



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών
«Σχεδιασμός και Κατασκευή Υπογείων Έργων»

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αριθμητική προσομοίωση της θραύσης ψαθυρού πετρώματος γύρω από πλάκες με οπή σε
μονοαξονική θλίψη

ΠΑΠΑΔΟΠΟΥΛΟΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ

ΜΗΧΑΝΙΚΟΣ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ – ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΟΣ

Επιβλέπων: ΝΟΜΙΚΟΣ Π.Π.

Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα 2016

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα εργασία πραγματεύεται το θέμα της ανάπτυξης και εξέλιξης της ρωγμάτωσης γύρω από κυκλικές οπές υπό μονοαξονική θλίψη μέσω του υπολογιστικού προγράμματος PHASE 2. Το θέμα της εξέλιξης και διάδοσης των ρωγματώσεων έχει τόσο θεωρητικό όσο και πρακτικό ενδιαφέρον, ειδικότερα κατά την αξιολόγηση της μηχανικής συμπεριφοράς υπογείων εκσκαφών σε πετρώματα.

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

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία ασχολείται με την παρατήρηση του τρόπου θραύσης μοντέλων με κυκλικό άνοιγμα με χρήση του προγράμματος Phase 2 της Rocscience.

Αρχικά δίνεται ένα θεωρητικό υπόβαθρο σχετικά με τη θραύση και τη διαδικασία καταστροφής πετρωμάτων υπό θλίψη και παρουσιάζονται οι μελέτες παλαιότερων ερευνητών σε αυτό το αντικείμενο.

Ύστερα δίνονται γενικά στοιχεία που αφορούν το λογισμικό Phase 2 και παρουσιάζεται η διαδικασία σχεδιασμού των μοντέλων και οι τρόποι εξαγωγής των αποτελεσμάτων από τις δοκιμές.

Στη συνέχεια ακολουθεί η ανάλυση δοκιμών μονοαξονικής θλίψης σε μοντέλα με μηχανικά χαρακτηριστικά ασβεστόλιθου με διάφορες οπές, με σκοπό την εξαγωγή αποτελεσμάτων που αφορούν την επίδραση του μεγέθους της οπής στα διάφορα στάδια που συντελούνται κατά την μονοαξονική φόρτισή τους.

Στο τελευταίο κεφάλαιο προσομοιώνεται το πείραμα του Carter για το δοκίμιο πλάκας με οπή από γρανίτη της λίμνης Bonnet. Λόγω της απουσίας πληροφοριών που αφορούν βασικά μηχανικά χαρακτηριστικά, όπως η συνοχή και η γωνία τριβής, οι τιμές στις μηχανικές παραμέτρους δόθηκαν με στόχο την επίτευξη της αντίστοιχης μέγιστης αντοχής, σύμφωνα με τα αποτελέσματα που έδωσε ο Carter για τον ίδιο γρανίτη χωρίς οπή. Με βάση αυτά τα χαρακτηριστικά σχεδιάζεται και αναλύεται το μοντέλο που περιλαμβάνει την οπή.

Τέλος παρουσιάζονται τα συμπεράσματα από τα αποτελέσματα που προέκυψαν.

ABSTRACT

This thesis mainly deals with the observation of fracture patterns around circular openings with the use of the computer program Phase 2 from Rocscience.

It starts with a theoretical background associated with the meaning of fracture and the procedure of failure of rock models under compression. Also there are general references to the literature relevant with this case study including experiments performed in natural underground excavation simulation models, and the conclusions derived from them.

Furthermore general informations about the program Phase 2 and a general presentation about the procedure of designing and analyzing a model are given.

Then follows the analysis of the uniaxial compression tests, that were performed in models with equal mechanical features and different circular opening diameter. The tests are designed to draw conclusions about the effect of the opening in the stages occurred during the destruction of the models.

In the final chapter there is a simulation of a test that was conducted by Carter in a granite model from lake Bonett. Due to the absence of information related to the material properties of the rock model, such as cohesion and friction angle, the values in these properties were given in order to accomplish similar uniaxial strength, according to the results which were presented by the researcher in the rock model without opening.

Finally the designed model is analysed and conclusions are derived.

