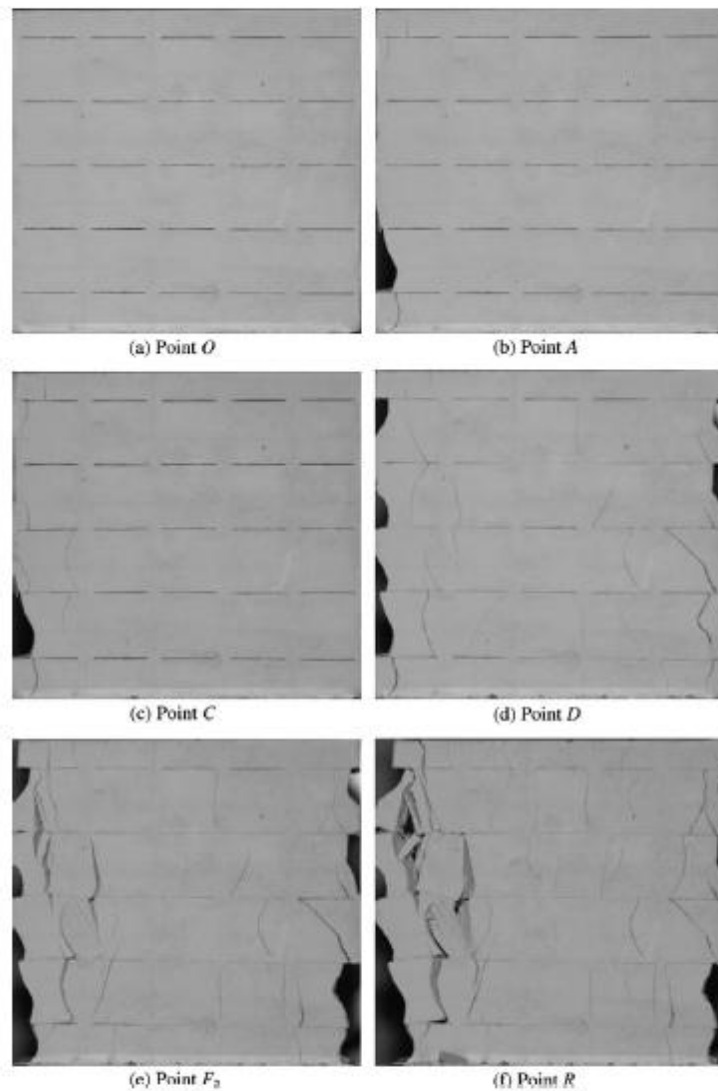
Φωτογραφία 2.2: Παρατήρηση της αστοχίας του δοκιμίου.

Στις επόμενες φωτογραφίες φαίνεται ένα δοκίμιο όπου έχει $k=0.4$ και γωνία κλίσης ασυνεχειών 0° . Φαίνεται ότι μεγάλος αριθμός ρωγμών αναπτύσσονται πριν το κλείσιμο όλων το προϋπάρχων ρωγμών. Κατά τη διάρκεια κλεισίματος το φορτίο μεταφέρεται από τις επιφάνειες επαφής. Ωστόσο οι ζημιές του υλικού υποβαθμίζουν την αντοχή του δοκιμίου. Η αύξηση του μεγέθους της αντίστασης από το κλείσιμο είναι ανάλογη με τη μείωση από το μέγεθος αντίστασης του υλικού. Μετά το κλείσιμο των οριζόντιων ασυνεχειών ακολουθεί η διάδοση αυτών με τις κάθετες ελκυστικές ρωγμές και εν τέλει το σπάσιμο του δοκιμίου σε πολλά κομμάτια.



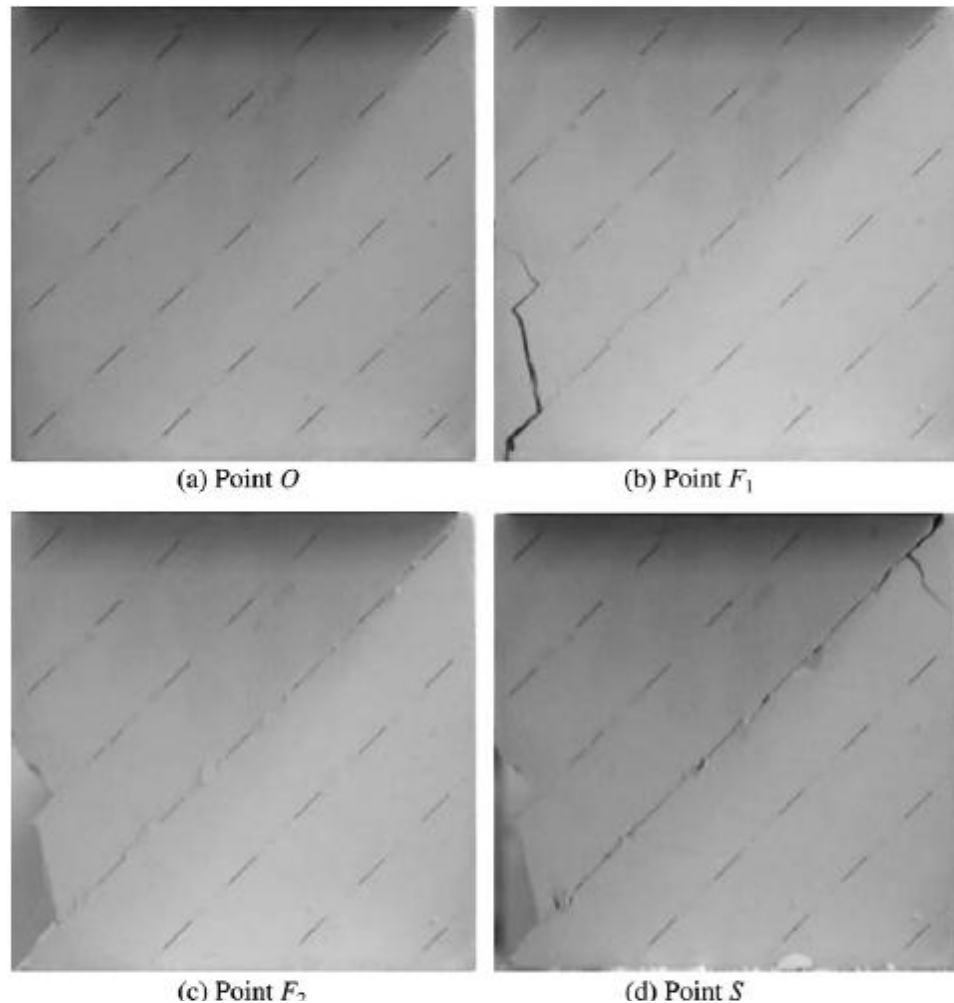
Φωτογραφία 2.3: Παρατήρηση αστοχίας δοκιμίου με οριζόντιες ασυνέχειες.

Η επόμενη φωτογραφία δείχνουν ένα δοκίμιο τύπου III με μεγάλη εμμόνη $k=0.8$ και γωνία κλίσης 0° . Λόγω της μεγάλης εμμόνης οι ρωγμές κλείνουν σε μικρές τιμές τάσεις έτσι ώστε εμποδίζεται η διάδοση περαιτέρω ρωγμών. Ως εκ τούτου η αντοχή του υλικού δεν έχει εξαντληθεί τελείως. Μετά από αυτό το στάδιο προκαλείται η επιβράδυνση της παραμόρφωσης μέχρι να φτάσει το μέγιστο η αντοχή.



Φωτογραφία 2.4: Φωτογραφίες από τη παρατήρηση αστοχίας.

Τέλος ακολουθούν φωτογραφίες από δοκίμιο τύπου IV με $k=0.6$ και γωνία κλίσης 45° . Φαίνεται η διατμητική αστοχία επέρχεται σε διαγώνια επίπεδα του δείγματος. Τα δόντια που δημιουργούνται στα επίπεδα ασυνεχειών προκαλούν αύξηση της αντίστασης σε διάτμηση έως τη στιγμή που καταστρέφονται και επέρχεται η παραμένουσα αντοχή του δοκιμίου.[4]



Φωτογραφία 2.5: Παρατήρηση αστοχίας δοκιμίου τύπου IV.

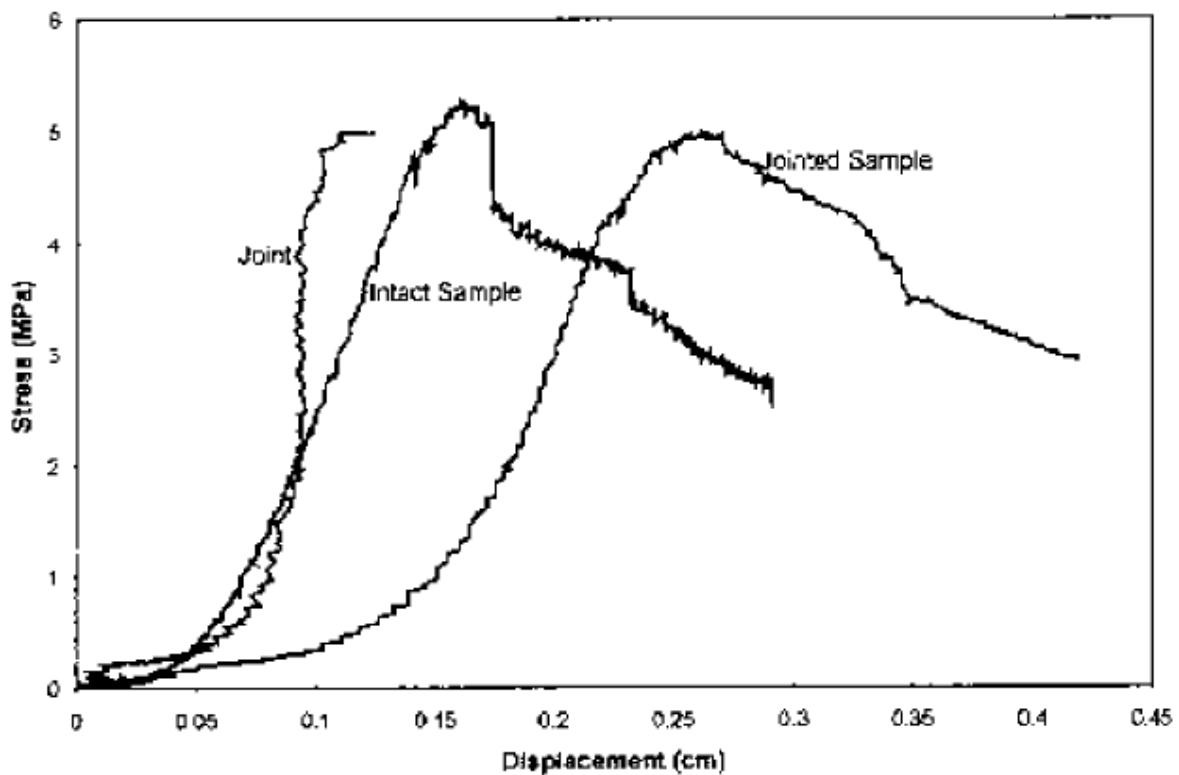
2.2.6 Πείραμα των P.H.S.W. Kulatilake, W. He, J. Um, H. Wang (1997)

Για την προετοιμασία του δείγματος χρησιμοποιήθηκαν γύψος, πυριτική άμμος και νερό. Η προετοιμασία έγινε προσεκτικά ώστε να επιτευχθούν αναπαράξιμες ιδιότητες του μίγματος αλλά και για την επιτυχία ισοτροπίας των δοκιμίων. Η ανάμιξη έγινε ελεγχόμενα εφ' όσον σε 10 λεπτά το δείγμα σκλήρυνε. Το κάθε δοκίμιο ξεκαλουπωνόταν μετά από 24 ώρες. Στη συνέχεια τα δοκίμια διατηρούνταν για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα υπό σταθερή θερμοκρασία και υγρασία και αφού εκτίθονταν για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα σε συνθήκες δωματίου πραγματοποιούνταν δοκιμές μηχανικών αντοχών. Για το χαρακτηρισμό του δείγματος πραγματοποιήθηκαν δοκιμές μονοαξονικής και τριαξονικής θλίψης καθώς και δοκιμή Brazilian. Επίσης πραγματοποιήθηκαν και δοκιμές διάτμησης για να προσδιοριστεί η γωνία τριβής 33.5° . Παράλληλα πραγματοποιήθηκαν δοκιμές μονοαξονικής θλίψης τόσο σε άρρηκτα όσο και σε ρωγματωμένα δοκίμια με οριζόντια ασυνέχεια για να μελετηθεί η καμπύλη τάσης - τροπής. Το μέγεθος των δοκιμίων ήταν $90 \times 12.5 \times 8.6$ cm και οι δοκιμές μονοαξονικής θλίψης εκτελέστηκαν με σταθερό ρυθμό μετατόπισης της πλάκας φόρτισης ίσο με $1.62 \cdot 10^{-3}$ cm/sec.

TABLE 1
PERFORMED INTACT MODEL MATERIAL TESTS AND RESULTS

Test	Sample Size	Number of Samples Tested	Summary of the Results
Uniaxial	5.15cm diameter, 11cm height	60	$\sigma_c=9.70\pm 1.48\text{MPa}$ $E=1.64\pm 0.30\text{GPa}$ $\rho=1.22\pm 0.05\text{g/cm}^3$ $\nu=0.24$
Triaxial	5.15cm diameter, 11cm height	5	$\sigma_3=1.38\text{MPa}, \sigma_{1f}=10.03\text{MPa}$ $\sigma_3=1.73\text{MPa}, \sigma_{1f}=10.59\text{MPa}$ $\sigma_3=2.07\text{MPa}, \sigma_{1f}=11.68\text{MPa}$ $\sigma_3=2.42\text{MPa}, \sigma_{1f}=12.58\text{MPa}$ $\sigma_3=3.45\text{MPa}, \sigma_{1f}=15.31\text{MPa}$
Brazilian	5.15cm diameter	5	$\sigma_t=1.45\text{MPa}$

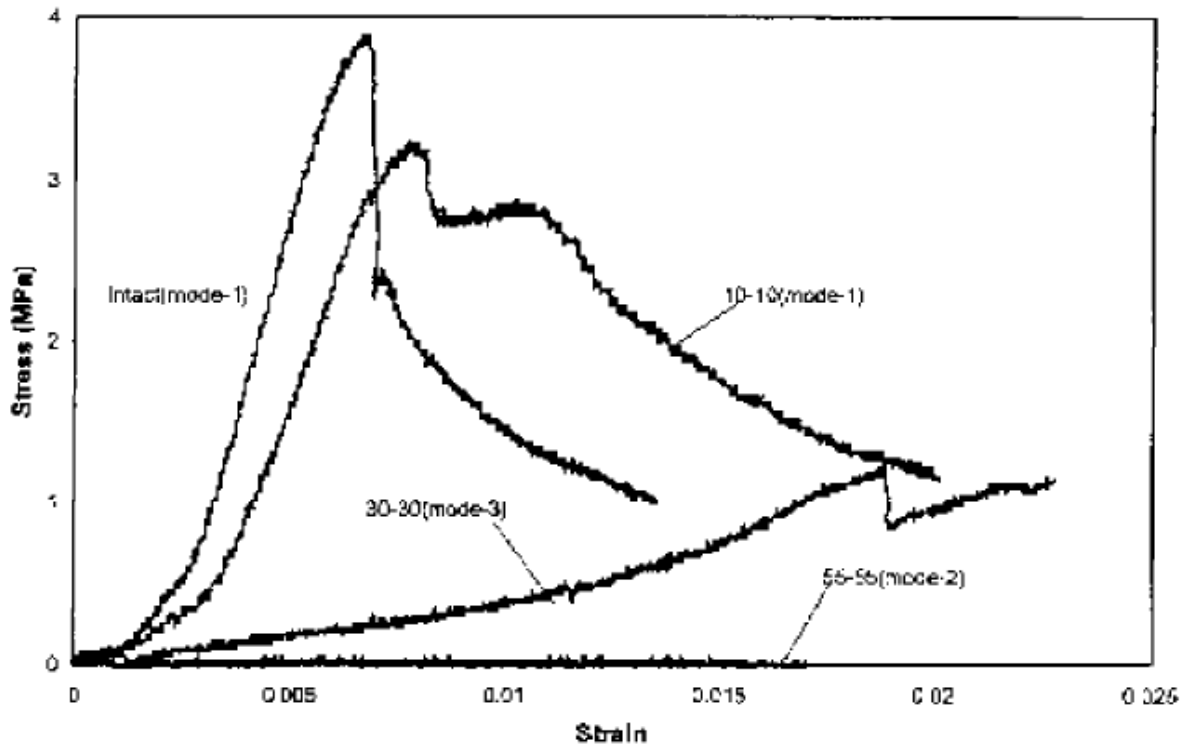
Πίνακας 2.1: με τα αποτελέσματα δοκιμών για τον χαρακτηρισμό του υλικού.



Σχήμα 2.15: Διάγραμμα τάσης - βραχύνσης άρρηκτου και ρωγματωμένου με οριζόντια ασυνέχεια δοκιμίου.

Η ανάλυση των αποτελεσμάτων παρουσιάζεται στο πίνακα 2.1, ο οποίος περιέχει την γεωμετρία των ασυνεχειών των δοκιμών. Το κάθε δοκίμιο αποτελείται από τα άρρηκτα τμήματα και τις ασυνέχειες. Κατά την εκτέλεση της μονοαξονικής θλίψης τα δοκίμια επέδειξαν τις ακόλουθες συμπεριφορές θραύσεως:

A) Για δοκίμια με γωνία κλίσης ασυνεχειών 0° έως 15° ο κυρίως μηχανισμός αστοχίας ήταν εφελκυστικές ρωγμές στο άρρηκτο υλικό. Οι εφελκυστικές ρωγμές ήταν σχεδόν παράλληλες στη διεύθυνση επιβολής του φορτίου και σχεδόν κάθετες στο επίπεδο ελαχίστης τάσης. Αυτά τα δείγματα έδειξαν την ακολουθία ελαστικής παραμόρφωσης, ευσταθούς διάδοσης ρωγμών, ασταθούς διάδοσης ρωγμών, συνένωσης ρωγμών και αστοχίας δοκιμίου με την αύξηση του φορτίου.



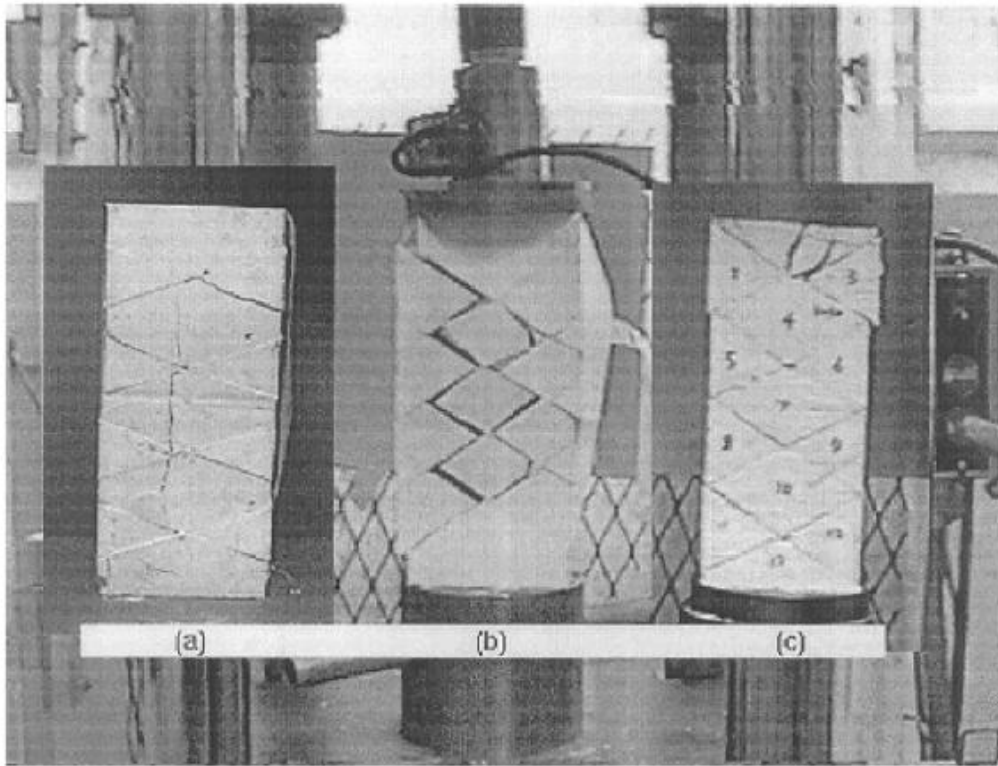
Σχήμα 2.16: Διάγραμμα τάσης - παραμόρφωσης για διάφορες κλίσης ασυνεχειών.

B) Ο κυρίως μηχανισμός για δοκίμια με γωνίες 40° έως 60° είναι συνδυασμός διατμητικής και εφελκυστικής αστοχίας των προϋπαρχόντων ρωγμών. Αυτή η μορφή αστοχίας περιλαμβάνει την κίνηση των τεμαχίων μέσω των επιπέδων των ασυνεχειών, το άνοιγμα ρωγμών και τη διαστολή του δοκιμίου προς την πλευρά εφαρμογής ελάχιστης τάσης. Αυτά επέδειξαν πολύ μικρές αντοχές. Για δοκίμια με μεγαλύτερη κλίση ασυνεχειών το ίδιο βάρος τους ήταν αρκετό για αστοχία.

Γ) ένας μικτός τύπος αστοχίας με τους δυο προαναφερθέντες, είναι ικανός να συμβεί σε δοκίμια με κλίση ασυνεχειών 20° έως 55° . Σε αυτά τα δοκίμια ένα μέρος της αστοχίας συμβαίνει στο άρρηκτο υλικό μέσω εφελκυστικών ρωγμών και ένα άλλο στις ασυνέχειες μέσω διάτμησης και εφελκυσμού. Αυτά τα δοκίμια επέδειξαν μια πλαστική συμπεριφορά. Η αντοχή τους μειώθηκε αυξάνοντας τη γωνία κλίσης των ασυνεχειών από αυτήν του άρρηκτου υλικού σε αυτήν που έχουν δοκίμια με γωνία κλίσης ασυνεχειών μεγαλύτερη από 40° .

Η φωτογραφία που ακολουθεί απεικονίζει δοκίμια που έχουν αστοχήσει με τους παραπάνω τρόπους που περιγράφηκαν. Επίσης εξετάστηκαν δοκίμια και χωρίς συμμετρία στις

ασυνέχειες τους. Οι καμπύλες τάσεις – παραμόρφωσης όπου πάρθηκαν από δοκίμιο με ασυνέχειες $10^\circ - 40^\circ$ και $40^\circ - 40^\circ$ ήταν παρόμοιες. Αυτό δείχνει ότι ένα δοκίμιο που περιέχει ασυνέχεια με μικρή κλίση $<20^\circ$ και μια με μεγάλη κλίση $>40^\circ$, η συμπεριφορά του εξαρτάται κυρίως από τη συμπεριφορά της ασυνέχεια με την απότομη κλίση.



Φωτογραφία 2.6: (a) Εφελκυστική αστοχία άρρηκτου υλικού (b) Συνδυασμός εφελκυστικής και δαιτητικής αστοχίας μέσω των ασυνεχειών (c) Συνδυασμός αστοχίας μέσω των ασυνεχειών και του άρρηκτου υλικού.

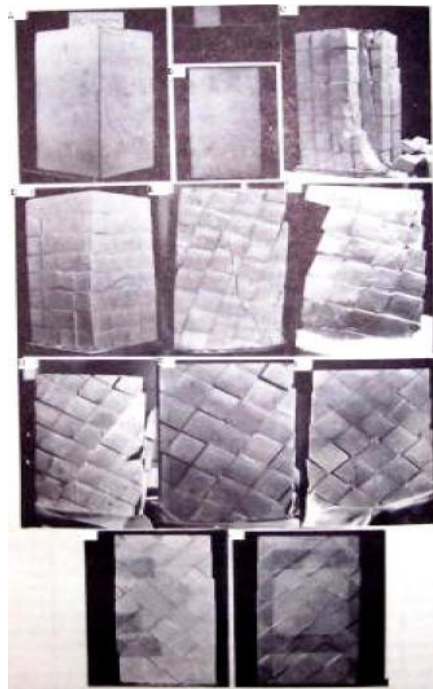
Συμπερασματικά από την διεξαγωγή του πειράματος προκύπτει ότι οι ρωγματωμένες βραχόμαζες μπορούν να επιδείξουν διαφορετικές συμπεριφορές αστοχίας κάτω από διαφορετικούς συνδυασμούς ασυνεχειών. Ο προσανατολισμός παίζει σημαντικό ρόλο στο τρόπο αστοχίας. [6]

2.3 Πειράματα διαξονικών και τριαξονικών δοκιμών.

2.3.1 Πείραμα των Brown(1970), Brown and Trollope(1970), Brown and Hudson(1972).

Ο Brown πραγματοποίησε τριαξονικές δοκιμές σε δοκίμια από γύψο μεγέθους 4x4x8 in με διάφορα συστήματα ασυνεχειών ώστε να διαμορφώνονται παραλληλεπίπεδα και εξάγωνα. Οι δοκιμές έγιναν για διάφορες τιμές πλευρικής πίεσης από 0 MPa έως 12 MPa. Παρατηρήθηκε ότι για πλευρική πίεση 12 MPa η αντοχή των δοκιμίων ήταν μεγαλύτερη από αυτή του άρρηκτου υλικού. Αυτό εξηγήθηκε από τον Brown ως επίδραση της κλίμακας διότι σε υψηλές τιμές πλευρικής πίεσης οι ασυνέχειες φαίνεται να έχουν μικρή επίδραση, έτσι η αντοχή του υλικού του άρρηκτου δοκιμίου ήταν μικρότερη από την αντοχή των τεμαχών των ρωγματομένων δοκιμίων. Ο τρόπος αστοχίας των δοκιμίων ήταν πολύπλοκα εξαρτώμενος από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των ασυνεχειών και της πλευρικής πίεσης. Στη περίπτωση της μονοαξονικής δοκιμής ο μηχανισμός αστοχίας που κυριαρχεί είναι οι αξονικές κατακλάσεις και δευτερευόντως η αποδόμηση του δοκιμίου λόγω πλευρικών μετατοπίσεων τεμαχών. Για μεγάλες τιμές πλευρικής πίεσης η αστοχία επέρχεται με την ανάπτυξη συζυγών διατμητικών επιπέδων αστοχίας μέσα στο άρρηκτο υλικό.

Οι Brown και Trollope πραγματοποίησαν δοκιμές τριαξονικής θλίψης σε ίδια διαστάσεων δοκίμια αλλά με τρεις οικογένειες ασυνεχειών εκ των οποίων η τρίτη παρέμενε πάντα κάθετη. Παρακάτω φαίνονται διάφοροι τρόποι αστοχίας αλλά και ο πίνακας που περιγράφει το μηχανισμό αστοχίας για κάθε δοκίμιο.



Φωτογραφία 2.7: Τρόποι αστοχίας δοκιμίων Brown and Trollope, 1970

σ_3 (MPa)	0	1.2	3	6	12
Άρρηκτο	Αξονικές κατακλάσεις άρρηκτου υλικού	Διατμητική θραύση σε επίπεδο 60° κλίσης ως προς την οριζόντιο	Διατμητική θραύση σε επίπεδο 60° κλίσης ως προς την οριζόντιο (A)	Διατμητική θραύση σε πολλαπλά συζυγή επίπεδα	Διατμητική θραύση σε πολλαπλά συζυγή επίπεδα(B)
0/90	Αξονικές κατακλάσεις άρρηκτου υλικού(C)	Αξονικές κατακλάσεις άρρηκτου υλικού	Διατμητική θραύση σε επίπεδο 60° κλίσης ως προς την οριζόντιο	Διατμητική θραύση σε πολλαπλά συζυγή επίπεδα(D)	Διατμητική θραύση σε πολλαπλά συζυγή επίπεδα
15/75	Ολίσθηση υπό το ίδιο βάρος στο επίπεδο των 75°	Διατμητική ολίσθηση και στα δυο επίπεδα ασυνεχειών	Διατμητική θραύση σε διαγώνιο επίπεδο (E)	Διατμητική θραύση σε πολλαπλά συζυγή επίπεδα(F)	Διατμητική θραύση σε πολλαπλά συζυγή επίπεδα
30/60	Ολίσθηση υπό το ίδιο βάρος στο επίπεδο των 60°	Ολίσθηση στο επίπεδο των 60° (G)	Ολίσθηση στο επίπεδο των 60°	Ολίσθηση στο επίπεδο των 60° (H)	Ολίσθηση στο επίπεδο των 60°
45/45	Ολίσθηση υπό το ίδιο βάρος στα επίπεδα των 45°	Διατμητική ολίσθηση και στα δυο επίπεδα ασυνεχειών (I)	Διατμητική ολίσθηση και στα δυο επίπεδα ασυνεχειών	Διατμητική ολίσθηση και στα δυο επίπεδα ασυνεχειών(J)	Διατμητική θραύση σε πολλαπλά συζυγή επίπεδα (K)

Πίνακας 2.2: με το μηχανισμό αστοχίας κάθε δοκιμίου με διαφορετικές κλίσεις ασυνεχειών και διαφορετικές τιμές πλευρικής πίεσης.

Οι Brown και Hudson (1972) μελέτησαν την προοδευτική αστοχία κερματισμένου δοκιμίου από γύψο αποτελούμενο από 40 τεμάχια συμπαγούς υλικού. Συμπέραναν ότι η παρουσία των ασυνεχειών προκαλεί τέτοια ανακατανομή των τάσεων ώστε μειώνεται η αντοχή ενός ρωγματωμένου δοκιμίου σε σχέση με αυτή του άρρηκτου. Επίσης παρατήρησαν ότι η αντοχή του δοκιμίου εξαρτάται από τον αριθμό των ασυνεχειών αλλά και του σχήματος των τεμαχίων όπου αποτελείται. [1]

2.3.2 Πειράματα των Einstein et al.(1970) και Einstein and Hirschfield (1973).

Οι Einstein et al. και ο Hirschfield πραγματοποίησαν δοκιμές τριαξονικής θλίψης σε δοκίμια 2x3x8 in με διάφορους συνδυασμούς ασυνεχειών. Συμπέραναν ότι για μικρές τιμές πλευρικής πίεσης η αστοχία επερχόταν με διατμητικές ολισθήσεις σε επίπεδο ασυνέχειας ή στο άρρηκτο υλικό. Για μεγάλες πλευρικές πιέσεις η αστοχία λάμβανε χώρα σε πολλές παράλληλες επιφάνειες οι οποίες δε περιείχαν απαραίτητα επίπεδα αδυναμίας. Η αντοχή του υλικού είναι συνάρτηση της κλίσης των ασυνεχειών εκτός από την περίπτωση επιβολής πολύ υψηλής τιμής πλευρικής πίεσης όπου η αντοχή του κερματισμένου υλικού έφτανε αυτή του άρρηκτου ανεξάρτητα από το προσανατολισμό και την απόσταση των επιπέδων αδυναμίας. Τέλος παρατηρήθηκε για χαμηλές τιμές πλευρικής πίεσης η συμπεριφορά των ομοιωμάτων ήταν ψαθυρή ενώ για υψηλές μετατρέπεται σε όλκιμη.[1]

2.3.3 Πειράματα των Landanyi και Archambault (1972,1980)

Οι Landanyi και Archambault δημιούργησαν προσομοιώματα διαστάσεων 50x100x15cm με εμμένουσες και μη εμμένουσες ασυνέχειες. Οι μηχανισμοί αστοχίας ήταν συναρτησείς της κλίσης των συστημάτων ασυνεχειών. Για γωνίες 15° έως 45° δημιουργήθηκαν ζώνες περιστροφικής παραμόρφωσης ενώ για γωνίες 0° έως 7° και 77° έως 90° η αστοχία επερχόταν μέσω επιπέδου διάτμησης. Ζώνες διατμητικής αστοχίας παρατηρήθηκαν στις υπόλοιπες γωνίες. Ο βαθμός αλληλεμπλοκής είναι ο κύριος παράγοντας που καθορίζει τη δυνατότητα περιστροφής των τεμαχών άρα επηρεάζει σημαντικά την αντοχή. Ο βαθμός αλληλεμπλοκής των τεμαχών εξαρτάται από το σχήμα τους και το βαθμό διαταραχής της βραχόμαζας.

Οι ίδιοι ερευνητές πραγματοποίησαν δοκιμές διαξονικής θλίψης σε δοκίμια με μη εμμένουσες ασυνέχειες για τρεις τιμές πλευρικής πίεσης. Σε σύγκριση με το προηγούμενο πείραμα συμπεράνα ότι η αντοχή ήταν παρόμοια μόνο για γωνίες κλίσης ασυνεχειών 0° και 30°. Σε όλες τις υπόλοιπες γωνίες η αντοχή του δοκιμίου με τις εμμένουσες ασυνέχειες είναι μικρότερη από αυτήν του δοκιμίου με τις μη εμμένουσες. Αυτό σύμφωνα με τους ερευνητές οφείλεται στους διαφορετικούς μηχανισμούς αστοχίας. Ο μηχανισμός αστοχίας και η αντοχή της κερματισμένης βραχόμαζας εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ομοιομορφία των τεμαχών του άρρηκτου υλικού και την εμμονή των ασυνεχειών. Τέλος παρατηρήθηκε ότι η αστοχία των δοκιμίων με τις μη εμμένουσες ασυνέχειες ήταν προοδευτική.[1]

2.3.4 Πειράματα των Bandis et al.(1981) και Bandis (1990).

Οι Bandis et al. εκτέλεσαν δοκιμές διαξονικής θλίψης σε δοκίμια ψαθυρού υλικού σε συνθήκες επίπεδης τάσης, στα οποία δημιουργήθηκαν ασυνέχειες με κατάλληλη κοπή. Έτσι το δοκίμιο 1 αποτελούταν από 4000 τεμάχια το 2 από 1000 και το 3 από 250 τεμάχια άρρηκτου υλικού. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το δοκίμιο με τα περισσότερα τεμάχια είχε τη μεγαλύτερη αντοχή ενώ αστόχησε με ζώνες περιστροφικής παραμόρφωσης. Αντίθετα τα δοκίμια 2 και 3 αστόχησαν με διατμητική ολίσθηση. Το συμπέρασμα της δοκιμής είναι όταν ο αριθμός των τεμαχών του άρρηκτου υλικού αυξηθεί σημαντικά, τότε συμβαίνει μεταβολή στη συμπεριφορά του δοκιμίου. Οι περιστροφές των τεμαχών ενεργοποιούν μηχανισμούς περιστροφικής διάτμησης με αποτέλεσμα το καλύτερο αλληλοκλείδωμα των τεμαχών και κατά συνέπεια αύξηση της αντοχής του δοκιμίου.

Ο Bandis πραγματοποίησε αντίστοιχες δοκιμές όπου τα δυο δοκίμια είχαν διαφορετικό μέγεθος τεμαχών άρρηκτου υλικού. Το δοκίμιο με τα περισσότερα τεμάχια εμφάνισε μεγαλύτερη αντοχή και η αστοχία οφειλόταν σε περιστροφές των τεμαχών άρρηκτου υλικού. Ενώ το άλλο δοκίμιο αστόχησε σε διατμητικές ολισθήσεις ασυνεχειών. Σύμφωνα με τον ερευνητή η παραπάνω συμπεριφορά είναι αποτέλεσμα της επίδρασης της κλίμακας. Σύμφωνα με τον Bandis (1990) η παραπάνω συμπεριφορά είναι αποτέλεσμα της κλίμακας, όταν τα τεμάχια του άρρηκτου υλικού έχουν τη δυνατότητα να κινηθούν ανεξάρτητα και να έχουν επαφή με όλες τις κλίμακες της τραχύτητας. Οι απαιτούμενοι βαθμοί ελευθερίας των τεμαχών για να συμβεί αυτό, δύναται να υπάρχουν σε περιπτώσεις έντονα κερματισμένης βραχόμαζας που βρίσκεται επιφανειακά ή σε μικρό βάθος, ή με άλλα λόγια για μικρές τιμές ορθής τάσης.[1]

2.3.5 Πειράματα των Szymakowski et al. (2003)

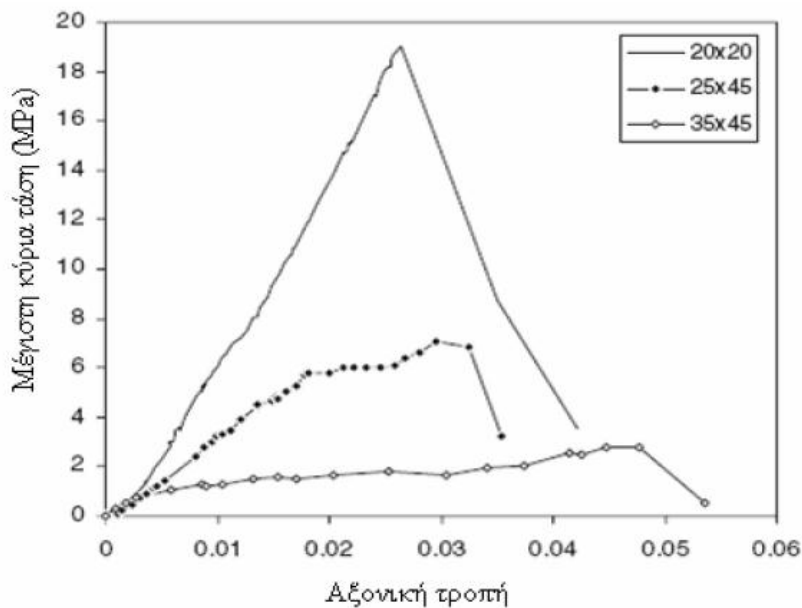
Σε κερματισμένα δοκίμια διαστάσεων 39x28x27 cm με διαφορετική απόσταση ασυνεχειών παρουσίασαν τα αποτελέσματα διατμητικών δοκιμών. Από τη μελέτη κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι βραχόμαζες με μεγάλα τεμάχια άρρηκτου υλικού παρουσιάζουν μεγαλύτερη αντοχή από αντίστοιχες με μικρότερα τεμάχια άρρηκτου πετρώματος.[1]

2.3.6 Πειράματα των Meyers και Priest (1992)

Σε δοκίμια από γύψο ύψους 300 mm και πλάτους 150 mm διεξήγαγαν τριαξονικές δοκιμές θλίψης με πλευρική πίεση 1 MPa. Από τα αποτελέσματα διαπίστωσαν ότι η συμπεριφορά και η αντοχή των κερματισμένων δοκιμών είναι συνάρτηση της κλίσης των ασυνεχειών και της αντοχής του άρρηκτου υλικού. Το δοκίμιο με το μεγαλύτερο αριθμό ασυνεχειών παρουσίασε τη μεγαλύτερη αντοχή αστοχώντας σε διατμητική θραύση άρρηκτου υλικού και ασυνέχειας.[1]

2.3.7 Πειράματα των Kulatikale et al. (2001)

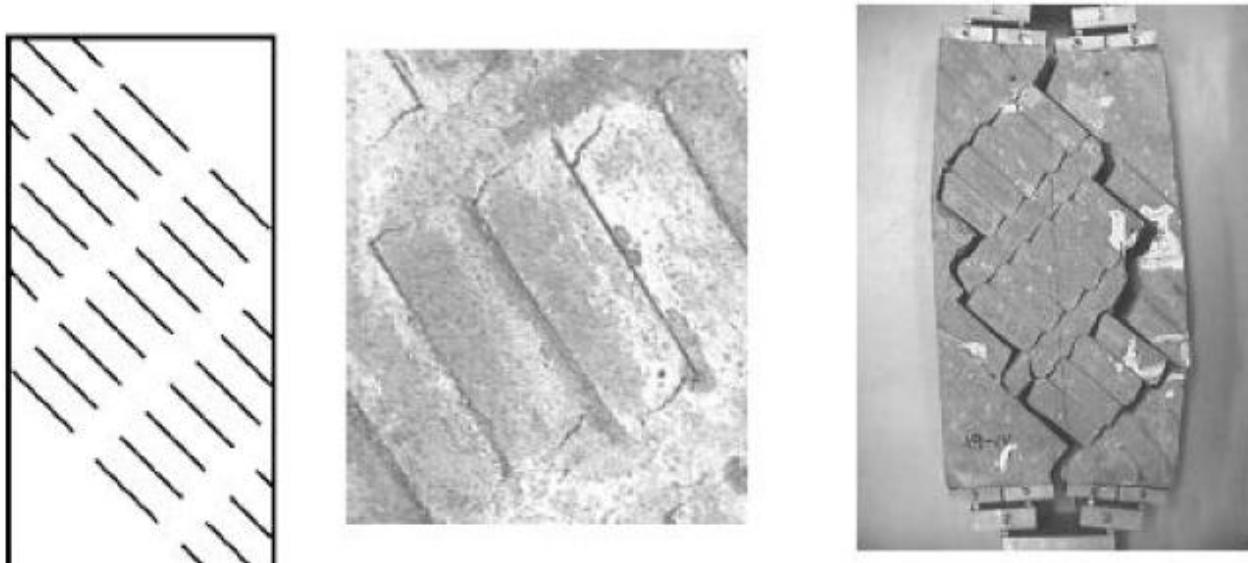
Για τη διεξαγωγή του πειράματος χρησιμοποίησαν φυσικά δοκίμια διαστάσεων 35,6x17,8x2,5 cm με διάφορους συνδυασμούς ασυνεχειών σε μονοαξονική και διαξονική θλίψη. Τα αποτελέσματα των πειραμάτων επέδειξαν τρεις μηχανισμούς αστοχίας. Θραύση του άρρηκτου υλικού όπου για μικρές τιμές πλευρικής τάσης ήταν κάθετη στην ελάχιστη κύρια τάση (αξονική κατάκλαση) ενώ για μεγαλύτερες πλευρικές πιέσεις προσανατολιζόταν διαγώνια ως προς την ελάχιστη κύρια τάση. Ολίσθηση κατά μήκος των ασυνεχειών όπου ο μηχανισμός αυτός δεν δημιουργήθηκε σε υψηλές πλευρικές πιέσεις και χαρακτηρίστηκε από κινήσεις του άρρηκτου υλικού παράλληλα ή κάθετα στα επίπεδα των ασυνεχειών. Τέλος ο συνδυασμός των δυο αυτών μηχανισμών όπου περιλάμβανε αστοχία άρρηκτου υλικού και ασυνεχειών. [1]



Σχήμα 2.17: Διάγραμμα 3 διαφορετικών μηχανισμών αστοχίας.

2.3.8 Πειράματα των Sint Jan και Prudencio (2003)

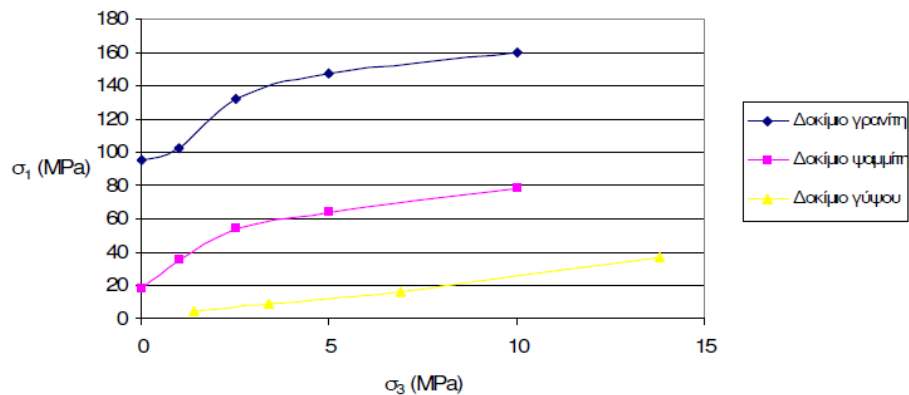
Πραγματοποίησαν τη μελέτη σε φυσικά δοκίμια με μη εμμένουσες ασυνέχειες διαστάσεων 30x15x5 cm . Τα δοκίμια περιείχαν είτε ένα σύστημα μη εμμενουσών ασυνεχειών είτε δύο συστήματα ένα με εμμένουσες και ένα με μη εμμένουσες για διάφορες κλίσεις. Σε όλα τα πειράματα κυριαρχούν μηχανισμοί αστοχίας με περιστροφές των τεμαχών να κυριαρχούν ενώ σε υψηλές πλευρικές πιέσεις αστοχούσε το άρρηκτο υλικό. [1]



Φωτογραφία 2.8: Χαρακτηριστικός τρόπος αστοχίας δοκιμίου.

2.3.9 Πειράματα των Yaji (1984) και Aroga (1987).

Ο Yaji πραγματοποίησε δοκιμές τριαξονικής θλίψης σε φυσικά δοκίμια γύψου, γρανίτη και ψαμμίτη για διάφορες τιμές της πλευρικής πίεσης. Παρατήρησε ότι ο μηχανισμός αστοχίας εξαρτάται από τη πλευρική πίεση και το προσανατολισμό των ασυνεχειών. Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνονται οι περιβάλλουσες αστοχίας για τρία δοκίμια.



Σχήμα 2.18: Περιβάλλουσες αστοχίας δοκιμίων Yaji.

Αντίστοιχες δοκιμές πραγματοποίησε και ο Aroga όπου παρατήρησε ότι οι παράγοντες που επηρεάζουν την αντοχή είναι η συχνότητα, ο προσανατολισμός και η αντοχή των ασυνεχειών. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα η αύξηση του αριθμού των ασυνεχειών ανά μέτρο οδηγεί σε αύξηση της αντοχής του δοκιμίου.[1]

2.3.10 Πειράματα των Reik και Zacas (1978)

Οι Reik και Zacas κατασκεύασαν δοκίμια διαστάσεων 60x60x130 cm με τρία συστήματα ασυνεχειών κάθετα μεταξύ τους από ελαφρύ σκυρόδεμα και από μίγμα γύψου με άμμο για να μελετήσουν την επίδραση της ενδιάμεσης κύριας τάσης. Διαπίστωσαν ότι η επίδραση της ενδιάμεσης κύριας τάσης στην αντοχή των δοκιμίων ήταν μεγάλη καθώς για αύξηση από 0.4 MPa στα 1.2 MPa η αντοχή αυξήθηκε μέχρι και 200%. Σύμφωνα με τους ερευνητές αυτούς όταν ένα σύστημα ασυνεχειών είναι παράλληλο στην ενδιάμεση κύρια τάση τότε η επιρροή είναι μικρή αντίθετα με τις άλλες διευθύνσεις που είναι μεγάλη. Τέλος έκριναν ότι κριτήρια αστοχίας που δε λαμβάνουν υπόψη την ενδιάμεση κύρια τάση δε μπορούν να προβλέψουν με ακρίβεια την αντοχή της βραχόμαζας.[8]

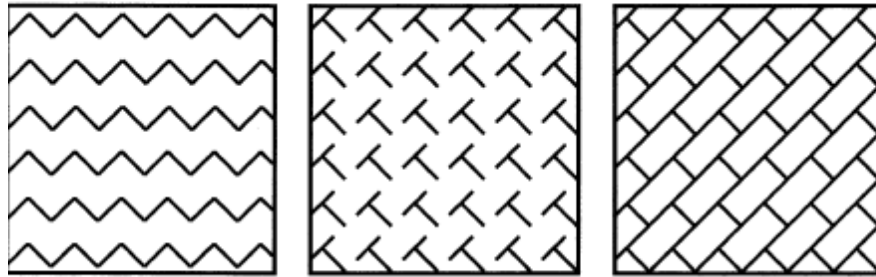
2.3.11 Πειράματα των M. Prudencio και M. Van Sint Jan (2007)

Τα δοκίμια της έρευνας κατασκευάστηκαν από τσιμέντο, άμμο και νερό σε αναλογία 4000/1000/1235 κατά βάρος. Πραγματοποιήθηκαν δοκιμές διαξονικής θλίψης σε δοκίμια 30x15x5 cm. Παρατηρήθηκαν τρεις τρόποι αστοχίας. Αστοχία επιπέδου, προοδευτική αστοχία και περιστροφή τεμαχίων. Συμπεράναν ότι η κατανομή της τάσης που σχετίζεται με το προσανατολισμό των ασυνεχειών και την τιμή της πλευρικής πίεσης οδηγούν σε διαφορετικούς τρόπους αστοχίας. Δείγματα με απότομη κλίση μη εμμενουσών ασυνεχειών αστοχούν σε επίπεδο. Για χαμηλή πλευρική πίεση όταν η γωνία κλίσης των ασυνεχειών είναι 90° μπορεί να επιφέρει προοδευτική αστοχία. Όταν έχουμε αστοχία των γεφυρών του άρρηκτου υλικού τότε μειώνεται η αντοχή του δοκιμίου κατά πολύ με αποτέλεσμα το διαχωρισμό σε τεμάχια που μπορούν και περιστρέφονται.