Περιεχόμενα

| | |
|---|----|
| 1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ | 7 |
| 1.1. Θεωρητικά στοιχεία..... | 7 |
| 1.2. Η θεωρία του Griffith για την ψαθυρή θραύση..... | 11 |
| 1.3. Μικρομηχανική της ψαθυρής θραύσης..... | 12 |
| 1.3.1. Η σχέση της έναρξης, επέκτασης και συνένωσης ρωγμών με τη στάθμη φόρτισης..... | 12 |
| 1.3.2. Προσομοιώματα μικρομηχανικής για την έναρξη, επέκταση και συνένωση ρωγμών..... | 13 |
| 1.4. Ανακατανομή τάσεων και παραμορφώσεων γύρω από κυκλικά ανοίγματα..... | 16 |
| 1.5. Το πρόβλημα της ρωγμάτωσης γύρω από κυκλικά ανοίγματα..... | 18 |
| 1.6. Η ερμηνεία του φαινομένου από ερευνητές..... | 19 |
| 1.6.1. Γενικά..... | 19 |
| 1.6.2. Η ερμηνεία του Carter..... | 19 |
| 1.6.3. Η ερμηνεία του Lajtai..... | 23 |
| 1.6.4. Η ερμηνεία των P. Ganne, A. Vervoort και M. Wevers..... | 26 |
| 1.7. Τα φαινόμενα κλίμακας και η σχέση τους με την τάση ρωγμάτωσης..... | 30 |
| 2. Το λογισμικό Phase 2..... | 33 |
| 2.1 Τρόπος ανάλυσης αποτελεσμάτων από το πρόγραμμα Phase2..... | 33 |
| 2.2 Διαδικασία σχεδιασμού..... | 34 |
| 3. Προσομοίωση δοκιμής μονοαξονικής θλίψης σε ασβεστολιθικά μοντέλα..... | 36 |
| 3.1. Μοντέλο επιβεβαίωσης..... | 36 |
| 3.1.1. Ανάλυση αποτελεσμάτων..... | 41 |
| 3.2. Μοντέλο 1..... | 45 |
| 3.2.1. Ανάλυση..... | 50 |
| 3.3. Μοντέλο 2..... | 63 |
| 3.3.1. Ανάλυση..... | 67 |
| 3.4. Μοντέλο 3..... | 77 |
| 3.4.1. Ανάλυση..... | 81 |
| 3.5. Σύγκριση αποτελεσμάτων..... | 90 |

| | |
|---|------------|
| 4.Προσομοίωση Carter..... | 91 |
| 4.1.Μοντέλο επιβεβαίωσης..... | 92 |
| 4.1.1.Ανάλυση..... | 97 |
| 4.2.Προσομοίωση μοντέλου με οπή..... | 99 |
| 4.2.1Ανάλυση..... | 110 |
| 4.3 Σύγκριση τιμών Carter – Μοντέλου..... | 125 |
| 5. Συμπεράσματα..... | 127 |
| ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ..... | 128 |

1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ

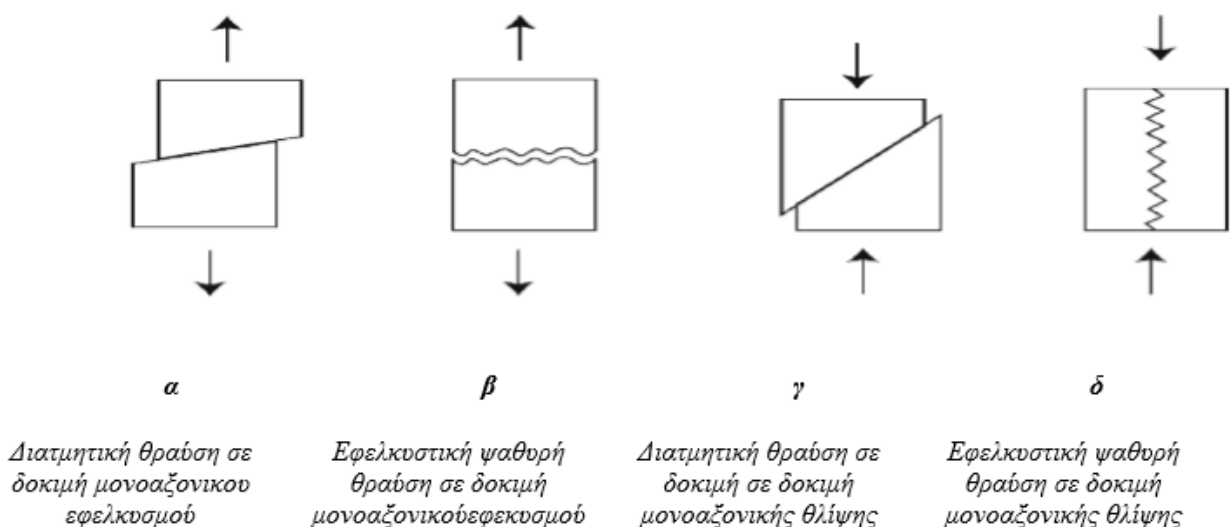
1.1. Θεωρητικά στοιχεία

Πέτρωμα ορίζεται κάθε ορυκτό ή συσσωμάτωμα ορυκτών που απαντά στη φύση σε μεγάλη μάζα ή σημαντική ποσότητα και καταλαμβάνει τμήμα του στερεού φλοιού της γης. Τα πετρώματα περιλαμβάνουν κρυστάλλους, κόκκους, κενά, υγρασία, πόρους, συνδετικό υλικό και ρωγμές σε διαφορετικές αναλογίες. Τέτοιου είδους μικροδομές παράγουν διαφορετικά μεγέθη και σχήματα προκαλώντας ετερογένεια στις μηχανικές σταθερές μεταξύ των πετρωμάτων. Για παράδειγμα η παρουσία κενών στην υφή του πετρώματος μειώνει την αντοχή του και αυξάνει την παραμορφωσιμότητά του. Ένα μικρό κατ'όγκο ποσοστό κενών μπορεί να έχει σημαντική επίδραση στις μηχανικές ιδιότητες του πετρώματος. Οι δομικές ανομοιομορφίες έχουν σαν αποτέλεσμα την τοπική μεταβολή των τάσεων που δέχεται ένα υπό τάση πέτρωμα.

Ο διαχωρισμός, ή θρυμματισμός, ενός στερεού σώματος σε δύο ή περισσότερα μέρη, κάτω από την επίδραση μηχανικών τάσεων ορίζεται ως θραύση. Η θραύση είτε ψαθυρή είτε όλκιμη μπορεί να διακριθεί σε δύο στάδια: την πυρήνωση-έναρξη (initiation) και την προώθηση (propagation) [<http://www.mie.uth.gr>]. Η ψαθυρή θραύση είναι μια γρήγορη προώθηση των ρωγμών μέσα σε ένα υλικό που βρίσκεται υπό ένταση. Οι ρωγμές αυτές επεκτείνονται με πολύ μεγάλη ταχύτητα καθιστώντας έτσι αδύνατη την πρόβλεψη της θραύσης. Τα ψαθυρά υλικά απορροφούν μικρά ποσά ενέργειας κατά την κρούση, χαρακτηρίζονται δηλαδή από μικρή σχετικά δυσθραυστότητα. Τα κεραμικά υλικά, το γυαλί, η γύψος κατατάσσονται σε αυτή την κατηγορία [<http://www.m3.tuc.gr>]. Ωστόσο, σε μικροσκοπική κλίμακα μπορεί να παρατηρηθεί μερική τοπική πλαστική παραμόρφωση.

Ο Patterson (2005) διέκρινε την ψαθυρή θραύση σε δύο κατηγορίες:

1. Διατμητική ψαθυρή θραύση, στην οποία η σχετική μετατόπιση είναι παράλληλη στην επιφάνεια της θραύσης, η οποία επιφάνεια έχει κλίση μικρότερη των 45ο στην μέγιστη θλιπτική τάση
2. Εφελκυστική ψαθυρή θραύση, η οποία χαρακτηρίζεται από διαχωρισμό παράλληλα στην επιφάνεια θραύσης, η οποία γενικά είναι παράλληλη στην μικρότερη κύρια τάση (θετική θεωρείται η θλίψη).