Η προοδευτική αστοχία αλλά και αστοχία επιπέδου συνδέθηκαν με υψηλές τιμές αντοχής και ψαθυρή συμπεριφορά. Αντίθετα αστοχία με περιστροφή συνδέθηκε με χαμηλές αντοχές και όγκιμες συμπεριφορές.[7]

2.3.12 Πειράματα των Muller.

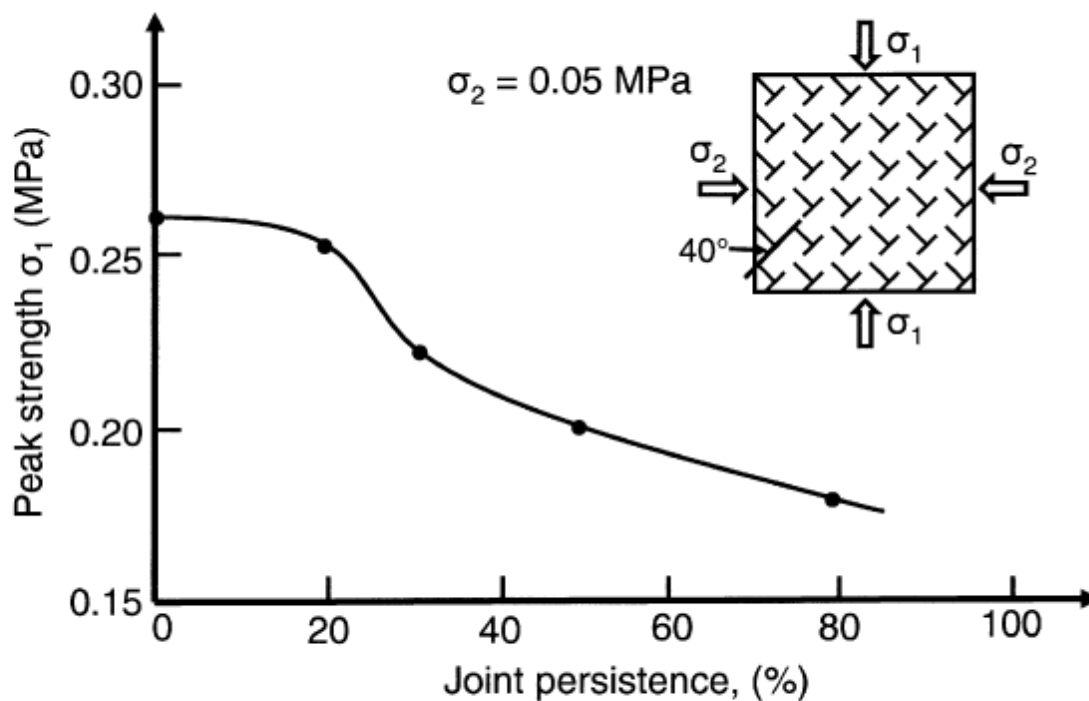
Μέσω της συμπίεσης και της θέρμανσης ο Muller και οι συνεργάτες του κατασκεύασαν δοκίμια από άμμο, βαρύτη και οργανικό πολυμερές. Έδειξαν ότι όταν ο λόγος του μεγέθους της βραχόμαζας προς την απόσταση των ασυνεχειών είναι μεγαλύτερος από την τιμή 10, τότε η αντοχή και η παραμορφωσιμότητα είναι σταθερές και δεν έχει επίδραση η κλίμακα. Τα μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν είχαν διαστάσεις 50x50x7 cm. Οι ασυνέχειες είχαν διαμορφωθεί με τρεις διαφορετικούς τρόπους όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 2.19: Τρεις τρόποι διαμόρφωσης των ασυνεχειών των δοκιμίων.

Εφαρμόστηκε η μέγιστη κύρια τάση από διάφορες μεριές. Στη κατεύθυνση όπου διατρέχουν κάθετα οι ασυνέχειες το δοκίμιο παρουσίαζε χαμηλή παραμορφωσιμότητα και υψηλή θλιπτική αντοχή επειδή έκλειναν οι ασυνέχειες. Όταν η μέγιστη κύρια τάση εφαρμοζόταν παράλληλη με τη φορά που διατρέχουν οι ασυνέχειες η πλευρική παραμόρφωση ήταν μεγάλη και το δοκίμιο αστοχούσε με διαχωρισμό τεμαχών. Σε αυτή τη περίπτωση η αντοχή ήταν μικρότερη από τη προηγούμενη. Λόγω της μεγάλης ποικιλίας στο προσανατολισμό των ασυνεχειών είχαν διάφορους μηχανισμούς αστοχίας. Επίσης μελετήθηκε η επίδραση της εμμονής των ασυνεχειών στην αντοχή της βραχόμαζας όπου τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο παρακάτω διάγραμμα.

Physical Modelling of Jointed Rock Mass



Σχήμα 2.20: Επίδραση της εμμονής στην αντοχή της βραχόμαζας.

Επίσης μελετήθηκε η βραχόμαζα με γέφυρες άρρηκτου υλικού. Χρησιμοποιήθηκε γύψος, διατομίτης και νερό για τη κατασκευή των δοκιμίων. Η ορθή τάση κρατείται σταθερή και η οριζόντια διατμητική εφαρμόζεται βαθμιαία μέχρι να επέλθει αστοχία και παρατηρήθηκαν διάφοροι μηχανισμοί δημιουργίας και διάδοσης ρωγμών. Για δείγματα με μικρή εμμονή ασυνεχειών και μέση κάθετη τάση η αστοχία ήρθε με περιστροφή τεμαχών. Δείγματα με μέση εμμονή ασυνεχειών και υψηλή κάθετη τάση εμφάνισαν παρόμοια συμπεριφορά. Τέλος τα δείγματα με μεγάλη εμμονή ασυνεχειών και υψηλή κάθετη τάση αστόχησαν σε καθαρή διατμητική αστοχία.

Στη δεύτερη φάση του πειράματος κατασκευάστηκαν δοκίμια από άμμο, βαρύτη, κολοφώνιο και αλκοόλη και ασυνέχειες με μεμβράνες πολυαιθυλενίου. Οι μέθοδοι δοκιμής είναι ίδιες με του προηγούμενως. Τα αποτελέσματα έδειξαν μείωση της διατμητικής αντοχής δοκιμίου με αύξηση της εμμονής. [9]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΑΚΟΥΣΤΙΚΗ ΕΚΠΟΜΠΗ

3. ΑΚΟΥΣΤΙΚΗ ΕΚΠΟΜΠΗ

3.1 Εισαγωγή

Η ακουστική εκπομπή (ΑΕ) είναι μια μέθοδος μη καταστροφικού ελέγχου και βασίζεται στη μετατροπή των ελαστικών κυμάτων σε ηλεκτρικά σήματα. Σύμφωνα με τον ορισμό της ISRM (2002) ως ακουστική εκπομπή ορίζονται τα μεταβατικά ελαστικά κύματα που δημιουργούνται με την ταχεία απελευθέρωση της ενέργειας από τοπικές πηγές στο εσωτερικό ενός υλικού.

Η πηγή των κυμάτων μπορεί να είναι τοπική μετατόπιση που συνοδεύει τη πλαστική παραμόρφωση ή την έναρξη και διάδοση αστοχίας στο υλικό. Πηγές των κυμάτων μπορεί να δημιουργηθούν κατά τη τήξη ενός υλικού και την αλλαγή φάσεως λόγω θερμικών τάσεων.

Στα ψαθυρά υλικά και συγκεκριμένα στα πετρώματα κατά την φόρτιση τους δημιουργείται συγκέντρωση των τάσεων γύρω από μικροσκοπικές ρωγμές ή ατέλειες του υλικού. Όταν ο συντελεστής συγκέντρωσης τάσεων υπερβεί μια οριακή τιμή η συσσωρευμένη ελαστική ενέργεια απελευθερώνεται απότομα, ανάλογα με τη ψαθυρότητα του υλικού και το ποσοστό της ελαστικής παραμόρφωσης σε σχέση με τη πλαστική στη περιοχή της αυξημένης συγκέντρωσης τάσεων.

Η απελευθερούμενη ενέργεια διαδίδεται μέσα στο πέτρωμα με τη μορφή ελαστικών κυμάτων και το φαινόμενο αυτό ορίζεται ως Ακουστική εκπομπή. Στα πετρώματα η προέλευση της ακουστικής εκπομπής σχετίζεται με ολίσθηση μεταξύ των κόκκων του ή με την έναρξη διάδοσης μικρορωγμών στη δομή του όταν βρίσκεται υπό ένταση. Το παραγόμενο σήμα προέρχεται από το ίδιο το πέτρωμα και όταν δεν βρίσκεται υπό φόρτιση δεν παρατηρείται το φαινόμενο.

Τα κύματα της ΑΕ διαδίδονται μέσα στο πέτρωμα και μπορούν να ανιχνευτούν από αισθητήρες (συνήθως πιεζοηλεκτρικών κρυστάλλων) οι οποίοι έρχονται σε επαφή με το πέτρωμα, συνήθως με τη βοήθεια ενός παχύρευστου υγρού και μετατρέπουν τα ελαστικά τασικά κύματα σε ηλεκτρικά όπου αυτά με κατάλληλα σχεδιασμένα συστήματα ΑΕ ενισχύονται και υφίστανται μια επεξεργασία. Η τεχνική αυτή ονομάζεται Τεχνική της Ακουστικής Εκπομπής (ΑΕΤ). Τα σήματα της ΑΕ κυμαίνονται σε ένα εύρος τιμών από 15kHz έως μερικά MHz. Σε αντίθεση με το όνομα της τεχνικής τα σήματα ελέγχονται σε εύρος υπερήχων.

Στη μηχανική των πετρωμάτων η αρχή της εφαρμογής της ΑΕΤ έγινε από τις μελέτες των Obert και Duvall (1942) για τη πρόβλεψη των βίαιων εκτινάξεων των πετρωμάτων σε βαθιά ορυχεία στα τέλη της δεκαετίας του 1930.

Μια από τις πιο σημαντικές μελέτες θεωρούνται αυτή του Kaiser (1950) ο οποίος παρατήρησε ότι τα υλικά έχουν «μνήμη» των εφαρμοσμένων σε αυτά τάσεων. Το φαινόμενο είναι γνωστό ως φαινόμενο Kaiser (Lanron,2003).

Οι πρώτες έρευνες εστιάθηκαν στη μελέτη του μηχανισμού γένεσης και διάδοσης των ελαστικών κυμάτων στα πετρώματα και στη σχέση των παραμέτρων ΑΕ με τη φόρτιση ή με τη παραμόρφωση του πετρώματος.[2]

3.2 Εφαρμογές της Τεχνικής της Ακουστικής Εκπομπής.

Στη μηχανική των πετρωμάτων η ΑΕΤ έχει εφαρμοσθεί κυρίως σε δυο πεδία. Το πρώτο περιλαμβάνει την μελέτη του μηχανισμού θραύσης των ψαθυρών πετρωμάτων με την ανάλυση των παραμέτρων ΑΕ και τον εντοπισμό της θέσης της πηγής της ΑΕ. Το δεύτερο πεδίο περιλαμβάνει τη μελέτη της εντατικής κατάστασης επί τόπου πετρώματος με τη χρήση του φαινομένου Kaiser.

Από εργαστηριακές μελέτες (Lockner,1993) όπου συσχετίζουν τις παραμέτρους της ΑΕ με την επερχόμενη θραύση ενός δοκιμίου, ενώ η ανάπτυξη της θραύσης μέσα στο δοκίμιο παρακολουθείται με τον εντοπισμό της θέσης της πηγής των γεγονότων της ΑΕ, βρήκαν εφαρμογή μέθοδοι της σεισμολογίας θεωρώντας ότι η γένεση των ακουστικών κυμάτων είναι αντίστοιχη με τη γένεση των σεισμικών σε διαφορετική κλίμακα.

Η ΑΕΤ είναι γνωστή και ως εργαλείο για το μη καταστροφικό έλεγχο (NDT) στη βιομηχανία όπου χρησιμοποιείται για την επιτόπια ανίχνευση της εξέλιξης των ρωγμών και τον έλεγχο ασφάλειας κατασκευών (κυρίως μεταλλικών). Σημαντικό ρόλο στην αυξανόμενη αποδοχή και χρήση της ΑΕΤ στην έρευνα και στη βιομηχανία έχει η ανάπτυξη της μικροηλεκτρονικής και των τεχνικών καταγραφής, ανάλυσης και επεξεργασίας με Η/Υ.

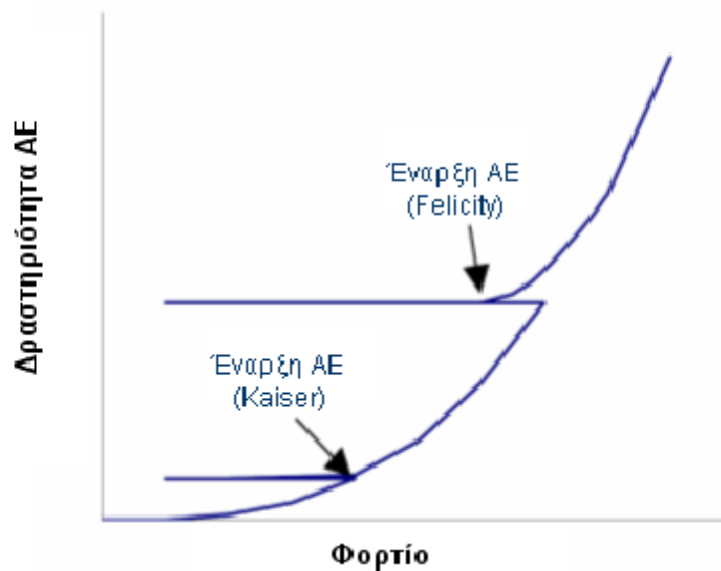
Σημαντικό πεδίο εφαρμογής της ΑΕ επί τόπου αποτελούν τα υπόγεια μεταλλεία μεγάλου βάθους, όπου υφίσταται ο κίνδυνος της βίαιης εκτίναξης των περιβαλλόντων πετρωμάτων. Σε αυτό το πρόβλημα εστιάσθηκαν και οι πρώτες έρευνες των Obert και Duvall, όπως προαναφέρθηκε.

Επιπλέον στα υπόγεια μεταλλεία υπάρχει η ανάγκη για τη πρόβλεψη ενδεχόμενων αστοχιών οροφής έτσι ώστε η έκθεση των εργαζομένων και του εξοπλισμού στο κίνδυνο να ελαχιστοποιείται. Για αυτό το σκοπό έχουν υιοθετηθεί διάφορες μέθοδοι παρακολούθησης της συμπεριφοράς του πετρώματος, με πιο συνήθη μέθοδο αυτή της μέτρησης της κάμψης της οροφής. Η εφαρμογή της ΑΕ ως μέσου πρόβλεψης καταπτώσεων της οροφής των υπόγειων μεταλλευτικών εκσκαφών ερευνάται σήμερα με ολοένα και μεγαλύτερο ενδιαφέρον. Οι Iannachione et al.(2000,2005) αναφέρουν τη δυνατότητα εφαρμογής της ΑΕ για την επιτυχή πρόβλεψη επικείμενης αστοχίας σε υπόγεια λατομεία θαλάμων και στύλων ασβεστόλιθου υπό υψηλές οριζόντιες τάσεις και σε υπόγεια ανθρακωρυχεία με μέθοδο εκμετάλλευσης τα επιμήκη μέτωπα. Σε όλες τις περιπτώσεις η ακουστική δραστηριότητα αυξήθηκε πριν από την επικείμενη αστοχία. Καθοριστικός παράγοντας στην επιτυχή πρόβλεψη είναι η μορφή της αστοχίας (προοδευτική ή επεισοδιακή) και το εάν δίνει πρόδρομα φαινόμενα ή όχι. Οι Choudhurry et al.(2004) αναφέρουν την εφαρμογή της ΑΕ για τη μελέτη της ευστάθειας προστατευτικού στύλου οροφής σε υπόγειο μεταλλείο χαλκού. Ο Mukhopadhyay (2001) συσχέτισε τη ποιότητα της βραχόμαζας με την εξασθένιση των ακουστικών κυμάτων κατά την κρουστικοπεριστροφική διάτρηση σε μέτωπα υπόγειων στοών εξετάζοντας παράλληλα και την επίδραση της κοχλίωσης.

Άλλες εφαρμογές της ΑΕ in situ έχουν αναφερθεί σε σήραγγες, σε πρανή, στη μελέτη της ζώνης διαταραχής στο υπόγειο εργαστήριο UCL του Καναδά, στη μελέτη της ρωγμάτωσης σε βαθιές γεωτρήσεις πετρελαίου και στη μέτρηση του φυσικού εντατικού πεδίου με το φαινόμενο Kaiser. [2]

3.2.1 Φαινόμενο Kaiser

Ο γερμανός ερευνητής Δρ. Joseph Kaiser (1953), ήταν ο πρώτος που παρατήρησε το φαινόμενο το οποίο φέρει και την επωνυμία του (Hardy H.R.Jr ,2003). Η ανακάλυψη έγινε όταν ο Kaiser μελετώντας την ακουστική δραστηριότητα των μετάλλων στις αρχές της δεκαετία του 1950, παρατήρησε ότι τα υλικά διατηρούν μια μνήμη από προηγούμενες εφαρμοσμένες τάσεις. Ουσιαστικά το φαινόμενο Kaiser είναι η απουσία δραστηριότητας ΑΕ, σε ένα συγκεκριμένο επίπεδο ευαισθησίας, έως ότου ξεπεραστεί το προηγούμενο μέγιστο φορτίο. Το φαινόμενο Felicity αποτελεί το αντίστροφο φαινόμενο και ως εκ τούτου ο λόγος Felicity ορίζεται από το φορτίο στο οποίο παρουσιάζεται ΑΕ δια του προηγούμενου μέγιστου φορτίου. Επομένως το φορτίο Kaiser έχει λόγο Felicity ίσο με 1. Όσο χαμηλότερος είναι ο λόγος Felicity τόσο πιο κρίσιμη θεωρείται η κατάσταση της κατασκευής υπό μελέτη.



Σχήμα 3.1: Τα φαινόμενα Kaiser και Felicity.

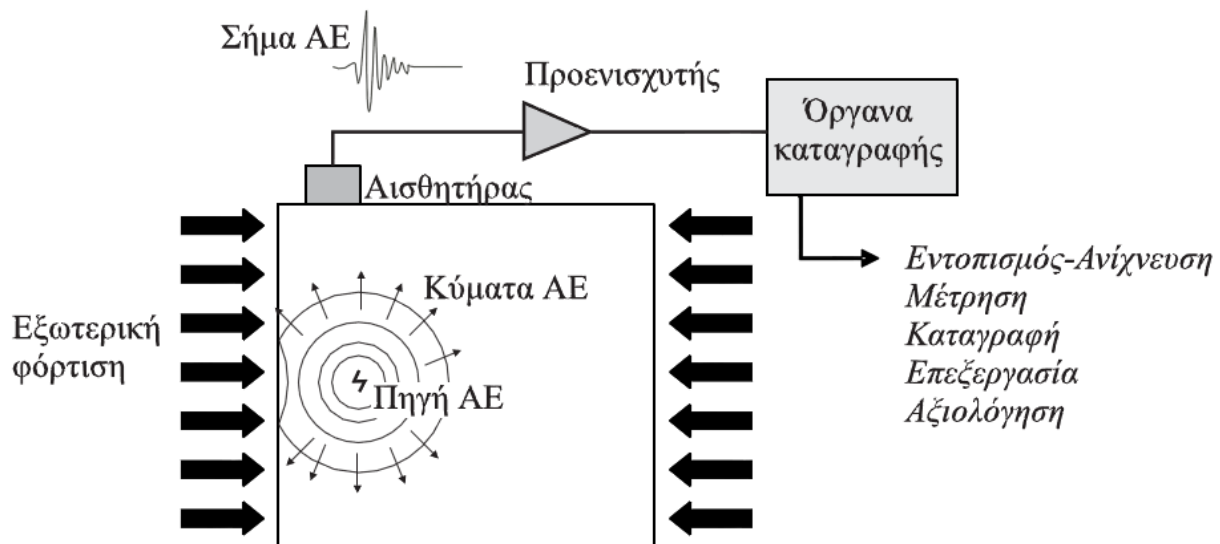
Κατά τη διάρκεια των τελευταίων δεκαετιών, η συνεχής έρευνα του φαινομένου Kaiser στα μέταλλα και τα κεραμικά και τα σύνθετα έχει επιτρέψει την υλοποίηση διάφορων πρακτικών εφαρμογών. Στο γεωτεχνικό τομέα το φαινόμενο Kaiser έχει εφαρμοστεί ως μέσο αξιολόγησης των τάσεων του φυσικού εντατικού πεδίου. Σχετική οδηγία για την εκτέλεση τέτοιων δοκιμών δίνεται σε αρχική μορφή από τη διεθνή Ένωση της Μηχανικής των Πετρωμάτων ISRM (2002).

Το φαινόμενο Kaiser παρατηρείται όταν κατά τη μηχανική φόρτιση ενός δείγματος πραγματοποιούνται ελεγχόμενοι κύκλοι φόρτισης και αποφόρτισης. Στο πρώτο κύκλο φόρτισης η τάση εφαρμόζεται στο δείγμα με σταθερό ρυθμό μέχρι σ_{max} η οποία στη συνέχεια μηδενίζεται. Στον δεύτερο κύκλο, η τάση αυξάνεται με τον ίδιο ρυθμό μέχρι τιμή σ'_{max} μεγαλύτερη της σ_{max} . Κατά τη διάρκεια του κάθε κύκλου παρακολουθείται η ακουστική δραστηριότητα και καταγράφονται οι υπερβάσεις (ή τα γεγονότα) συναρτήσει της εφαρμοσμένης τάσης. Παρατηρείται ότι σε όλη τη

διάρκεια του πρώτου κύκλου φόρτισης καταγράφεται ακουστική δραστηριότητα, ενώ κατά τη διάρκεια του δεύτερου κύκλου φόρτισης δεν παρατηρείται καμία δραστηριότητα έως ότου το επιβαλλόμενο φορτίο ξεπεράσει τη μέγιστη τάση (σ_{\max}) του πρώτου κύκλου φόρτισης. Κατά συνέπεια, το φαινόμενο Kaiser μπορεί να οριστεί ως η απουσία ανιχνεύσιμης ΑΕ μέχρι την υπέρβαση του μέγιστου εντατικού επιπέδου της προηγούμενης διαδρομής φόρτισης του υλικού.[3]

3.3 Σήματα Ακουστικής Εκπομπής

Στο παρακάτω σχήμα απεικονίζεται η διαδικασία γένεσης, διάδοσης και ανίχνευσης της ΑΕ. Ένα γεγονός ΑΕ στη πηγή προκαλεί απελευθέρωση ενέργειας η οποία διαδίδεται μέσα στο πέτρωμα ως ελαστικό τασικό κύμα. Η διάδοση του κύματος φτάνει μέχρι τα όρια του σώματος και στη συνέχεια ανιχνεύεται από τον αισθητήρα της ΑΕ, ο οποίος μετατρέπει τις μικρές επιφανειακές μετακινήσεις λόγω του κύματος σε ηλεκτρικό σήμα. Στη συνέχεια το ηλεκτρικό σήμα μεταφέρεται σε προενισχυτή και σε μονάδα επεξεργασίας.

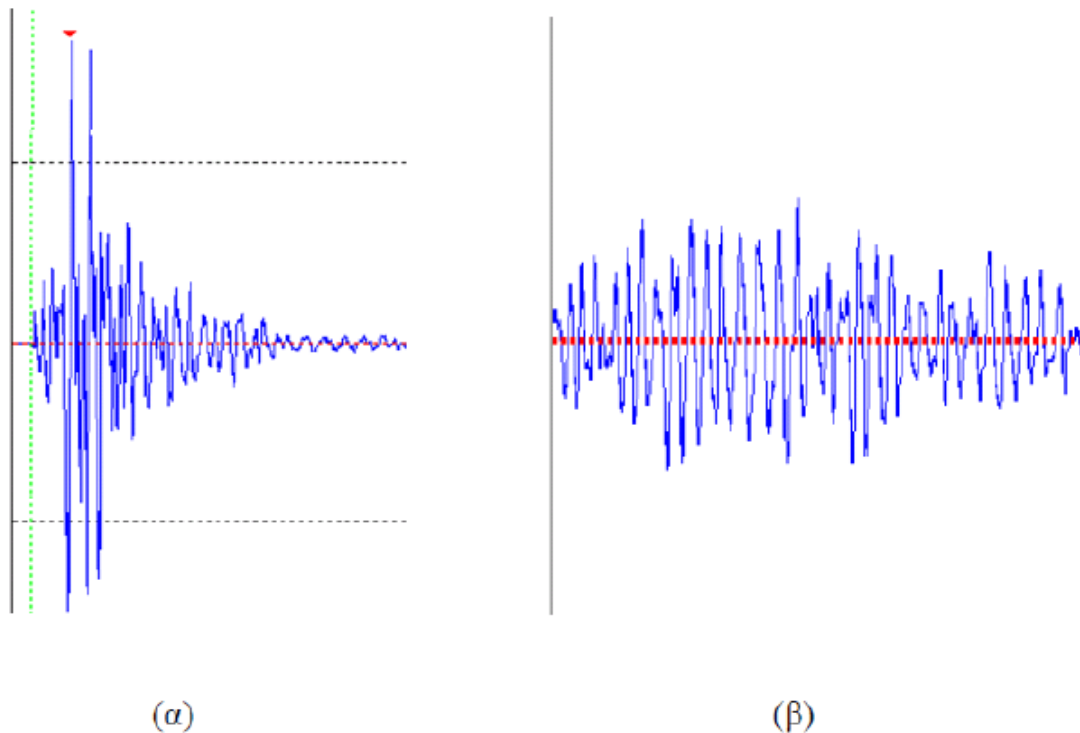


Σχήμα 3.2: Διαδικασία γένεσης, διάδοσης και ανίχνευσης της ΑΕ

Το κύμα ΑΕ στη πηγή περιέχει ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων από μερικές δεκάδες ΚHz έως μερικά MHz. Γενικά, το ανιχνεύσιμο σήμα έχει πολύπλοκη μορφή, που εξαρτάται τόσο από τα χαρακτηριστικά της πηγής και του μέσου διάδοσης (μορφή κύματος, ταχύτητα, εξασθένηση, ανακλάσεις και συμβολές) όσο και από τα χαρακτηριστικά του αισθητήρα. Αυτές οι επιδράσεις διαφοροποιούν τα ανιχνεύσιμα σήματα ΑΕ από αυτά που εκπέμπονται από την πηγή.

Η δραστηριότητα ΑΕ περιγράφεται συνήθως από παραμέτρους συσχετισμένες με το πλήθος και το μέγεθος των γεγονότων ΑΕ. Τα σήματα ΑΕ που λαμβάνει ο αισθητήρας διακρίνονται σε συνεχούς και κρουστικού τύπου. Τα δεδομένα τους διακρίνονται αντίστοιχα σε χρονικά

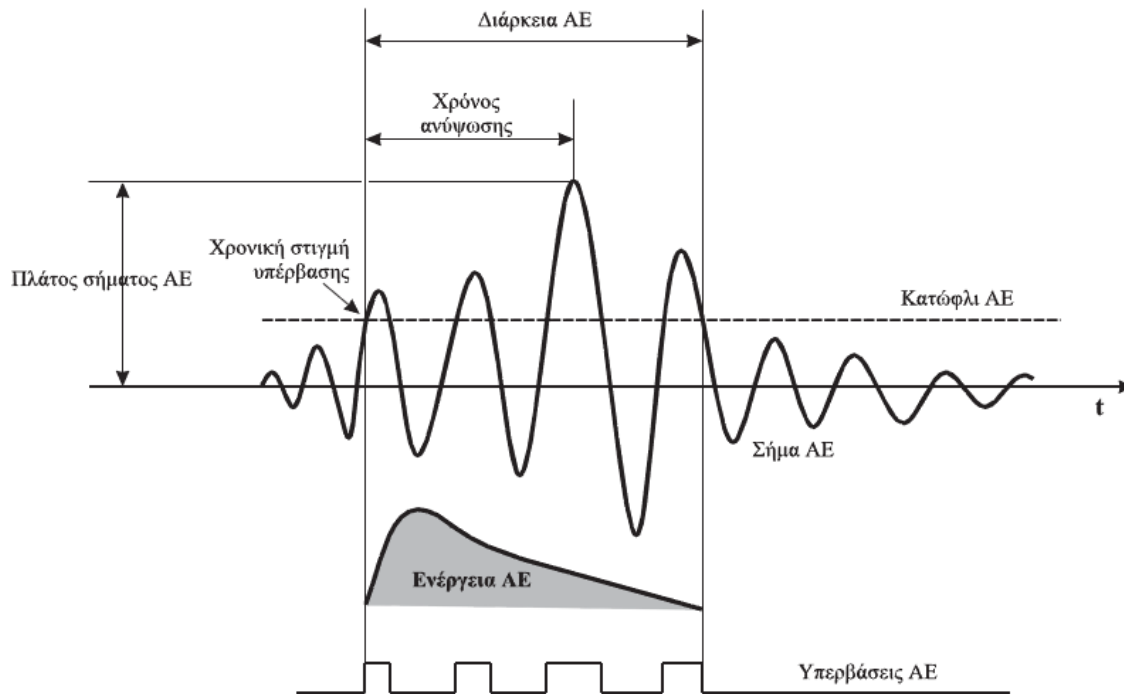
εξαρτώμενα (time driven data) και δεδομένα συσχετισμένα με τη κρουστική μορφή ενός σήματος ΑΕ (hit driven data). Ένα κρουστικό σήμα θεωρείται ως προερχόμενο από ένα διακριτό γεγονός. Όταν ο ρυθμός των γεγονότων ΑΕ είναι μεγάλος τα σήματα τους επικαλύπτονται και συνδυάζονται ώστε να σχηματίσουν σήματα συνεχούς μορφής. Στο σχήμα που ακολουθεί δίνεται ένα τυπικό παράδειγμα δυο τύπων σημάτων ΑΕ.



Σχήμα 3.3: (α) Τυπική μορφή κρουστικού σήματος ΑΕ (β) Τυπική μορφή συνεχούς σήματος ΑΕ.

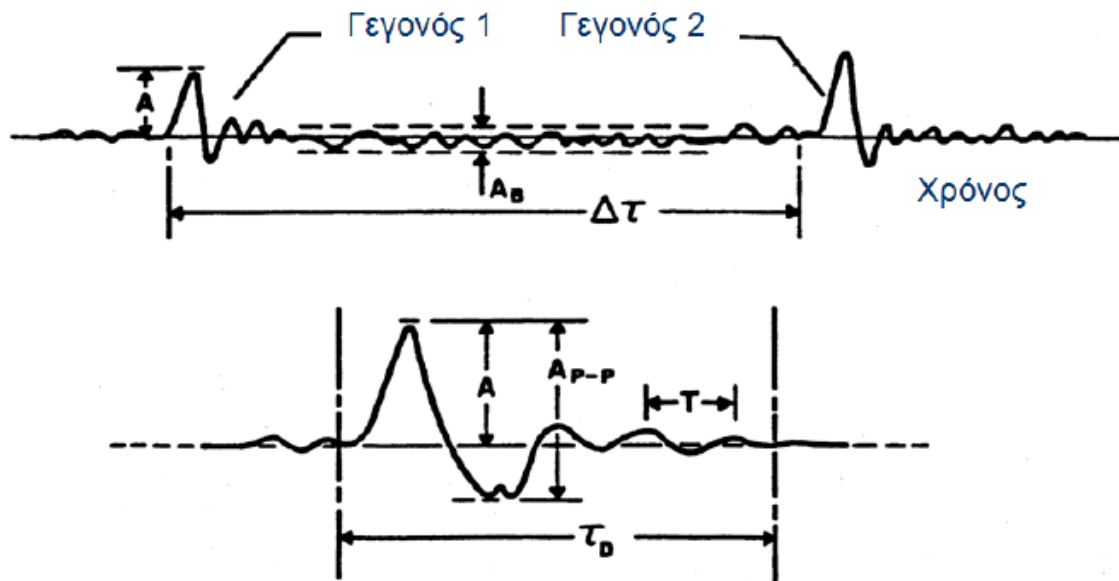
Τα σήματα συνεχούς μορφής χαρακτηρίζονται συνήθως από τη μέση τετραγωνική ρίζα του πλάτους U_{RMS} του καταγραφόμενου σήματος. Για το χαρακτηρισμό ενός κρουστικού σήματος είναι απαραίτητος ο καθορισμός μιας τάσης κατώφλιου (threshold) πάνω από το θόρυβο του περιβάλλοντος. Το κατώφλι καθορίζεται επίσης και από το πλάτος των καταγραφόμενων σημάτων ΑΕ και το επιθυμητό μέγεθος των καταγραφόμενων δεδομένων. Όταν το σήμα υπερβεί το κατώφλι τότε καταγράφεται ένας χτύπος (hit). Σε μια τυπική μελέτη ΑΕ καταγράφονται εκατοντάδες ή χιλιάδες σήματα καθιστώντας την επεξεργασία και την αξιολόγηση ιδιαίτερα χρονοβόρα. Γι' αυτό τον λόγο από κάθε κυματομορφή εξάγονται οι χαρακτηριστικές παράμετροι, που καλούνται χαρακτηριστικές παράμετροι ΑΕ. Αυτές διευκολύνουν την ανάλυση και τη σύγκριση μεταξύ των λαμβανομένων σημάτων.

Οι κύριες παράμετροι που χαρακτηρίζουν ένα σήμα κρουστικού τύπου είναι το πλάτος του σήματος (amplitude), ο χρόνος ανύψωσης (rise time) και η διάρκεια του σήματος (duration).



Σχήμα 3.4: Χαρακτηριστικά κυματομορφής γεγονότος ΑΕ.

Οι παράμετροι του σήματος της ΑΕ ορίζονται ως εξής: Διάρκεια Γεγονότος (T_D) είναι ο συνολικός χρόνος ενός μεμονωμένου γεγονότος. Ενέργεια ακουστικής εκπομπής (E) είναι το τετράγωνο του πλάτους του γεγονότος. Κατώφλι (threshold) είναι το όριο πάνω από το οποίο καταγράφονται σήματα. Χτύπος (hit) είναι κάθε φορά που το σήμα υπερβαίνει το κατώφλι. Λόγος σήματος προς θόρυβο (SNR) είναι ο λόγος του πλάτους του γεγονότος και του πλάτους του παρασιτικού θορύβου προς το πλάτος του παρασιτικού θορύβου. Η περίοδος (T) είναι ο χρόνος μεταξύ δυο διαδοχικών μεγίστων (peaks) του γεγονότος. Πλάτος - εύρος σήματος ακουστικής εκπομπής (A) είναι η μέγιστη τιμή κάθε καταγραμμένου γεγονότος εκφρασμένη σε dB ή η μέγιστη διαφορά δυναμικού της κυματομορφής ΑΕ. Αποτελεί μέτρο μεγέθους του σήματος και ορίζεται από την σχέση $\text{dB} = 20 \log(V_{\max}/1\mu\text{Volt})$ (Ενίσχυση προ-ενισχυτή σε dB). Το πλάτος μεταξύ δυο μεγίστων (A_{p-p}) είναι το πλάτος μεταξύ της μέγιστης θετικής και μέγιστης αρνητικής τιμής του γεγονότος. Πλάτος παρασιτικού θορύβου (A_B) το πλάτος μεταξύ της μέγιστης θετικής και αρνητικής τιμής του παρασιτικού θορύβου.



Σχήμα 3.5: Χαρακτηριστικές μορφές γεγονότων ΑΕ και αποτύπωση σημαντικών παραμέτρων.

Πρέπει να σημειωθεί ότι, η συσσωρευμένη δραστηριότητα (N) και ο ρυθμός γεγονότων (NR) εξαρτώνται από την ευαισθησία του συστήματος παρακολούθησης και από το λόγο του σήματος προς το θόρυβο (SNR). Οι παράμετροι πλάτος (A), ενέργεια (E), συσσωρευμένη ενέργεια (ΣE) και ρυθμός ενέργειας (ER) εξαρτώνται από τους προαναφερθέντες παράγοντες και επίσης από την απόκριση του γενικού συστήματος παρακολούθησης. [10]

3.4 Εξασθένηση και θόρυβος

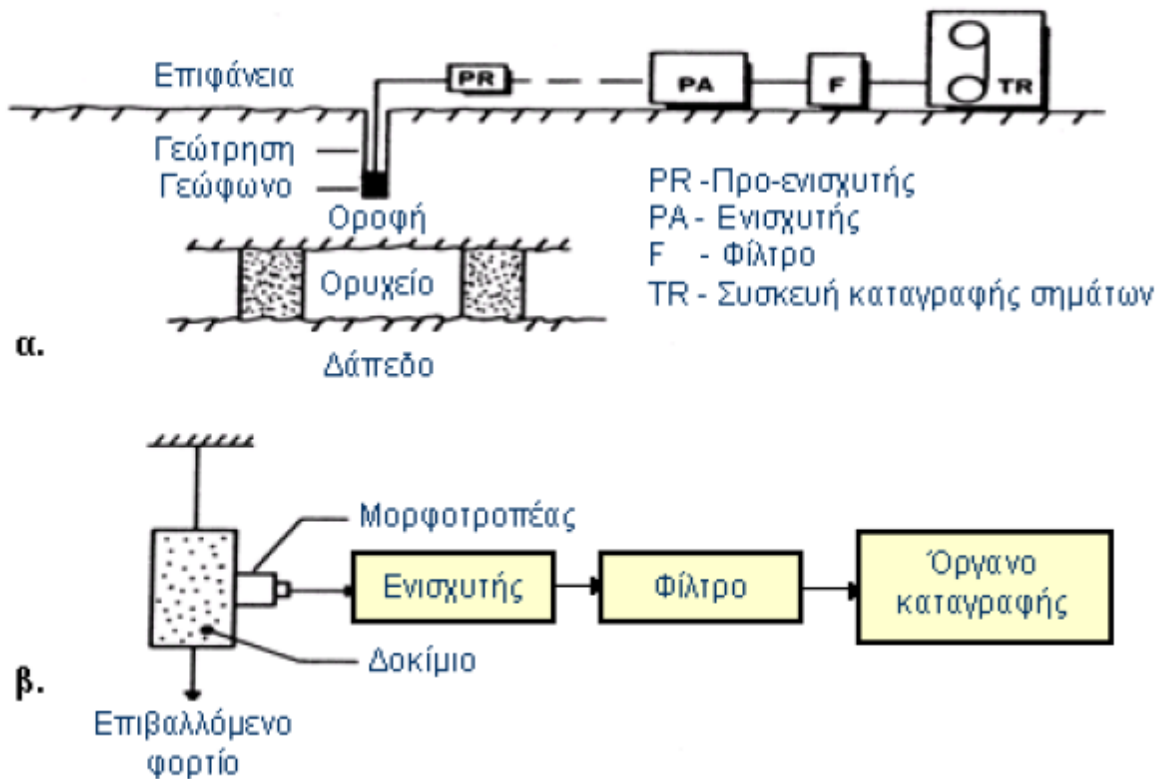
Η δυνατότητα ανίχνευσης ενός σήματος ΑΕ καθορίζεται κυρίως από την ευαισθησία του εξοπλισμού και το πλάτος των ελαστικών κυμάτων που εκπέμπονται από τη πηγή. Επιπλέον, η ανιχνευσιμότητα ενός σήματος εξαρτάται από την εξασθένηση του κύματος κατά τη διάδοση του και από το θόρυβο στο εύρος συχνοτήτων λειτουργίας του εξοπλισμού. Η εξασθένηση αναφέρεται στην μείωση του πλάτους του κύματος κατά την διάδοση του. Οι μηχανισμοί που επηρεάζουν την εξασθένηση είναι η γεωμετρική εξάπλωση του μετώπου στο χώρο, οι απώλειες ενέργειας και η απόσβεση στο μέσο διάδοσης. Λόγω γεωμετρικής εξάπλωσης το πλάτος φθίνει αντιστρόφως ανάλογα με την αύξηση της απόστασης. Αντίστοιχα λόγω απώλειας της ενέργειας το πλάτος φθίνει εκθετικά με την απόσταση από την πηγή. Στις εργαστηριακές δοκιμές η εξασθένηση λόγω απόσβεσης και γεωμετρικής εξάπλωσης δεν περιορίζει σημαντικά την ανιχνευσιμότητα των σημάτων ΑΕ λόγω των περιορισμένων διαστάσεων των δοκιμίων.

Οι πηγές θορύβου εμπίπτουν σε δυο κατηγορίες, στις ηλεκτρικές και στις μηχανικές. Οι πηγές αυτές πρέπει να εξετάζονται, ώστε να γίνεται σαφής διάκριση μεταξύ θορύβου και σημάτων ΑΕ. Σημαντική πηγή θορύβου στις μελέτες ΑΕ είναι οι ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές (Electromagnetic Interference EMI), που δημιουργούνται στον ηλεκτρονικό εξοπλισμό της ΑΕ λόγω ακτινοβολίας ή ηλεκτρικής επαγωγής. Πηγές EMI είναι οι μετασχηματιστές, ισχυρές λάμπες, ηλεκτρικές μηχανές κλπ. Οι πηγές μηχανικού θορύβου προκαλούν κρουστικού τύπου σήματα. Κάθε

κίνηση ενός μηχανικού μέρους σε επαφή με το δοκίμιο αποτελεί μια πιθανή πηγή μηχανικού θορύβου. Ο μηχανικός θόρυβος ελαττώνεται σημαντικά σε συχνότητες άνω των 100 kHz.[10]

3.5 Τεχνικές παρακολούθησης ΑΕ

Οι τεχνικές παρακολούθησης που χρησιμοποιούνται για να καταγραφούν τα σήματα ΑΕ είναι παρόμοιες τόσο στο εργαστήριο όσο και στο πεδίο. Ένα γενικό σύστημα παρακολούθησης περιλαμβάνει ένα μορφοτροπέα (transducer) ή μια συστοιχία αυτών οι οποίοι μπορούν να ανιχνεύσουν οποιαδήποτε δραστηριότητα. Έναν ενισχυτή (amplifier), ένα σύστημα φιλτραρίσματος (filtering system) καθώς και ένα όργανο καταγραφής (recorder). Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζονται συστήματα παρακολούθησης τόσο επί τόπου όσο και στο εργαστήριο.



Σχήμα 3.6: Τυπικό σύστημα παρακολούθησης (α) σε πεδίο (β) σε εργαστήριο.

Οι μονάδες παρακολούθησης που χρησιμοποιούνται εργαστηριακά είναι συνήθως πιο περίπλοκες επίσης τόσο σε εργαστηριακή όσο και σε έρευνα πεδίου η μέτρηση της ΑΕ παρουσιάζει πολλές τεχνικές δυσκολίες. Στο εργαστήριο η σχεδίαση κατάλληλων εγκαταστάσεων φόρτισης είναι σημαντικό πρόβλημα καθώς δεν θα πρέπει να παράγουν μηχανικό θόρυβο που θα μπορούσε να ανιχνευθεί από το σύστημα ελέγχου και να ερμηνευθεί ως ΑΕ. Επίσης αν πρόκειται να αξιολογηθεί το συχνотικό φάσμα της παρατηρηθείσας δραστηριότητας είναι απαραίτητο οι εγκαταστάσεις φόρτισης να παρουσιάζουν σταθερή απόκριση σε αυτό το εύρος συχνοτήτων. Στο πεδίο η μελέτη ΑΕ περιπλέκεται από τη παρουσία θορύβου χαμηλής σχετικά συχνότητας (100Hz έως 20kHz) λόγω των βιομηχανικών ή ανθρώπινων πηγών, από την εξασθένηση των κυμάτων και

από τη δυσκολία καθορισμού της θέσης της πηγής λόγω περιπλοκότητας δομών και αγνώστων παραγόντων που επιδρούν στη ταχύτητα διάδοσης των σημάτων.[10]

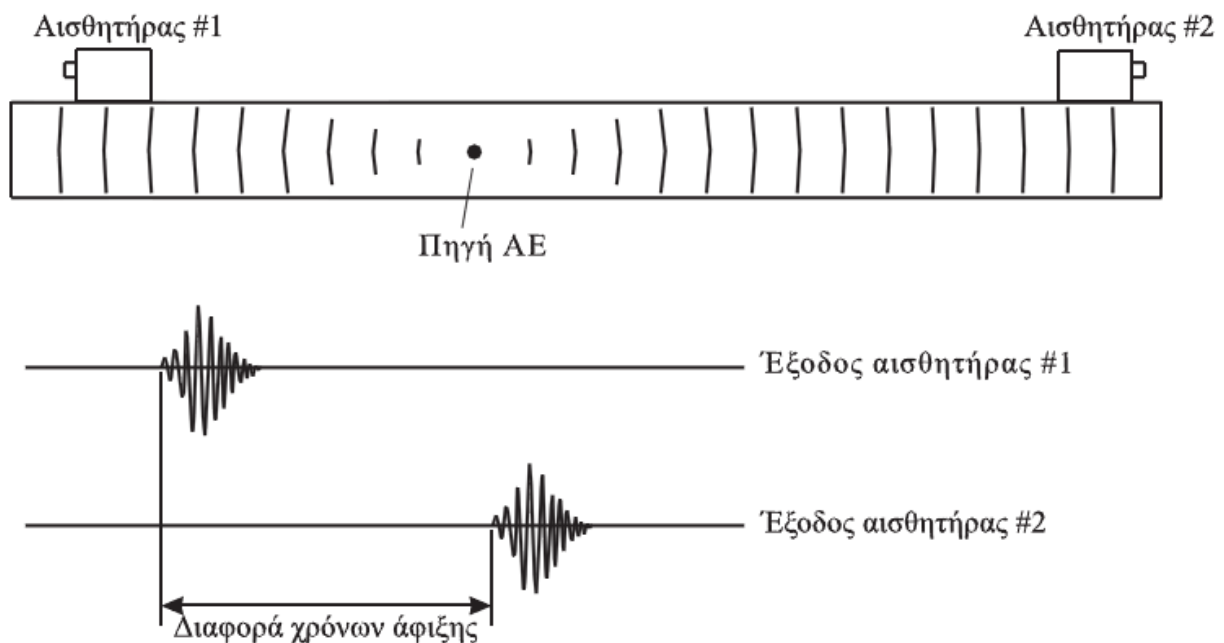
3.6 Εντοπισμός θέσης της πηγής

Ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα της ΑΕΤ είναι ότι, με τη χρήση πολλών αισθητήρων και από την ανάλυση των στοιχείων που λαμβάνονται είναι δυνατός ο εντοπισμός της θέσης της πηγής ΑΕ. Ο υπολογισμός της θέσης γίνεται από την ταχύτητα του ακουστικού κύματος και τους χρόνους άφιξης του σήματος στους διαφορετικούς αισθητήρες.

Η απλούστερη περίπτωση εντοπισμού θέσης είναι ο γραμμικός εντοπισμός (μονοδιάστατος), που είναι χρήσιμος για δομές με την μια διάσταση μεγαλύτερη σε σχέση με τις άλλες. Έστω ότι έχουμε δυο αισθητήρες, που απαιτούνται για το γραμμικό εντοπισμό, στις θέσεις x_1 και x_2 αντίστοιχα και x_s η ζητούμενη θέση της πηγής και t_s ο χρόνος γέννησης του σήματος ΑΕ στη πηγή (Σχήμα). Εάν θεωρηθεί ότι το κύμα διαδίδεται με την ίδια ταχύτητα προς όλες τις κατευθύνσεις, τότε η διαφορά στους χρόνους άφιξης κάθε αισθητήρα είναι ανάλογη προς την απόσταση του από τη πηγή

$$(t_i - t_s) = (x_i - x_s) / V$$

Όπου t_i ο χρόνος άφιξης του σήματος του αισθητήρα i ($i=1,2$) και V η ταχύτητα του ακουστικού κύματος. Προκύπτουν έτσι δυο εξισώσεις από τις οποίες μπορούν να υπολογισθούν ο χρόνος γένεσης και η θέση της πηγής του σήματος ΑΕ.



Σχήμα 3.7 : Γραμμικός εντοπισμός της θέσης της πηγής ΑΕ.

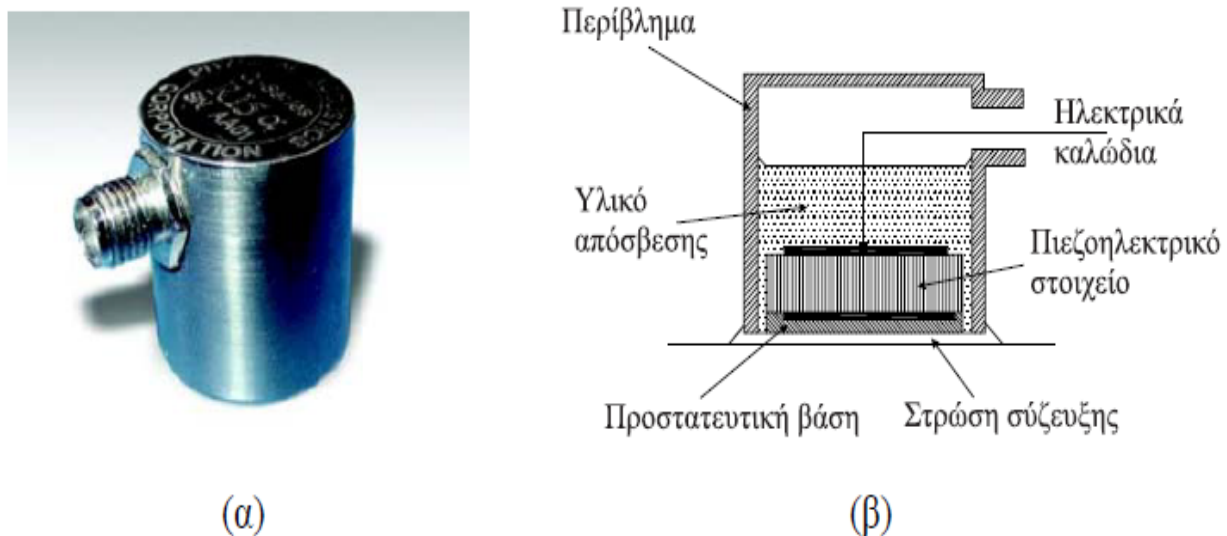
Για το γραμμικό εντοπισμό θέσης απαιτούνται δύο αισθητήρες έναντι τριών για τον επίπεδο προσδιορισμό και τεσσάρων για τον εντοπισμό της θέσης στο χώρο. Η πρακτική αξία του

εντοπισμού θέσης εξαρτάται από την ακρίβεια προσδιορισμού και από την κλίμακα της δοκιμής. Η ακρίβεια του προσδιορισμού επηρεάζεται από μικροδιαφορές της ευαισθησίας των αισθητήρων, από αβεβαιότητες στο χρόνο άφιξης και από την παραδοχή ότι το κύμα ΑΕ οδεύει προς όλες τις κατευθύνσεις με την ίδια ταχύτητα.[10]

3.7 Συστήματα Παρακολούθησης

3.7.1 Αισθητήρες και προενισχυτές.

Η ευαισθησία και το εύρος συχνοτήτων λειτουργίας του αισθητήρα είναι οι πιο σημαντικοί παράγοντες για την επιλογή του κατάλληλου κατά περίπτωση αισθητήρα σε ένα σύστημα παρακολούθησης ΑΕ. Οι πιο συνηθισμένοι αισθητήρες σήμερα είναι πιεζοηλεκτρικού στοιχείου. Πρόκειται ειδικό κεραμικό υλικό, συχνά PZT (lead-zirconate-titane) το οποίο αποτελεί και το ενεργό στοιχείο του αισθητήρα. Όταν ο πιεζοηλεκτρικός κρύσταλλος παραμορφώνεται, το ηλεκτρικό δυναμικό στα άκρα του μεταβάλλεται και έτσι η μετακίνηση, που επιβάλλει στην επιφάνεια του λόγω ενός κύματος ΑΕ, μετατρέπεται σε ηλεκτρικό σήμα. Δεδομένου ότι οι αισθητήρες (sensors) μετατρέπουν το τασικό κύμα σε ηλεκτρικό σήμα, ονομάζονται και μορφοτροπείς (transducers). Ένας τυπικός πιεζοηλεκτρικός αισθητήρας – μορφοτροπέας δίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 3.8: (α) Αισθητήρας πιεζοηλεκτρικού στοιχείου (β) Κατασκευαστικές λεπτομέρειες αισθητήρα.

Τα σύγχρονα συστήματα ΑΕ, οι αισθητήρες, τα καλώδια, τα ηλεκτρικά κυκλώματα κτλ. περιλαμβάνουν θωράκιση για προστασία από ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές (EMI). Οι συχνότητες απόκρισης των αισθητήρων είναι τέτοιες ώστε να ελαχιστοποιείται ο θόρυβος από το περιβάλλον. Σχετικά με τα ηλεκτρονικά τους κυκλώματα οι αισθητήρες μπορεί να είναι απλοί οι διαφορικοί. Ένας απλός αισθητήρας περιέχει ένα κρύσταλλο και είναι γενικά ευάλωτος στον ηλεκτρομαγνητικό θόρυβο. Αντίθετα, ο διαφορικός αισθητήρας σχεδιάζεται έτσι ώστε να

εξαλείφεται ο ηλεκτρομαγνητικός θόρυβος. Συνίσταται από δυο κρυστάλλους αντίθετης πολικότητας. Τα σήματα μεταβαίνουν στη συνέχεια σε ένα διαφορικό προενισχυτή όπου ενισχύεται η διαφορά μεταξύ των σημάτων. Λόγω της αντίθετης πολικότητας των σημάτων η διαφορά τους είναι το διπλάσιο της εξόδου ενός μονού κρυστάλλου. Αντίθετα, οι EMI των ηλεκτρικών κυκλωμάτων παράγουν σήματα της ίδιας πολικότητας και συνεπώς λαμβάνοντας ως αποτελέσματα η διαφορά των δυο σημάτων εξουδετερώνονται στο προενισχυτή.

Η ευαισθησία ενός αισθητήρα δείχνεται συνήθως σε διάγραμμα απόκρισης συναρτήσει της συχνότητας (τάση εξόδου σε σχέση με τη συχνότητα).

Οι προενισχυτές έχουν ως σκοπό να παράγουν ένα σήμα υψηλότερης τάσης που είναι πιο εύχρηστο για περαιτέρω επεξεργασία. Η ενίσχυση του πλάτους του σήματος ΑΕ είναι λογαριθμική σύμφωνα με τη σχέση (Physical Acoustics Corporation PAC,2005):

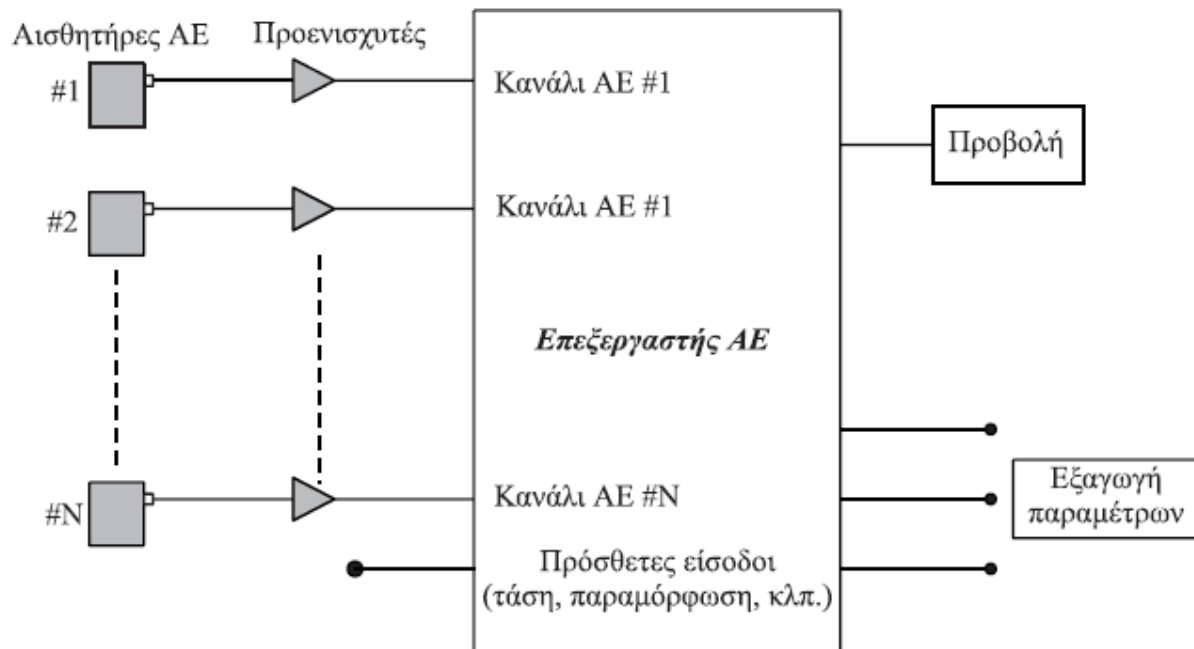
$$dB=20\log(V_{\max}/1\mu\text{Volt})-(\text{ Ενίσχυση σήματος από τον ενισχυτή σε dB})$$

Γενικότερα είναι προτιμότερο ο προενισχυτής να τοποθετείται κοντά στον αισθητήρα, ώστε να ελαχιστοποιούνται οι EMI. Ορισμένες φορές είναι ενσωματωμένος στο περίβλημα του αισθητήρα και τότε περιέχει ένα φίλτρο συχνοτήτων για την απόρριψη του ανεπιθύμητου θορύβου. Εν τούτοις παράγουν και αυτοί θόρυβο που σε συνδυασμό με το θόρυβο του αισθητήρα καθορίζει την ακρίβεια λήψης σήματος ΑΕ.

Στα σύγχρονα συστήματα παρακολούθησης ΑΕ το ελάχιστο σήμα που μπορεί να ανιχνευτεί (πάνω από τον ηλεκτρονικό θόρυβο), είναι της τάξης των 4 μV στην έξοδο ενός τυπικού μορφοτροπέα. Το πλάτος ενός σήματος ΑΕ εκφράζεται συνήθως σε dB, όπου 1 μV αντιστοιχεί σε 0 dB και 100mV σε 100 dB.[10]

3.7.2 Μονάδα επεξεργασίας.

Το ελαστικό εντατικό κύμα που φθάνει σε κάθε αισθητήρα μετατρέπεται σε ηλεκτρικό σήμα και στη συνέχεια ενισχύεται, φιλτράρεται και υφίσταται επεξεργασία από ειδικά σχεδιασμένα για το σκοπό αυτό συστήματα ΑΕ. Τα σύγχρονα ηλεκτρονικά συστήματα ΑΕ, βασίζονται σε αρχιτεκτονική παράλληλης επεξεργασίας, είναι πολυκάναλα με ισχυρούς επεξεργαστές ανάλυσης σήματος που καταγράφουν σε πραγματικό χρόνο χαρακτηριστικές παραμέτρους του σήματος (Αναστασόπουλος 1998). Απλοποιημένο διάγραμμα ενός ηλεκτρονικού συστήματος επεξεργασίας σημάτων ΑΕ δίνεται στο σχήμα που ακολουθεί. Τα κανάλια ΑΕ είναι συγχρονισμένα, ώστε να είναι δυνατή η μετρηση της διαφοράς του χρόνου άφιξης του σήματος σε δυο ή περισσότερους αισθητήρες και ο υπολογισμός της θέσης της πηγής. Οι παράμετροι που μπορούν να μετρούνται για κάθε σήμα ΑΕ περιλαμβάνουν το πλάτος (amplitude - dB), τον ρυθμό απαριθμήσεων (counts), το χρόνο ανύψωσης (rise time), τη συνολική διάρκεια (duration) κλπ.



Σχήμα 3.9: Απλοποιημένο διάγραμμα ηλεκτρονικού συστήματος επεξεργασίας σημάτων ΑΕ.



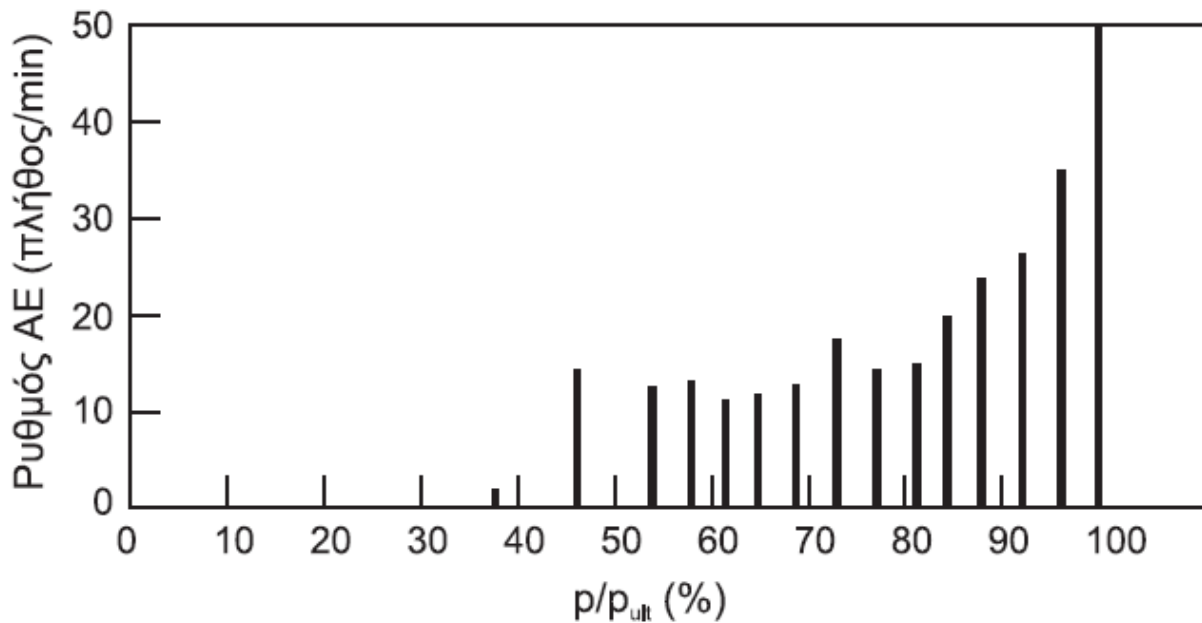
Φωτογραφία 3.1: Ψηφιακό σύστημα καταγραφής δεδομένων ΑΕ.

Στο παραπάνω σχήμα απεικονίζεται μια κάρτα οχτώ καναλιών PCI – 8 καταγραφής και επεξεργασίας δεδομένων ΑΕ της PAC (Physical Acoustic Corporation). Τα δεδομένα ανιχνεύονται και καταγράφονται σε ένα προηγμένο ψηφιακό-παραμετρικό σύστημα παρακολούθησης. Τα 8 κανάλια ΑΕ είναι υψηλής ταχύτητας απόκτησης δεδομένων σε πραγματικό χρόνο (μέχρι και 132 MegaBytes/sec) με δυνατότητα εξαγωγής χαρακτηριστικών παραμέτρων (χρόνος ανύψωσης, υπερβάσεις κατωφλίου, πλάτος και ισχύς σήματος, ενέργεια, διάρκεια, RMS κλπ.), ενώ το συνοδευτικό λογισμικό έχει τη δυνατότητα προβολής παραμετρικών γραφημάτων και κυματομορφών σε πραγματικό χρόνο. Εκτός από τα 8 κανάλια ΑΕ το σύστημα διαθέτει δυο επιπλέον εισόδους (παραμετρικές εισόδους) για την περίπτωση εισαγωγής σήματος από εξωτερικές συσκευές, όπως για παράδειγμα από ένα κελί φορτίου. Αυτές οι παραμετρικές εισόδους, που

καταγράφουν ταυτόχρονα με τη καταγραφή δεδομένων ΑΕ, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη συσχέτιση των παραμέτρων ΑΕ με άλλες παραμέτρους, όπως π.χ. η εφαρμοζόμενη τάση σε ένα δοκίμιο ή η παραμόρφωση του.[10]

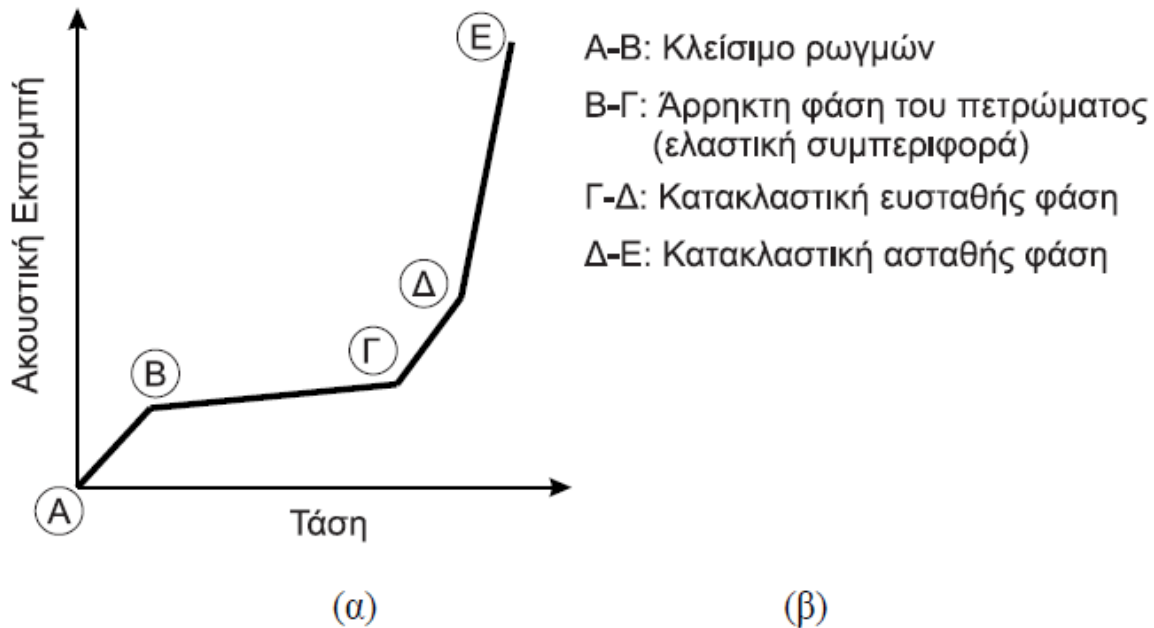
3.8 Επίδραση του επιβαλλόμενου φορτίου στην ΑΕ

Από τις πρώτες μελέτες της ΑΕ στα πετρώματα έγινε προσπάθεια να προσδιοριστούν εμπειρικές σχέσεις μεταξύ της παρατηρηθείσας δραστηριότητας ΑΕ και των μηχανικών ιδιοτήτων των υλικών. Οι Obert και Duvall (1945) διεξάγοντας δοκιμές μονοαξονικής θλίψης σε διάφορα πετρώματα (νεφρίτη, ασβεστόλιθο, γρανίτη, κερατόλιθο, σχιστόλιθο, ψαμμίτη, επιδοτίτη και δολομίτη) έδειξαν ότι υπό θλιπτική φόρτιση ο ρυθμός ΑΕ αυξάνεται ανάλογα με το επιβαλλόμενο φορτίο. Στο διάγραμμα που ακολουθεί παρουσιάζονται χαρακτηριστικά αποτελέσματα δοκιμών μονοαξονικής θλίψης σε χονδρόκοκκο γρανίτη.



Σχήμα 3.10: Μεταβολή του ρυθμού ΑΕ συναρτήσει του εφαρμοζόμενου φορτίου p ως ποσοστό του φορτίου αστοχίας p_{ult} σε χονδρόκοκκο γρανίτη.

Σημαντική δουλειά στο τομέα αυτό έχει γίνει από τον Mogi (1962), ο οποίος δίνει το διάγραμμα του παρακάτω σχήματος ως γενική μορφή της σχέσης μεταξύ της ΑΕ και του εφαρμοζόμενου φορτίου για δοκιμές μονοαξονικής θλίψης. Στο ίδιο διάγραμμα συνδυάζεται από τους Boyce et al (1981) η ΑΕ με τη διαδικασία καταστροφής του δοκιμίου κατά τις δοκιμές θλίψης (Σοφιανός, 2005)



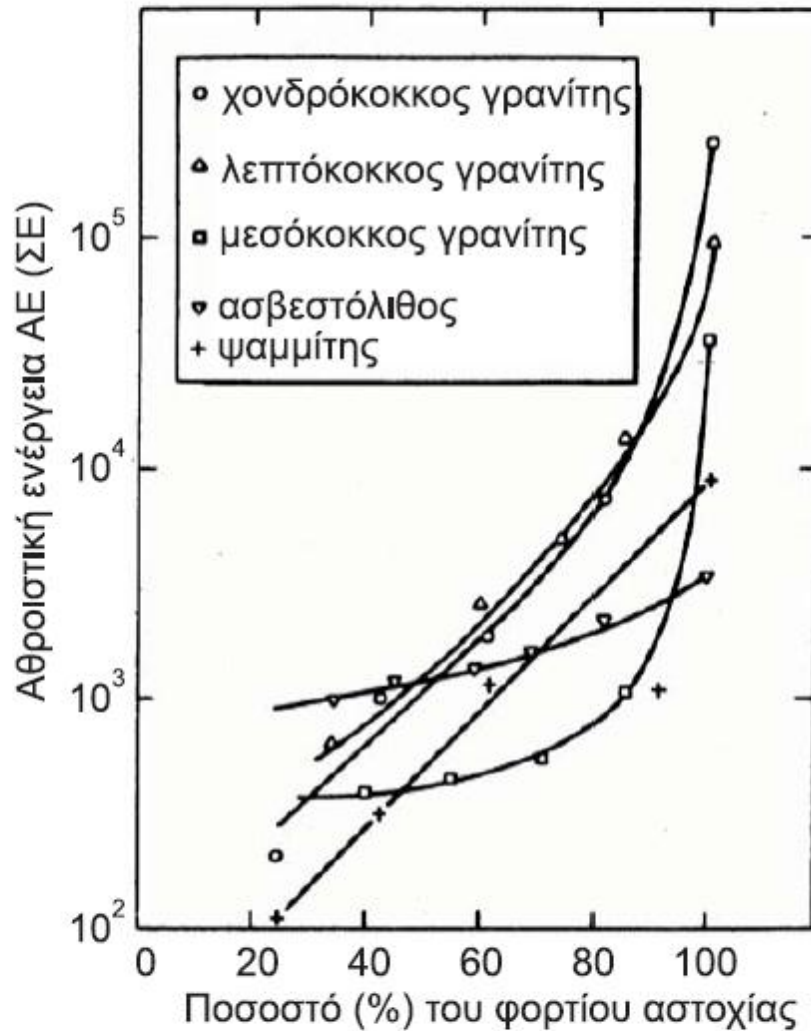
Σχήμα 3.11: (α) Γενική σχέση εφαρμοζόμενης τάσης και ακουστικής εκπομπής ΑΕ (β) Συσχέτιση της σχέσης τους με τη διαδικασία καταστροφής κατά τη δοκιμή μονοαξονικής θλίψης.

Πειράματα των Boyce et al. σε διάφορους τύπους πετρωμάτων έδειξαν ότι αν και ισχύει η γενική σχέση του προηγούμενου σχήματος, εντούτοις διακρίνονται τέσσερις επί μέρους τύποι απόκρισης στους οποίους οι φάσεις A-B, B-Γ, Γ-Δ, και Δ-E είναι λιγότερο ή περισσότερο εμφανείς. Νεώτερες έρευνες (Eberhart 1998, Eberhart et al.1999, Rudajev et al 2000 κλπ.) επιβεβαιώνουν αυτές τις παρατηρήσεις.

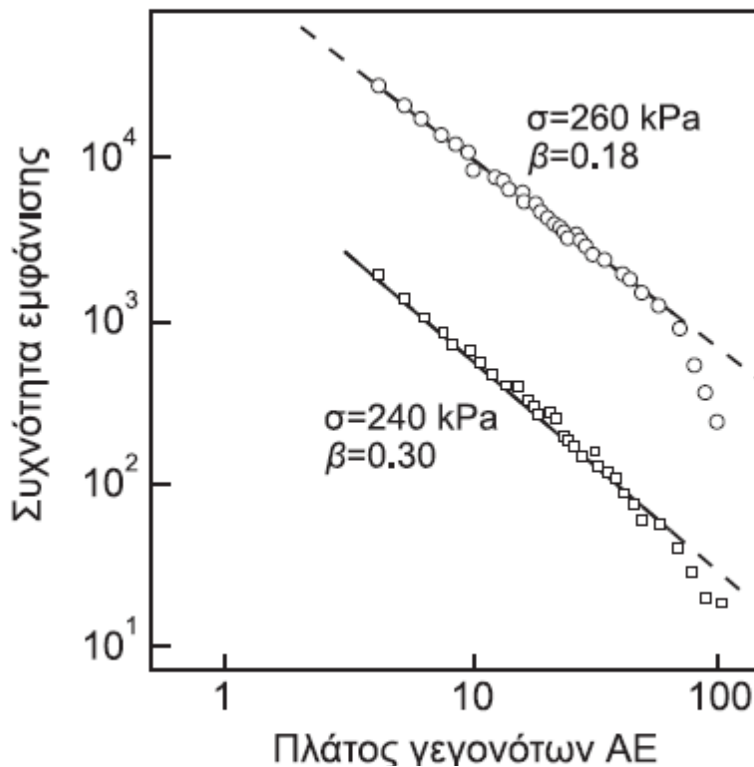
Πειράματα του Goodman το 1963, που αναφέρονται από τον Hardy (2003), εξετάζουν την επίδραση των κύκλων φόρτισης και αποφόρτισης στην ΑΕ. Σύμφωνα με αυτά, παρατηρήθηκε ότι για αύξηση του φορτίου πέρα από ένα σημείο, αναφερόμενο ως σημείο « επιταχυνόμενης ακουστικής δραστηριότητας» (accelerated rock noise activity), τα γεγονότα ΑΕ που ανιχνεύονται αυξάνονται κατά τη διάρκεια των επόμενων κύκλων φόρτισης. Σύμφωνα και με τα πειράματα των Brown και Singh το 1966, που επίσης αναφέρονται από τον Hardy (2003), υπό συνθήκες μονοαξονικού εφελκυσμού προέκυψε το παρακάτω διάγραμμα για την εκλυόμενη ενέργεια ΑΕ συναρτήσει του εφαρμοζόμενου φορτίου ως ποσοστό του φορτίου αστοχίας.

Ενδιαφέρον παρουσιάζει επίσης η σχέση του πλάτους των σημάτων ΑΕ με τη συχνότητα εμφάνισής τους. Σύμφωνα με τα πειράματα ερευνητών, που αναφέρονται από τον Hardy (2003) και εικονίζονται στο μεθεπόμενο σχήμα, έδειξαν ότι η σχέση αυτή, όπως προέκυψε από τις δοκιμές σε μονοαξονικής θλίψης σε γρανίτη, προσομοιώνεται με μια ευθεία σε λογαριθμικούς άξονες πλάτους ΑΕ- συχνότητας εμφάνισης. Γεγονότα ΑΕ ακραίου πλάτους δεν μπορούν να συμπεριληφθούν στην ευθεία αυτή. Επιπλέον, για τιμές του φορτίου κοντά στο φορτίο αστοχίας, η σταθερά β, που εκφράζει τη κλίση της ευθείας αυτής, μεταβάλλεται αντιστρόφως ανάλογα με το εφαρμοζόμενο φορτίο και συνεπώς με την αύξηση του φορτίου περισσότερα γεγονότα ΑΕ έχουν μεγαλύτερο πλάτος.

Η δραστηριότητα ΑΕ έχει επίσης συσχετισθεί με τη χρονικά μεταβαλλόμενη ανελαστική παραμόρφωση (ερπυσμό) του πετρώματος Hardy (2003), όπου διαπιστώθηκε μια σχεδόν γραμμική σχέση μεταξύ της ερπυστικής παραμόρφωσης και της ΑΕ.[10]



Σχήμα 3.12: Αθροιστική εκλυόμενη ενέργεια ΑΕ συναρτήσει του εφαρμοζόμενου φορτίου για διάφορα πετρώματα (Hardy 2003)



Σχήμα 3.13: Διάγραμμα συχνότητας συναρτήσει του πλάτους για το γρανίτη Westerly, υπό μονοαξονική θλίψη. Hardy (2003)

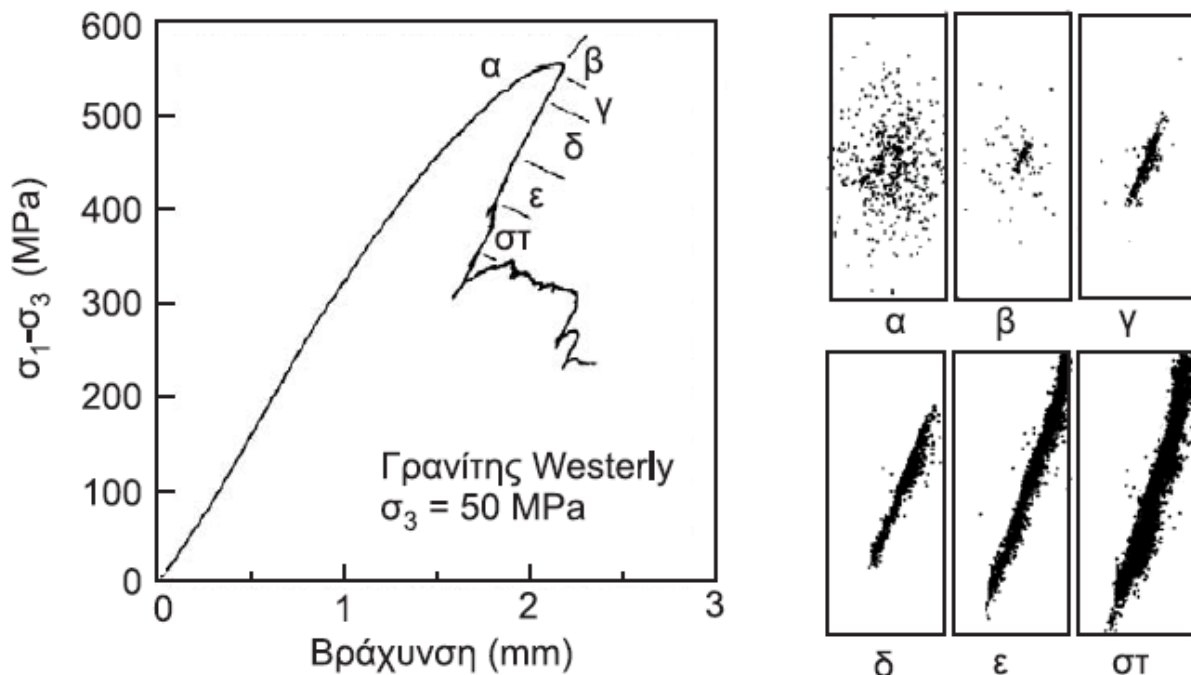
3.9 Μελέτη της εξέλιξης της αστοχίας με εντοπισμό της θέσης της πηγής ΑΕ

Όπως ήδη αναφέρθηκε, με την χρήση περισσότερων του ενός αισθητήρων προσαρμοσμένων σε ένα δοκίμιο είναι δυνατός ο προσδιορισμός της θέσης της πηγής των σημάτων ΑΕ. Εντοπισμός των γεγονότων ΑΕ κατά τη διάρκεια της παραμόρφωσης δοκιμίων των πετρωμάτων από τα πρώτα στάδια της φόρτισης έως την αστοχία αναφέρεται σε σημαντικό αριθμό δημοσιεύσεων στη διεθνή βιβλιογραφία (Lockner 1993). Τα πρώτα πειράματα στα τέλη της δεκαετίας του 1960 περιελάμβαναν την επιλεκτική καταγραφή και επεξεργασία σημάτων για τον εντοπισμό της θέσης της πηγής σε δοκιμές μονοαξονικής θλίψης. Ο σύγχρονος εξοπλισμός καταγραφής και επεξεργασίας ΑΕ επιτρέπει τον εντοπισμό μεγάλου πλήθους γεγονότων ΑΕ σε ρυθμούς από 100 έως 1000 γεγονότα ανά δευτερόλεπτο.

Επειδή η ΑΕ συνδέεται άμεσα με το σχηματισμό και τη διάδοση μικρορωγμών στα πετρώματα παρέχει μια ιδανική μέθοδο για τη μελέτη της αστοχίας τους. Η ψαθυρή θραύση των κρυσταλλικών πετρωμάτων συνοδεύεται από απότομη απώλεια της αντοχής τους, με αποτέλεσμα σε εύκαμπτες συσκευές φόρτισης να παρατηρείται ασταθής και βίαιη θραύση. Έτσι ο ρυθμός της ΑΕ στη φάση της αστοχίας του δοκιμίου είναι τόσο υψηλός, ώστε είναι σχεδόν αδύνατη η παρακολούθηση και ο εντοπισμός των ανεξάρτητων γεγονότων ΑΕ. Για την παρακολούθηση της αστοχίας στη φάση αυτή είναι απαραίτητος ο σχεδιασμός ενός ελεγχόμενου συστήματος φόρτισης στο οποίο ο ρυθμός της ΑΕ να διατηρείται σταθερός κατά τη φόρτιση (Lockner,1993). Με τον

τρόπο αυτό μπορεί να ανιχνευτεί η ανάπτυξη της αστοχίας κατά την φόρτιση και να συσχετισθεί με τον εντοπισμό των γεγονότων ΑΕ. Σχετικά πειράματα του Lockner έδωσαν τα αποτελέσματα του παρακάτω σχήματος.

Οι Zietlow και Labuz (1998), αναφέρουν πειράματα κάμψης σε δοκίμια γρανίτη, ψαμμίτη και χαλαζίτη, όπου εφαρμόσθηκε εντοπισμός της θέσης της πηγής της ΑΕ για το προσδιορισμό περιοχών μικρορηγμάτωσης κατά τη δοκιμή. Τα γεγονότα ΑΕ εντοπίσθηκαν σε ποσοστό του φορτίου αστοχίας μεγαλύτερου του 50% (ανάλογα με το τύπο του πετρώματος), ενώ η συγκέντρωση των γεγονότων ΑΕ σε ακραία φορτία ήταν ενδεικτική της αστοχίας.[10]



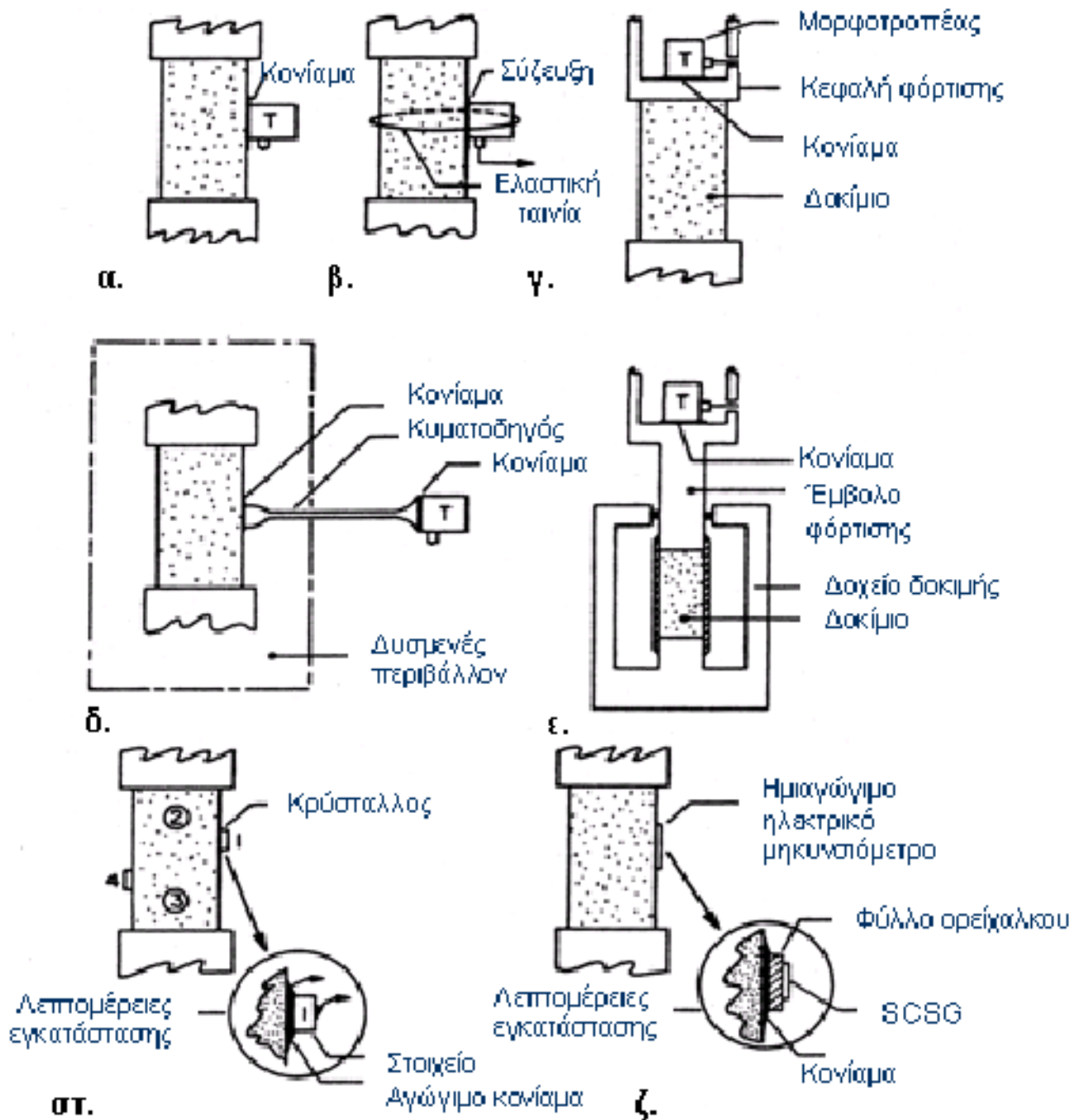
Σχήμα 3.14: Αποτελέσματα εντοπισμού θέσης ΑΕ σε δοκίμιο γρανίτη Westerly υπό τριαξονικής θλίψης.

3.10 Εγκατάσταση μορφοτροπέων σε μονοαξονικές δοκιμές.

Οι μονοαξονικές δοκιμές σε θερμοκρασία δωματίου είναι πιθανώς ο πιο κοινός τύπος δοκιμών από τις εργαστηριακές δοκιμές της βραχομηχανικής. Στο σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζονται τεχνικές εγκατάστασης μορφοτροπέων. Οι μέθοδοι που παρουσιάζονται στην α και β περίπτωση εφαρμόζονται συνήθως για τα συμβατικά επιταχυνσιόμετρα και για μορφοτροπείς ΑΕ με πιεζοηλεκτρικό στοιχείο. Η στερέωση των μορφοτροπέων με κονίαμα ή με αγωγήμη εποξική ρητίνη, επιτρέπει την επαναχρησιμοποίηση του μορφοτροπέα. Το μόνο μειονέκτημα της μεθόδου είναι ότι κατά την διάρκεια της παραμόρφωσης του δείγματος μπορεί να προκληθούν μηχανικές αστοχίες (π.χ. αστοχία στερέωσης, μικρορωγμές, κλπ.) στο τσιμέντο, οι οποίες μπορούν να καταγραφούν ως ακουστική δραστηριότητα. Με τη χρήση ενός μέσου σύζευξης (ειδικό ρευστό υψηλού ιξώδους με μικρή ακουστική εξασθένιση) και μιας διάταξης σύνδεσης (π.χ. ελαστική ταινία), ωστόσο, μπορεί να αντιμετωπισθεί ο θόρυβος βάθους.

Σε μερικές περιπτώσεις οι μορφοτροπείς ΑΕ τοποθετούνται πάνω σε ειδική κεφαλή φόρτισης όπως απεικονίζεται στη γ περίπτωση. Η τεχνική αυτή είναι κατάλληλη στη περίπτωση διενέργειας δοκιμών σε μεγάλο πλήθος δειγμάτων και παρέχει προστασία στο μορφοτροπέα στη περίπτωση που το δοκίμιο φορτιστεί μέχρι την αστοχία. Ωστόσο, η μέθοδος αυτή μπορεί να οδηγήσει σε λανθασμένα συμπεράσματα. Αφενός, ο αισθητήρας δεν τοποθετείται άμεσα πάνω στο δείγμα μπορεί να εκδηλωθούν σημαντικές ακουστικές απώλειες στη διεπιφάνεια μεταξύ δείγματος και πλάκας φόρτισης, αφετέρου, μπορεί να καταγραφεί υψηλή ακουστική δραστηριότητα λόγω μηχανικών ασταθειών που συνδέονται με την μη ευθυγράμμιση των δειγμάτων, τις ανωμαλίες της επιφάνειας τους, την τριβή λόγω κακής συνάφειας μεταξύ του δείγματος και της κεφαλής φόρτισης. Δεδομένου ότι ο μορφοτροπέας βρίσκεται πολύ κοντά σε αυτήν την ασταθή περιοχή, τα γεγονότα χαμηλής ισχύος που δεν προέρχονται από ακουστική δραστηριότητα του γεωυλικού, μπορεί να επισκιάσουν σημαντικότερα γεγονότα που παράγονται εντός του δείγματος.

Όπως φαίνεται στο σχήμα στ και ζ οι μορφοτροπείς με πιεζοηλεκτρικό στοιχείο και τα ημιαγώγιμα ηλεκτρικά μηκυνσιόμετρα μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν στην μονοαξονική δοκιμή. Οι μορφοτροπείς PZT έχουν υιοθετηθεί εκτενώς στις μελέτες ΑΕ στα γεωυλικά και το σημαντικότερο πλεονέκτημα είναι ότι λόγω των μικρών σχετικά διαστάσεων τους μπορούν να τοποθετηθούν σε σχετικά μικρά δείγματα.[3]



Σχήμα 3.15: Εργαστηριακές τεχνικές εγκατάστασης μορφοτροπέων α. στερέωση με κονίαμα β. σύζευξη με ελαστική ταινία γ. τοποθέτηση στη κεφαλή φόρτισης δ. χρήση κυματοδηγού ε. χρήση τριαξονικού δοχείου στ. λεπτομέρειες πιεζοηλεκτρικού στοιχείου ζ. λεπτομέρειες ημιαγώγιμου ηλεκτρικού μηχανοσόμετρου Hardy (2003)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΚΑΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΥΛΙΚΟΥ

4. Προετοιμασία δοκιμών και Χαρακτηρισμός Υλικού

4.1 Εισαγωγή

Για την παρασκευή των δοκιμών χρησιμοποιήθηκε οικοδομικός γύψος της εταιρίας “Κнауφ”. Η αναλογία του μίγματος διατηρήθηκε σταθερή κατά βάρος με λόγο Γύψος/Νερό = 1,5 σε όλη τη διάρκεια των πειραματικών δοκιμών. Η προετοιμασία των μιγμάτων για τη παρασκευή των δοκιμών έγινε προσεκτικά ώστε να επιτευχθεί όσο το δυνατό μεγαλύτερη ισοτροπία των δοκιμών. Αξίζει να αναφερθεί ότι μέσα σε 10 λεπτά το μίγμα σκλήρυνε έτσι ήταν αναγκαία η γρήγορη εισαγωγή του μίγματος στα καλούπια. Μετά το καλούπωμα το δείγμα παρέμενε για μια ώρα στους 45° C στο φούρνο και έπειτα ξεκαλουπώνονταν και επανατοποθετούταν στο φούρνο έως την πραγματοποίηση των εργαστηριακών δοκιμών.

Αρχικά κατασκευάστηκαν μια σειρά δοκιμών ώστε να γίνουν οι απαραίτητες εργαστηριακές δοκιμές για τον χαρακτηρισμό του υλικού. Αυτές είναι η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη, η εφελκυστική αντοχή, η ταχύτητα διάδοσης των Ρ κυμάτων, η αντοχή σε κάμψη και τέλος ο προσδιορισμός της απώλειας μάζας με το χρόνο που αντιστοιχεί σε απώλεια υγρασίας. Για τη παρασκευή των δοκιμών κατασκευάστηκαν ξύλινα καλούπια με εσωτερικές διαστάσεις 15 cm μήκος 7,5 cm πλάτος και 4 cm ύψος.



Φωτογραφία 4.1: Ξύλινο καλούπι για τη παρασκευή των δοκιμών.



Φωτογραφία 4.2: Φούρνος ξήρανσης των δοκιμών.



Φωτογραφία 4.3: Σερβοϋδραυλική μονάδα φόρτισης δοκιμών και διάταξη βιντεοσκόπησης.



Φωτογραφία 4.4: Ζυγός ακριβείας κατά την παρασκευή των δοκίμων.

4.2 Εφελκυστική Αντοχή Υλικού.

Για τον χαρακτηρισμό της εφελκυστικής αντοχής του υλικού πραγματοποιήθηκε η δοκιμή αντιδιαμετρικής θλίψης (Brazilian Test). Η δοκιμή χρησιμοποιείται για την έμμεση μέτρηση της αντοχής του πετρώματος σε μονοαξονικό εφελκυσμό. Τα δοκίμια είναι μορφής δίσκου, πάχους 2,5cm και διαμέτρου 54mm, υπόκεινται σε αντιδιαμετρική θλίψη μέχρι θραύσης. Υπό αυτές τις συνθήκες φόρτισης το δοκίμιο αστοχεί κατά τη διάμετρο φόρτισης σε εφελκυσμό. Η εφελκυστική τάση που προκαλεί αυτή την αστοχία θεωρείται ίση με τη αντοχή του δοκιμίου σε μονοαξονικό εφελκυσμό.

Η δοκιμή βασίζεται στο γεγονός ότι τα περισσότερα πετρώματα όταν βρεθούν σε διαξονικό εντατικό πεδίο αστοχούν σε εφελκυσμό όταν η μια κύρια τάση είναι εφελκυστική και η άλλη κύρια τάση θλιπτική και εφ' όσον το μέγεθος της τελευταίας δεν υπερβαίνει το τριπλάσιο της κύριας εφελκυστικής τάσης. Σημαντική προϋπόθεση για τον υπολογισμό της αντοχής σε εφελκυσμό, είναι να παρατηρείται κατά την πειραματική διαδικασία έναρξη αστοχίας του δοκιμίου κατά μήκος της διαμέτρου φορτίσεως.

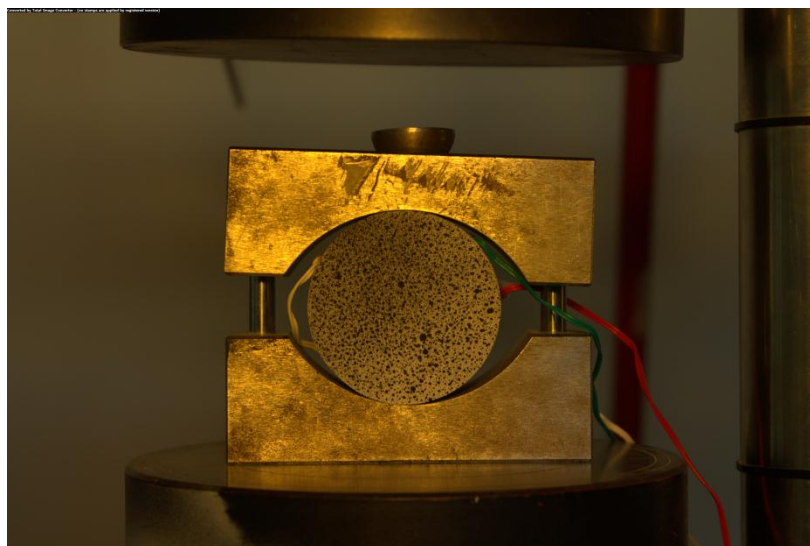
Δοκίμια	Εφελκυστική Αντοχή (MPa)
Br1	2.50
Br2	2.77
Br3	2.32
Μέσο όρο	2.53

Πίνακας 4.1 Αποτελέσματα δοκιμής Brazilian

Όπως φαίνεται στο παραπάνω πίνακα η αντοχή σε εφελκυσμό του υλικού είναι $\sigma_t=2.53$ MPa. Στη συνέχεια ακολουθούν φωτογραφίες κατά την εκτέλεση των δοκιμών.