. Εικόνα 1.(Πηγή: Paterson M.S, Wong T, “Experimental Rock Deformation-The Brittle Field”,2005)

Η κύρια μορφή μακροσκοπικής ψαθυρής αστοχίας στην τριαξονική θλίψη, εκτός από τις δοκιμές με χαμηλή πλευρική πίεση, αλλά και στον τριαξονικό εφελκυσμό σε υψηλές τιμές πλευρικής πίεσης, είναι η διατμητική ψαθυρή θραύση. Γενικά, η θραύση και στις δύο περιπτώσεις συμβαίνει σε μια διακριτή γωνία ως προς τη μέγιστη κύρια θλιπτική τάση, συνήθως 20-30°. Ωστόσο, με αύξηση της πλευρικής πίεσης η παραπάνω γωνία τείνει να αυξάνεται ελαφρά. Επίσης, σε όλες τις δοκιμές εφελκυσμού, έχειδειχθεί ότι υπάρχει μια σταδιακή αλλαγή στον προσανατολισμό της επιφάνειας αστοχίας κατά την μετάβαση από εφελκυστική σε διατμητική θραύση με αυξανόμενη πλευρική πίεση. Με αυξανόμενη πλευρική πίεση, η συμπεριφορά του υλικού τείνει να μεταβαίνει από ψαθυρή σε όλκιμη και η διατμητική αστοχία τείνει να γίνεται μια ζώνη έντονης παραμόρφωσης και μικροθραύσης παρά μια διακριτή επιφάνεια διάτμησης.

Η εφελκυστική ψαθυρή θραύση συμβαίνει συνήθως στις δοκιμές μονοαξονικού εφελκυσμού με τη μορφή αποκόλλησης του δοκιμίου κάθετα προς την κατεύθυνση της εφελκυστικής τάσης. Ωστόσο, εφελκυστική θραύση μπορεί να συμβεί και σε θλιπτικό εντατικό πεδίο, ή και σε τριαξονικές δοκιμές εφελκυσμού όταν όλες οι μακροσκοπικές κύριες τάσεις είναι θλιπτικές (π.χ. Handin 1953). Χαρακτηριστικό παράδειγμα της τελευταίας περίπτωσης είναι η δοκιμή Brazilian στην οποία το δοκίμιο μορφής δίσκου θλίβεται μονοαξονικά αλλά αστοχεί σε εφελκυσμό. Σε δοκιμές θλίψης σε ατμοσφαιρική πίεση ή κοντά σε αυτήν, συμβαίνουν συχνά εφελκυστικές ρωγμές με τη μορφή σχισμού παράλληλα στον άξονα της θλίψης. Το γεγονός ότι η εφελκυστική ψαθυρή θραύση συμβαίνει με την απουσία μακροσκοπικής εφελκυστικής τάσης, αποτελεί ζήτημα προς συζήτηση. Μια άποψη είναι ότι η θραύση συμβαίνει όταν ξεπεραστεί μια συγκεκριμένη κρίσιμη εφελκυστική τροπή (κριτήριο μέγιστης εφελκυστικής τροπής, π.χ. Bridgman 1938). Ωστόσο αυτή η άποψη δεν δίνει ικανοποιητική εξήγηση του φαινομένου. Πιο πιθανή εξήγηση κατά τον Peterson (2005), είναι ότι οι θραύσεις προέρχονται από τοπικές εφελκυστικές τάσεις γύρω από ατέλειες ή ασυνέχειες του υλικού σε μικροσκοπική κλίμακα που σχετίζονται με την αξονική κατάκλαση [Peterson 2005]. Η διαδικασία δημιουργίας των εφελκυστικών ρωγμών από τα φυσικά ελαττώματα του υλικού περιγράφεται στην παράγραφο 1.3.

Η πιθανότητα εμφάνισης ψαθυρής θραύσης αυξάνεται με μείωση της θερμοκρασίας, με την αύξηση της ταχύτητας φόρτισης και με την παρουσία εγκοπών ή άλλων ασυνεχειών στο υλικό. Η ψαθυρή θραύση, είναι η χειρότερη θραύση γιατί δε μπορεί να γίνει επιδιόρθωση της βλάβης πριν την αστοχία γι αυτό και ο σχεδιασμός των κατασκευών πρέπει να γίνεται με βασικό κριτήριο την αποφυγή της [<http://www.mie.uth.gr>].