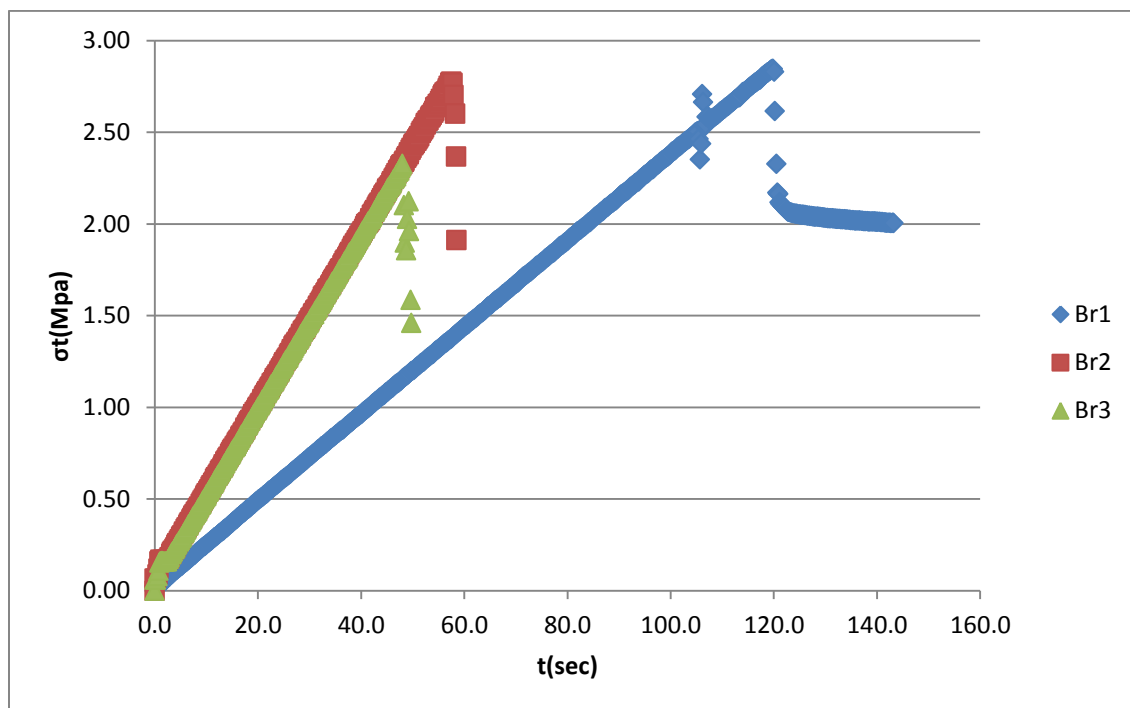


Φωτογραφία 4.5: Τα δείγματα μορφής δίσκου.

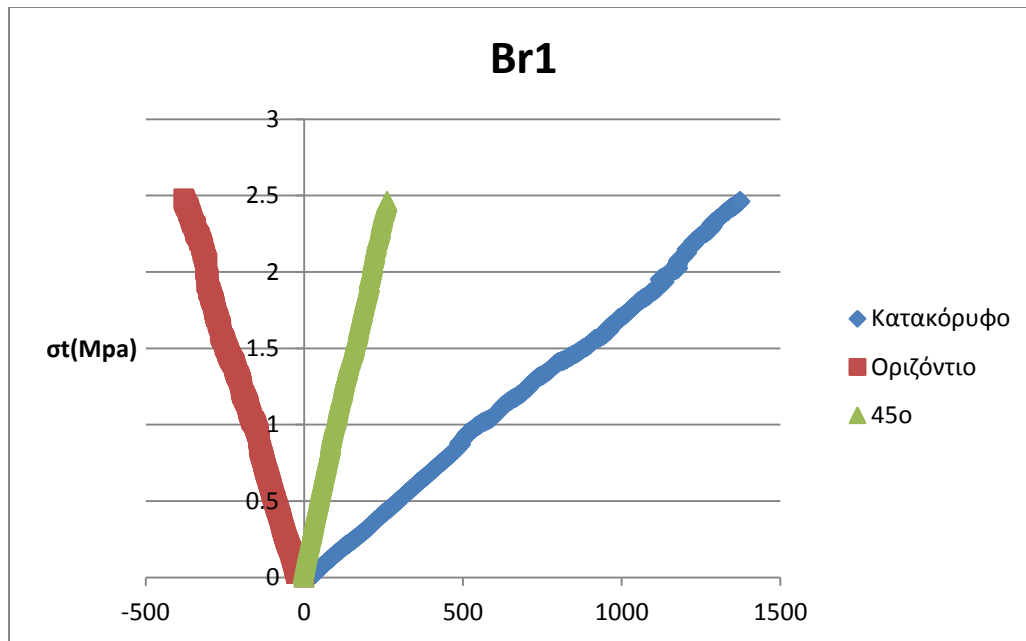


Φωτογραφία 4.6: Κατά την εγκατάσταση για την εφαρμογή της δοκιμής.

Στο διάγραμμα που ακολουθεί απεικονίζεται η εφελκυστική αντοχή συναρτήσει του χρόνου φόρτισης των τριών δοκιμίων. Η διαφορά στη κλίση του οφείλεται στο διαφορετικό ρυθμό φόρτισης. Για το δοκίμιο Br1 ήταν 50 N/sec ενώ εγκαταστάθηκαν και μετρητές παραμόρφωσης για την μέτρηση των παραμορφώσεων. Για τα δοκίμια Br2, Br3 ο ρυθμός φόρτισης ήταν 100 N/sec. Για το δοκίμιο Br1 με τη χρήση των μετρητών παραμόρφωσης υπολογίστηκε ως μέγιστη εφελκυστική αντοχή κατά την διάνοιξη της πρώτης ρωγμής του δοκιμίου και όχι η ολοκληρωτική καταστροφή του που συμβαίνει λίγο αργότερα και το δοκίμιο ως τότε αναλαμβάνει ακόμα φορτίο.



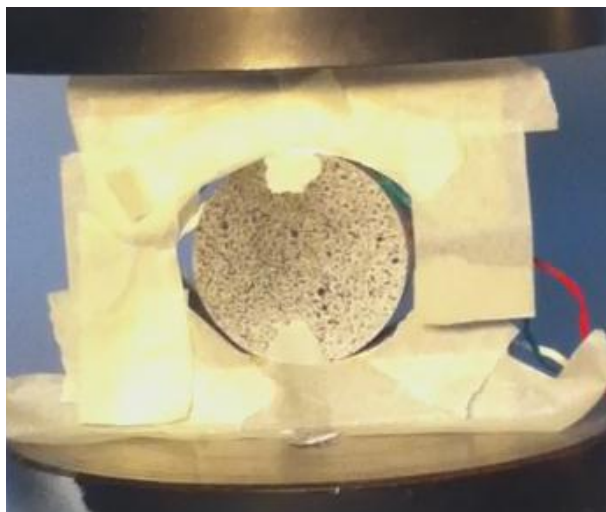
Σχήμα 4.1: Διάγραμμα εφελκυστικής τάσης συναρτήσει του χρόνου φόρτισης.



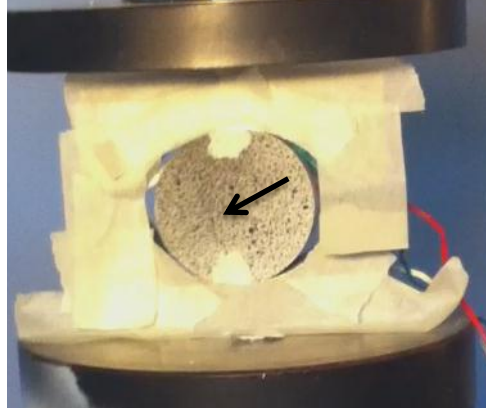
Σχήμα 4.2: Διάγραμμα εφελκυστικής τάσης – τροπής.

Από το παραπάνω διάγραμμα υπολογίστηκε το μέτρο ελαστικότητας σε εφελκυσμό. Το μέσο μέτρο ελαστικότητας προέκυψε από το ευθύγραμμο χοντρικά τμήμα της καμπύλη εφελκυστικής τάσης –εφελκυστικής τροπής $E\mu = \frac{\Delta\sigma_t}{\Delta e} = \frac{(1.93-0.89)10^6}{303.5-162.6} = 6.3\text{GPa}$.

Από την επεξεργασία των βίντεο των πειραμάτων για το δοκίμιο Br2 φαίνεται η δημιουργία κάθετων εφελκυστικών ρωγμών λόγω της αντιδιαμετρικής θλίψης. Επίσης παρόμοιος τρόπος αστοχίας παρατηρήθηκε και στο δοκίμιο Br3. Επίσης αναγκαία προϋπόθεση για την μέτρηση της εφελκυστικής αντοχής είναι η ρωγή να ξεκινάει από το κέντρο των δοκιμίων κάτι που φαίνεται από την ανάλυση των βίντεο.



Φωτογραφία 4.7: Δοκίμιο Br1 παρουσιάζει αποφλοίωση κατά την έναρξη της δοκιμής.



Φωτογραφία 4.8: Δοκίμιο Br1 μια κεντρική ρωγμή ξεκινάει να φαίνεται



Φωτογραφία 4.9 Λίγο πριν την θραύση του δοκιμίου Br1



Φωτογραφία 4.10: Ομοίως έναρξη ρωγμής από το κέντρο του δοκιμίου Br2



Φωτογραφία 4.11: Λίγο πριν την θραύση του δοκιμίου Br2



Φωτογραφία 4.12: Για το δοκίμιο Br3 έναρξη ρωγμής από το κέντρο του δοκιμίου.



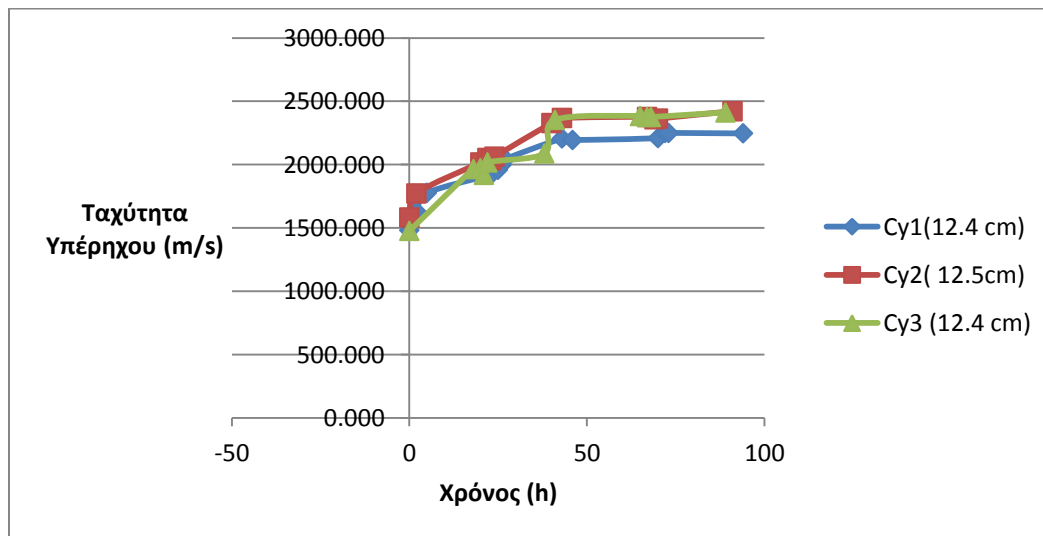
Φωτογραφία 4.13: Δοκίμιο Br3 κατά την στιγμή που αστοχεί.

4.3 Ταχύτητα διάδοσης διαμήκους κύματος.

Η μέτρηση του χρόνου t_p διάδοσης διαμήκους κύματος (κύματος P) πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο με τη κεντρική μονάδα Pundit 7. Τα δοκίμια ήταν κυλινδρικού σχήματος μήκους d και διαμέτρου 54 mm. Η ταχύτητα διάδοσης υπολογίστηκε από τον τύπο $V_p = d \cdot t_p^{-1}$. Από τις μετρήσεις προέκυψε ο παρακάτω πίνακας από τον οποίο προκύπτει ότι η ταχύτητα διάδοσης του διαμήκους κύματος στο υλικό είναι 2360 m/s. Η μετρήσεις επαναλαμβάνονταν μέχρι σταθεροποίησης της τιμής καθώς υπήρχε αλλαγή λόγω της απώλειας της περιεχόμενης υγρασίας σταδιακά. Επίσης αξίζει να αναφερθεί ότι χρησιμοποιήθηκε ειδικό gel στις ήδη λείες και επίπεδες επιφάνειες των δοκιμίων για την καλή επαφή των μορφοτροπέων.

Δοκίμια	Μήκος Δοκιμίου (m)	Χρόνος (ms)	Ταχύτητα Διάδοσης (m/s)
Cy1	0,124	55.2	2246
Cy2	0,125	51.6	2422
Cy3	0,124	51.4	2412

Πίνακας 4.2 : Δεδομένα Δοκιμής υπερήχων.



Σχήμα 4.3: Διάγραμμα ταχύτητας – Χρόνος από τη παρασκευή του δοκιμίου.

4.4 Εργαστηριακός προσδιορισμός της απώλειας μάζας.

Τα δοκίμια αμέσως μετά την παρασκευή τους ζυγίζονταν και κατόπιν τοποθετούνταν σε εργαστηριακό φούρνο στους 45°C για τουλάχιστο τέσσερις ημέρες. Στο διάστημα αυτό εμφανίζονταν απώλεια της περίσσειας υγρασίας στο δοκίμιο που εκδηλωνόταν ως απώλεια μάζας. Για το προσδιορισμό της απώλειας μάζας συναρτήσεϊ του χρόνου από τη παρασκευή των δοκιμίων αυτά ζυγίζονταν ανά τακτά χρονικά διαστήματα έως και τις τέσσερις ημέρες.

4.5 Προσδιορισμός αντοχής σε Κάμψη.

Για το προσδιορισμό της αντοχής σε κάμψη κατασκευάστηκε δοκίμιο μήκους 15.5 cm πάχους 4cm και ύψους 4cm. Η μέγιστη αντοχή σε κάμψη υπολογίστηκε από τον τύπο $R = \frac{3Wl}{2bt^2}$ όπου R η αντοχή σε κάμψη, W το φορτίο αστοχίας, l το μήκος του ανοίγματος μεταξύ των ακμών στήριξης, b το πλάτος του δοκιμίου και t το πάχος του δοκιμίου. Από την βιντεοσκόπηση του πειράματος φάνηκε ότι η κρίσιμη διατομή της δοκού είναι η μεσαία όπου αναπτύσσεται η μέγιστη ροπή κάμψης. Η μέγιστη αντοχή σε κάμψη μετρήθηκε ίση με 4,03 MPa.



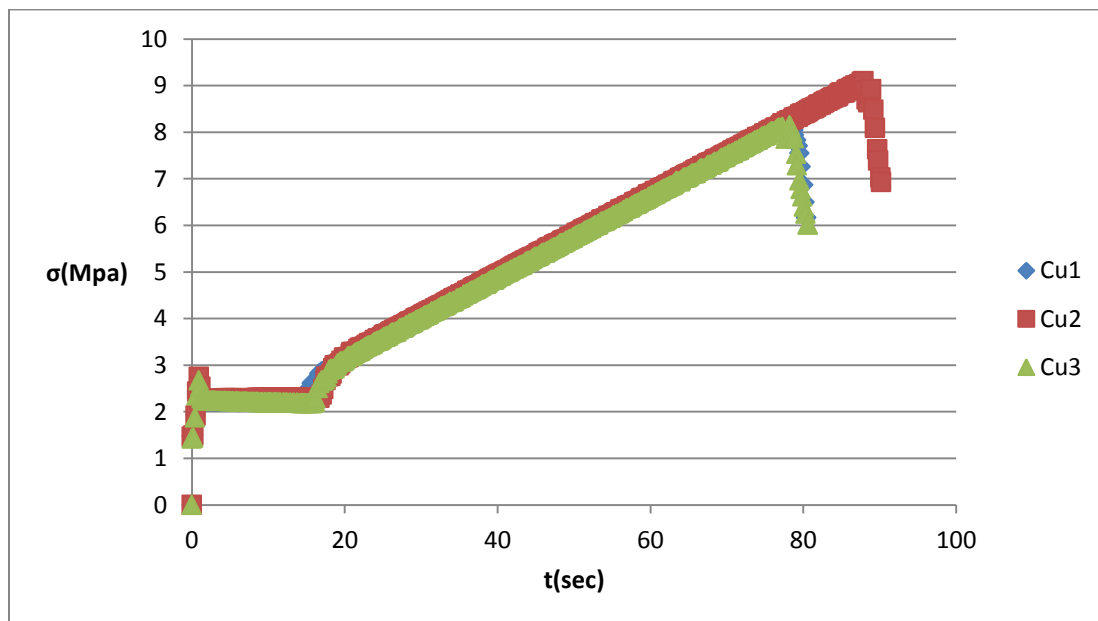
Φωτογραφία 4.14: Κατά την εκτέλεση της δοκιμής χωρίς να παρατηρηθεί κάποια ρωγμάτωση.



Φωτογραφία 4.15: Διάνοιξη ρωγμής και αστοχία του δοκιμίου.

4.6 Μονοαξονική θλιπτική αντοχή σε δοκίμια σχήματος κύβου.

Για τον χαρακτηρισμό της μονοαξονικής αντοχής του υλικού πραγματοποιήθηκαν δοκιμές σε κυβικά δοκίμια ακμής 4,7 cm. Από την εκτέλεση των δοκιμών προκύπτει μέση αντοχή των τριών δοκιμών 8.5 MPa.



Σχήμα 4.4: Διάγραμμα Τάσης – Χρόνου των 3 κυβικών δοκιμών.



Φωτογραφία 4.16: Κυβικό δοκίμιο λίγο πριν την εκτέλεση της δοκιμής.

Από τη βιντεοσκόπηση των πειραμάτων προέκυψε ότι και τα τρία δοκίμια αστόχησαν με τη δημιουργία ρωγμών παράλληλων με τη διεύθυνση φόρτισης.



Φωτογραφία 4.17: Κατά την φόρτιση πριν την δημιουργία ρωγμών.



Φωτογραφία 4.18: Δημιουργία ρωγμών παράλληλων με την διεύθυνση φόρτισης.



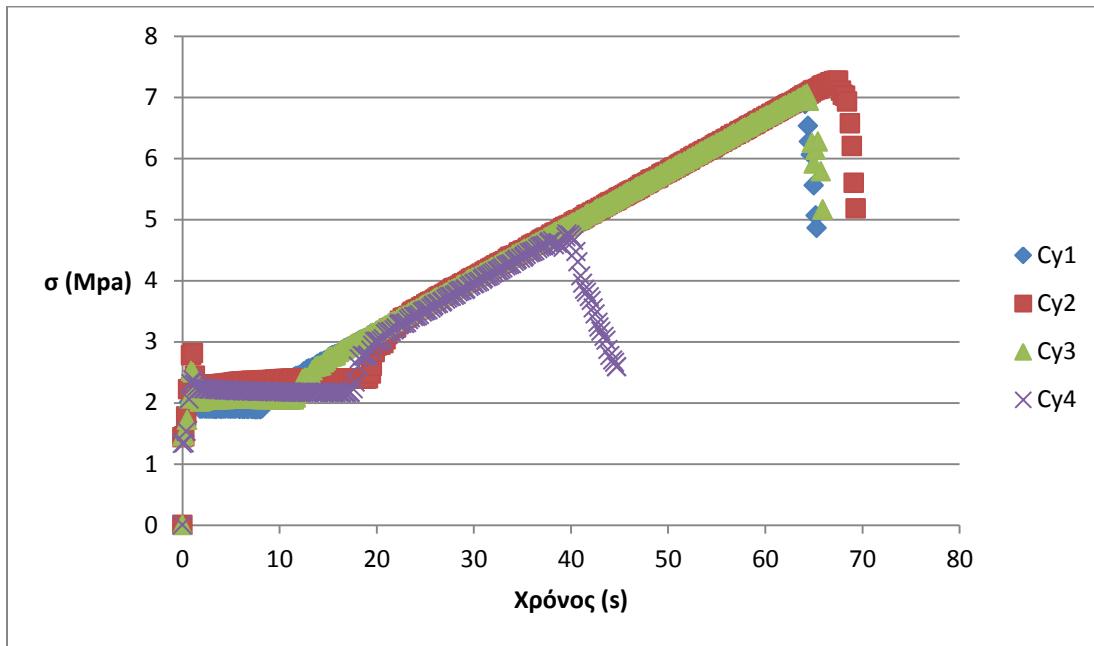
Φωτογραφία 4.19: Αστοχία του δοκιμίου.

4.7 Προσδιορισμός μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής σε κυλινδρικά δοκίμια.

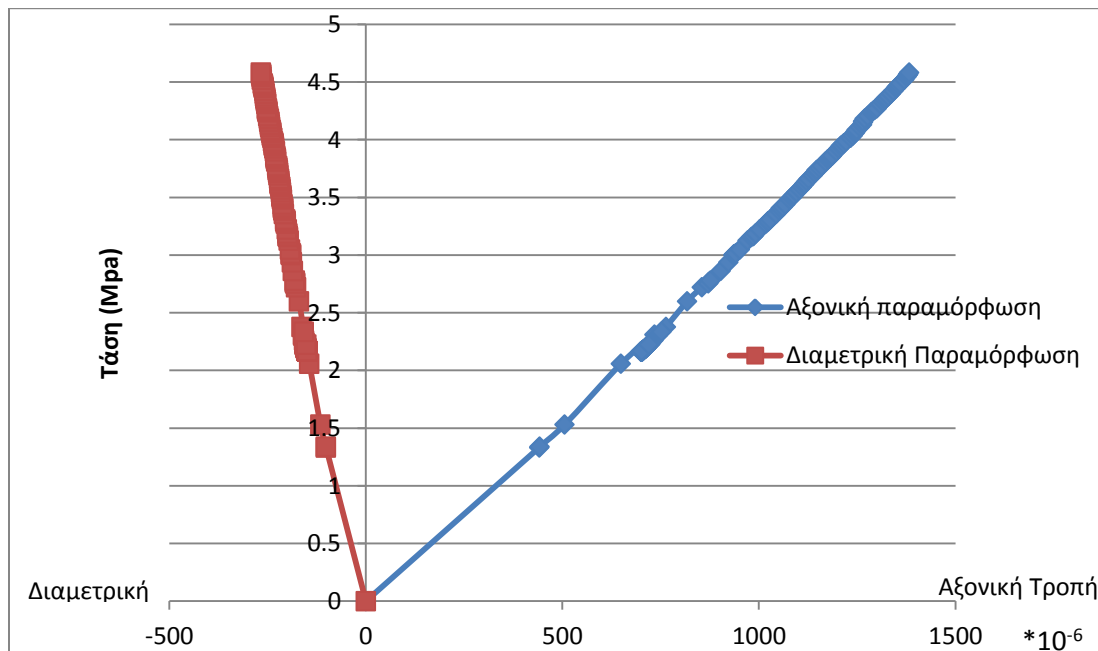
Με την πραγματοποίηση της δοκιμής μονοαξονικής θλίψης μπόρεσε να υπολογιστεί η μονοαξονική θλιπτική αντοχή του υλικού σε κυλινδρικά δοκίμια και με τη χρήση μετρητών παραμόρφωσης (strain gauges) να κατασκευαστούν καμπύλες αξονικής τάσης – αξονικής τροπής και αξονικής τάσης – διαμετρικής τροπής, από τις οποίες παρατηρείται ότι το υλικό μας συμπεριφέρεται ως γραμμικά ελαστικό μέχρι την αστοχία, δηλαδή ψαθυρό που σημαίνει ότι δεν αναμένουμε προειδοποίηση μέχρι την αστοχία του. Εν συνεχεία υπολογίστηκε το μέτρο ελαστικότητας και ο λόγος Poisson.

Σε δοκίμια κυλινδρικού σχήματος διαμέτρου 54mm από τα οποία προέκυψε η μονοαξονική αντοχή για κυλινδρικά δοκίμια είναι $\sigma_c=6.51$ MPa. Ακολουθούν τα διαγράμματα της τάσης κατά τη διάρκεια φόρτισης των δειγμάτων. Η αντοχή του δοκιμίου Cy4 είναι αισθητά μικρότερη λόγω του

ότι οι βάσεις έδρασης στου δοκιμίου στη πρέσα δεν ήταν αρκετά επίπεδες με αποτέλεσμα την μη ομοιόμορφη κατανομή του φορτίου.



Σχήμα 4.5: διάγραμμα Τάσης – Χρόνου των κυλινδρικών δοκιμίων.



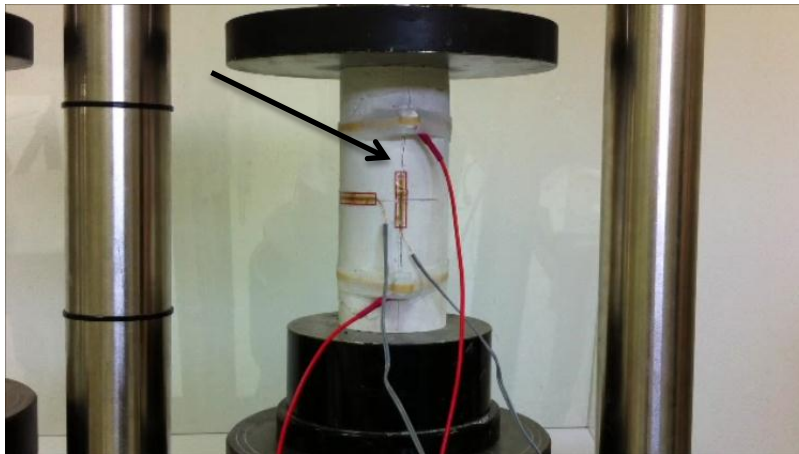
Σχήμα 4.6: Διάγραμμα $\sigma - \epsilon_{\alpha}$ και $\sigma - \epsilon_{\delta}$ για το δοκίμιο Cy4.

Από το παραπάνω διάγραμμα, το οποίο προέκυψε από το δοκίμιο Cy4 υπολογίστηκαν τα εξής, Εφαπτομενικό μέτρο ελαστικότητας 3.3 GPa, Μέσο μέτρο Ελαστικότητας 3.5 GPa, Τέμνον μέτρο ελαστικότητας 3.1 GPa. Τέλος υπολογίστηκε ο λόγος Poisson $\nu=0,17$. Και τα τέσσερα κυλινδρικά δοκίμια

αστόχησαν με τον ίδιο τρόπο όπως παρατηρήθηκε. Αρχικά ανέπτυξαν ρωγμή παράλληλη με την διεύθυνση της φόρτισης και στη συνέχεια αστόχησαν με αξονικό σχισμό.



Φωτογραφία 4.20: Δοκίμιο Cy4 κατά την Φόρτιση με Strain Gauges.



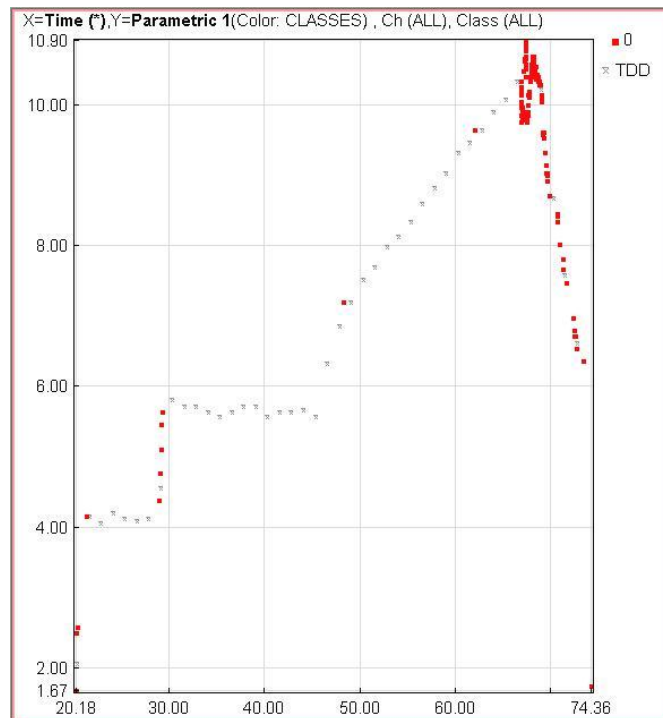
Φωτογραφία 4.21: Δημιουργία ρωγμής παράλληλη με τη διεύθυνση φόρτισης.



Φωτογραφία 4.22: Διεύρυνση της ρωγμής και αστοχία του δοκιμίου.

Στο δοκίμιο Cy4 τοποθετήθηκε αισθητήρας για τη παρακολούθηση της συμπεριφοράς του δοκιμίου με το φαινόμενο της Ακουστικής Εκπομπής. Όπως φαίνεται και στο παρακάτω διάγραμμα

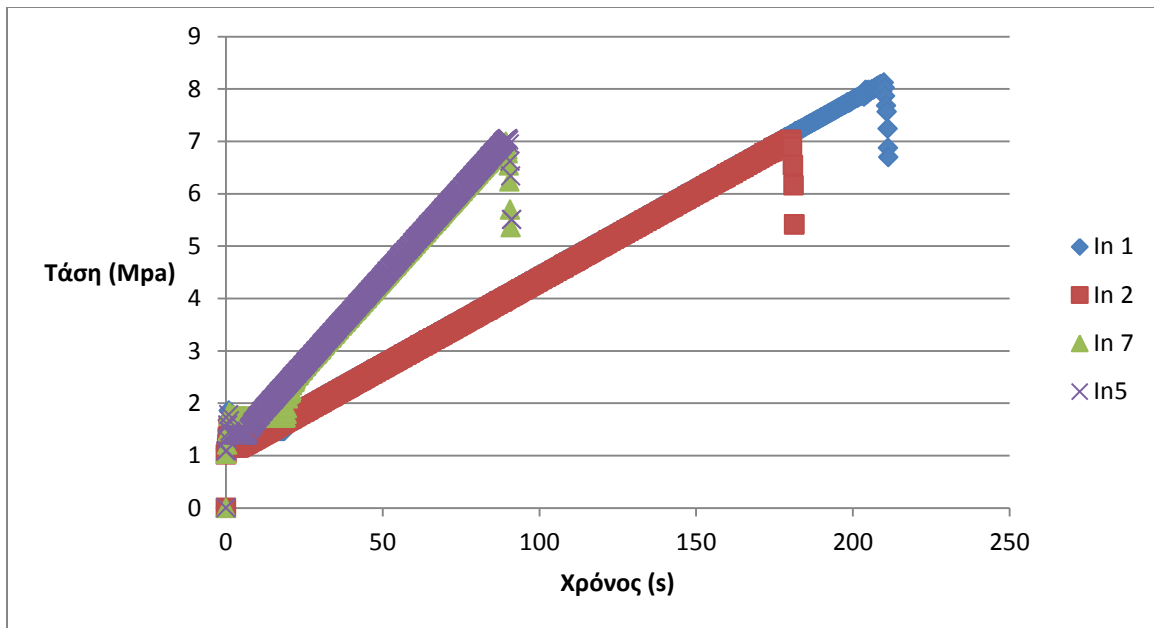
Parametric1 – Time, δεν παρατηρείται καταγραφή του φαινομένου λόγω της φύσης του υλικού. Δηλαδή είναι ψαθυρό και δεν δίνει προειδοποιητικά «σήματα» παρά μόνο κάποια κλάσματα πριν την αστοχία του. Στον άξονα έχει γίνει συσχετισμός του φορτίου που κατέγραψε η πρέσα με τη διαφορά δυναμικού που δημιουργεί ο αισθητήρας.



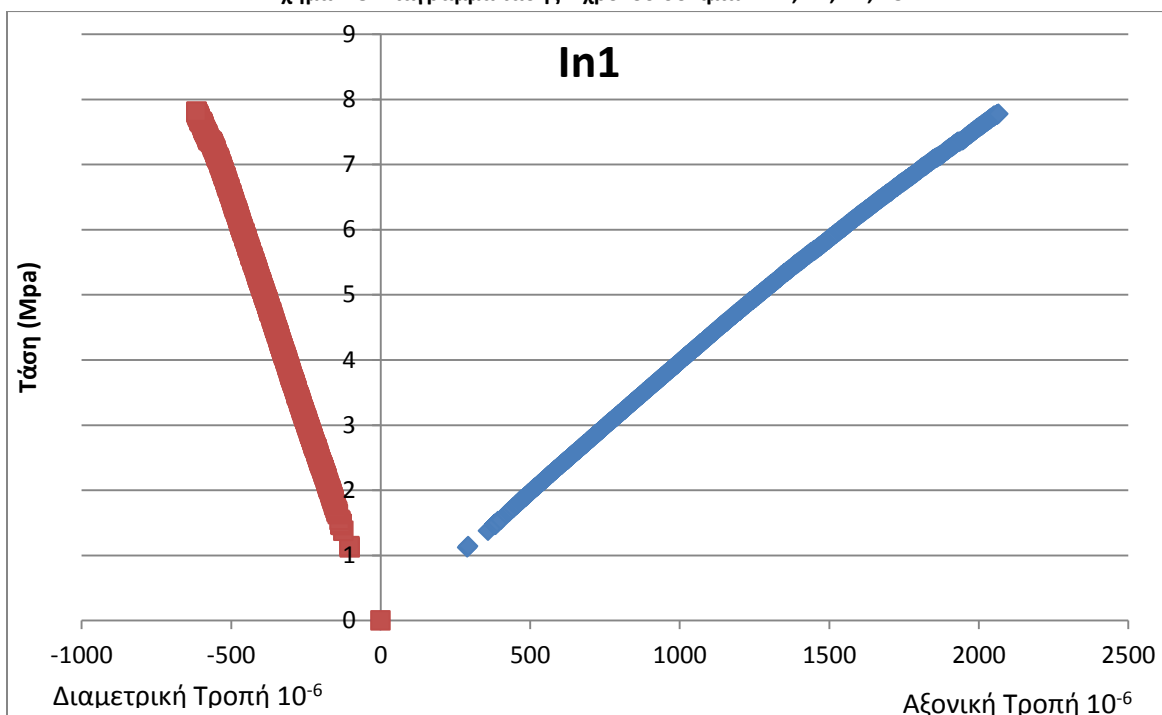
Σχήμα 4.7: Διάγραμμα ΑΕ Parametric –Time δοκιμίου Cy4.

4.8 Μονοαξονική θλιπτική αντοχή πρισματικών δοκιμίων.

Στη συνέχεια υπολογίστηκε η μονοαξονική θλιπτική αντοχή των πρισμάτων όπως σχεδιάστηκε για την διεξαγωγή του πειράματος όπου η αντοχή τους είναι ίση με 7,296 MPa, ο ρυθμός φόρτισης ήταν 100 kN/s για τα In7 και In5 και 50 kN/s για τα In1 και In2. Ακολουθούν οι καμπύλες τάσης – χρόνου φόρτισης και οι καμπύλες τάσης παραμόρφωσης για τα δοκίμια In1 και In2 όπου τοποθετήθηκαν μετρητές παραμόρφωσης.

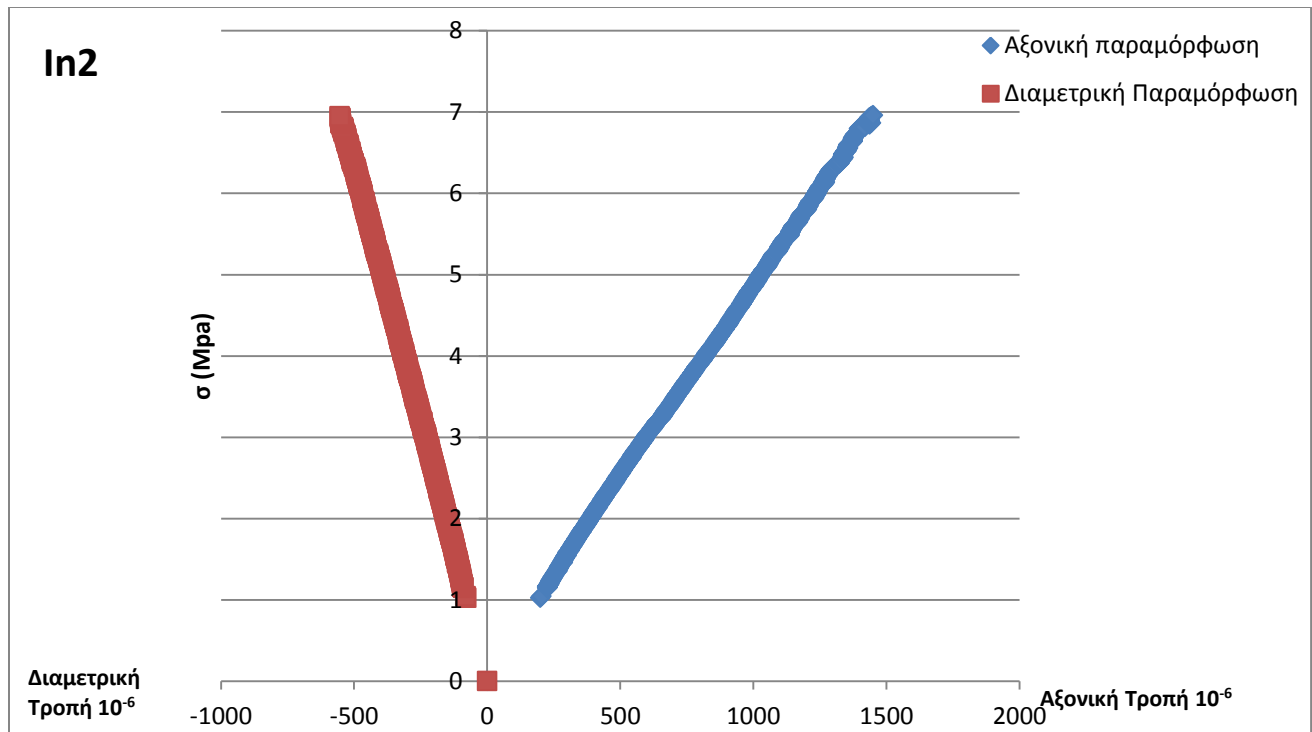


Σχήμα 4.8: Διάγραμμα τάσης – χρόνου δοκιμίων In1,In2,In7,In5.



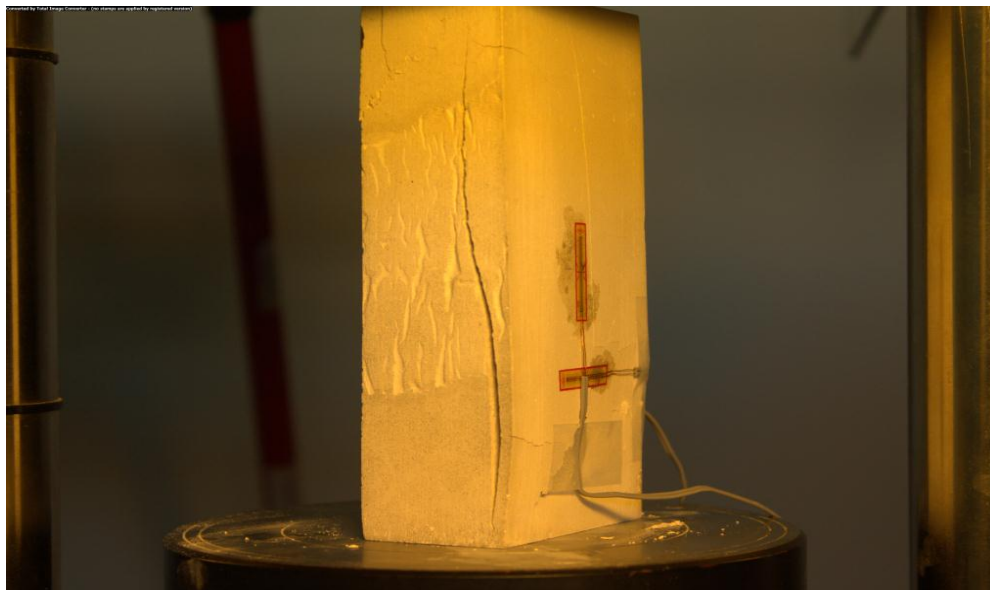
Σχήμα 4.9: Διάγραμμα Τάσης – τροπής του δοκιμίου In1.

Από το παραπάνω διάγραμμα υπολογίστηκε Εφαπτομενικό μέτρο ελαστικότητας 3.8GPa, Μέσο μέτρο ελαστικότητας 4 GPa, Τέμνον μέτρο ελαστικότητας 3,9 GPa και ο λόγος Poisson 0,29.

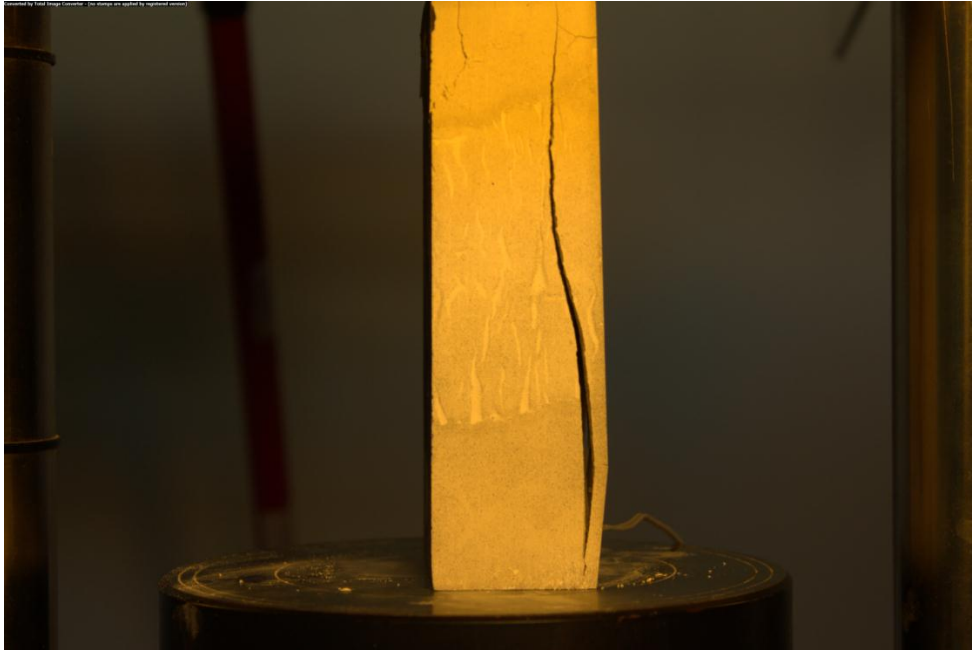


Σχήμα 4.10: Διάγραμμα τάσης- αξονικής τροπής και τάσης – διαμετρικής τροπής του δοκιμίου In2.

Από το παραπάνω διάγραμμα υπολογίστηκε Εφαπτομενικό μέτρο ελαστικότητας 4.6 GPa, Μέσο μέτρο ελαστικότητας 4.7 GPa, Τέμνον μέτρο ελαστικότητας 4,9 GPa και ο λόγος Poisson 0,3.

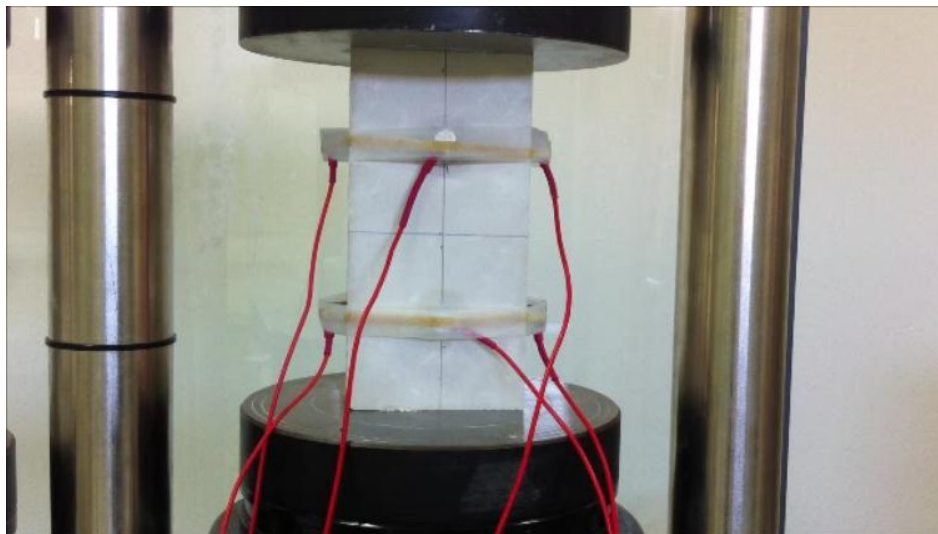


Φωτογραφία 4.23: Άρρηκτο δοκίμιο μετά την φόρτιση με τους μετρητές παραμόρφωσης.

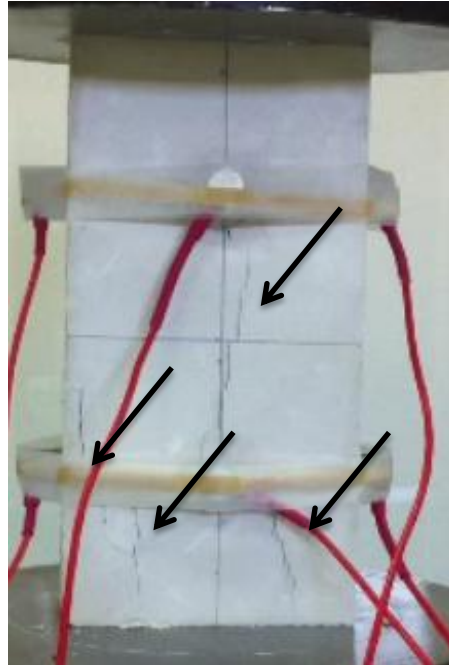


Φωτογραφία 4.24: Κατεστραμμένο δοκίμιο μετά την ολοκλήρωση της φόρτισης.

Στην παραπάνω φωτογραφία διακρίνεται η εφελκυστική ρωγμή που δημιουργήθηκε κατά την αστοχία του δοκιμίου, σχεδόν παράλληλη με τη διεύθυνση φόρτισης του δοκιμίου. Ο τρόπος αστοχίας είναι αξονικός σχισμός.



Φωτογραφία 4.25: δείγματος In7 πριν τη δημιουργία ρωγμών.



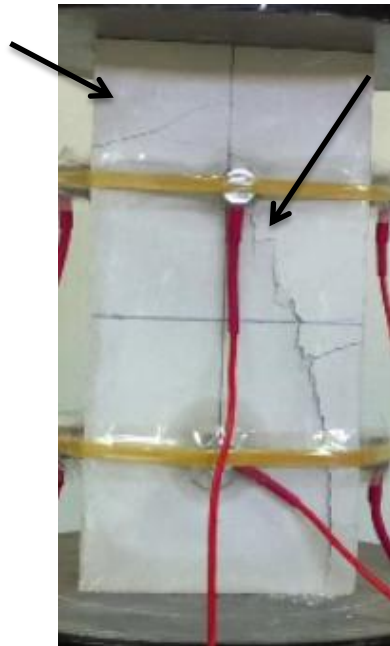
Φωτογραφία 4.26: Ρωγμές παράλληλες με τη διεύθυνση φόρτισης του δοκιμίου In7.



Φωτογραφία 4.27: δοκιμίου In5 πριν την δημιουργία ρωγμών.