Μερικά χαρακτηριστικά της ψαθυρής θραύσης:

- Δεν υπάρχει μόνιμη παραμόρφωση του υλικού,
- Η επιφάνεια τείνει να είναι κάθετη στην κύρια εφελκυστική τάση,
- Χαρακτηριστικά στίγματα των πρώτων ρωγμών συχνά δείχνουν το σημείο όπου ξεκίνησε η θραύση,
- Η διαδρομή που ακολουθεί η ρωγμή εξαρτάται από τη δομή του υλικού [Hochgraf 2004]).

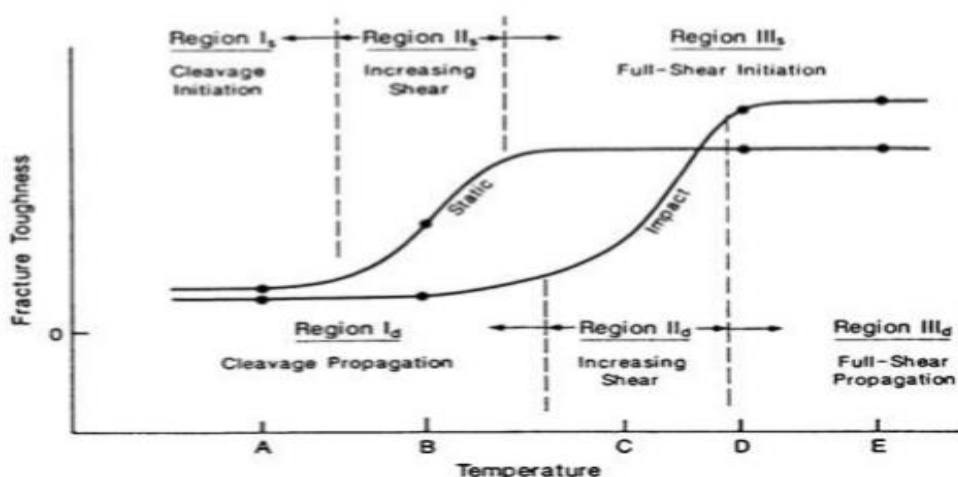
Αντίθετα με την ψαθυρή, η όλκιμη θραύση συμβαίνει αργά, και χαρακτηρίζεται από το μεγάλο ποσοστό πλαστικής παραμόρφωσης του υλικού, πριν και κατά τη διάρκεια προώθησης των ρωγμών, οι οποίες τελικά επιφέρουν τη θραύση. Η δυσθραυστότητα των όλκιμων υλικών είναι υψηλή και απορροφούν μεγάλα ποσά ενέργειας κατά την κρούση. Επιπροσθέτως, στη όλκιμη θραύση, η ελάττωση της διατομής στην περιοχή θραύσεως είναι σημαντική λόγω της πλαστικής παραμόρφωσης που προηγείται, ενώ αντιθέτως, στην ψαθυρή θραύση, η ελάττωση της διατομής είναι από μηδενική έως αμελητέα.

Μερικά χαρακτηριστικά όλκιμης θραύσης:

- Υπάρχει μόνιμη παραμόρφωση στο άκρο της προωθούμενης ρωγμής
- Όπως και με την ψαθυρή θραύση, η επιφάνεια της όλκιμης θραύσης τείνει να είναι κάθετη προς την κύρια εφελκυστική τάση,
- Στην όλκιμη θραύση, σε κρυσταλλικά μέταλλα και κεραμικά μικροσκοπικά έχει δειχθεί ότι διάτμηση είναι αυτή που επεκτείνει την ρωγμή,
- Η επιφάνεια θραύσης είναι θαμπή και ινώδης,
- Πρέπει να υπάρχει μεγάλη διαθέσιμη ενέργεια για την επέκταση της ρωγμής [Hochgraf 2004].