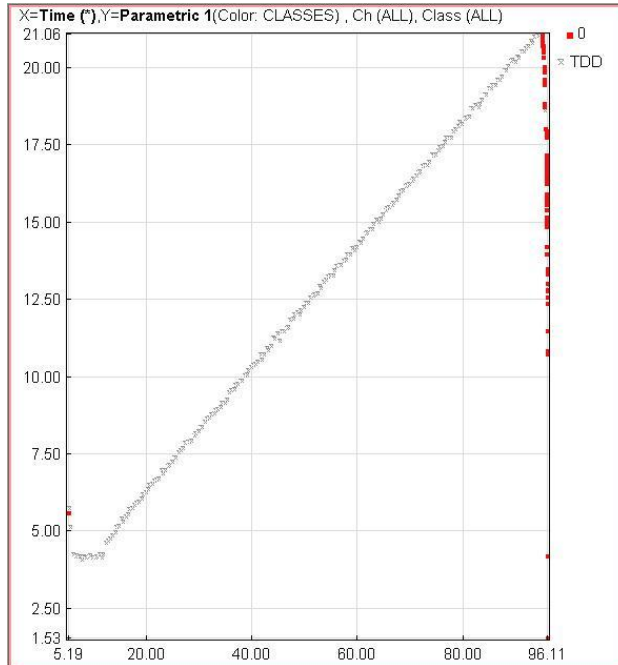
Φωτογραφία 4.28: Δημιουργία ρωγμή παράλληλης της διεύθυνσης φόρτισης



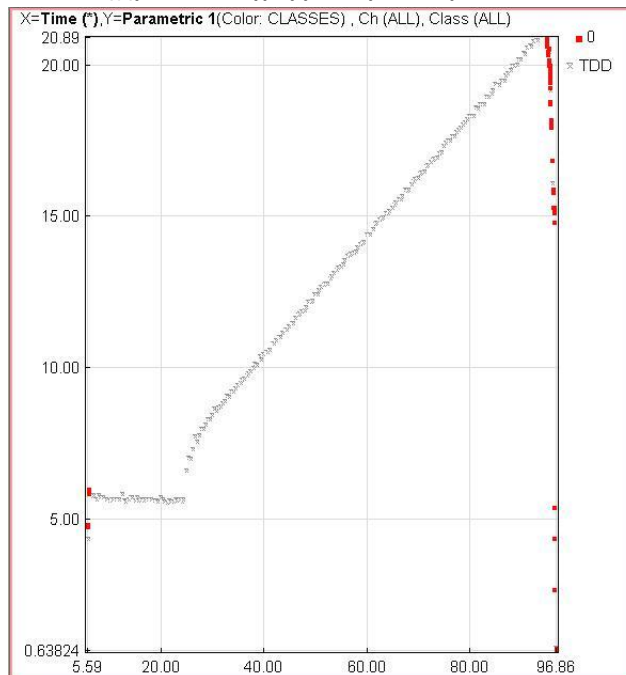
Φωτογραφία 4.29: Δημιουργία νέων κάθετων ως προς τη πρώτη ρωγμών και θραύση δοκιμίου.

Συνοψίζοντας παρατηρούμε ότι παρά το διαφορετικό ρυθμό φόρτισης των δοκιμίων η μέγιστη αντοχή τους δεν έχει μεγάλη απόκλιση.

Επίσης από τα διαγράμματα Τάσης - Τροπής στα δύο δοκίμια όπου τοποθετήθηκαν μετρητές παραμόρφωσης παρατηρούμε ότι έχουν ψαθυρή συμπεριφορά. Δηλαδή δεν έχουμε τη δημιουργία προειδοποιητικών ρωγμών αλλά τη δημιουργία τους, αμέσως πριν την αστοχία του δοκιμίου. Αυτό δικαιολογεί το ότι η καμπύλη τάσης - τροπής είναι ευθεία γραμμή.



Σχήμα 4.11:Διάγραμμα Φορτίου- Χρόνου In5



Σχήμα 4.12:Διάγραμμα Φορτίου –χρόνου In7

Από τη παρακολούθηση του πειράματος με την μέθοδο της Ακουστικής Εκπομπής, όπως φαίνεται και από τα παραπάνω διαγράμματα για το δοκίμιο In7 και In5 δεν καταγράφηκε κάποια δραστηριότητα μέχρι την στιγμή της αστοχίας. Αυτό επιβεβαιώνει πλήρως τη ψαθυρή συμπεριφορά του υλικού όπου δεν παρατηρείται κάποια ρωγμάτωση μέχρι την απότομη θραύση του.

Από τη παρατήρηση των δοκιμών διαπιστώθηκε η αστοχία τους με εφελκυστικές ρωγμές παράλληλες με τη διεύθυνση φόρτισης και με μεγάλη εμμονή.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΔΟΚΙΜΕΣ ΣΕ ΔΟΚΙΜΙΑ ΜΕ ΛΕΙΕΣ ΑΣΥΝΕΧΕΙΕΣ.

5. Δοκιμές σε δοκίμια με λείες ασυνέχειες.

5.1 Εισαγωγή.

Μετά τον χαρακτηρισμό υλικού κατασκευάστηκαν δοκίμια γύψου με τεχνητές ασυνέχειες με κλίση $0^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 40^\circ$ και 50° . Για μεγαλύτερη κλίση ασυνέχειας το δοκίμιο αστοχούσε με το ίδιο του το βάρος. Οι ασυνέχειες ήταν εμμένουσες, δηλαδή εκτείνονταν σε όλο το πλάτος του δοκιμίου. Σε όλα τα δοκίμια εγκαταστάθηκαν πριν την εκτέλεση της δοκιμής αισθητήρες πιεζοηλεκτρικού στοιχείου και με τη κατάλληλη διάταξη παρατηρήθηκε το φαινόμενο της Ακουστικής Εκπομπής. Η συνέχεια των δοκιμών διακοπτόταν με ένα λεπτό φύλλο από πλαστικό κατάλληλα προσανατολισμένο ώστε να δημιουργηθεί η επιθυμητή κλίση κάθε φορά. Τέλος τα δοκίμια βιντεοσκοπήθηκαν ώστε μαζί με τα δεδομένα της ακουστικής εκπομπής να βγουν χρήσιμα συμπεράσματα για τον τρόπο αστοχίας τους αλλά και την επίδραση της κλίσης της ασυνέχειας.



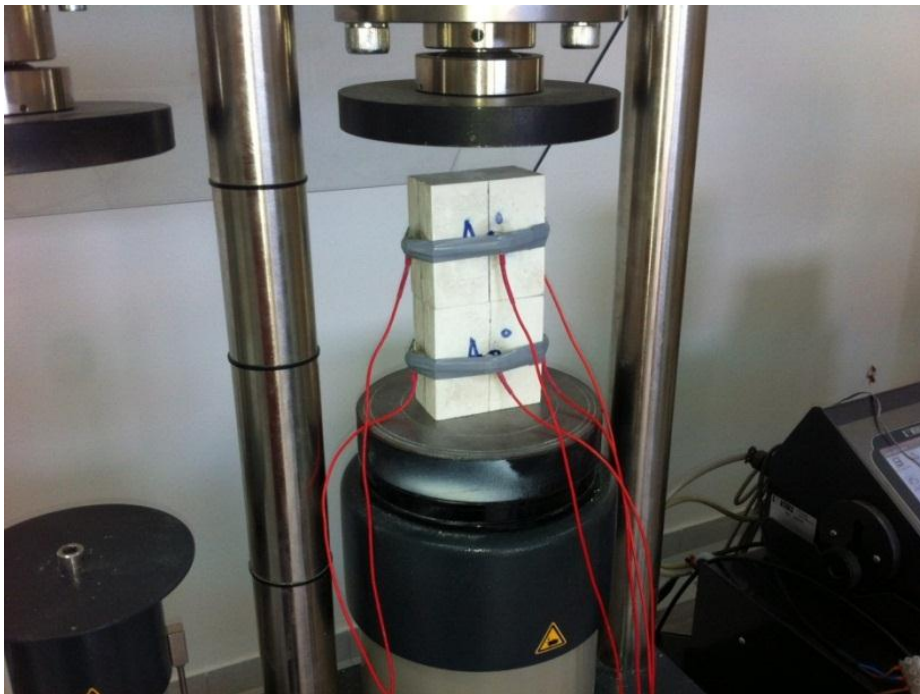
Φωτογραφία 5.1: Καλούπι για τη κατασκευή δοκιμίου με ασυνέχεια κλίσης 20° .



Φωτογραφία 5.2: Δοκίμιο με εγκαταστημένους αισθητήρες ΑΕ λίγο πριν την έναρξη δοκιμής.

5.2 Δοκίμια με κλίση ασυνεχειών 0° .

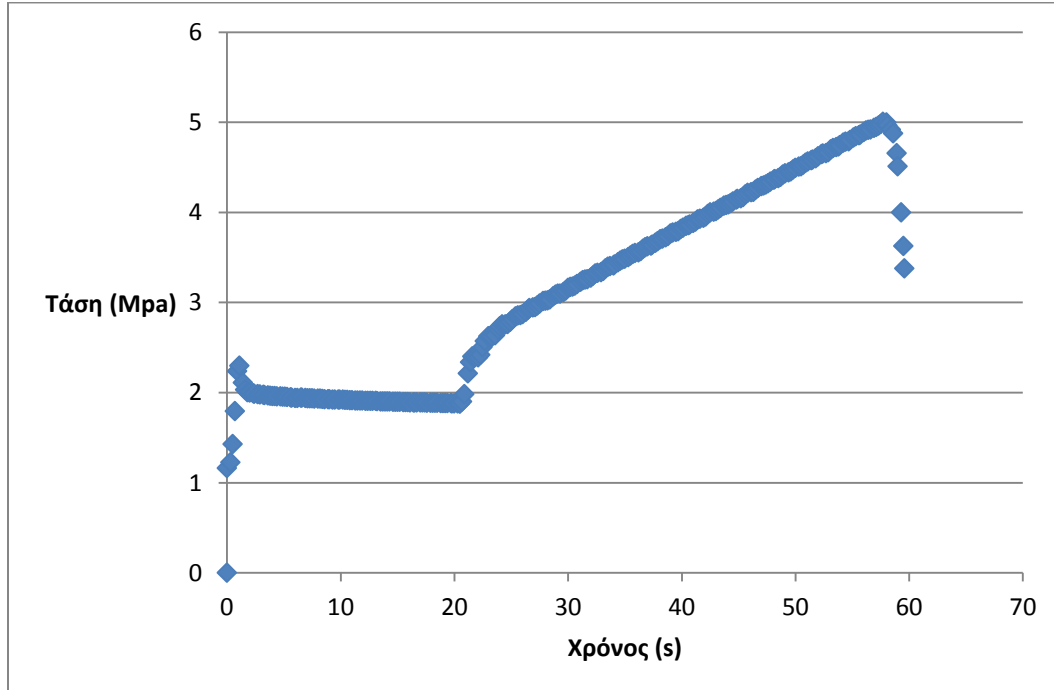
Κατασκευάστηκε δοκίμιο με οριζόντια εμμένουσα ασυνέχεια. Η μέγιστη αντοχή του δοκιμίου είναι $\sigma_{\max}=5.00$ MPa αρκετά μειωμένη από αυτή του άρρηκτου δοκιμίου $\sigma_{\max}=7.296$ MPa. Η ύπαρξη της ασυνέχειας έστω και με μηδενική κλίση επηρέασε την αντοχή του δοκιμίου. Ο τρόπος αστοχίας του δοκιμίου είναι παρόμοιος με αυτόν των άρρηκτων δοκιμίων. Δηλαδή είχαμε δημιουργία παράλληλων με τη διεύθυνση φόρτισης μη εμμενουσών ρωγμών και έπειτα τη θραύση του δοκιμίου με αξονικό σχισμό. Με τη διαφορά ότι η δημιουργία των ρωγμών ξεκινά από το υπάρχον επίπεδο της τεχνητής ασυνέχειας.



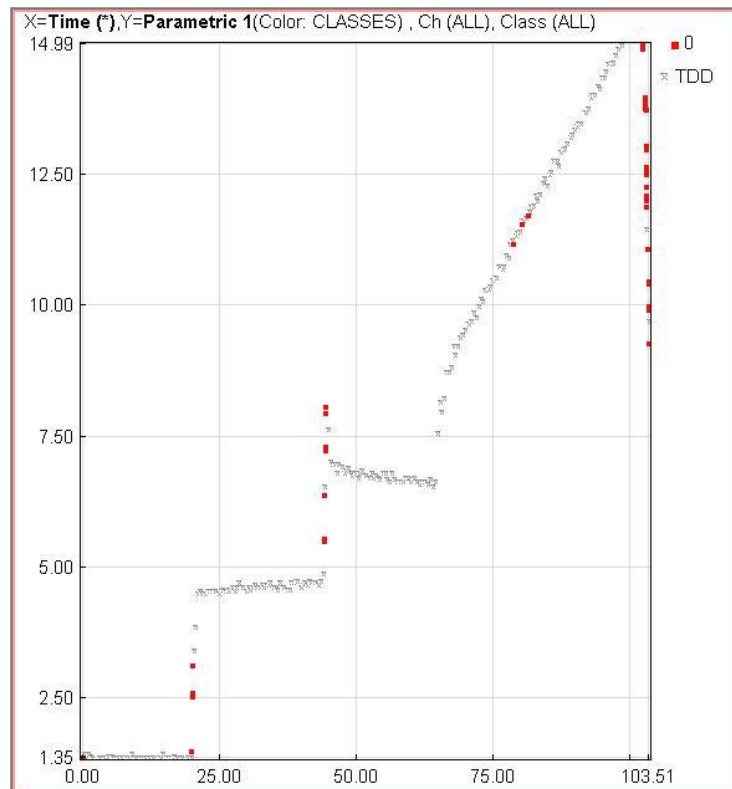
Φωτογραφία 5.3 : Δοκίμιο με κλίση εμμένουσας ασυνέχειας 0° πριν τη φόρτιση.



Φωτογραφία 5.4: Δοκίμιο με κλίση εμμένουσας ασυνέχειας 0° μετά την θραύση.



Σχήμα 5.1: Διάγραμμα τάσης-χρόνου.



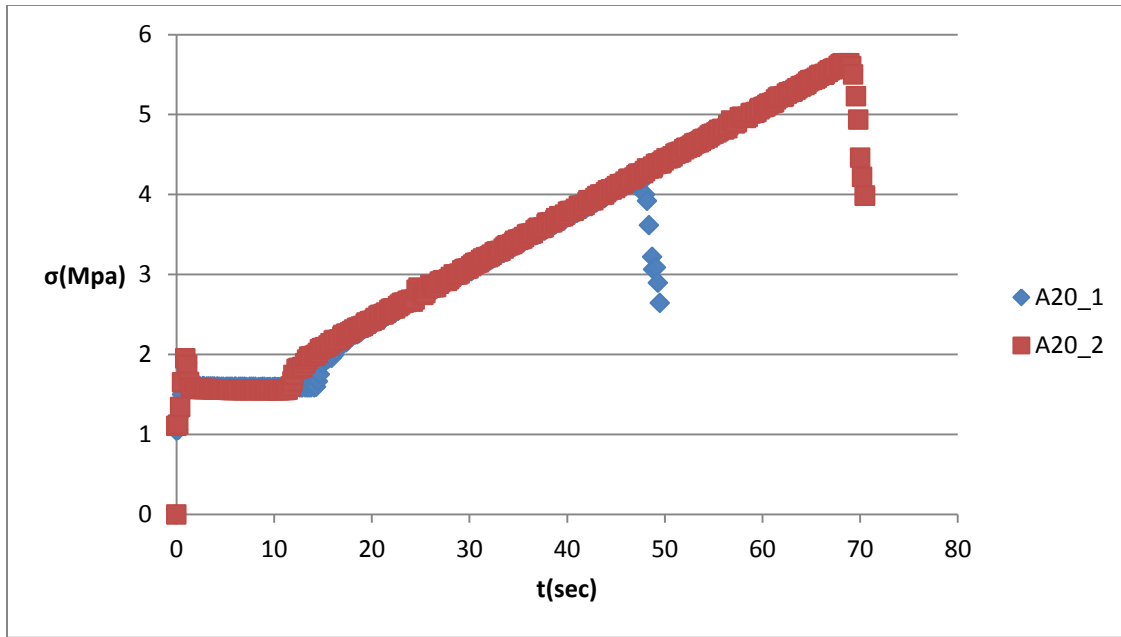
Σχήμα 5.2: Διάγραμμα Φορτίου – Χρόνου δοκιμίου A0 με τα ληφθέντα σήματα ακουστικής εκπομπής.

Με τη μέθοδο της ΑΕ πάλι δεν παρατηρείται σημαντική δραστηριότητα παρά μόνο 20 δευτερόλεπτα πριν από την αστοχία του δοκιμίου, τα σήματα πιθανό να σχετίζονται με τη δημιουργία ρωγμών οι οποίες δεν μπορούν να επιβεβαιωθούν από το βίντεο.

5.3 Δοκίμια με κλίση ασυνεχειών 20°.

Εκτελέστηκαν δοκιμές σε δυο διαφορετικά δοκίμια με κλίση επιπέδου ασυνέχειας 20° ως προς την οριζόντιο. Από όπου προέκυψαν οι παρακάτω καμπύλες τάσης – χρόνου φόρτισης με μέγιστες τάσεις 4.2 MPa και 5,6 MPa αντίστοιχα.

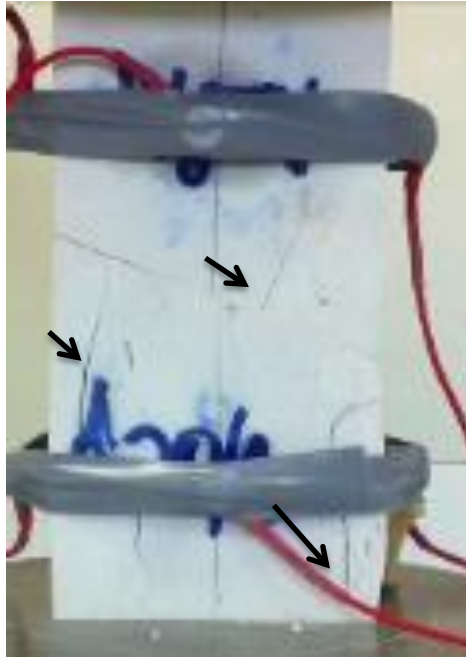
Επίσης τα πειράματα βιντεοσκοπήθηκαν και όπως φαίνεται και από τις φωτογραφίες στο δοκίμιο A20_1 παρατηρήθηκαν ρωγμές κάθετα στην επιφάνεια ασυνέχειας καθώς και κάθετα στις βάσεις φόρτισης του δοκιμίου. Αντίστοιχα στο δοκίμιο A20_2 παρατηρήθηκαν 2 ρωγμές εκατέρωθεν της ασυνέχειας σχεδόν κάθετες σε αυτή. Στην συνέχεια είχαμε ανάπτυξη νέων ρωγμών με ίδιο προσανατολισμό με τις πρώτες.



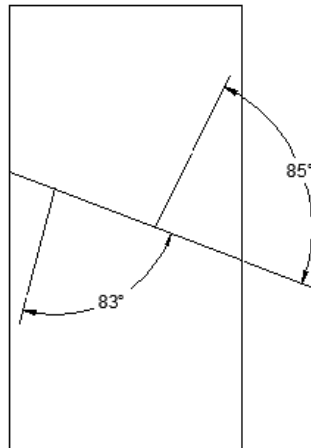
Σχήμα 5.3: Διάγραμμα τάσης – χρόνου φόρτισης.



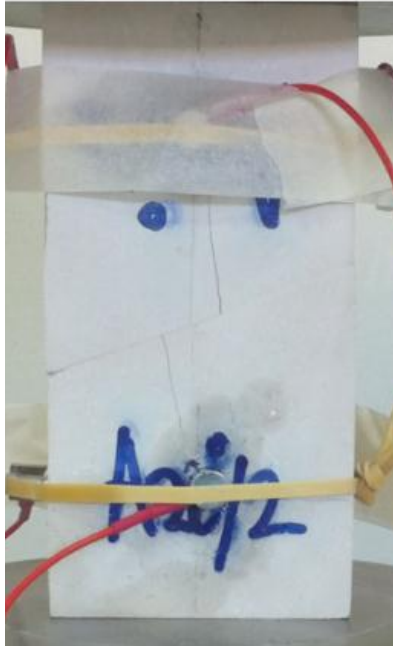
Φωτογραφία 5.5: Δοκίμο την στιγμή της φόρτισης πριν την εμφάνιση ρωγμών.



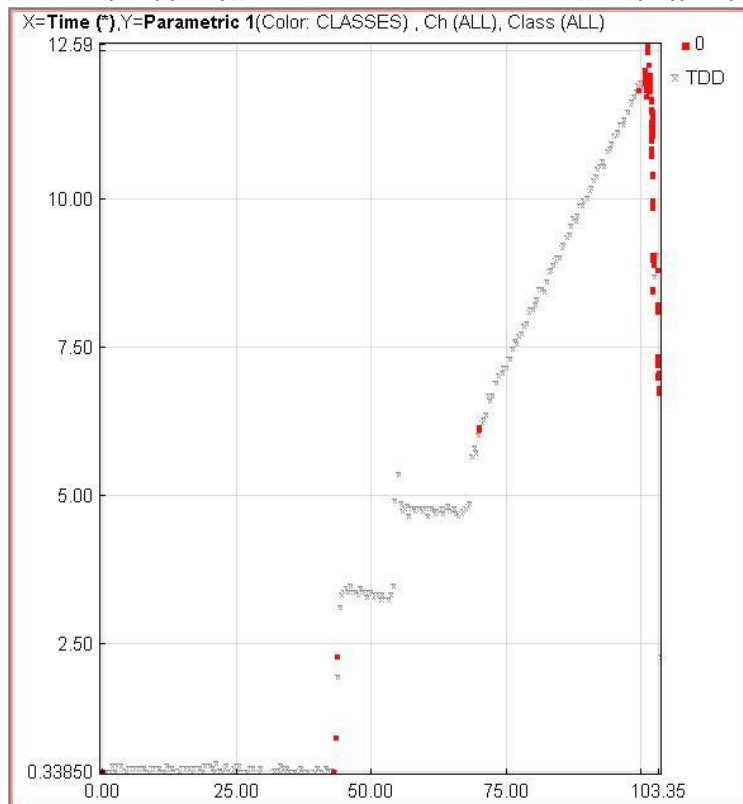
Φωτογραφία 5.6: Ασυνέχειες προσανατολισμένες σχεδόν κάθετες στο επίπεδο ασυνέχειας.



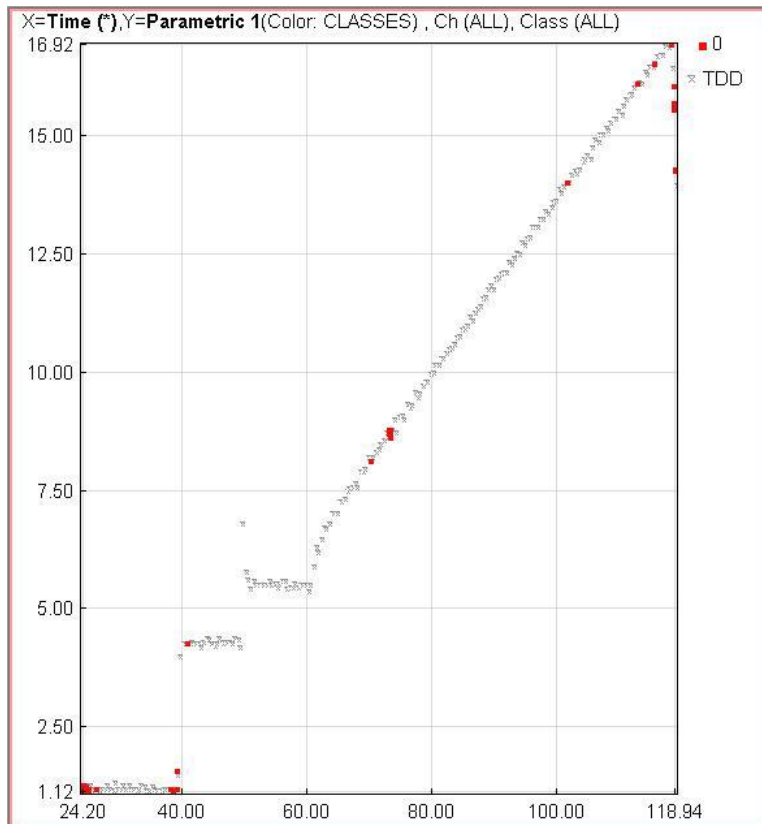
Σχήμα 5.4: Απεικονίζονται οι αρχικές τροχιές των ασυνεχειών στο επίπεδο αδυναμίας.



Φωτογραφία 5.7: Δημιουργία αρχικών κάθετων στο επίπεδο ασυνέχειας ρωγμών για το A20_2.



Σχήμα 5.5: Διάγραμμα ΑΕ δοκιμίου A20_1



Σχήμα 5.6: Διάγραμμα ΑΕ δοκιμίου A20_2

Στο δοκίμιο A20_1 δε παρατηρήθηκε Ακουστική Εκπομπή αντίθετα στο A20_2 έχουμε τη καταγραφή σημάτων περίπου 40 δευτερόλεπτα πριν από τη θραύση του δοκιμίου κάτι που επιβεβαιώνεται και από το βίντεο καθώς 40 δευτερόλεπτα πριν από την θραύση φάνηκαν οι πρώτες ρωγμές, όπως φαίνεται στη παρακάτω φωτογραφία.

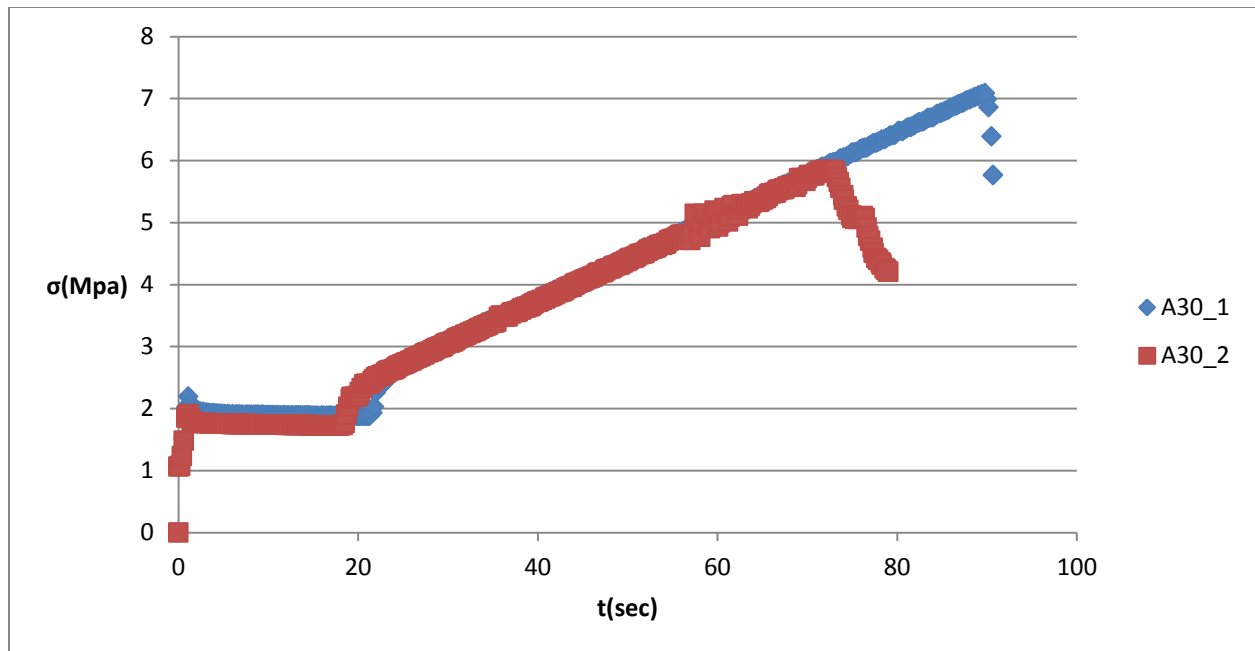


Φωτογραφία 5.8: Βιντεοσκόπηση 40 sec πριν τη αστοχία του δοκιμίου.

Το δοκίμιο A20_1 αστόχησε με εφελκυστικές ρωγμές ομοίως το A20_2 αστόχησε με εφελκυστικές ρωγμές που ξεκινούσαν από την ασυνέχεια κάθετες και εκτείνονται σε ολόκληρο το μισό του δοκιμίου.

5.4 Δοκίμια με κλίση επιπέδου ασυνέχειας 30° .

Σε δοκίμια με ένα επίπεδο ασυνέχειας με κλίση 30° εκτελέστηκαν δοκιμές και έφτασαν αντοχή 7 MPa το A30_1 και 5.8 MPa το A30_2. Παρά το ότι η κλίση της ασυνέχειας αυξάνεται η αντοχή είναι λίγο υψηλότερη από αυτών με κλίση επιπέδου ασυνέχειας 20° . Παρακάτω απεικονίζονται οι καμπύλες τάσης – χρόνος φόρτισης των δυο δοκιμίων.



Σχήμα 5.7: Διάγραμμα τάσης – χρόνου.

Για το A30_1 παρατηρήθηκε δημιουργία ρωγμής παράλληλη με τη διεύθυνση φόρτιση. Δημιουργήθηκε από την ασυνέχεια πάνω και κάτω από αυτήν και στην συνέχεια αστόχησε το δοκίμιο με αξονικό σχισμό.



Φωτογραφία 5.9: Δοκίμιο κατά την φόρτιση πριν την εμφάνιση ρωγμών.



Φωτογραφία 5.10:Ρωγμές σχεδόν κάθετες με γωνία 60° από την ασυνέχεια.

Για το δοκίμιο A30_2 είχαμε τη δημιουργία ρωγμών παράλληλων με την διεύθυνση φόρτισης από επιφάνεια ασυνέχειας. Η αστοχία επήλθε με περαιτέρω άνοιγμα των ρωγμών χωρίς να παρατηρείται ολίσθηση στο επίπεδο ασυνέχειας.

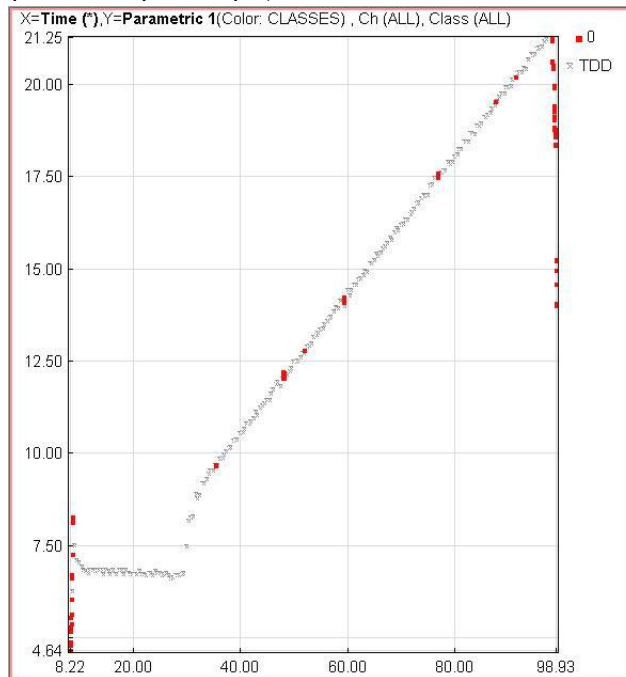


Φωτογραφία 5.11:Δοκίμιο με ρωγμές σχεδόν κάθετες.

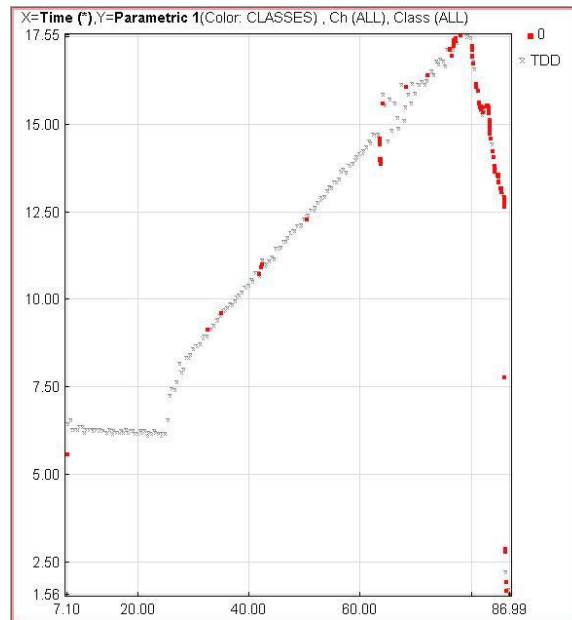


Φωτογραφία 5.12:Δοκίμιο A30_2

Η αριστερή ρωγμή φαίνεται να είναι επιφανειακή ενώ οι άλλες οι οποίες διαπερνούν το επίπεδο της ασυνέχειας φαίνονται βαθύτερες.



Σχήμα 5.8:Διάγραμμα ΑΕ δοκιμίου A30_1.



Σχήμα 5.9: Διάγραμμα ΑΕ δοκιμίου A30_2.

Με τη μέθοδο της ΑΕ εκπομπής για το δοκίμιο A30_1 εντοπίστηκαν κάποια σήματα που δεν μπορούν να επαληθευθούν στο βίντεο. Αντίθετα για το δοκίμιο A30_2 περίπου 25 δευτερόλεπτα πριν την αστοχία έχουμε της πρώτες καταγραφές ΑΕ και πράγματι έχουμε τη εμφάνιση των πρώτων ρωγμών.

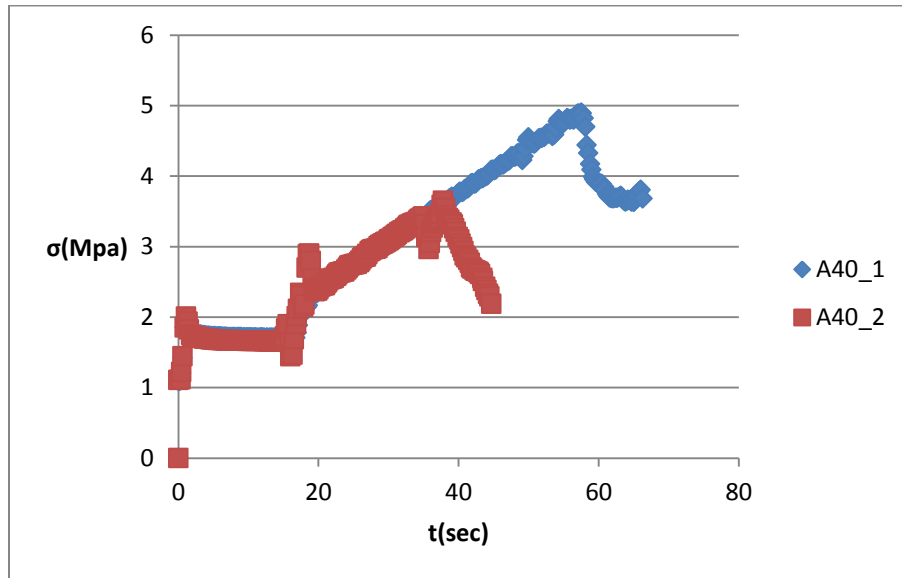
Το δοκίμιο A30_1 αστόχησε με τη δημιουργία εφελκυστικών ρωγμών που ξεκινάνε από την ασυνέχεια και εκτείνονται σε όλο το δοκίμιο. Ενώ στο A30_2 εκτός από τις εφελκυστικές ρωγμές παρατηρούμε και ίχνη διάτμησης στο επίπεδο της ασυνέχειας.



Φωτογραφία 5.13: A30_1 δοκίμιο. Εφελκυστικές ρωγμές ξεκινάνε από την ασυνέχεια.

5.5 Δοκίμια με κλίση ασυνέχειας 40°.

Στη συνέχεια του πειράματος κατασκευάστηκαν δοκίμια με κλίση επιπέδου ασυνέχειας 40°. Τα δοκίμια είχαν μειωμένη αντοχή καθώς η κλίση της ασυνέχειας αυξήθηκε. Το A40_1 είχε 4,8MPa και το A40_2 είχε 3,6 MPa.



Σχήμα 5.10:Διάγραμμα τάσης - χρόνου.

Από την αξιολόγηση των βίντεο για το δοκίμιο A40_1 παρατηρείτε ρωγμή παράλληλη με τη διεύθυνση φόρτισης αλλά και κάθετη στη βάση φόρτισης δοκιμίου. Η θραύση επέρχεται με καταστροφή της βάσης και διερεύνησης των ρωγμών.



Φωτογραφία 5.14:Δοκίμιο κατά τη φόρτιση πριν τη ρωγμάτωση του.



Φωτογραφία 5.15: Ρωγμές δοκιμίου κατά την φόρτιση.

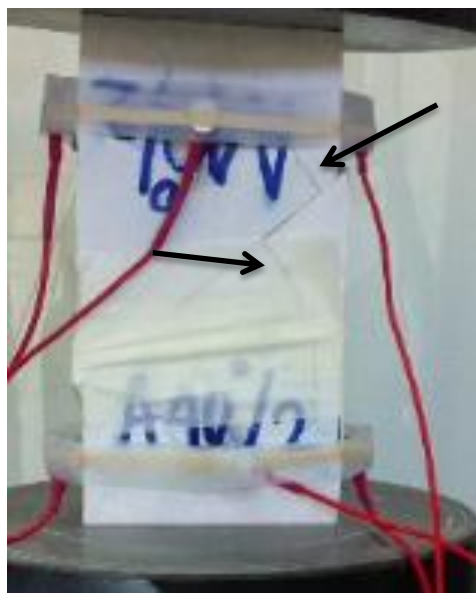
Για το δοκίμιο A40_2 παρατηρήθηκε ρωγμή κάθετη στην ασυνέχεια καθώς και ολίσθηση στο επίπεδο της ασυνέχειας. Έπειτα ακολούθησε η διεύρυνση της ρωγμής έως την βάση του φόρτισης του δοκιμίου.



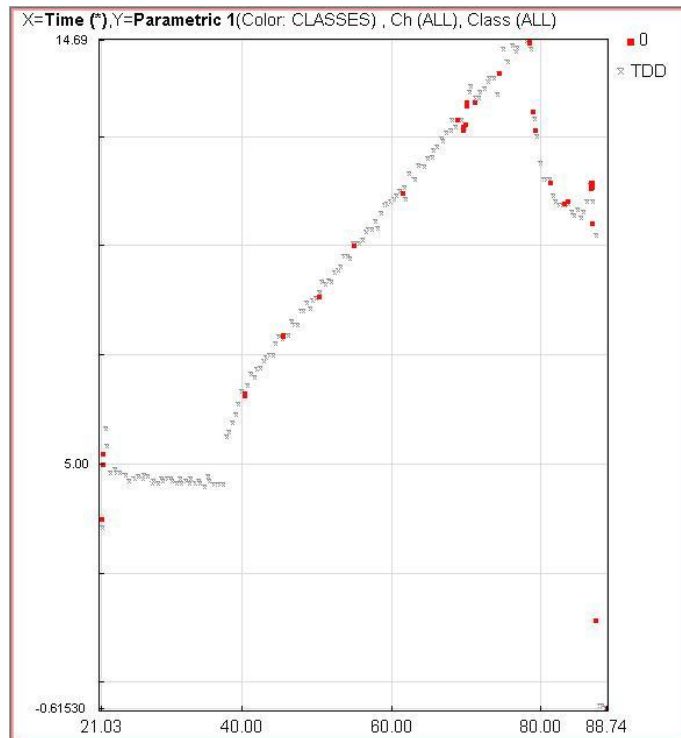
Φωτογραφία 5.16: Αρχικό στάδιο φόρτισης δεν παρατηρείτε ρωγμάτωση.



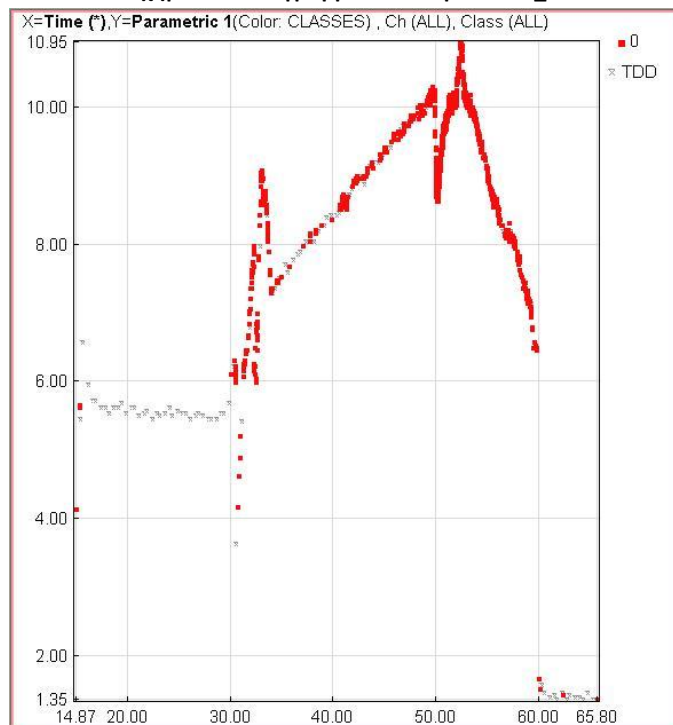
Φωτογραφία 5.17: Ρωγμή κάθετη στο επίπεδο της ασυνέχειας.



Φωτογραφία 5.18: Νέα ρωγμάτωση με ίδιο προσανατολισμό αυξάνοντας το φορτίο.



Σχήμα 5.11: Διάγραμμα ΑΕ δοκιμίου A40_1.

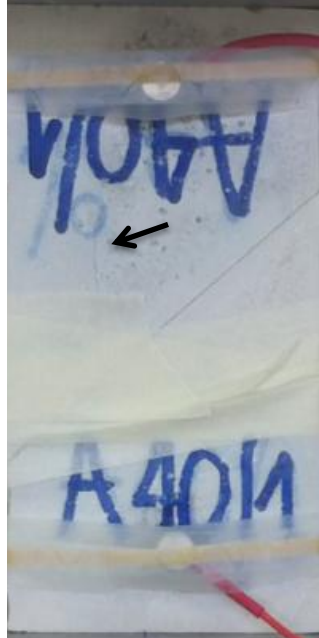


Σχήμα 5.12: Διάγραμμα ΑΕ δοκιμίου A40_2.

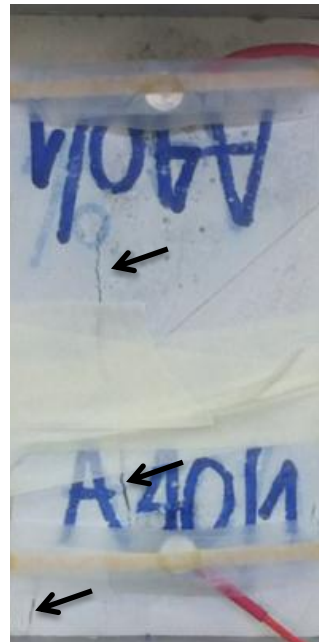
Για το δοκίμιο A40_1 επαληθεύονται κάποια σήματα Ακουστικής Εκπομπής από το βίντεο καθώς 20 δευτερόλεπτα πριν τη θραύση έχουμε δημιουργία μια ρωγμής και δέκα δευτερόλεπτα πριν τη θραύση έχουμε έντονη ρωγμάτωση έως τη θραύση του όπως φαίνεται στις ακόλουθες φωτογραφίες. Για το δοκίμιο A40_2 διακρίνουμε έντονη Ακουστική δραστηριότητα κάτι που

δικαιολογείται καθώς 30 δευτερόλεπτα πριν τη θραύση του είχαμε ολίσθηση κατά μήκος του επιπέδου ασυνέχειας και στη συνέχεια την έντονη ρωγμάτωση.

Από τη παρατήρηση του δοκιμίου A40_1 διαπιστώνονται εφελκυστικές κάθετες ρωγμές καθώς και ένα επίπεδο διάτμησης στο πάνω μέρος του δοκιμίου. Ενώ στο A40_2 εκτός από τις εφελκυστικές παρατηρούνται ίχνη διάτμησης στο επίπεδο ασυνέχειας.



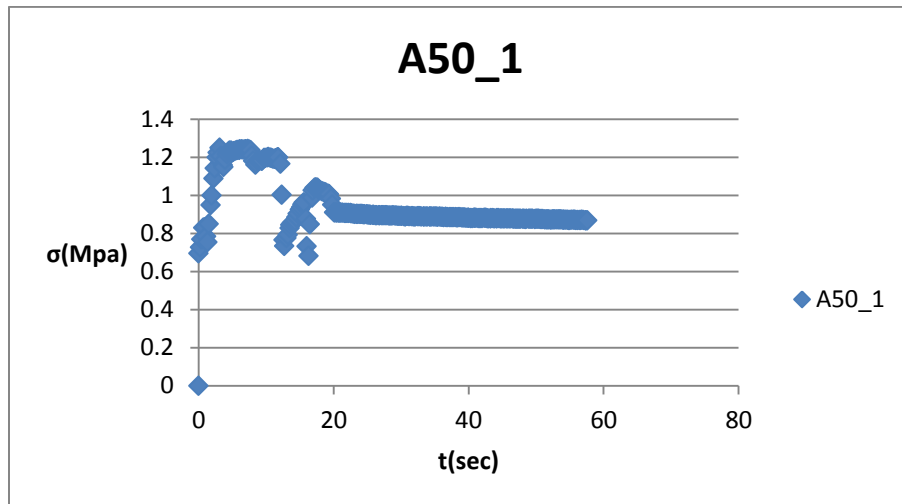
Φωτογραφία 5.19: Έναρξη ρωγμής 20 δευτερόλεπτα πριν τη θραύση του δοκιμίου A40_1.



Φωτογραφία 5.20: Ρωγμάτωση δοκιμίου A40_1 10 δευτερόλεπτα πριν την θραύση του δοκιμίου.

5.6 Δοκίμια με επίπεδο ασυνέχειας 50°.

Για το τελευταίο στάδιο του πρώτου μέρους των πειραματικών δοκιμών κατασκευάστηκε δοκίμιο με κλίση επιπέδου ασυνέχειας 50°. Όπως φαίνεται από το διάγραμμα η τιμή της αντοχής του φτάνει μόλις τα 1,2 MPa. Από τη παρατήρηση του βίντεο παρατηρείται ολίσθηση στο επίπεδο ασυνέχειας και δημιουργία μικρής ρωγμής κάθετη στο επίπεδο της ασυνέχειας.



Σχήμα 5.13: Διάγραμμα τάσης – χρόνου.

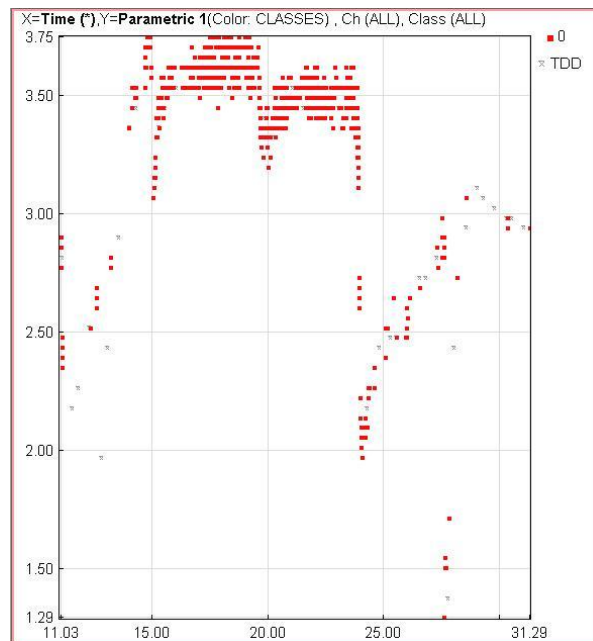


Φωτογραφία 5.21: Ολίσθηση κατά το επίπεδο ασυνέχειας.



Φωτογραφία 5.22: Δημιουργία ρωγμής λίγο πριν τη θραύση.

Στο A50_1 παρατηρήθηκαν εφελκυστικές ρωγμές κάθετες στο επίπεδο ασυνέχειας που γίνονται παράλληλες με τη διεύθυνση φόρτισης και φτάνουν ως την βάση του δοκιμίου.



Σχήμα 5.14: Διάγραμμα ΑΕ δοκιμίου A50_1.

Τα έντονα σήματα ακουστικής εκπομπής εξηγούνται λόγω της ολίσθησης από την αρχή της δοκιμής μονοαξονικής θλίψης.

5.8 Δοκίμια με 5 επίπεδες ασυνέχειες.

5.8.1 Εισαγωγή

Σε αυτήν την σειρά πρισμάτων με κατάλληλα καλούπια κατασκευαστήκαν 5 παράλληλα επίπεδα ασυνεχιών με συγκεκριμένο προσανατολισμό και διερευνήθηκε η αντοχή τους σε μονοαξονική θλίψη. Η κάθετη απόσταση μεταξύ των ασυνεχιών κρατήθηκε σταθερή ίση με 2.5cm. Επίσης τα πειράματα με χρήση κατάλληλης διάταξης βιντεοσκοπήθηκαν για τη διεξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων για τον τρόπο αστοχίας τους. Επίσης για την παρακολούθηση της φόρτισης των δοκιμών χρησιμοποιήθηκαν έξι αισθητήρες καταγραφής ακουστικής εκπομπής σε κάθε ένα δοκίμιο.



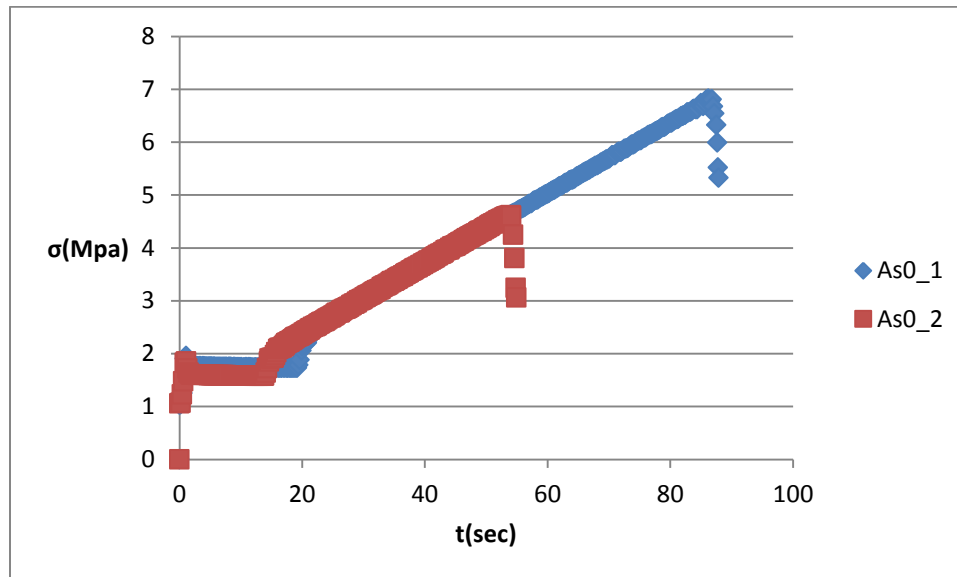
Φωτογραφία 5.23: Καλούπια για την κατασκευή πρισμάτων με 5 παράλληλα επίπεδα ασυνεχιών.



Φωτογραφία 5.24: Καλούπια Κατασκευής δοκιμών με 5 παράλληλες ασυνέχειες.

5.8.2 Δοκίμια με 5 επίπεδα ασυνεχειών κλίσης 0°.

Αρχικά κατασκευάστηκαν δύο δοκίμια με πέντε εμμένουσες και οριζόντιες ασυνέχειες. Τα δοκίμια έφτασαν σε μέγιστη αντοχή μονοαξονικής θλίψης 5,7 MPa και όπως φαίνεται και από το διάγραμμα τάσης χρόνου. Το δοκίμιο όπως αναμενόταν παρουσίασε μικρότερη αντοχή σε αντίθεση τόσο με τα άρρηκτα όσο και με αυτό μιας ασυνέχειας 0° κλίσης.

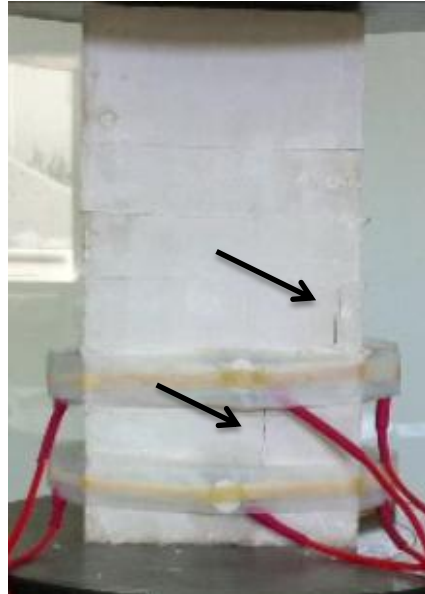


Σχήμα 5.15: Διάγραμμα τάσης - χρόνου.

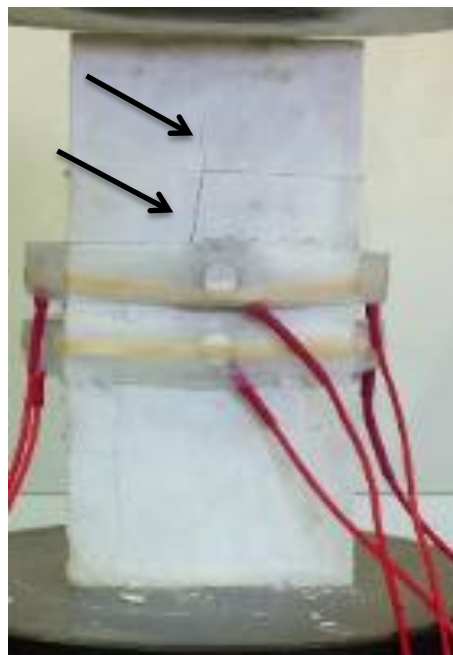
Κατά τη φόρτιση των δοκιμών όπως φαίνεται και στις φωτογραφίες είχαμε το σχηματισμό κάθετων ρωγμών στα επίπεδα ασυνεχειών.



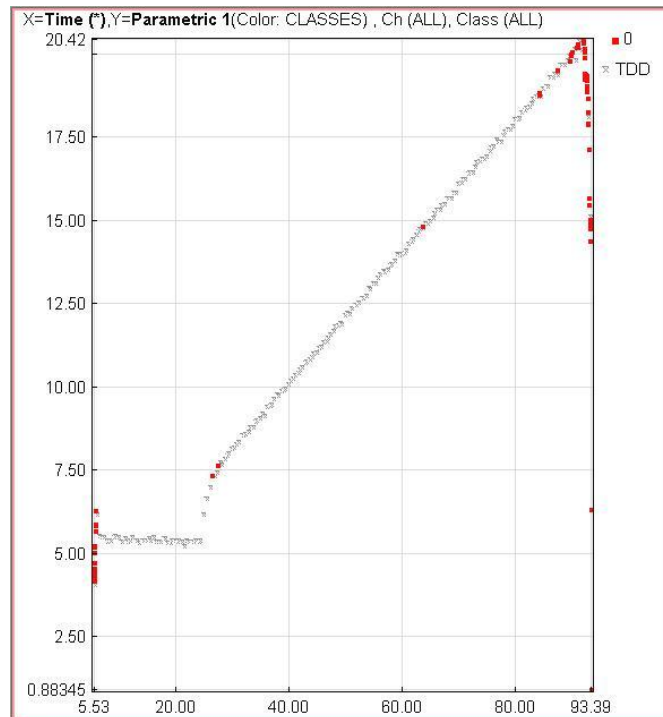
Φωτογραφία 5.25: Δοκίμιο As0_1 πριν το σχηματισμό ρωγμών.



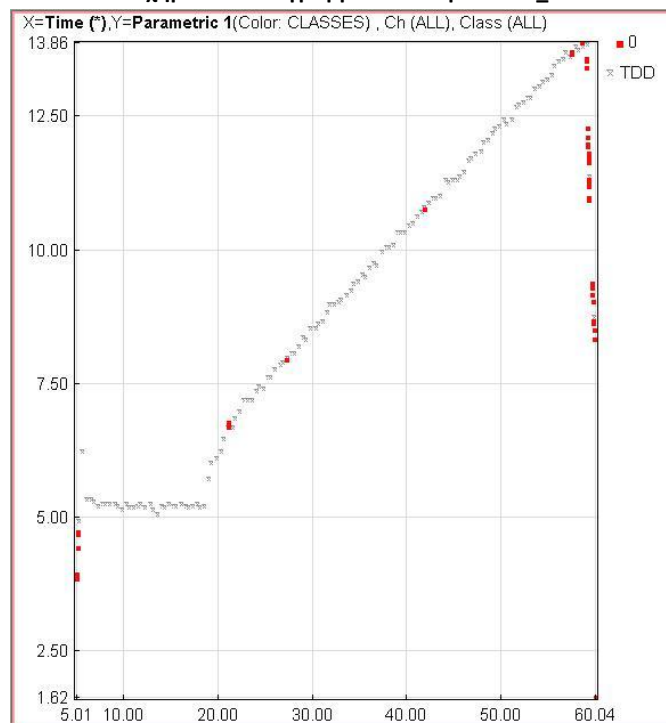
Φωτογραφία 5.26: Δοκίμιο As0_1 σχηματισμός κάθετων ρωγμών στα επίπεδα ασυνέχειας



Φωτογραφία 5.27: Δοκίμιο As0_2 σχηματισμός κάθετων ρωγμών στα επίπεδα ασυνέχειας.



Σχήμα 5.16: Διάγραμμα ΑΕ δοκιμίου As0_1



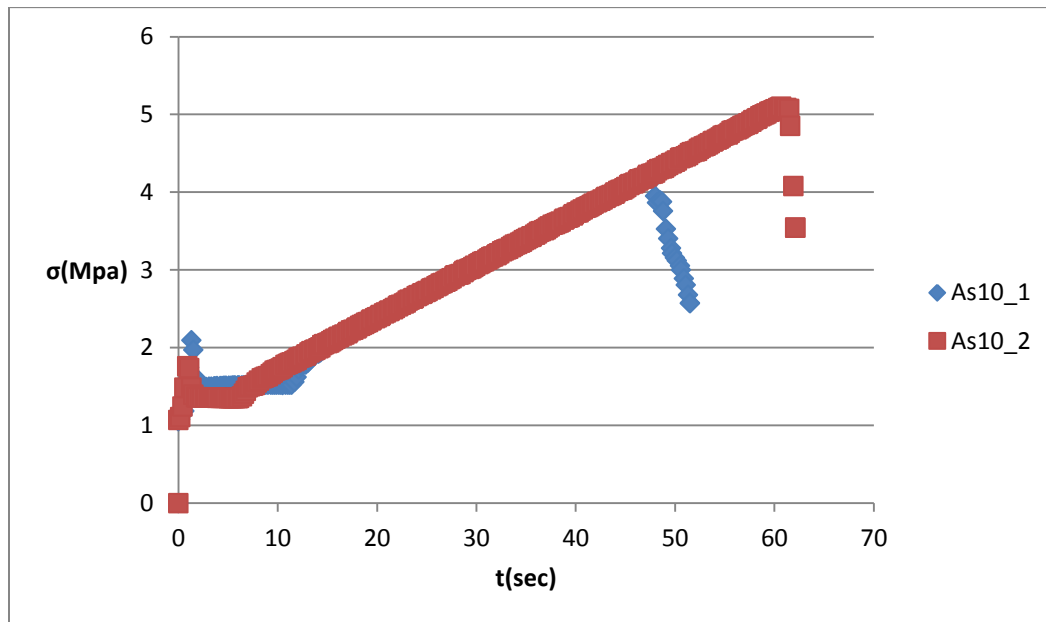
Σχήμα 5.17: Διάγραμμα ΑΕ δοκιμίου As0_2

Όπως φαίνεται από τα παραπάνω διαγράμματα δεν παρατηρείται ακουστική εκπομπή κάτι που επαληθεύεται και από τη βιντεοσκόπηση καθώς έχουμε την ανάπτυξη ρωγμών μόνο λίγα δευτερόλεπτα πριν τη θραύση.

Τόσο το δοκίμιο As0_1 όσο και το As0_2 αστόχησαν με τη δημιουργία εφελκυστικών ρωγμών οι οποίες διαπερνούν τα επίπεδα ασυνέχειας.

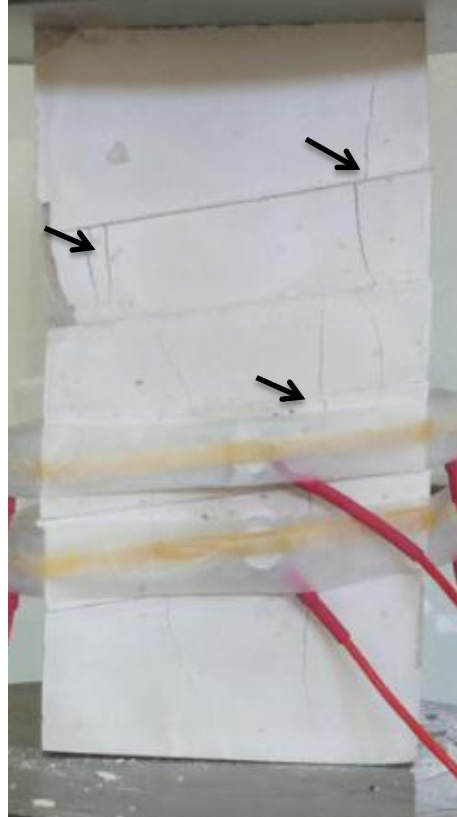
5.8.3 Δοκίμια με κλίση ασυνεχειών 10°.

Εν συνεχεία κατασκευάστηκαν δοκίμια με πέντε επίπεδα ασυνεχειών με κλίση 10°. Τα δοκίμια έφτασαν αντοχή 4,6 MPa όπως φαίνεται και από το παρακάτω διάγραμμα.



Σχήμα 5.18: Διάγραμμα τάσης- χρόνου φόρτισης.

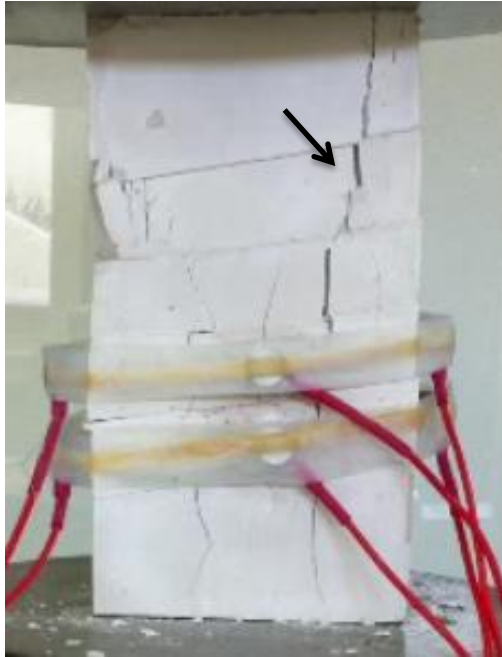
Το δοκίμιο As10_1 κατά την φόρτιση υπέστη δημιουργία ρωγμών κάθετων στα επίπεδα ασυνέχειας οι οποίες ξεκινάνε από τα επίπεδα ασυνεχειών. Στην συνέχεια είχαμε την διεύρυνση και ένωση τους και είχαμε δημιουργία περισσότερων λίγο πριν την θραύση.



Φωτογραφία 5.28: Δημιουργία παράλληλων με τη διεύθυνση φόρτισης ρωγμών.



Φωτογραφία 5.29: Ένωση και άνοιγμα των αρχικών ρωγμών.



Φωτογραφία 5.30: Δημιουργία νέων ρωγμών με παρόμοια διεύθυνση και άνοιγμα εκ νέου των προϋπαρχόντων.

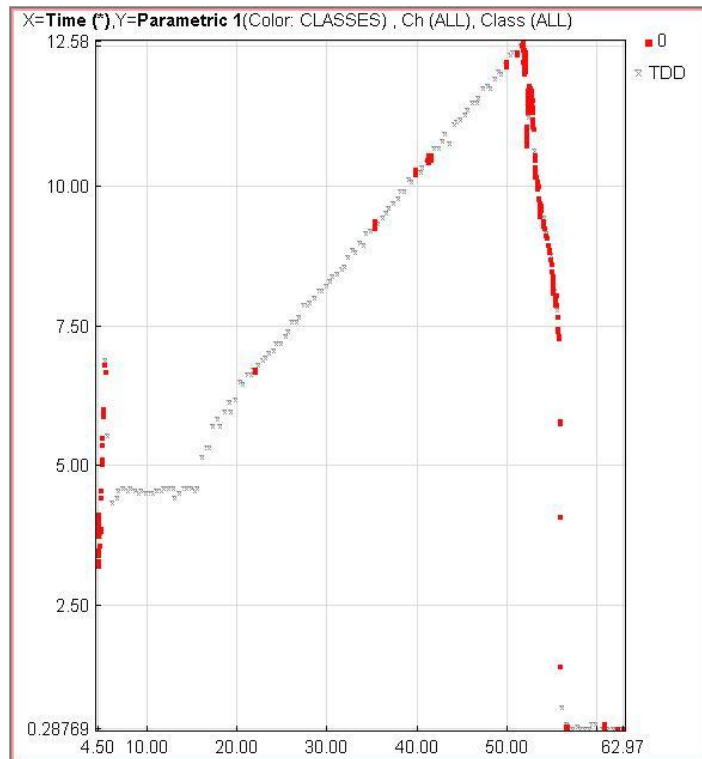
Το δοκίμιο As10_2 δεν είχε σταδιακή δημιουργία ρωγμών αλλά μία απότομη λίγο πριν επέλθει η θραύση του. Η διεύθυνση αυτής της ασυνέχειας παρέμεινε παράλληλη με διεύθυνση φόρτισης.



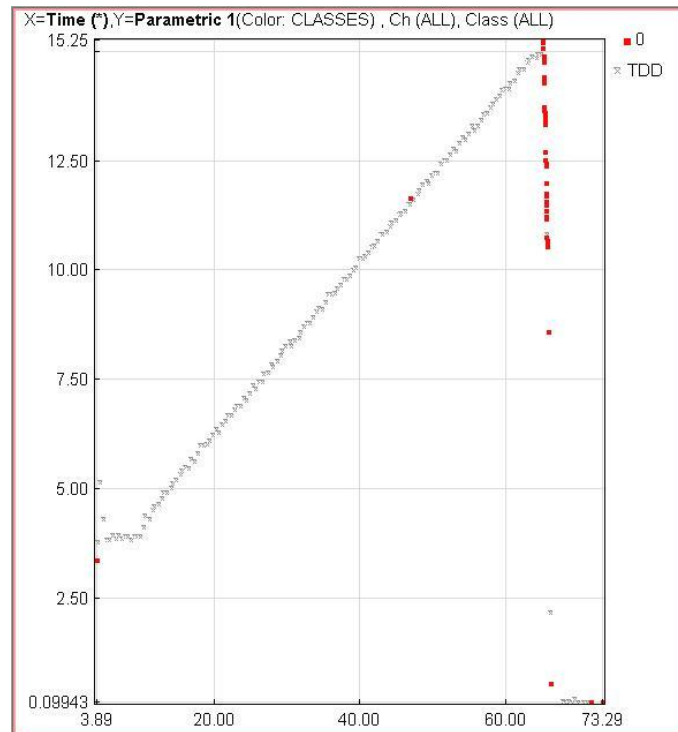
Φωτογραφία 5.31: Δημιουργία ρωγμής κατά μήκος επιπέδων ασυνεχειών.



Φωτογραφία 5.32: Δημιουργία ρωγμής παράλληλη με διεύθυνση φόρτισης.



Σχήμα 5.19: Διάγραμμα Α.Ε. δοκιμίου As10_1

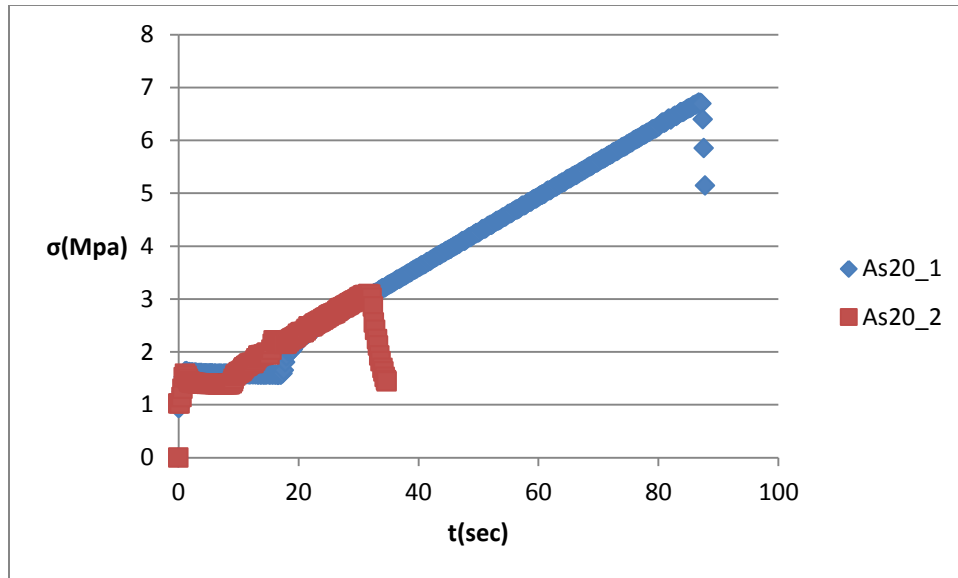


Σχήμα 5.20:Διάγραμμα Α.Ε. δοκιμίου As10_2

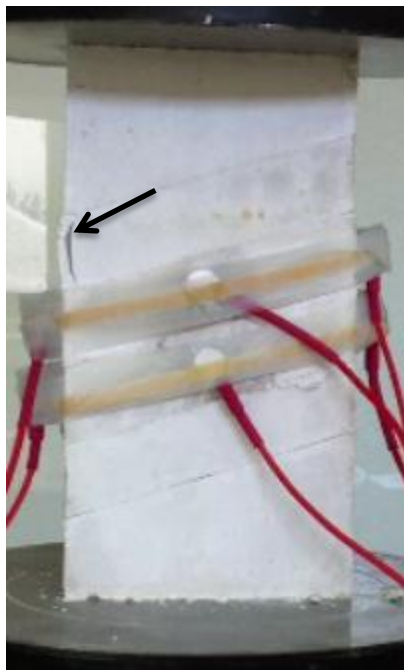
Με το φαινόμενο της ακουστικής εκπομπής είχαμε την καταγραφή κάποιων σημάτων λόγω ρωγμάτωσης του As10_1 αντίθετα στο As10_2 δεν έχουμε δημιουργία σημάτων παρά μόνο στην αστοχία του δοκιμίου.

5.8.4 Δοκίμια με κλίση ασυνεχειών με 20° .

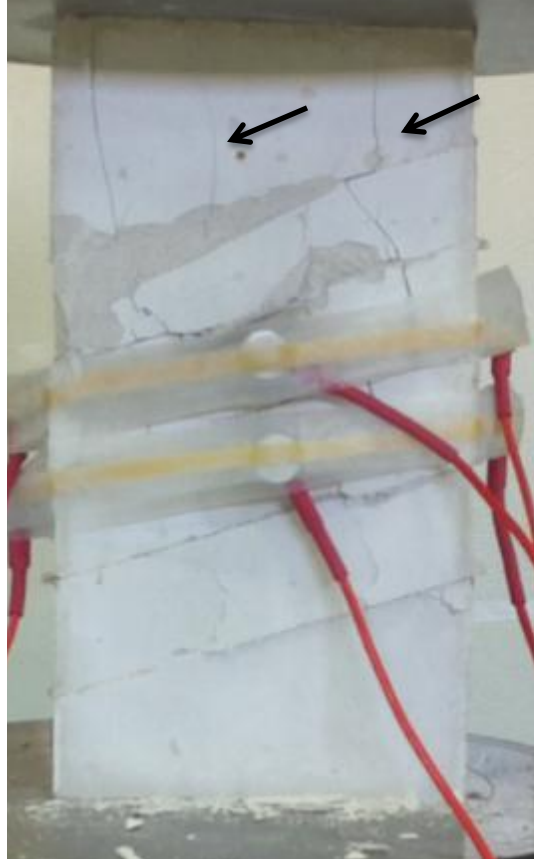
Στη συνέχεια του πειράματος εκτελέστηκαν δοκιμές σε δοκίμια με κλίση επιπέδων ασυνεχειών 20° .Η μέση αντοχή των δοκιμίων μετρήθηκε 4.9 MPa όμως η διαφορά στην αντοχή των δυο πρισμάτων ήταν μεγάλη όπως φαίνεται και στο παρακάτω διάγραμμα, κάτι που πιθανό να οφείλεται στην ανομοιογένεια του μίγματος. Παράλληλα από την βιντεοσκόπηση παρατηρείται και διαφορά στο τρόπο θραύσης των δοκιμίων. Το As20_1 όπου παρουσίασε υψηλότερη αντοχή εμφάνισε ρωγμές παράλληλες με την διεύθυνση φόρτισης αντίθετα με το As20_2 όπου εμφάνισε ρωγμές κάθετες στις ασυνέχειες. Επίσης το δοκίμιο As20_2 παρουσίασε έντονη αποφλοιώση κατά τη διάρκεια της φόρτισης.



Σχήμα 5.21: Διάγραμμα τάσης – χρόνος φόρτισης.



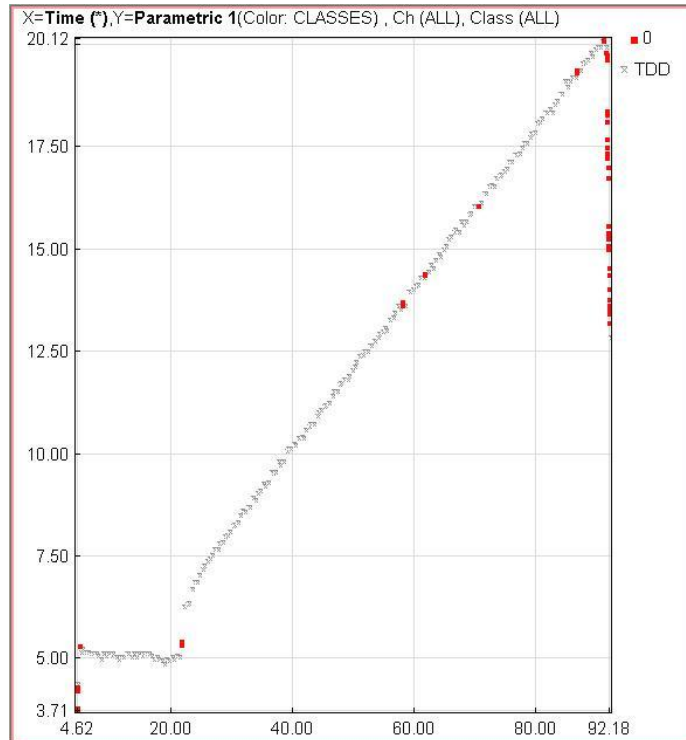
Φωτογραφία 5.33: As20_1 Δημιουργία ρωγμών παράλληλων στη διεύθυνση φόρτισης.



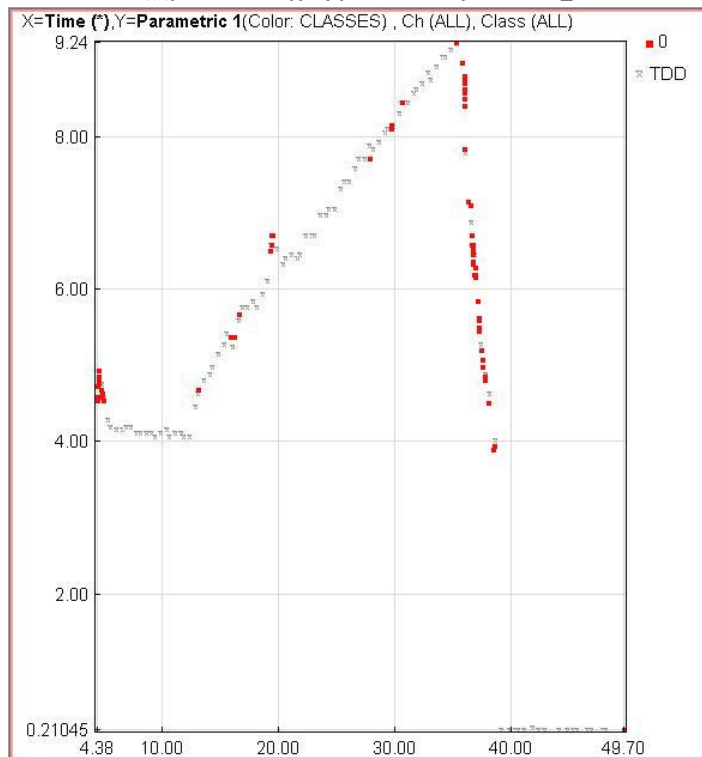
Φωτογραφία 5.34:As20_2 Δημιουργία ρωγμών κάθετων στις ασυνέχειες.

Το δοκίμιο As20_1 αστόχησε με τη δημιουργία εφελκυστικών ρωγμών. Παράλληλα παρατηρήθηκαν και ίχνη διάτμησης σε μία ρωγματωμένη επιφάνεια. Επίσης είχε και ελάχιστες αποφλοιώσεις.

Με την μέθοδο της ΑΕ δεν παρατηρήθηκε σημαντική εκπομπή σημάτων όπως φαίνεται και από τα διαγράμματα που ακολουθούν. Στο δεύτερο δοκίμιο καταγράφηκαν κάποια παραπάνω σήματα που οφείλονται στην έντονη αποφλοίωση του.



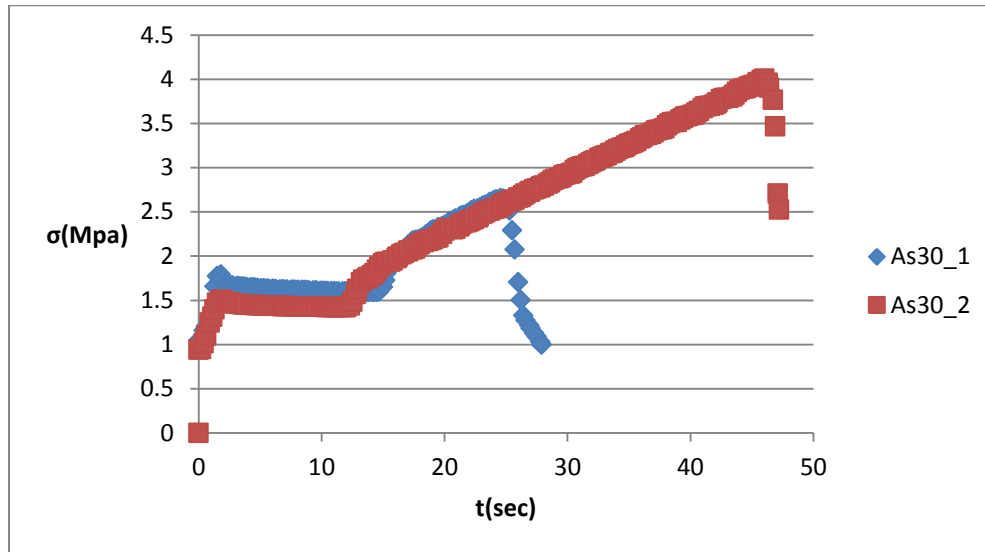
Σχήμα 5.22:Διάγραμμα Α.Ε. δοκιμίου As20_1.



Σχήμα 5.23:Διάγραμμα Α.Ε. δοκιμίου As20_2.

5.8.5 Δοκίμια με κλίση ασυνεχειών 30°.

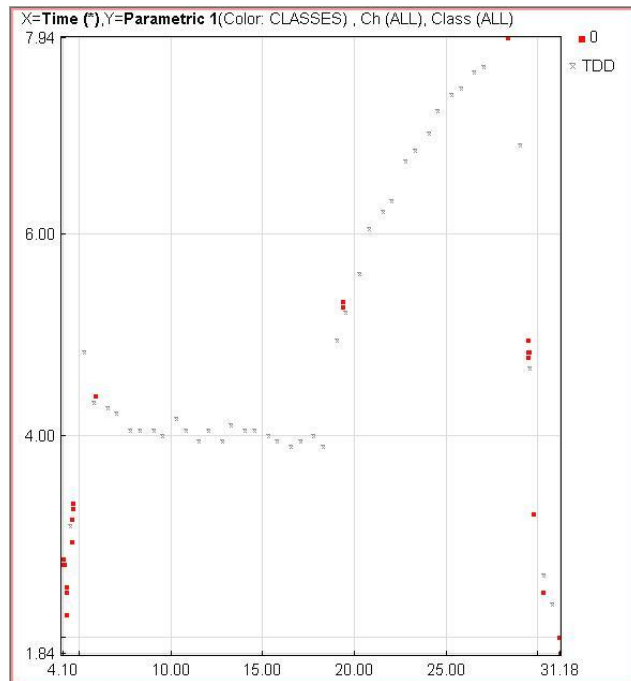
Τα δοκίμια με κλίση ασυνεχειών 30° είχαν μέγιστη αντοχή σε μονοαξονική θλίψη 3.3 MPa. Και τα δυο δοκίμια είχαν παρόμοιο τρόπο αστοχίας. Αρχικά είχαμε το σχηματισμό ρωγμών κάθετα στα επίπεδα των ασυνεχειών και έπειτα δημιουργία νέων ρωγμών παράλληλων με τη διεύθυνση φόρτισης και αποφλοιώση μέχρι τη θραύση των δοκιμίων.



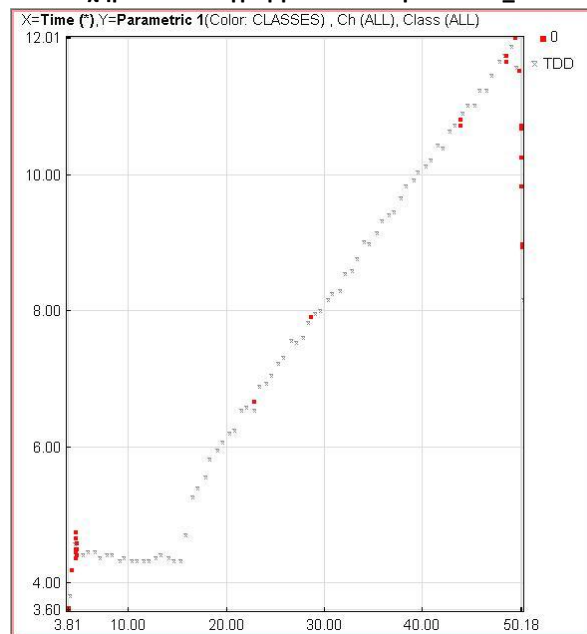
Σχήμα 5.24:Διάγραμμα τάσης- χρόνου φόρτισης.



Φωτογραφία 5.35:Δοκίμιο As30_2



Σχήμα 5.25: Διάγραμμα Α.Ε. δοκιμίου As30_1.



Σχήμα 5.26: Διάγραμμα Α.Ε. δοκιμίου As30_2.

Με τη παρακολούθηση του φαινομένου της ΑΕ επαληθεύεται η ψαθυρή συμπεριφορά του δοκιμίου καθώς δεν παρουσιάζει εκπομπή σημάτων πριν την αστοχία του όπως φαίνεται στα παραπάνω διαγράμματα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

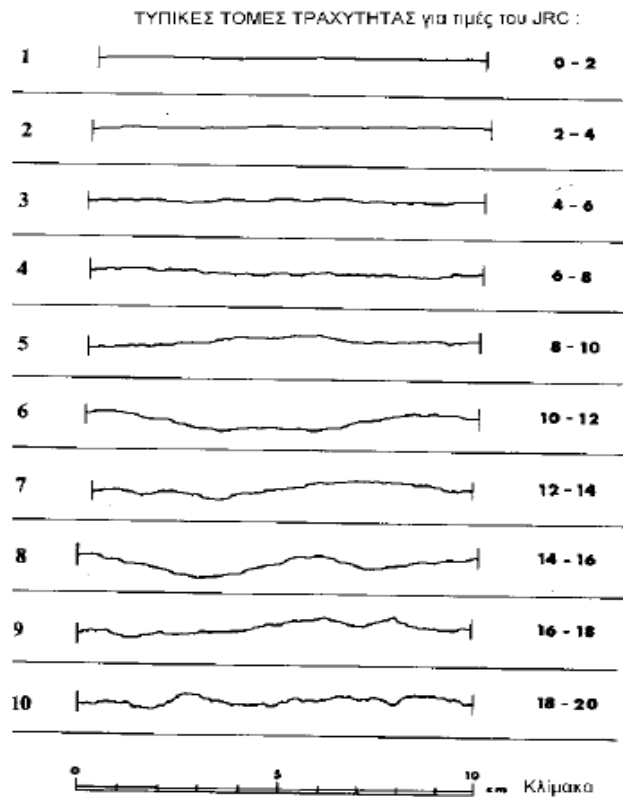
ΔΟΚΙΜΙΑ ΜΕ ΜΙΑ ΑΣΥΝΕΧΕΙΑ ΜΕ ΤΡΑΧΥΤΗΤΑ.

6. Δοκίμια με μια ασυνέχεια με τραχύτητα.

Στο δεύτερο στάδιο της πειραματικής διερεύνησης της αντοχής και του τρόπου αστοχίας τεχνητών δοκιμίων από γύψο κατασκευάστηκαν δοκίμια άρρηκτα και στη συνέχεια χαραζόταν το επίπεδο ασυνέχειας που θέλαμε να δημιουργήσουμε με συγκεκριμένη κλίσης. Εν συνεχεία το δοκίμιο με τη χρήση κεραμιδοκόφτη έσπαγε στο περίγραμμα της ασυνέχειας δημιουργώντας έτσι ένα προσανατολισμένο επίπεδο ασυνέχειας με τυχαία τιμή τραχύτητας. Εν συνεχεία μετριόταν το JRC με προφιλόμετρο και στη συνέχεια γινόταν η θραύση του δοκιμίου με διάταξη βιντεοσκόπησης και με έναν αισθητήρα Ακουστικής εκπομπής. Αξίζει να αναφερθεί ότι για τη διεξαγωγή συμπερασμάτων χρησιμοποιήθηκαν τρεις κάμερες εκ των οποίων η μία ήταν ταχείας λήψης, δηλαδή είχε τη δυνατότητα να τραβήξει μέχρι 1200 καρέ το δευτερόλεπτο.

Επίσης μετρήθηκε η βασική γωνία τριβής βάζοντας ένα δοκίμιο πάνω στο άλλο και σηκώνοντας το κάτω δοκίμιο μέχρι να γλιστρήσει το πάνω. Αυτό επαναλήφθηκε πολλές φορές. Έτσι καταγράφηκε η γωνία τριβής ίση με 35° μετά από πολλές μετρήσεις. Αξίζει όμως να αναφερθεί ότι όταν τρίψαμε τα δυο δοκίμια δηλαδή δημιουργήθηκε διάτμηση μεταξύ των δυο δοκιμίων και οι πλευρές τους είχαν πουδραρισθεί, τότε η γωνία τριβής μετρήθηκε 28° .

Γενικότερα η τραχύτητα αναφέρεται στη κύμανση σε σχέση με το μέσο επίπεδο της ασυνέχειας και συνεισφέρει στη διατμητική αντοχή αυξάνοντας την φαινόμενη γωνία τριβής. Η εκτίμηση της παραμέτρου JRC μπορεί να γίνει τις τυποποιημένες τομές τραχύτητας που φαίνονται στο παρακάτω πίνακα.



Σχήμα 6.1:Τυπικές τομές τραχύτητας.

6.1 Δοκίμια με κλίση ασυνέχειας 30°.

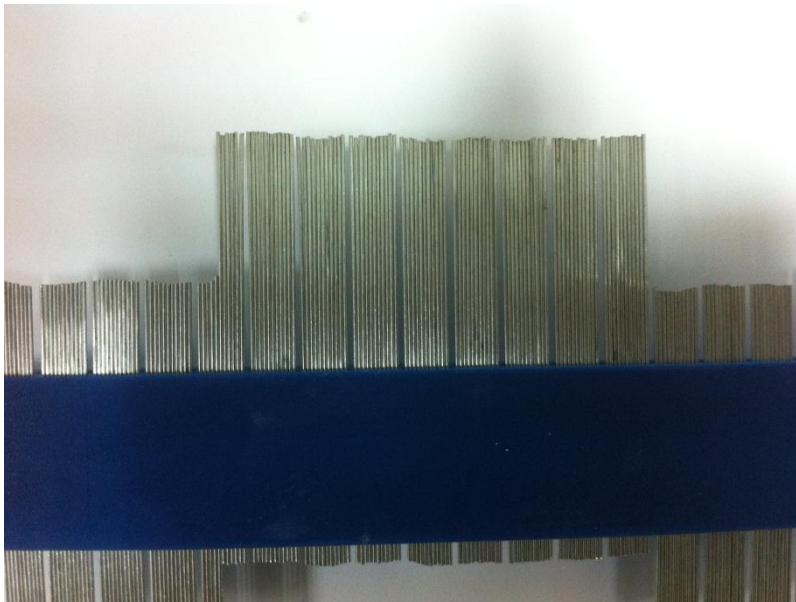
6.1.1 Δοκίμιο JRC30A.

Κατασκευάστηκαν 3 δοκίμια με κλίση του επιπέδου της ασυνέχειας 30° και αφού τοποθετήθηκε αισθητήρας ακουστικής εκπομπής, υποβλήθηκαν στη δοκιμή μονοαξονικής θλίψης, με ρυθμό φόρτισης 200 kN/sec.

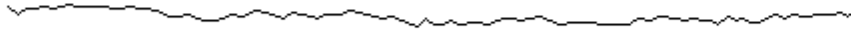


Φωτογραφία 6.1: Δοκίμιο JRC30A.

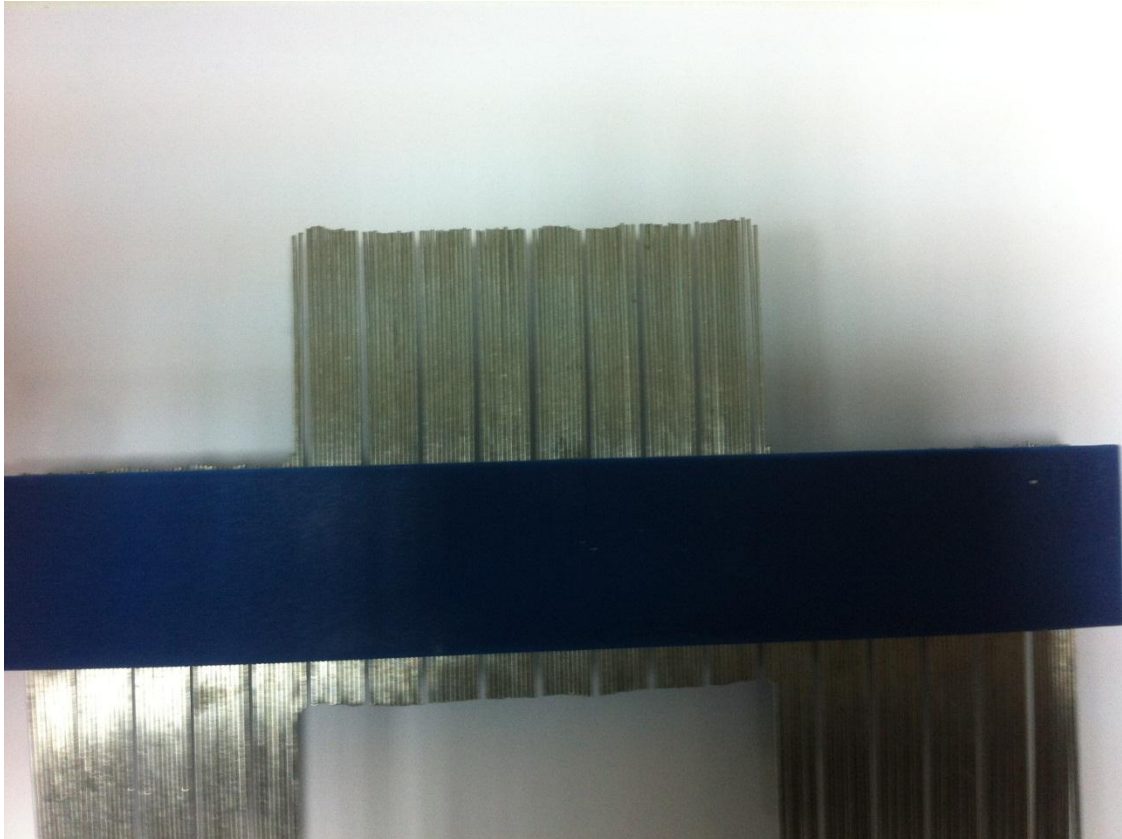
Με τη βοήθεια του προφιλόμετρου μετρήθηκε η τιμή του JRC. Μετρήθηκε σε κάθε δοκίμιο τρεις φορές η τιμή JRC, στις άκρες και στη μέση. Ο ρυθμός φόρτισης των δοκιμίων ήταν 200kN/sec.



Φωτογραφία 6.2: Μέτρηση στο μπροστινό τμήμα.



Σχήμα 6.2:Μετά από επεξεργασία στο AutoCad



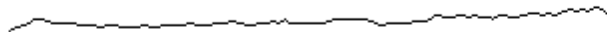
Φωτογραφία 6.3:Μέτρηση στο μέσο του επιπέδου ασυνέχειας.



Σχήμα 6.3:Μετα από επεξεργασία στο AutoCAD.



Φωτογραφία 6.4: Μέτρηση στο τελευταίο μέρος του επιπέδου της ασυνέχειας.

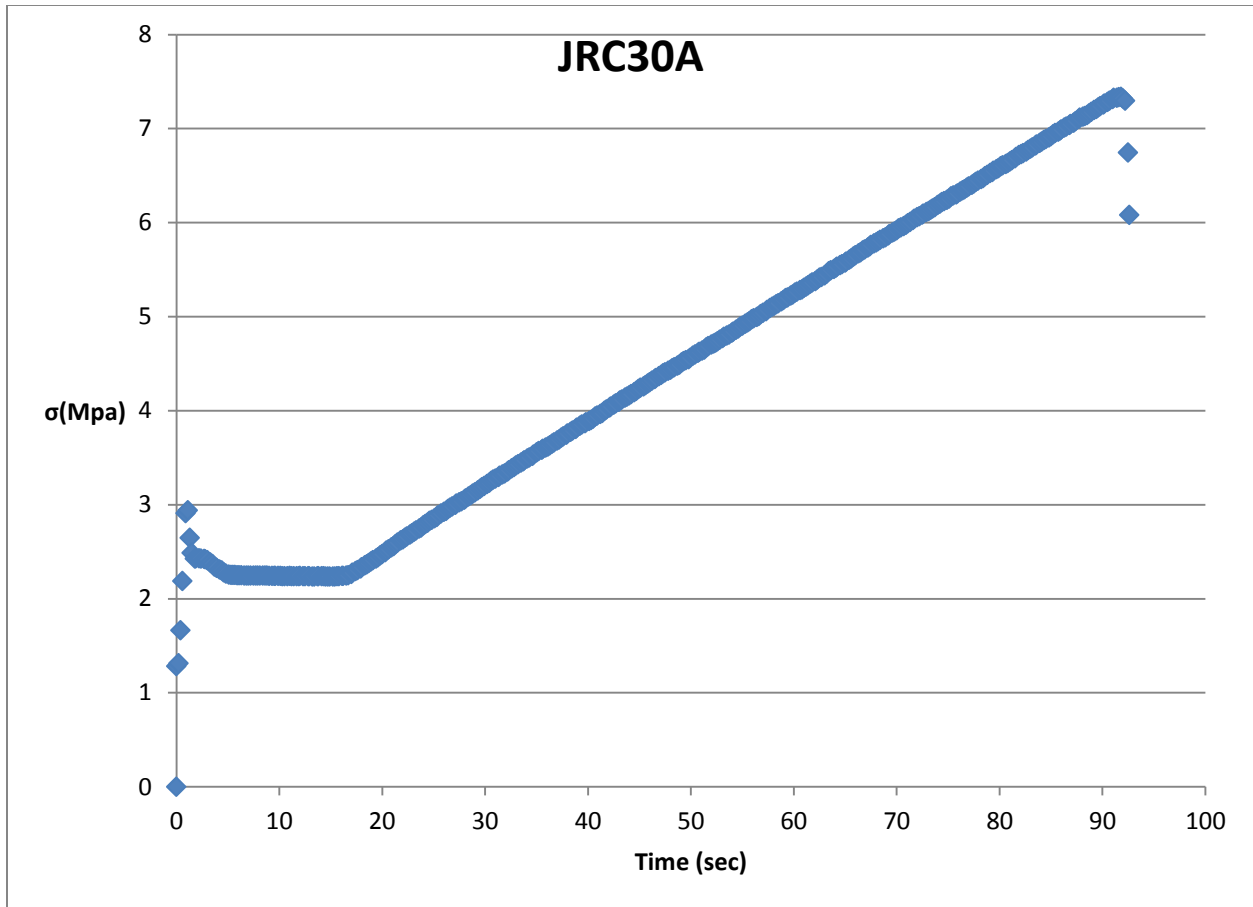


Σχήμα 6.4: Μετά από επεξεργασία στο AutoCAD.

Μετά από αξιολόγηση των μετρήσεων προκύπτει τιμή JRC ίση με 7. Λόγω όμως της επίδρασης του μεγέθους αυτή η τιμή είναι για ασυνέχεια μήκους 10 cm η δική μας ασυνέχεια έχει μήκος 8,66 cm άρα σύμφωνα με τους Barton and Bandis (1982)

$$JRC_n = JRC_0 \left(\frac{L_n}{L_0} \right)^{-0.02 JRC_0} = 7,14$$

Το δοκίμιο JRC30A στη συνέχεια υποβλήθηκε σε μονοαξονική θλίψη και έβγαλε μέγιστη αντοχή 7.33 MPa.

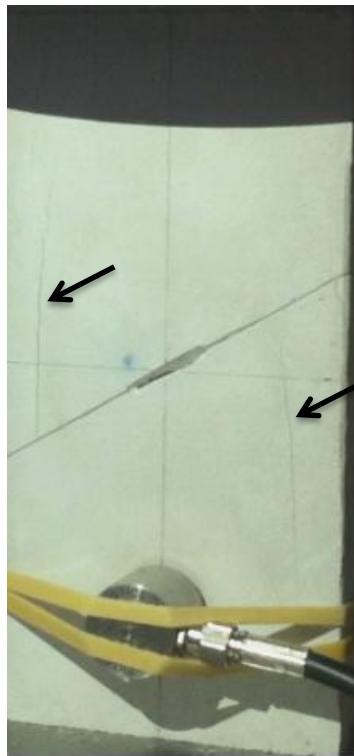


Σχήμα 6.5: Διάγραμμα τάση – χρόνου δοκιμίου JRC30A.

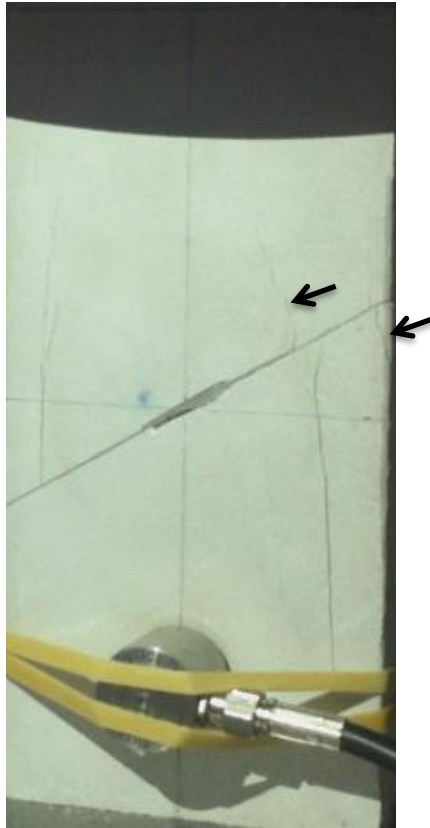
Από την ανάλυση του βίντεο προκύπτει ότι το δοκίμιο αστόχησε με εφελκυστικές ρωγμές οι οποίες δεν ξεκινούν από την ασυνέχεια και είναι παράλληλες με τη διεύθυνση του φορτίου αντίθετα οι ρωγμές που ξεκινούν από την ασυνέχεια είναι κάθετες σε αυτή.



Φωτογραφία 6.5: Δημιουργία εφελκυστικής ρωγμής που δεν ξεκινά από την ασυνέχεια.



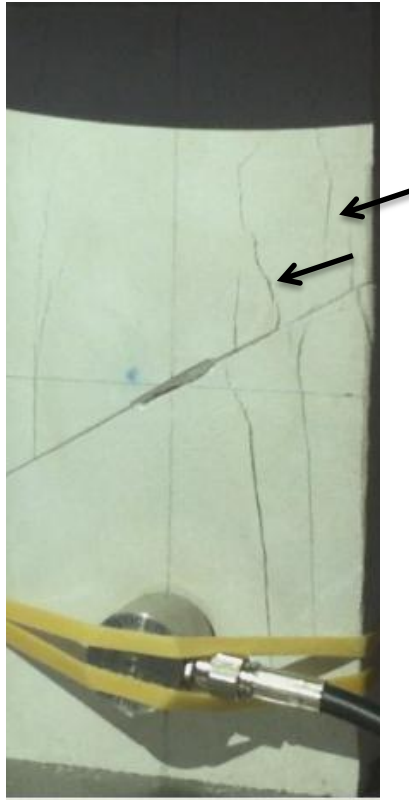
Φωτογραφία 6.6: Δημιουργία εφελκυστικών ρωγμών όπου δεν ξεκινάνε από την ασυνέχεια.



Φωτογραφία 6.7:Ρωγμές κάθετες στην ασυνέχεια.



Φωτογραφία 6.8:Δημιουργία νέων ρωγμών.



Φωτογραφία 6.9: Άνοιγμα και δημιουργία νέων ρωγμών.

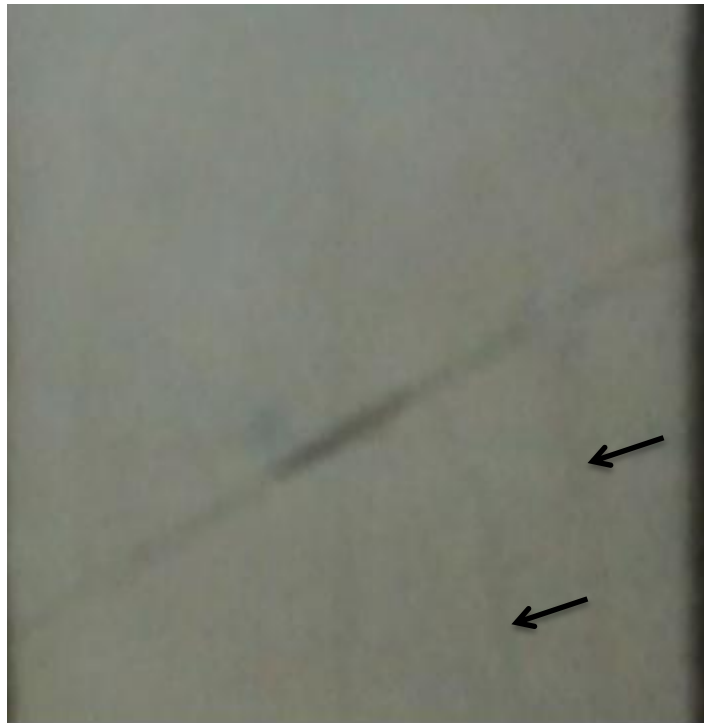


Φωτογραφία 6.10: Διεύρυνση των ρωγμών και θραύση δοκιμίου.

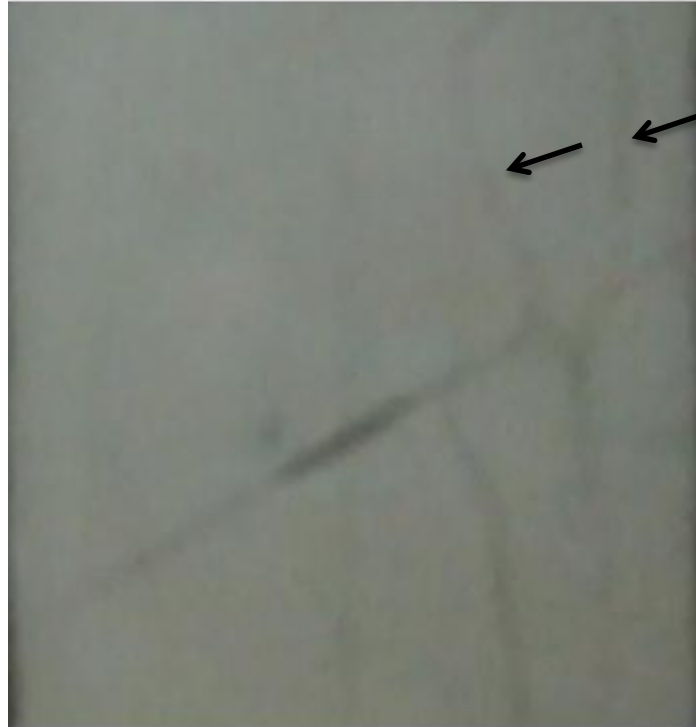


Φωτογραφία 6.11:Λήψη φωτογραφιών από Τρίτη κάμερα από την πίσω πλευρά του δοκιμίου.

Από τη πίσω πλευρά του δοκιμίου παρατηρούμε μια ρωγμή κάθετη η οποία διαπερνά το επίπεδο ασυνέχειας. Ενώ στο πάνω μέρος του δοκιμίου παρατηρούμε μια οριζόντια ρωγμή. Στη συνέχεια με παρατήρηση της κάμερας ταχείας λήψης βγάζουμε πιο ασφαλή συμπεράσματα για τον τρόπο δημιουργίας των ρωγμών.



Φωτογραφία 6.12:Δημιουργία ρωγμών από το κάτω μέρος του δοκιμίου.



Φωτογραφία 6.13: Δημιουργία ρωγμής δεξιά και πέρασμα της προϋπάρχουσας από το επίπεδο της ασυνέχειας αριστερά.

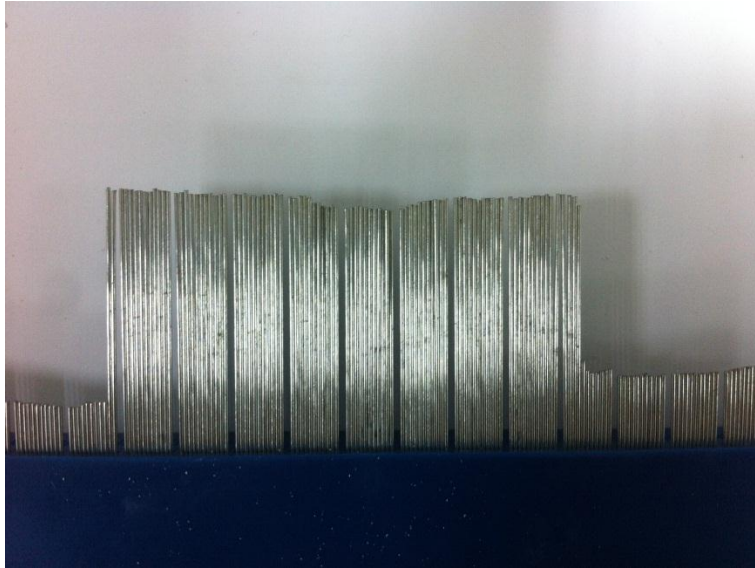


Φωτογραφία 6.14: Διεύρυνση ρωγμών και θραύση δοκιμίου.

Από τη παρατήρηση του κατεστραμμένου δοκιμίου βγήκε το συμπέρασμα ότι αστόχησε με εφελκυστικές ρωγμές οι οποίες έχουν μεγάλη κλίση στο επίπεδο της ασυνέχειας και όσο απομακρύνονται από αυτή τείνουν να πάρουν τη διεύθυνση της δύναμης φόρτισης. Δευτερευόντως παρατηρούνται επιφανειακές αποφλοιώσεις που συνδέουν εφελκυστικές ρωγμές με λοξές διατμήσεις.

6.1.2 Δοκίμιο JRC30B.

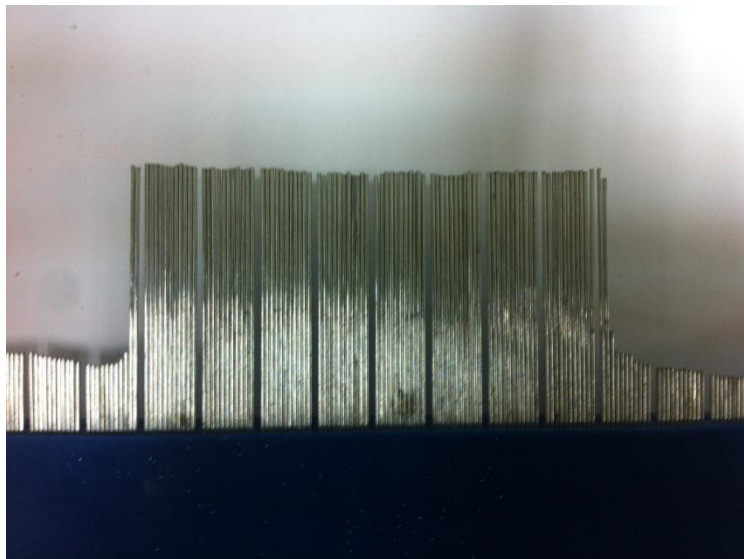
Με την ίδια μεθοδολογία εξετάστηκε και το δεύτερο δοκίμιο με κλίση του επιπέδου ασυνέχειας πάλι 30° . Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι μετρήσεις που πάρθηκαν με το προφιλόμετρο για το προσδιορισμό του JRC (δείκτη τραχύτητας της ασυνέχειας).



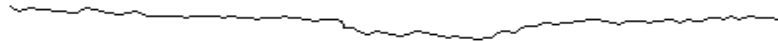
Φωτογραφία 6.15:Μέτρηση του JRC στο μπροστινό τμήμα της ασυνέχειας.



Σχήμα6.6:Μετα από επεξεργασία στο AutoCAD.



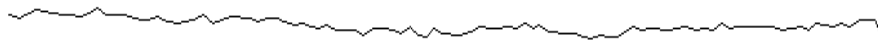
Φωτογραφία 6.16:Μέτρηση στο κέντρο της ασυνέχειας.



Σχήμα 6.7: Μετά από επεξεργασία στο AutoCAD.



Φωτογραφία 6.17: Τρίτη μέτρηση στο τελευταίο τμήμα του επιπέδου ασυνέχειας.

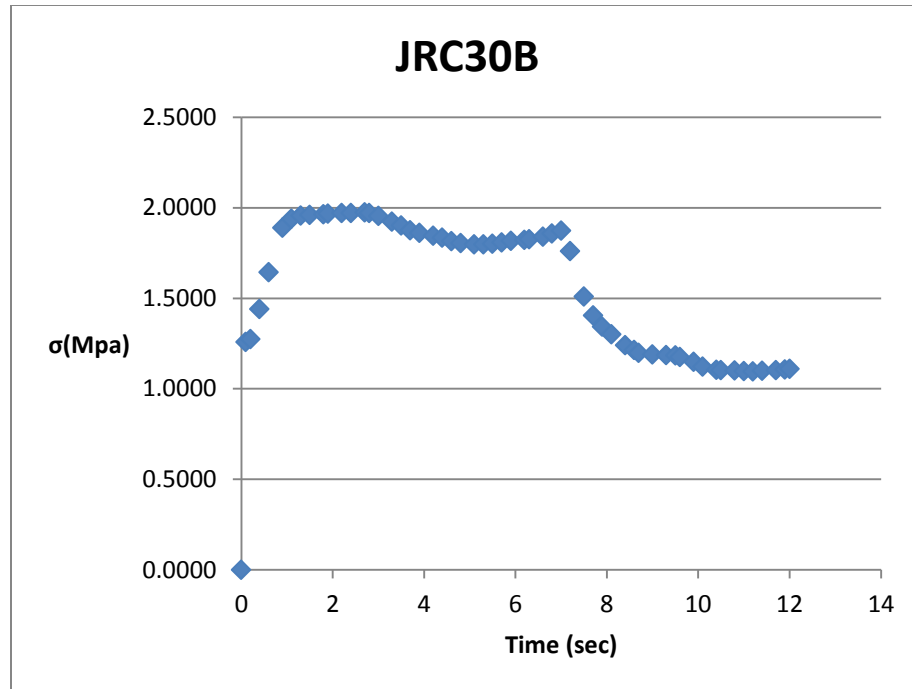


Σχήμα 6.8: Μετά από επεξεργασία στο AutoCAD.

Κατόπιν αξιολόγησης των προφίλ των ασυνεχειών προκύπτει ότι η ασυνέχεια έχει $JRC = 8$. Άρα λόγω της επίδρασης της κλίμακας

$$JRC_n = JRC_0 \left(\frac{L_n}{L_0} \right)^{-0.02 JRC_0} = 8.18$$

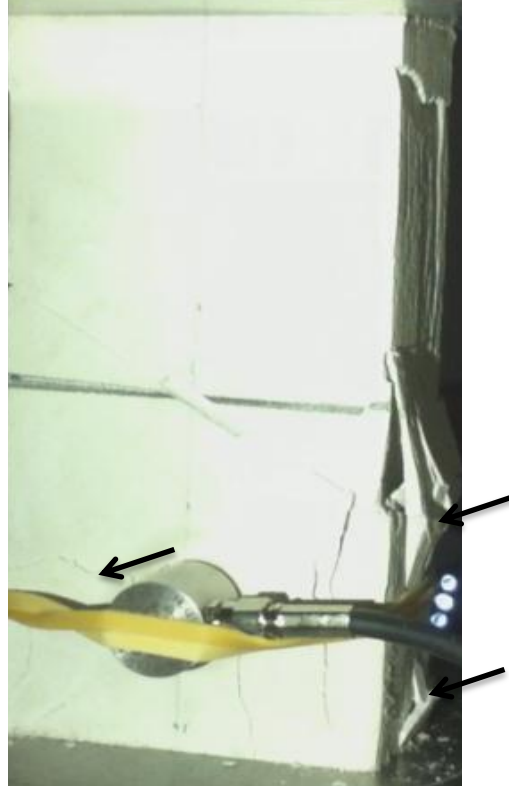
Στη συνέχεια το δοκίμιο υποβλήθηκε σε μονοαξονική θλίψη σε δυο κύκλους φόρτισης.



Σχήμα 6.9: Δεύτερος κύκλος φόρτισης δοκιμίου JRC30B.



Φωτογραφία 6.18: Δημιουργία ρωγμών κάθετων στην ασυνέχεια.

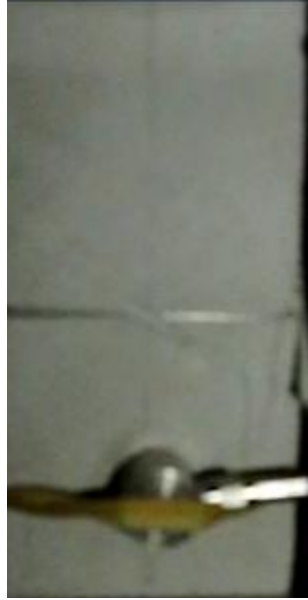


Φωτογραφία 6.19: Δημιουργία νέων ρωγμών και επιφανειακών αποφλοιώσεων.



Φωτογραφία 6.20: Αστοχία δοκιμίου JRC30B.

Από τη παρατήρηση του δοκιμίου με την κάμερα ταχείας λήψης συμπεραίνουμε ότι οι ρωγμές δεξιά στο δοκίμιο δημιουργήθηκαν από το επίπεδο της ασυνέχειας.



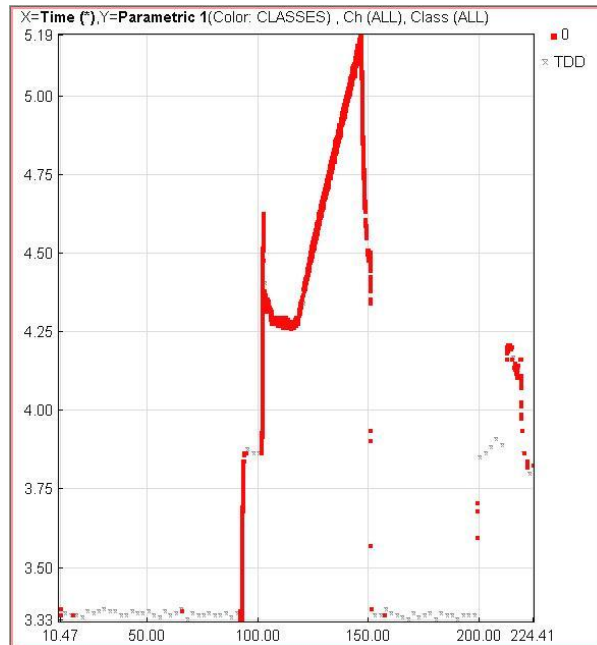
Φωτογραφία6.21: Από το βίντεο ταχείας λήψης.

Εν συνεχεία δημιουργούνται ρωγμές στο κάτω μέρος του δοκιμίου τόσο κάθετες όσο και οριζόντιες όπως φαίνεται στη παρακάτω φωτογραφία η οποία μπορεί να συνδέεται με επιφανειακές αποφλοιώσεις.



Φωτογραφία6.22: Από το βίντεο ταχείας λήψης.

Από τη παρατήρηση του δοκιμίου καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι αστόχησε από εφελκυστικές ρωγμές που ξεκινούν από το επίπεδο της ασυνέχειας και επιφανειακές αποφλοιώσεις.



Σχήμα 6.10: Διάγραμμα ΑΕ Φορτίο – Χρόνος του δεύτερου κύκλου φόρτισης.

Από το διάγραμμα ΑΕ παρατηρούμε έντονη δραστηριότητα του φαινομένου λόγω της ολίσθησης που παρουσίασε το δοκίμιο κατά το δεύτερο κύκλο φόρτισης και της έντονης ρωγμάτωσης σε όλη τη διάρκεια φόρτισης.

6.1.3. Δοκίμιο JRC30C.

Παρομοίως εξετάστηκε η συμπεριφορά τρίτου δοκιμίου με κλίση επιπέδου ασυνέχειας 30° . Ακολουθεί ο προσδιορισμός του JRC με τρεις μετρήσεις πάνω στη τεχνητή ασυνέχεια.



Φωτογραφία 6.23: Μέτρηση τραχύτητας με προφιλόμετρο στο μπροστινό τμήμα της ασυνέχειας.

Σχήμα 6.11:Μετά από επεξεργασία στο AutoCAD.

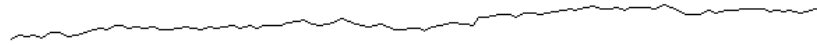


Φωτογραφία 6.24:Δεύτερη μέτρηση στο μέσο της ασυνέχειας.

Σχήμα 6.12:Μετά από επεξεργασία στο AutoCAD.



Φωτογραφία 6.25:Τρίτη μέτρηση στο τελευταίο τμήμα του επιπέδου ασυνέχειας.

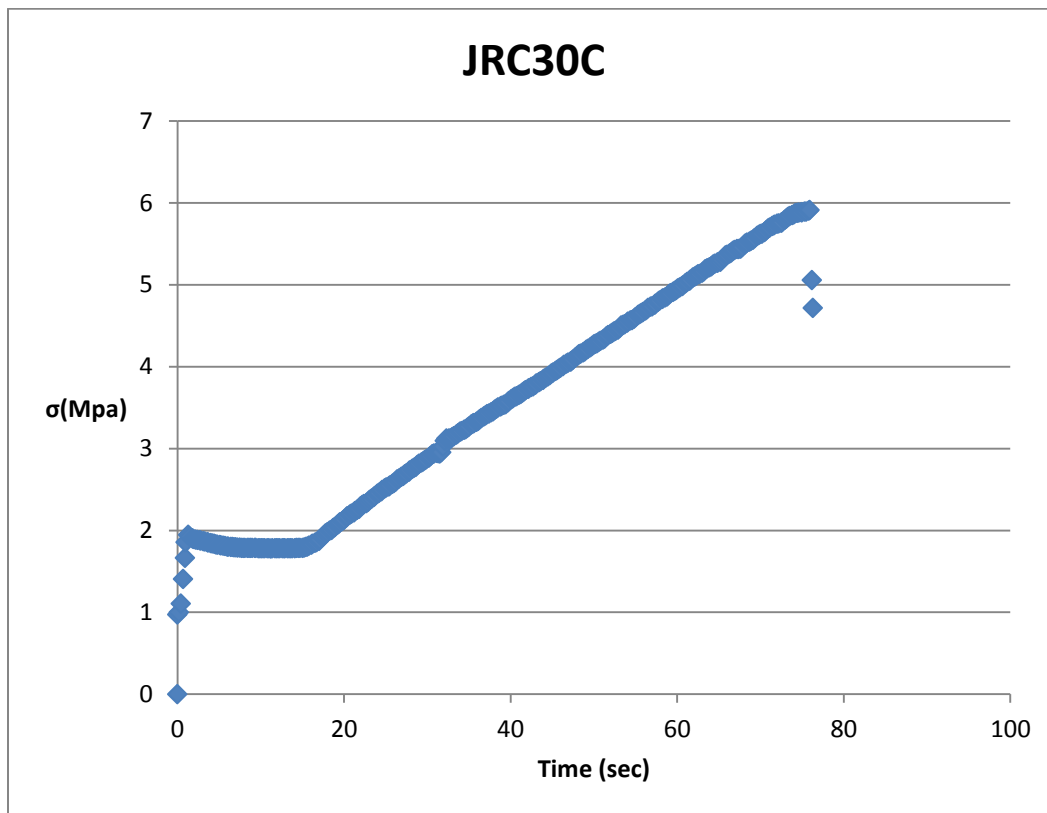


Σχήμα 6.13:Μετά από επεξεργασία στο AutoCAD.

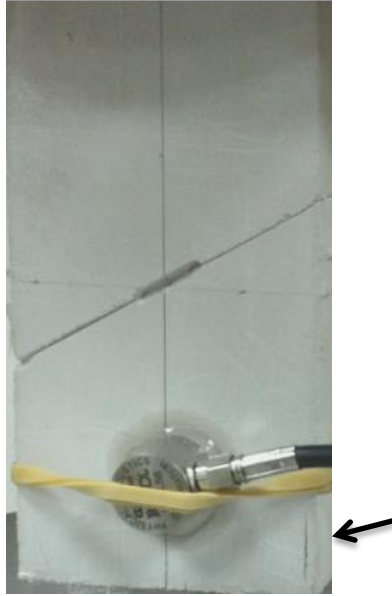
Μετά από αξιολόγηση των μετρήσεων προκύπτει τιμή JRC ίση με 6. Λόγο της επίδρασης του μεγέθους όμως θα γίνει διόρθωση.

$$JRC_n = JRC_0 \left(\frac{L_n}{L_0} \right)^{-0.02 JRC_0} = 6,6$$

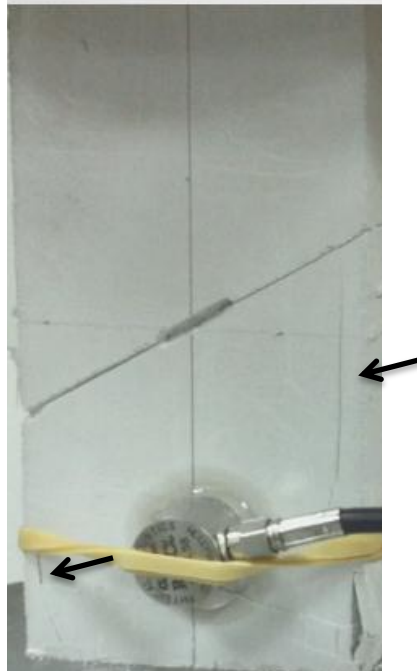
Το δοκίμιο έφτασε μέγιστη μονοαξονική θλιπτική αντοχή ίση με 5,9 MPa όπως φαίνεται και στο διάγραμμα -τάσης χρόνου. Από τη παρατήρηση του βίντεο προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα.



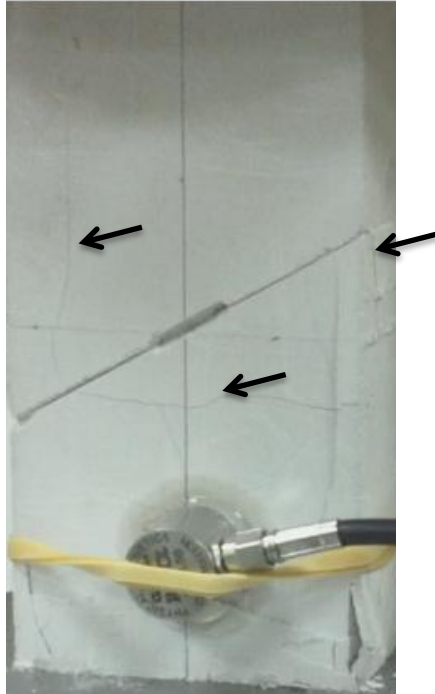
Σχήμα 6.14:Διάγραμμα Τάσης – Χρόνου.



Φωτογραφία 6.26:Εναρξη εφελκυστικής ρωγμής στη βάση του δοκμίου.



Φωτογραφία 6.27:Δημιουργία νέων εφελκυστικών ρωγμών.



Φωτογραφία 6.28:Νέες εφελκυστικές ρωγμές και μια οριζόντια καθώς και αποφλοιώσεις.

Με τη κάμερα ταχείας λήψης μπορούν να βγουν χρήσιμα συμπεράσματα για το πώς δημιουργήθηκαν οι ρωγμές. Συγκεκριμένα παρατηρούμε μια εφελκυστική ρωγμή από δεξιά η οποία ξεκινάει από το κάτω μέρος του δοκιμίου και οδεύει προς την ασυνέχεια. Στη συνέχεια διαδίδεται προς τα πάνω μέχρι που συναντάει το επίπεδο της τεχνητής ασυνέχειας και σταματάει εκεί. Καθώς αυξάνεται το φορτίο έχουμε μια ρωγμή στο πάνω μέρος του δοκιμίου η οποία ξεκινάει από το πάνω τμήμα και οδεύει προς την ασυνέχεια αφού πρώτα παίρνει κάθετη διεύθυνση προς αυτήν. Από αυτό το σημείο έχουμε τη διάδοση μιας οριζόντιας ασυνέχειας η οποία ενώνεται με τις άλλες εφελκυστικές ρωγμές.



Φωτογραφία 6.29:Ξεκίνημα ρωγμής.



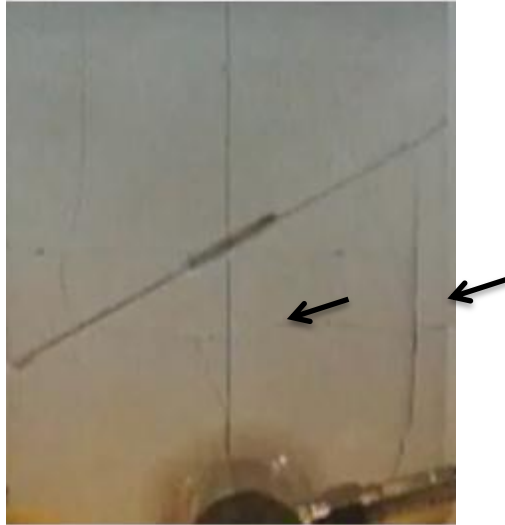
Φωτογραφία 6.30: Διάδοση έως τη τεχνητή ασυνέχεια.



Φωτογραφία 6.31: Νέα εφελκυστική ρωγμή.



Φωτογραφία 6.32: Διάδοση ως το τεχνητό επίπεδο.

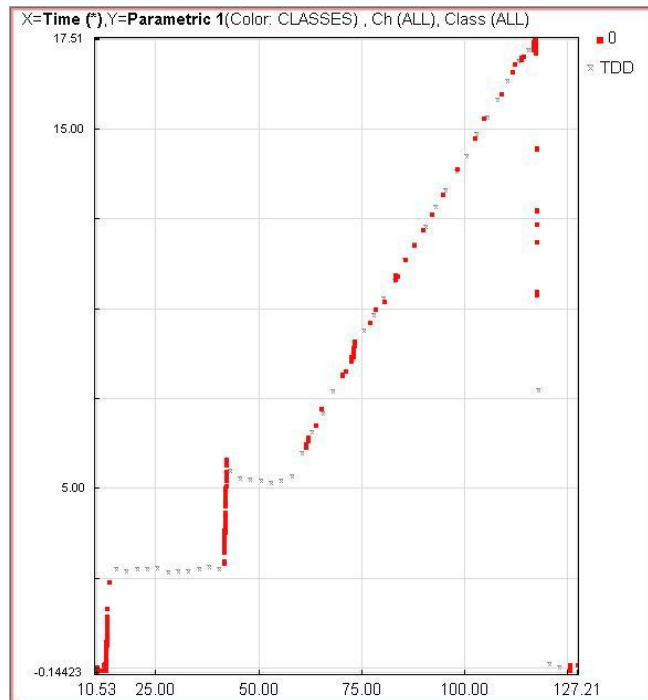


Φωτογραφία 6.33:Οριζόντια ρωγμή και επιφανειακές αποφλοιώσεις.

Από τη παρατήρηση το δοκιμίου συμπεράνουμε ότι αστόχησε με εφελκυστική θραύση και στη συνέχεια με διάτμηση στην ασυνέχεια.



Φωτογραφία 6.34:Ίχνη διάτμησης στο τεχνητό επίπεδο ασυνέχειας.



Σχήμα 6.15: Διάγραμμα ΑΕ δοκιμίου JRC 30C φορτίο – χρόνος.

Από το διάγραμμα της ακουστικής εκπομπής παρατηρούμε έντονη δραστηριότητα στην αρχή που σχετίζεται με την επαφή της άνω πλάκας φόρτισης με τη βάση του δοκιμίου. Στη συνέχεια έχουμε έντονη δραστηριότητα στα 72 sec που σχετίζονται με τη δημιουργία ρωγμάτων στο δοκίμιο. Τέλος, όπως αναμενόταν παρατηρούμε δραστηριότητα του φαινομένου λόγω της αστοχίας του δοκιμίου και το σχηματισμό ρωγμών.

6.2 Δοκίμια με κλίση ασυνέχειας 40° .

6.2.1 Δοκίμιο JRC40A.

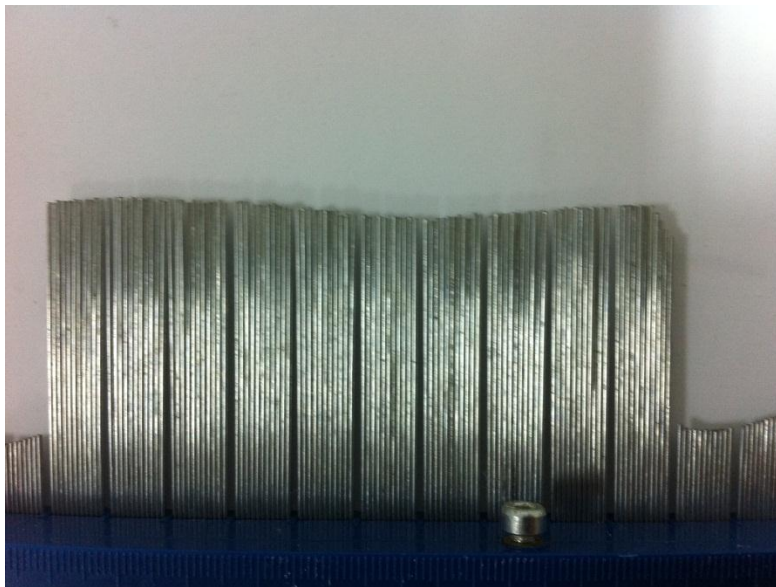
Η ίδια μεθοδολογία ακολουθήθηκε και για τα δοκίμια με κλίση επιπέδου ασυνέχειας 40°. Αρχικά προσδιορίστηκε η τιμή της τραχύτητας JRC. Αξιολογώντας τις μετρήσεις για τιμή JRC ίση με 5. Θα υπολογισθεί με την επίδραση της κλίμακας η σωστή τιμή.

$$JRC_n = JRC_0 \left(\frac{L_n}{L_0} \right)^{-0.02 JRC_0} = 5,01 \approx 5$$



Φωτογραφία 6.35:Μέτρηση τραχύτητας στο μπροστά τμήμα της ασυνέχειας.

Σχήμα 6.16:Μετά από επεξεργασία στο AutoCAD.



Φωτογραφία 6.36:Μέτρηση τιμής στη μέση της ασυνέχειας.

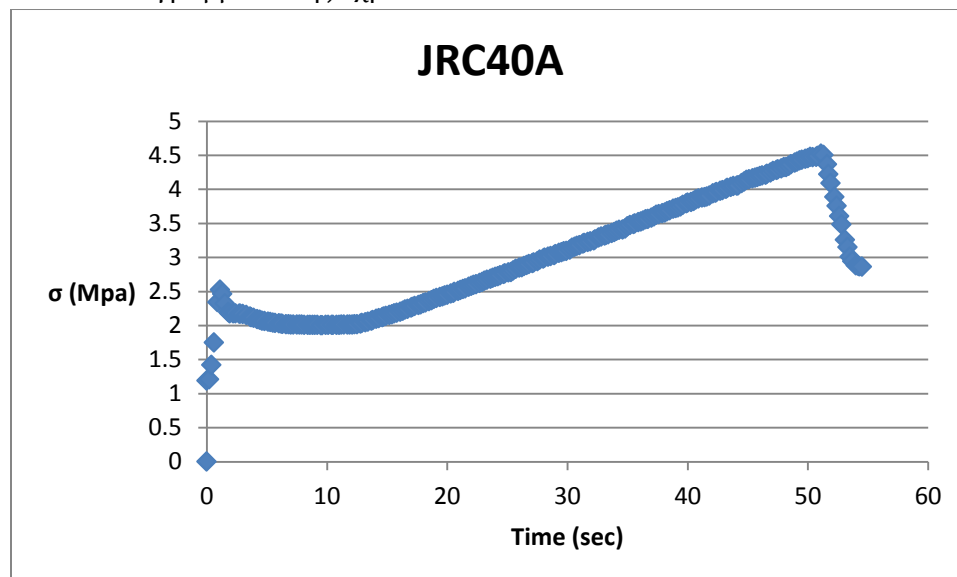
Σχήμα 6.17:Μετά από επεξεργασία στο AutoCAD.



Φωτογραφία 6.37:Μέτρηση στο τρίτο τμήμα της ασυνέχειας.

Σχήμα 6.18:Μετά από επεξεργασία στο AutoCAD.

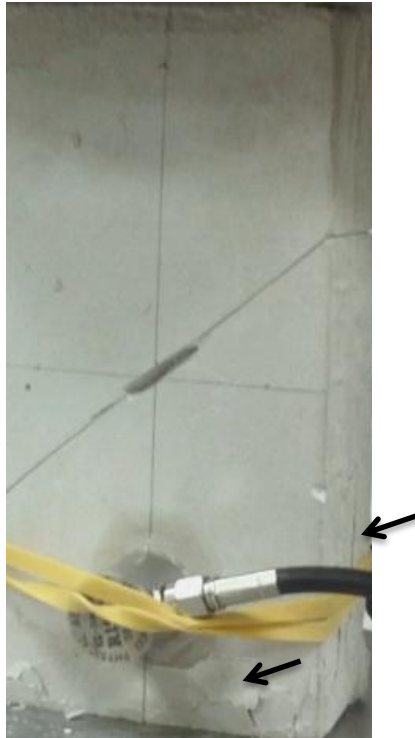
Το δοκίμιο στη συνέχεια υποβλήθηκε σε μονοαξονική θλίψη και αστόχησε στα 4,5 MPa όπως φαίνεται και στο διάγραμμα τάσης -χρόνου.



Σχήμα 6.19:Διάγραμμα φόρτισης δοκιμίου JRC40A.

Από τη παρατήρηση των βίντεο διακρίνουμε μια εφελκυστική ρωγμή στο πλαϊνό μέρος του δοκιμίου καθώς και κάποιες επιφανειακές αποφλοιώσεις στη βάση του δοκιμίου. Στη συνέχεια από τη βάση του δοκιμίου και από την περιοχή έντονης αποφλοιώσης ξεκινά νέα

εφελκυστική ρωγμή που εκτείνεται μέχρι να συναντήσει το τεχνητό επίπεδο ασυνέχειας και να σταματήσει εκεί. Στη συνέχεια επέρχεται η θραύση του δοκιμίου.



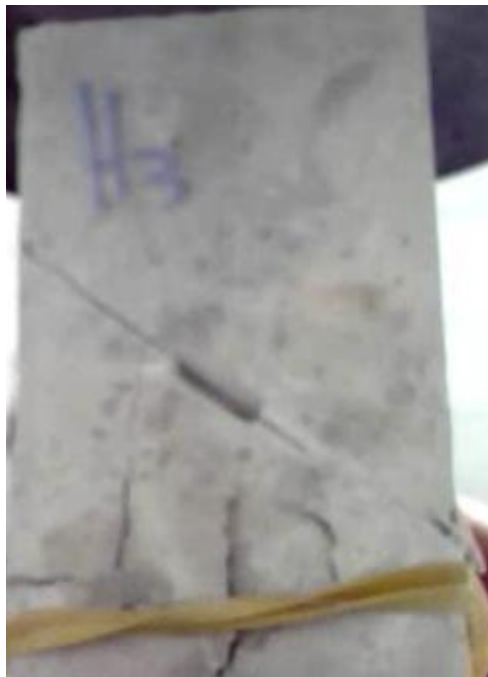
Φωτογραφία 6.38:Επιφανειακές αποφλοιώσεις και παλινή εφελκυστική ρωγμή.



Φωτογραφία 6.39:Νέα εφελκυστική ρωγμή

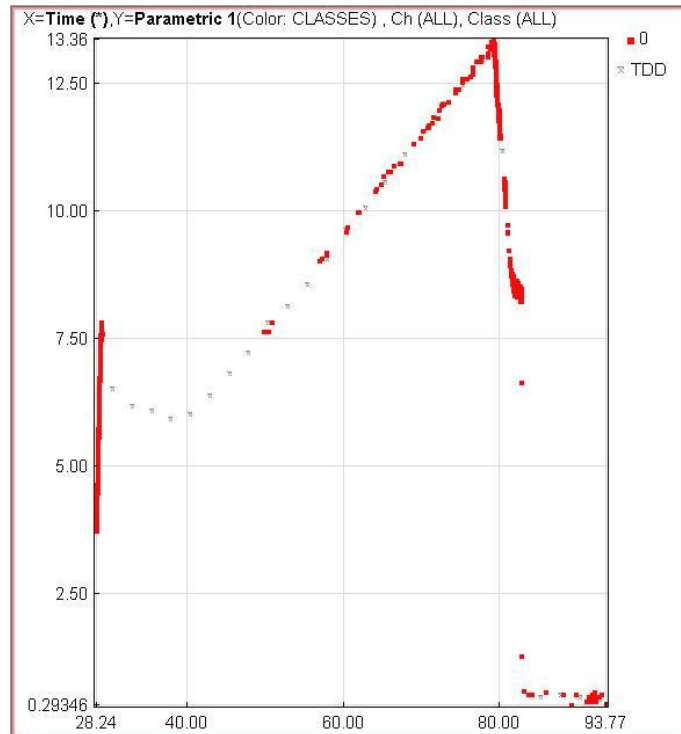


Φωτογραφία 6.40: Η εμφάνιση της εφελκυστικής ρωγμής σταματά στο επίπεδο ασυνέχειας.



Φωτογραφία 6.41: Πίσω Κάμερα καταγραφή εφελκυστικών ρωγμών.

Από την εξέταση του κατεστραμμένου δοκιμίου παρατηρήθηκε ότι αστόχησε με εφελκυστικές ρωγμές και παράλληλα παρατηρήθηκε λοξή διάτμηση στο κάτω μέρος του δοκιμίου.



Σχήμα 6.20: Διάγραμμα ΑΕ δοκιμίου JRC40A.

Από τη μελέτη του φαινομένου της Ακουστικής Εκπομπής παρατηρούμε έντονη δραστηριότητα στην αρχή της δοκιμής όπου οι πλάκες φόρτισης ακουμπάνε πάνω στις βάσεις του δοκιμίου. Στη συνέχεια αρχίζει η ανάληψη φορτίου από το δοκίμιο όπου δε παρατηρούμε έντονη δραστηριότητα μέχρι τη στιγμή λίγο πριν αστοχήσει το δοκίμιο όπου αυξάνεται σημαντικά, λόγω της ψαθυρότητας του υλικού.

6.2.2 Δοκίμιο JRC40B.

Αρχικά μετρήθηκε η τιμή του δείκτη τραχύτητας όπως και στα άλλα δοκίμια. Από την αξιολόγηση των τριών μετρήσεων προκύπτει τιμή JRC ίση με 6. Λόγω της επίδρασης της κλίμακας ισχύει:

$$JRC_n = JRC_0 \left(\frac{L_n}{L_0} \right)^{-0.02 JRC_0} = 6,01 \approx 6$$

Η μέγιστη αντοχή του δοκιμίου έφτασε τα 5,16 MPa όπως φαίνεται και στο διάγραμμα τάσης - χρόνου που ακολουθεί.



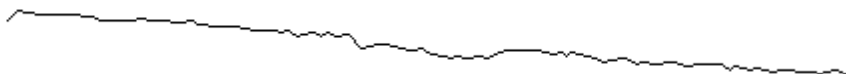
Φωτογραφία 6.42:Μπροστινή μέτρηση του JRC40B.



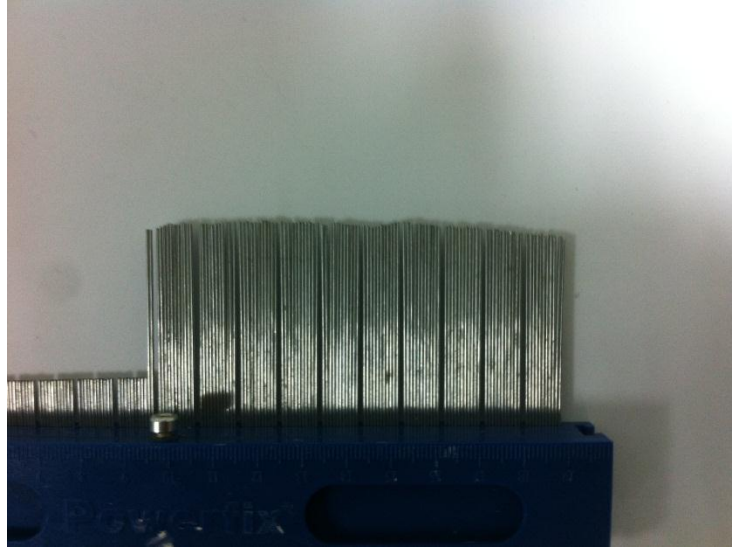
Σχήμα 6.21:Μετά από επεξεργασία στο AutoCAD.



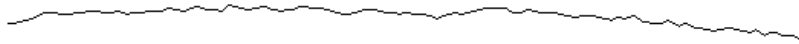
Φωτογραφία 6.43:Μέτρηση στο μέσο της ασυνέχειας.



Σχήμα 6.22:Μετά από επεξεργασία στο AutoCAD.



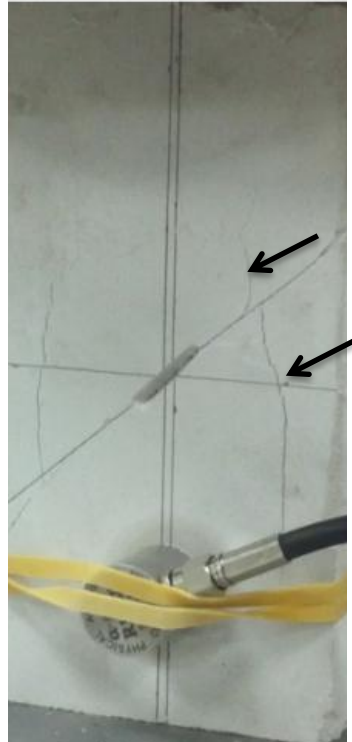
Φωτογραφία 6.44:Μέτρηση στο τελευταίο τμήμα της ασυνέχειας.



Σχήμα 6.23:Μετά από επεξεργασία στο AutoCAD.



Φωτογραφία 6.45:Εφελκυστική ρωγμή.



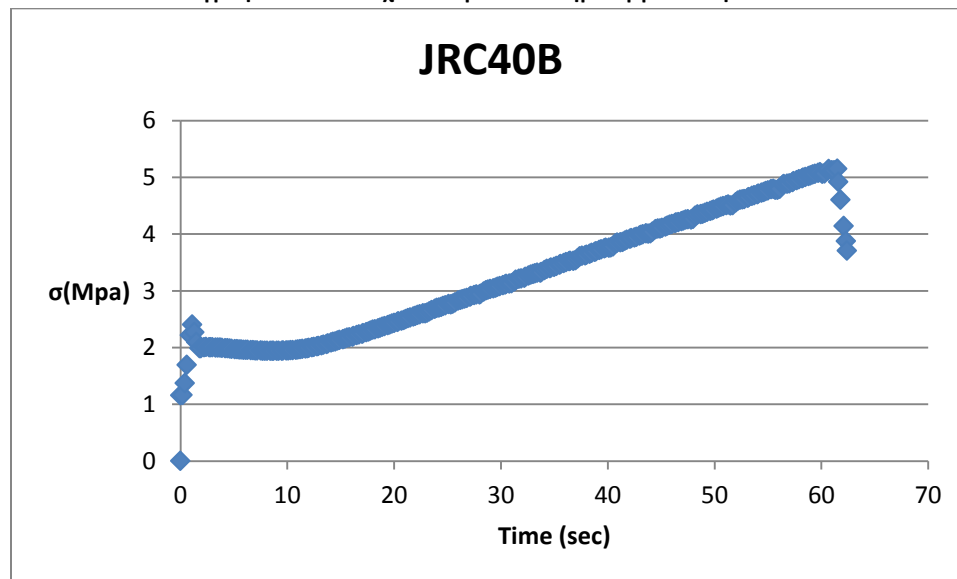
Φωτογραφία 6.46: Δημιουργία νέων εφελκυστικών ρωγμών από την ασυνέχεια.



Φωτογραφία 6.47: Διεύρυνση των ρωγμών.



Φωτογραφία 6.48: Αστοχία δοκιμίου και δημιουργία αποφλοιώσεων.

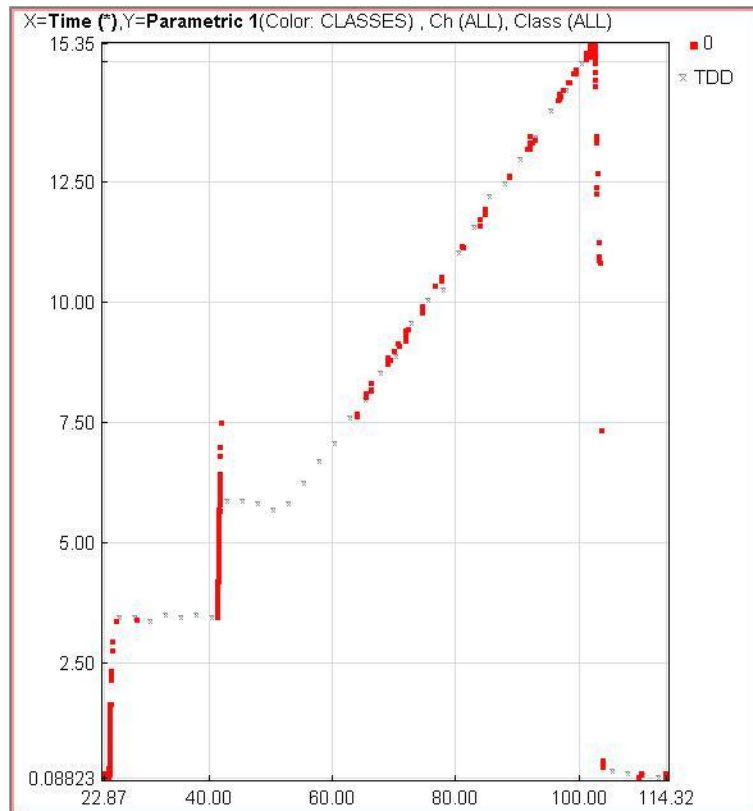


Σχήμα 6.24: Διάγραμμα Τάσης-Χρόνου.

Από τη παρατήρηση του κατεστραμμένου δοκιμίου προκύπτει το συμπέρασμα ότι το δοκίμιο αστόχησε με εφελκυστικές ρωγμές που ξεκινούν από την ασυνέχεια. Επίσης παρουσιάστηκε και διάτμηση η οποία οδήγησε σε επιφανειακές αποφλοιώσεις. Επιπλέον ίχνη διάτμησης παρατηρούνται και στο επίπεδο της τεχνητής ασυνέχειας.



Φωτογραφία 6.49: Λοξό επίπεδο διάτμησης.

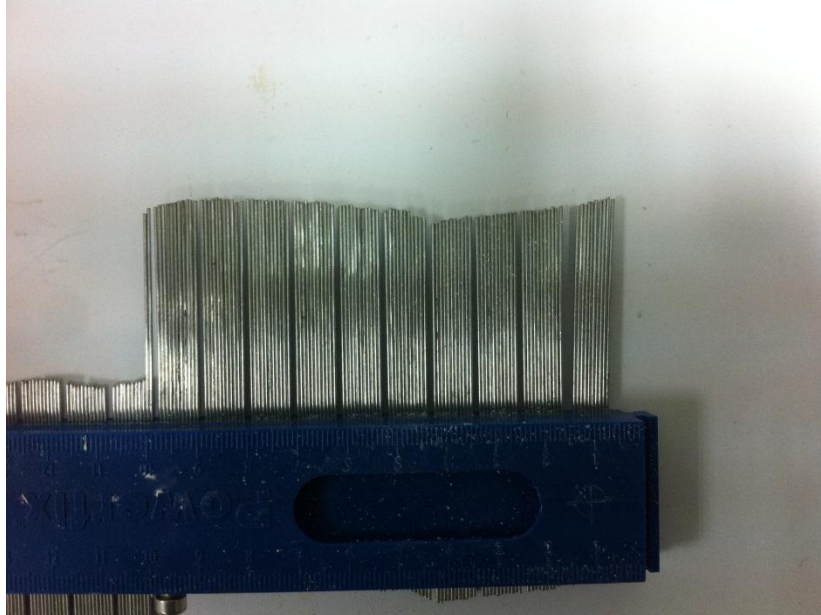


Σχήμα 6.25: Διάγραμμα ΑΕ για το δοκίμιο JRC40B.

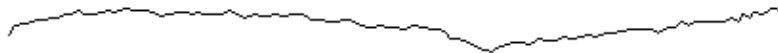
Από τη παρατήρηση του φαινομένου της Ακουστικής Εκπομπής διακρίνουμε έντονη δραστηριότητα στην αρχή λόγω της επαφής των πλακών φόρτισης και στο τέλος που έχουμε την αστοχία του δοκιμίου. Αυτό επαληθεύεται και από το βίντεο καθώς δε παρατηρείται κάποια ρωγμή μέχρι την ξαφνική αστοχία του δοκιμίου.

6.2.3 Δοκίμο JRC40C.

Παρομοίως για το τρίτο δοκίμιο με ασυνέχεια 40° υπολογίστηκε ο δείκτης τραχύτητας JRC.



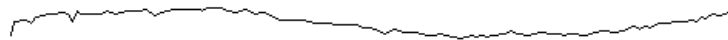
Φωτογραφία 6.50:Μέτρηση στην αρχή του επιπέδου ασυνέχειας.



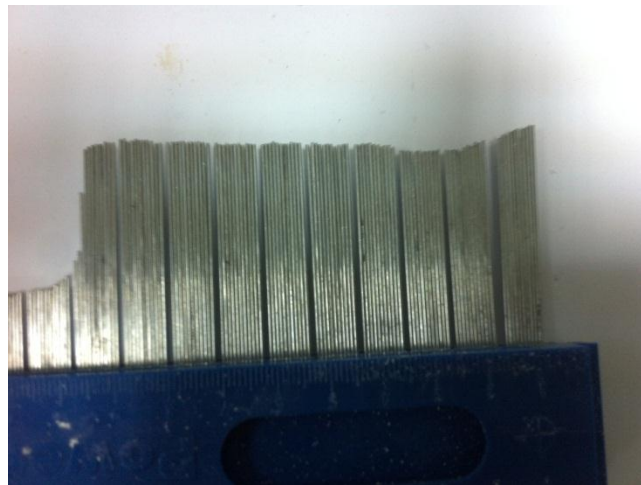
Σχήμα 6.26:Μετά από επεξεργασία στο AutoCAD.



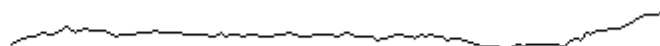
Φωτογραφία 6.51: Δεύτερη μέτρηση στο επίπεδο της ασυνέχειας.



Σχήμα 6.27: Μετά από επεξεργασία στο AutoCAD.



Φωτογραφία 6.52: Τρίτη μέτρηση της τραχύτητας στο επίπεδο της ασυνέχειας.

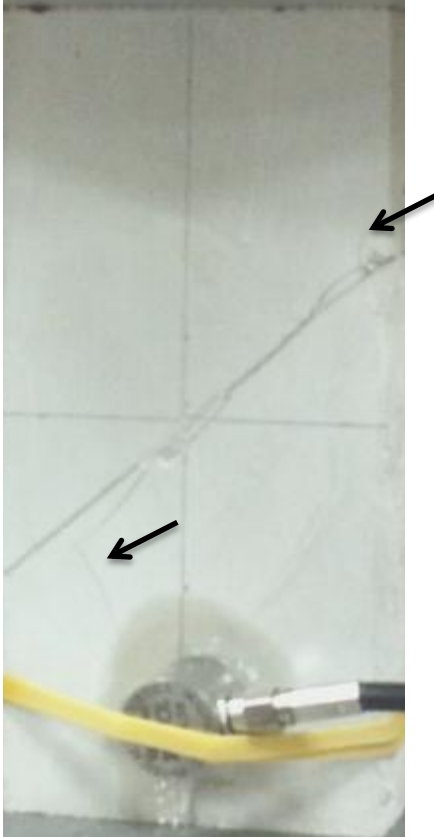


Σχήμα 6.28: Μετά από επεξεργασία στο AutoCAD.

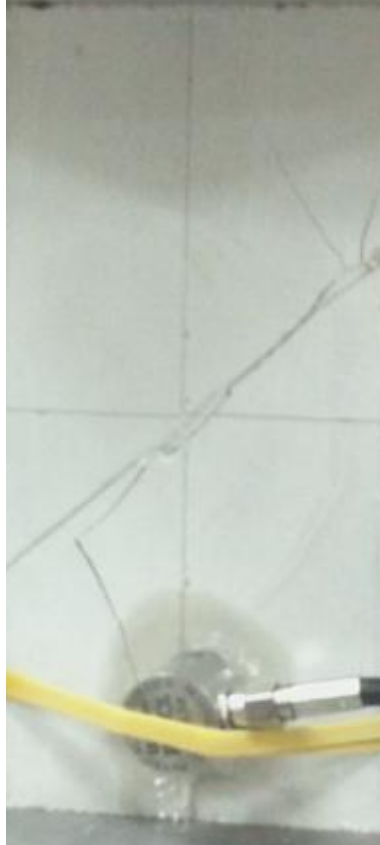
Από την αξιολόγηση των μετρήσεων προκύπτει ο δείκτης JRC ίσος με 12. Λόγο όμως της επίδρασης της κλίμακας θα γίνει διόρθωση ως εξής:

$$JRC_n = JRC_0 \left(\frac{L_n}{L_0} \right)^{-0.02JRC_0} = 12,07 \approx 12.$$

Από τη παρατήρηση του βίντεο προκύπτει ότι έχουμε τη δημιουργία κάθετων ως προς το επίπεδο της ασυνέχειας ρωγμών, οι οποίες στη συνέχεια τείνουν να γίνουν παράλληλες με τη διεύθυνση φόρτισης. Στη συνέχεια έχουμε ολίσθηση στο επίπεδο ασυνέχειας και άνοιγμα των εφελκυστικών ρωγμών.



Φωτογραφία 6.53: Δημιουργία δυο αντιδιαμετρικών εφελκυστικών ρωγμών.



Φωτογραφία 6.54:Επέκταση των ρωγμών.



Φωτογραφία 6.55:Δημιουργία νέας κάθετης εφελκυστικής ρωγμής.

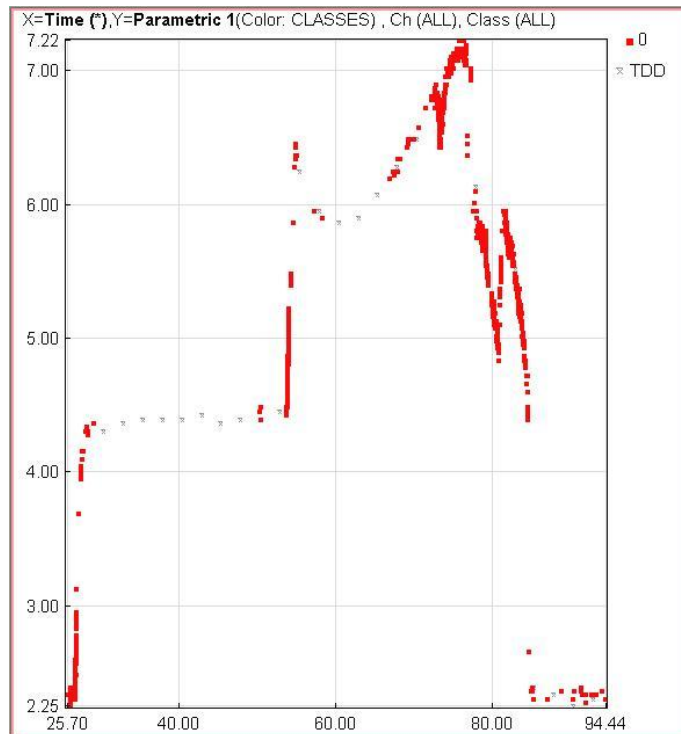


Φωτογραφία 6.56: Ολίσθηση και θραύση δοκιμίου.



Φωτογραφία 6.57: Πίσω όψη δοκιμίου τη στιγμή έναρξης της ολίσθησης.

Από τη παρατήρηση του κατεστραμμένου δοκιμίου συμπεραίνουμε ότι αστόχησε λόγω ολίσθησης και εφελκυστικών ρωγμών που δημιουργήθηκαν από το επίπεδο ασυνέχειας.



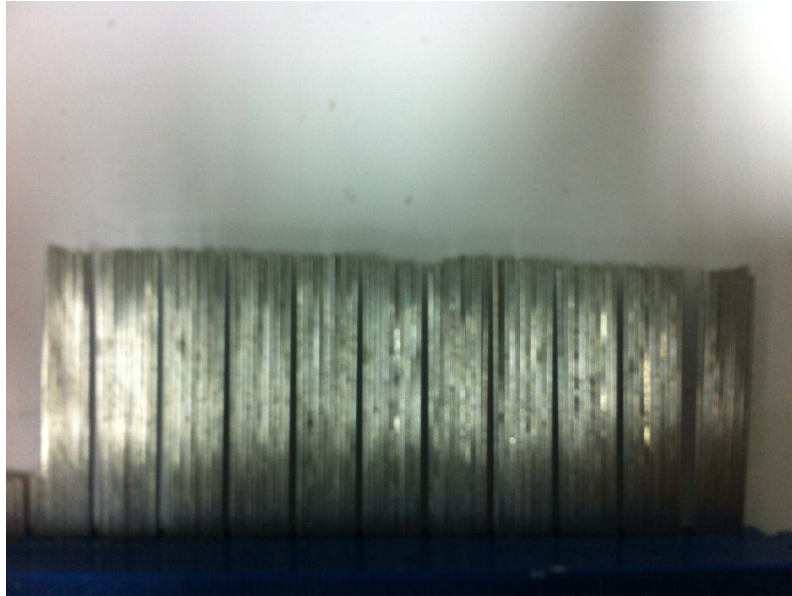
Σχήμα 6.29: Διάγραμμα δοκιμίου ΑΕ JRC40C.

Από το διάγραμμα της Ακουστικής εκπομπής παρατηρούμε κάποια σήματα περίπου στα 70 sec που σχετίζονται με τη δημιουργία δυο ρωγμών και στη συνέχεια που έχουμε έντονη δραστηριότητα σχετίζεται με την αστοχία του δοκιμίου μέσω εφελκυστικών ρωγμών και ολίσθηση πάνω στο επίπεδο της τεχνητής ασυνέχειας.

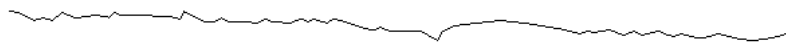
6.3 Δοκίμια με κλίση ασυνέχειας 50°.

6.3.1. Δοκίμιο JRC 50A.

Όπως και στα προηγούμενα δοκίμια μετρήθηκε με το προφیلόμετρο η τιμή του δείκτη τραχύτητας του τεχνητού επιπέδου ασυνέχειας.



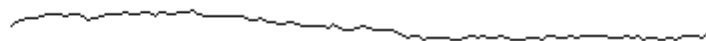
Φωτογραφία 6.58:Μέτρηση προφίλ ασυνέχειας στο πρώτο τμήμα.



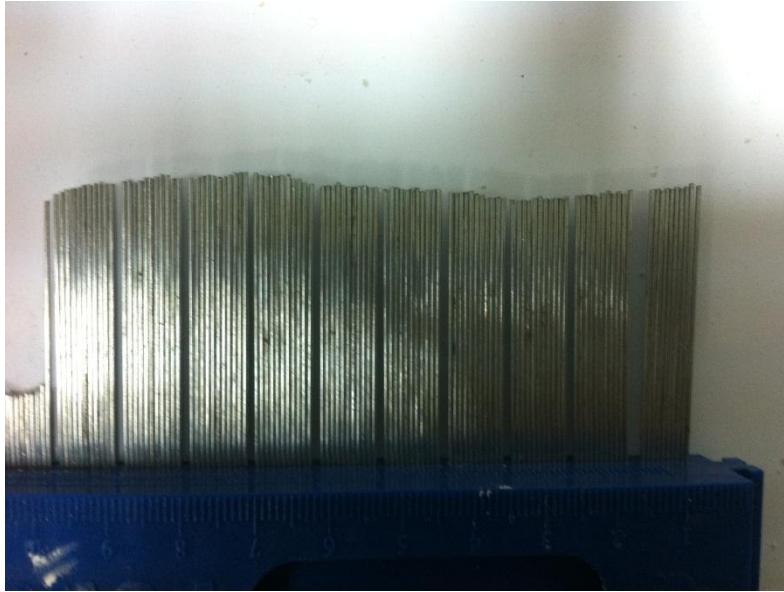
Σχήμα 6.30:Αποτύπωση του προφίλ της ασυνέχειας στο AutoCAD.



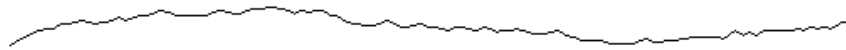
Φωτογραφία 6.59:Μέτρηση στο μέσω της ασυνέχειας.



Σχήμα 6.31:Αποτύπωση Ασυνέχειας στο AutoCAD.



Φωτογραφία 6.60: Μέτρηση στο τρίτο τμήμα της ασυνέχειας.



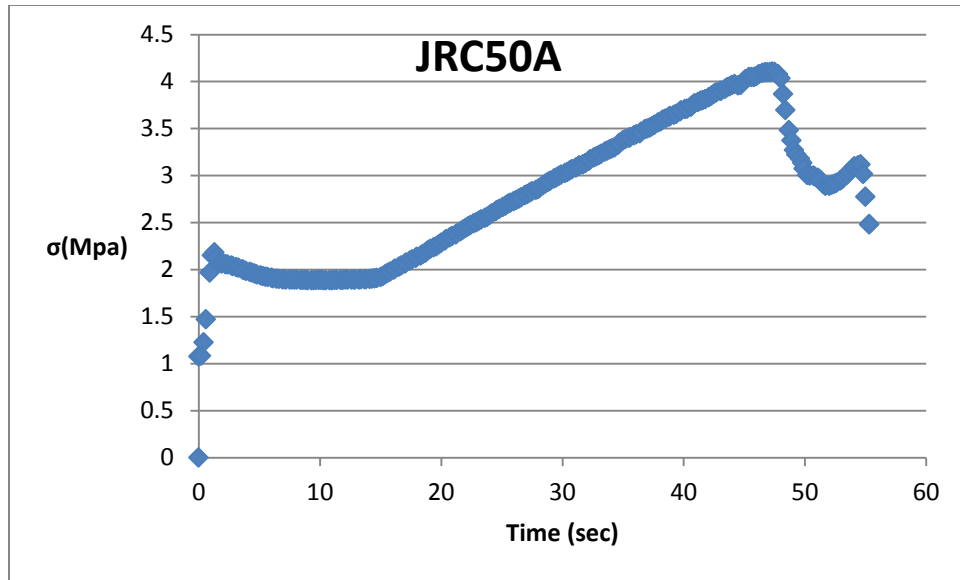
Σχήμα 6.32: Αποτύπωση στο AutoCAD.

Από την αξιολόγηση των μετρήσεων προκύπτει τιμή για τον δείκτη τραχύτητας ίση με 8. Λόγο της επίδρασης της κλίμακας ισχύει:

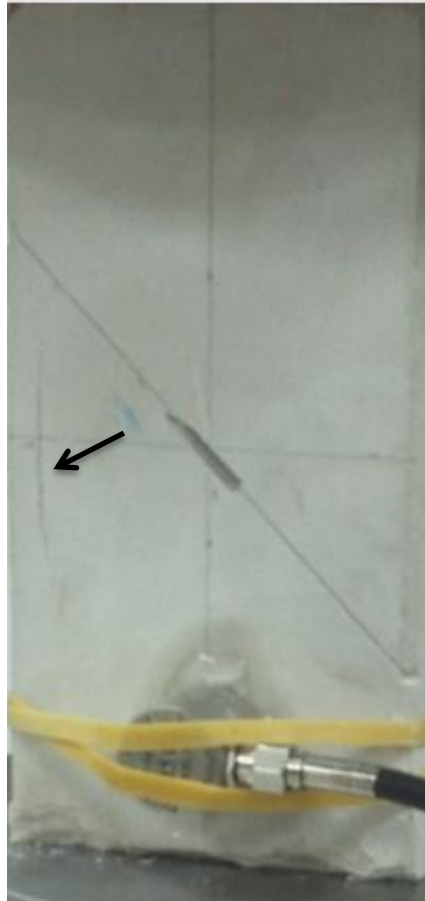
$$JRC_n = JRC_0 \left(\frac{L_n}{L_0} \right)^{-0.02 JRC_0} = 7,37 \approx 7.$$

Το δοκίμιο έφτασε μέγιστη τάση σε μονοαξονική θλίψη στα 4,1 MPa όπως φαίνεται και στο διάγραμμα Τάσης - Χρόνου που ακολουθεί.

Εν συνεχεία από τη παρατήρηση του βίντεο διακρίνεται η δημιουργία μια εφελκυστικής ρωγμής στο άρρηκτο τμήμα του δοκιμίου η οποία εκτείνεται παράλληλα με τη διεύθυνση φόρτισης και διακόπτεται μόλις συναντήσει το επίπεδο ασυνέχειας. Παράλληλα έχουμε τη δημιουργία εφελκυστικών ρωγμών από την ασυνέχεια που εκτείνονται μέχρι το τέλος του δοκιμίου. Αξίζει να σημειωθεί ότι επέρχεται η αστοχία του δοκιμίου χωρίς να παρατηρηθεί ολίσθηση στο επίπεδο ασυνέχειας.



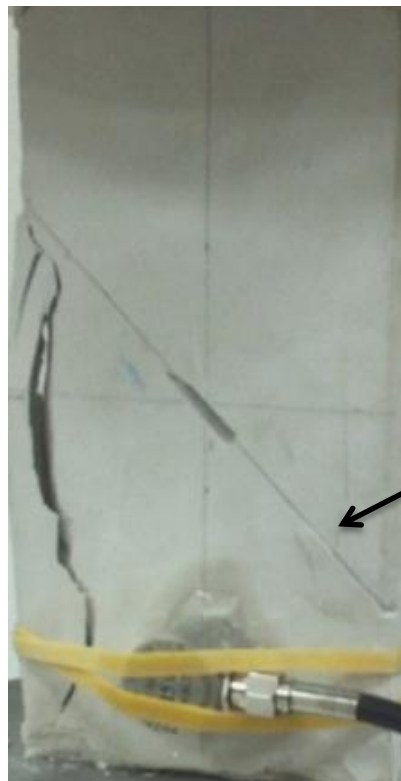
Σχήμα 6.33: Διάγραμμα της φόρτισης του δοκιμίου.



Φωτογραφία 6.61: Δημιουργία ρωγμής από άρρηκτο τμήμα δοκιμίου.



Φωτογραφία 6.62: Άνοιγμα ρωγμής και αποφλοίωση.



Φωτογραφία 6.63: Δημιουργία νέας εφελκυστικής ρωγμής που ξεκινά από την ασυνέχεια.

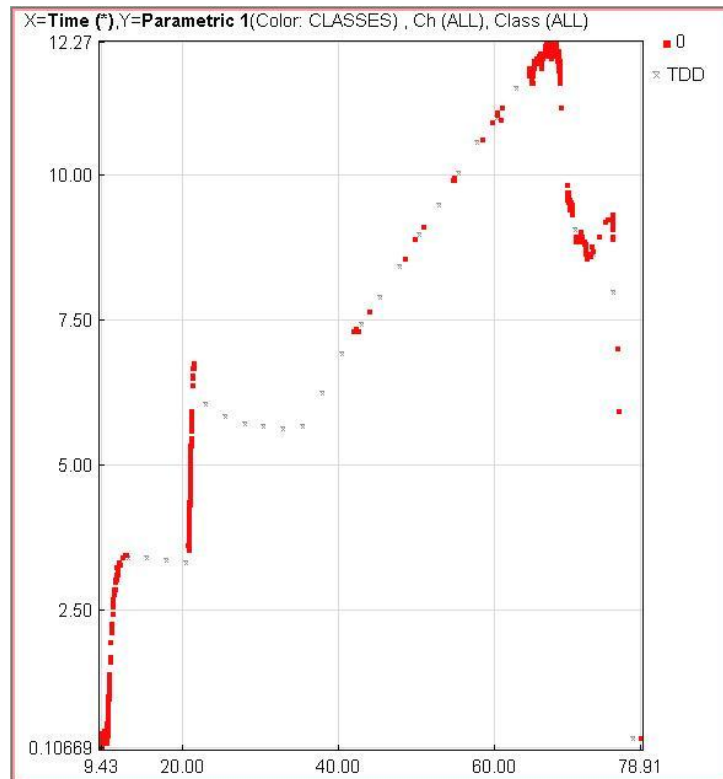


Φωτογραφία 6.64:Θραύση δοκιμίου χωρίς να παρατηρείται ολίσθηση στο επίπεδο ασυνέχειας.



Φωτογραφία 6.65:Διάνοιξη εφελκυστικών ρωγμών από την πίσω όψη του δοκιμίου.

Από τη παρατήρηση του κατεστραμμένου δοκιμίου συμπεραίνεται ότι αστόχησε με εφελκυστικές ρωγμές οι οποίες έχουν μεγάλη γωνία κλίσης, σχεδόν 90° . Επίσης παρατηρείται λοξή διάτμηση που ξεκινάει από τα άκρα. Τέλος έχουμε τη δημιουργία επιφανειακών αποφλοιώσεων.



Σχήμα 6.34: Διάγραμμα ΑΕ δοκιμίου JRC50A.

Λόγο της ψαθυρής συμπεριφοράς των δοκιμίων δεν έχουμε δραστηριότητα ακουστικής εκπομπής που να μπορεί να συσχετιστεί με κάποια ρωγμή που παρατηρήθηκε στο βίντεο.

6.3.2. Δοκίμιο JRC50B.

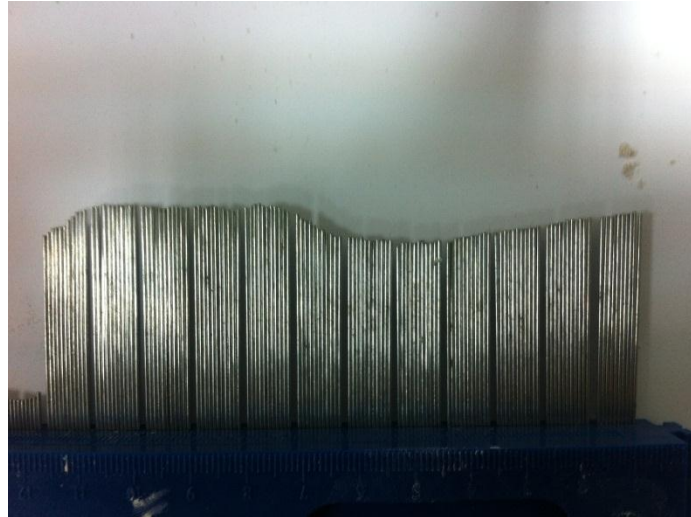
Για τη διεξαγωγή ασφαλέστερων συμπερασμάτων επαναλήφθηκε η δοκιμή μονοαξονικής θλίψης με τη διάταξη της βιντεοσκόπησης σε άλλο ένα δοκίμιο με κλίση επιπέδου ασυνέχειας 50° .



Φωτογραφία 6.66:Μέτρηση του προφιλ της ασυνέχειας στο μπροστά τμήμα.



Φωτογραφία 6.35:Μετά από επεξεργασία στο AutoCAD.



Φωτογραφία 6.66:Μέτρηση στο μέσο τμήμα της ασυνέχειας.



Σχήμα 6.36:Μετά από επεξεργασία στο AutoCAD.



Φωτογραφία 6.67:Μέτρηση στο τρίτο τμήμα της ασυνέχειας.



Σχήμα 6.37:Μετά από επεξεργασία στο AutoCAD.

Οι μετρήσεις αξιολογούνται με δείκτη τραχύτητας JRC ίσο με 14 και λόγω της επίδρασης της κλίμακας ισχύει:

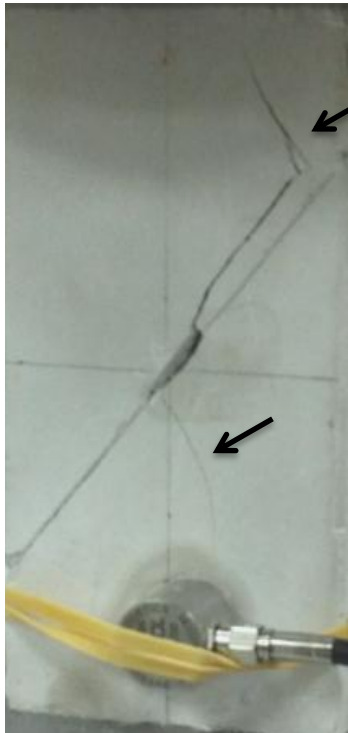
$$JRC_n = JRC_0 \left(\frac{L_n}{L_0} \right)^{-0.02JRC_0} = 13,4 \approx 13$$

Από τη βιντεοσκόπηση του πειράματος παρατηρήθηκε μια ρωγμή τη στιγμή που ακούμπησε η πρέσα τις επιφάνειες του δοκιμίου. Στη συνέχεια αυτή διευρύνθηκε και έπειτα δημιουργήθηκε και δεύτερη εφελκυστική ρωγμή ,αφού είχε πραγματοποιηθεί ολίσθηση στο επίπεδο της ασυνέχειας και κάποιες αποφλοιώσεις στο πάνω τμήμα του δοκιμίου λόγω της ολίσθησης.

Από την κάμερα ταχεία λήψης διακρίνεται η αρχική τροχία της ρωγμής που είναι κάθετη πάνω στο επίπεδο της ασυνέχειας και έπειτα τείνει να γίνει παράλληλη με το φορτίο.



Φωτογραφία 6.68: Δημιουργία ρωγμής.



Φωτογραφία 6.69: Δημιουργία δεύτερης ρωγμής.



Φωτογραφία 6.70:Ολίσθηση στο επίπεδο ασυνέχειας.



Φωτογραφία 6.71:Από τη πίσω κάμερα φαίνεται η ολίσθηση και έπειτα η δημιουργία εφελκυστικής ρωγμής.



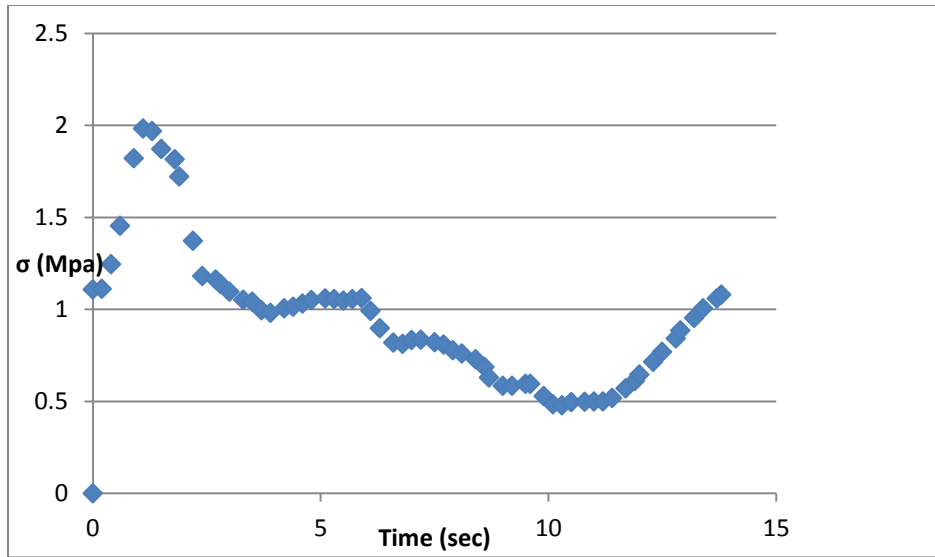
Φωτογραφία 6.72: Αρχική τροχία ρωγμής.



Φωτογραφία 6.73: Τελική τροχία

Η μέγιστη τάση που άντεξε το δοκίμιο πριν αστοχήσει δεν ξεπερνάει τα 2 MPa όπως φαίνεται και στο διάγραμμα και η χαμηλή αντοχή οφείλεται στην ολίσθηση.

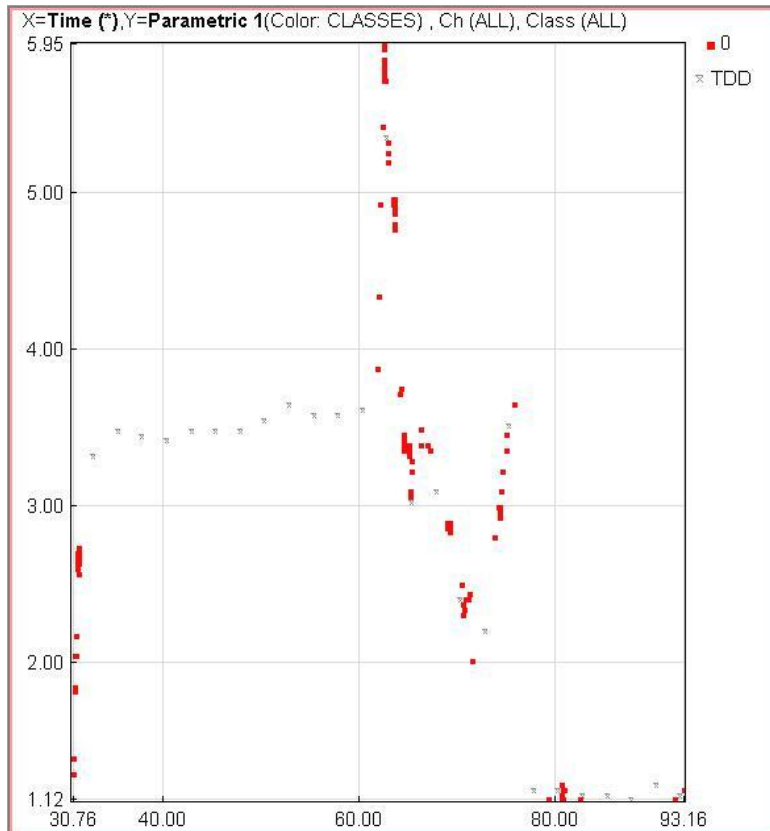
Από τη παρατήρηση του κατεστραμμένου δοκιμίου παρατηρούνται τόσο οι εφελκυστικές ρωγμές όσο και τα ίχνη της διάτμησης στο επίπεδο της ασυνέχειας. Πρώτα αρχίζει να ολισθαίνει το δοκίμιο και στη συνέχεια αστοχεί με τις εφελκυστικές ρωγμές.



Σχήμα 6.38:Διάγραμμα Τάσης –Χρόνου δοκιμίου JRC50B.



Φωτογραφία 6.74:Σημάδια Ολίσθησης και εφελκυστικές ρωγμές.



Σχήμα 6.39:Διάγραμμα ΑΕ δοκιμίου JRC50B.

Από το διάγραμμα της Ακουστικής Εκπομπής διακρίνουμε έντονη δραστηριότητα του φαινομένου λόγω της ολίσθησης στο επίπεδο ασυνέχειας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

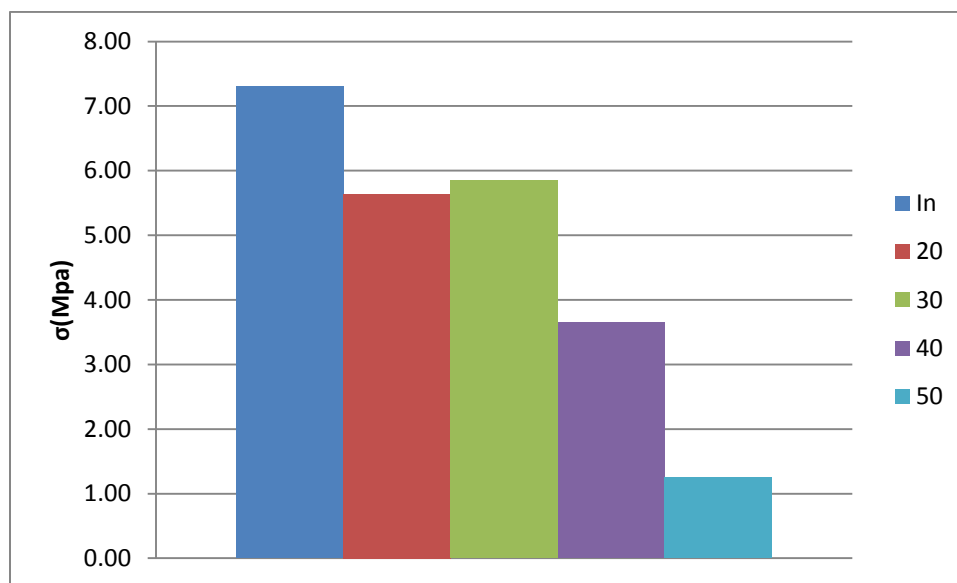
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

7. Συμπεράσματα

Από το πρώτο μέρος των πειραματικών δοκιμών προκύπτει, όπως φαίνεται και από το παρακάτω διάγραμμα, ότι η μέγιστη αντοχή παρατηρείται στο άρρηκτο δοκίμιο. Για κλίση επιπέδου ασυνέχειας 20° και 30° παρατηρούμε μειωμένη αντοχή δοκιμίου σε σχέση με το άρρηκτο αλλά σχεδόν σταθερή σε αυτό το εύρος τιμών. Για περαιτέρω αύξηση της κλίσης του επιπέδου ασυνέχειας υπάρχει μεγάλη επιρροή στη τελική αντοχή του δοκιμίου. Αυτό συμβαίνει διότι στις 20° και 30° ο μηχανισμός αστοχίας του δοκιμίου επηρεάζεται από την άρρηκτη φάση και όχι από την ύπαρξη της ασυνέχειας αντίθετα σε μεγαλύτερες κλίσης η ασυνέχεια επηρεάζει τον τρόπο αστοχίας του δοκιμίου και για αυτό έχουμε χαμηλότερες αντοχές.

Αξίζει να αναφερθεί ότι για μεγαλύτερο όγκο δοκιμών υπολογίζοντας τον μέσο όρο αντοχής τους, δεν αναμένονται διακυμάνσεις σε σχέση με την κλίση του επιπέδου της ασυνέχειας. Αντίθετα αναμένεται η ομαλή πτώση της αντοχής των δοκιμών με την αύξηση της κλίσης του επιπέδου ασυνέχειας.

Από την αξιολόγηση των βίντεο παρατηρείται ομοιότητα στο τρόπο θραύσης των δοκιμών. Σε όλα τα δοκίμια έχουμε το σχηματισμό εφελκυστικών ρωγμών εκατέρωθεν του επιπέδου ασυνέχειας με προσανατολισμό κάθετες σε αυτό το επίπεδο και στη συνέχεια τείνουν να γίνουν παράλληλες με τη διεύθυνση φόρτισης του δοκιμίου.. Οι ρωγμές αυτές σε όλα τα δοκίμια εμφανίζονται λίγο πριν την θραύση του δοκιμίου λόγω της ψαθυρής συμπεριφοράς του υλικού και για αυτόν το λόγο δεν παρατηρούμε έντονη δραστηριότητα ακουστικής εκπομπής. Επίσης παρατηρείται ολίσθηση για κλίση ασυνέχειας 50° και 40°.

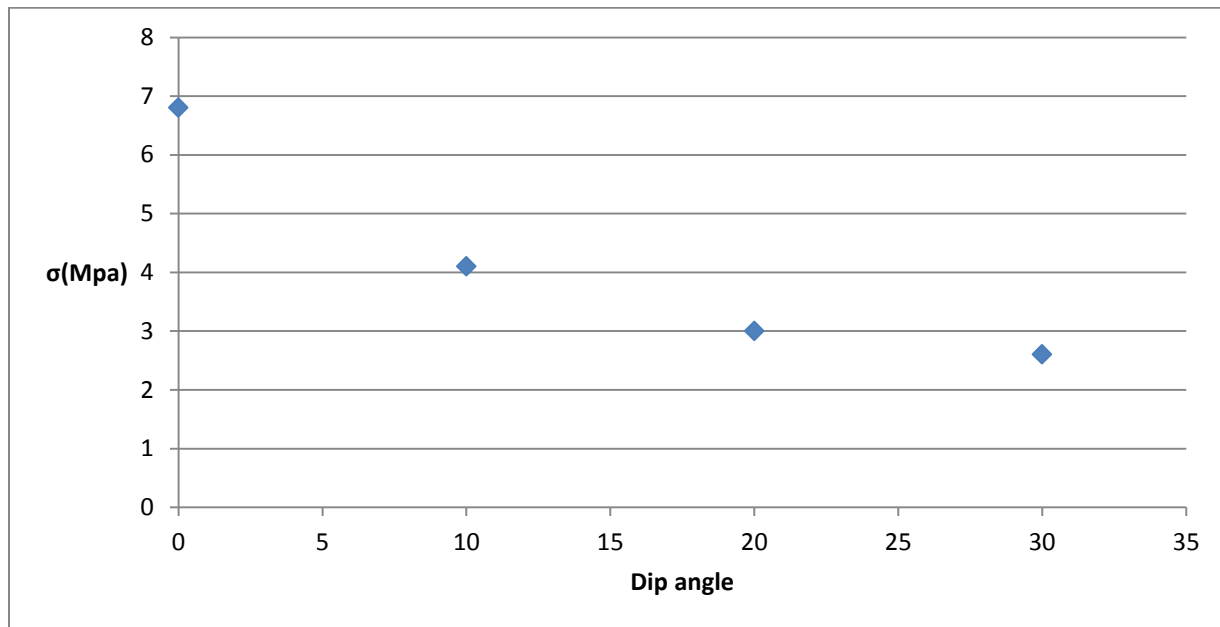


Σχήμα 7.1: Διάγραμμα Αντοχής Δοκιμών με κλίση επιπέδου ασυνεχειών.

Τα συμπεράσματα που προκύπτουν, από τα δοκίμια με πέντε επίπεδα ασυνεχειών είναι ότι με αύξηση της γωνίας κλίσης των ασυνεχειών έχουμε μείωση της αντοχής των δοκιμών σε μονοαξονική θλιπτική αντοχή. Η αντοχή των δοκιμών με περισσότερες ασυνέχειες είναι μικρότερη από ότι αυτά με μια ασυνέχεια.

Τέλος ως προς τον τρόπο αστοχίας παρατηρήθηκε ότι τα πρίσματα με 5 επίπεδα ασυνεχειών ευνοούσαν τη δημιουργία ασυνεχειών με μικρότερη εμμόνη ενώ στα δοκίμια με μια ασυνέχεια είχαμε

τη δημιουργία ρωγμών με μεγαλύτερη εμμονή. Οι εφελκυστικές ρωγμές ήταν κάθετες στα επίπεδα ασυνεχειών. Επίσης παρατηρήθηκε η έντονη αποφλοιώση των δοκιμίων κάτι που απουσίαζε από τα δοκίμια με ένα επίπεδο ασυνέχειας.



Σχήμα 7.2: Διάγραμμα τάσης – γωνία κλίσης επιπέδου ασυνεχειών.

Από το δεύτερο μέρος των πειραματικών δοκιμών, δηλαδή των δοκιμών με ένα επίπεδο ασυνεχειών με τραχύτητα, συμπεραίνουμε ότι όσο αυξάνει η κλίση του επιπέδου ασυνέχειας μειώνεται η αντοχή του δοκιμίου. Επίσης παρουσιάζουν λίγο πιο υψηλή αντοχή από ότι τα δοκίμια με ασυνέχειες χωρίς τραχύτητα.

Επίσης στο πρώτο μέρος των πειραματικών δοκιμών παρατηρήσαμε ολίσθηση κατά το επίπεδο της ασυνέχειας στις 40° μοίρες ενώ στα δοκίμια με ασυνέχεια με τραχύτητα παρατηρήθηκε στις 50°.

Ως προς τον τρόπο αστοχίας είχαμε τη δημιουργία εφελκυστικών ρωγμών που ξεκινούσαν από το επίπεδο της ασυνέχειας και ήταν κάθετες σε αυτό αλλά και εφελκυστικές ρωγμές παράλληλες με τη διεύθυνση της φόρτισης στο άρρηκτο υλικό. Επίσης παρατηρήθηκαν λοξά επίπεδα διάτμησης σε αρκετά και ίχνη διάτμησης στα επίπεδα των ασυνεχειών.

8. Βιβλιογραφία

- [1]. Χαλακατεβάκης Ν. «Αναλυτικός υπολογισμός αντοχής κερματισμένης βραχόμαζας» (Διδακτορική Διατριβή)
- [2]. Σοφιανός Α. ,Νομικός Π. «Προχωρημένη Μηχανική των Πετρωμάτων» (Σημειώσεις Μαθήματος)
- [3]. Κυπριωτάκη Α. «Εργαστηριακές εφαρμογές ακουστικής εκπομπής σε δοκίμια άοπλου και ινολισμένου σκυροδέματος» (Μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία)
- [4]. C. Xin, L. Zhihong, P. Xi “Deformability characteristics of jointed rock masses under uniaxial compression”
- [5]. Z.Y. Yang, J.M. Chen, T.H. Huang, “Effect of joint sets on the strength and deformation of rock mass models”
- [6]. P.H.S.W. Kulatilake, W. He, J. Um, H. Wang, “A physical model study of jointed rock mass strength under uniaxial compressive loading”
- [7]. M. Prudencio, M.Vant Sint Jan, “Strength and failure modes of rock mass models with non-persistent joints”
- [8]. G.Reik, M. Zacas, “Strength and deformation characteristics of jointed Media in true triaxial compression”
- [9]. W. Zhu, J. Zhao “Stability analysis and modeling of underground excavations in fractured rocks”
- [10]. Κατσικογιάννη Π. Νομικός Π. Σοφιανός Α. «Η τεχνική της Ακουστικής εκπομπής στη μηχανική των πετρωμάτων»