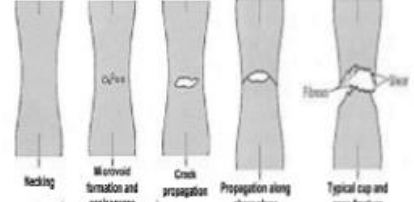


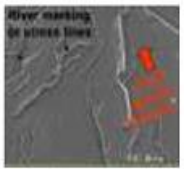
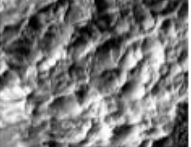
Τα ελαττώματα του υλικού είναι η αιτία της πρόωρης αστοχίας των υλικών κυρίως των ψαθυρών. Η ύπαρξη ατελειών στο υλικό, όπως φυσικές ασυνέχειες (ρήγματα, στρώση, διακλάσεις, κλπ) ή και τεχνητές όπως μια εγκοπή, έχει σαν αποτέλεσμα την δημιουργία ανομοιόμορφης κατανομής των τάσεων κοντά στην περιοχή τους. Οι τάσεις στην περιοχή των ελαττωμάτων έχουν μεγαλύτερες τιμές από αυτές μακριά τους, με αποτέλεσμα να δημιουργείται μια συγκέντρωση τάσεων γύρω τους. Εάν δεν υπήρχε η ασυνέχεια, η εφαρμοζόμενη τάση στο υλικό θα ήταν ομοιόμορφα κατανεμημένη στην επιφάνεια της διατομής του.

Η θεωρία της θραυστομηχανικής των υλικών έχει βασιστεί σε προτάσεις του Griffith ο οποίος μελετούσε τη θραύση ινών γυαλιού. Μετά από πειράματα, ο Griffith διατύπωσε την ιδέα ότι η αντοχή θραύσης των ψαθυρών υλικών, είναι μικρότερη από τη θεωρητική αντοχή θραύσης τους, λόγω ανομοιογένειάς τους. Ένα ψαθυρό υλικό περιέχει ατέλειες στη δομή του, οι οποίες είναι μεγάλες συγκριτικά με τις ατομικές και μοριακές αποστάσεις, και δημιουργούν τοπικές διαταραχές στις γραμμές της εφαρμοζόμενης τάσης. Με την προσομοίωση του σχήματος της ρωγμής με έλλειψη, έδωσε τη δυνατότητα μαθηματικής επεξεργασίας του πειραματικά επιβεβαιωμένου φαινομένου της συγκέντρωσης των τάσεων, λόγω μονοαξονικού εφελκυσμού [Σοφιανός & Νομικός 2008]. Ο Griffith ανέλυσε τις τάσεις με βάση τη θεωρία του Inglis (1913) και διατύπωσε τη βασική αρχή σύμφωνα με την οποία τα στερεά σώματα (και τα ρευστά) κατέχουν επιφανειακή ενέργεια και για να διαδοθεί μια ρωγμή, η αντίστοιχη επιφανειακή ενέργεια πρέπει να αποδοθεί από την εξωτερικά προσδιδόμενη ενέργεια ή από την εκροή της επιφανειακής ενέργειας του στερεού σώματος [Αντωνογιαννάκη 2004].



Διάγραμμα 1. Οι δυο μορφές θραύσης σε μακροσκοπικό (μικροσκοπικό) επίπεδο παρατήρησης (Πηγή: <http://www.metalpass.com/>)

Στον Πίνακα που ακολουθεί, φαίνεται συνοπτικά η αναγνώριση του τύπου θραύσης

| | Ψαθυρή θραύση | Όλκιμη θραύση | |
|---|---|---|--|
| Η γενική μορφή |  <p>Ψαθυρή θραύση ψυχρών μετάλλων, κεραμικών υλικών</p> |  <p>Πολύ όλκιμο</p> |  <p>Μέτρια όλκιμο</p> |
| | Πηγή: http://www.intechopen.com/ | | |
| Η εξέλιξη |  <p>Η θραύση γίνεται απότομα χωρίς προειδοποίηση μέσω επέκτασης ασυνεχειών του υλικού ή/και δημιουργίας νέων</p> |  <p>Η ύπαρξη δευτερογενών φάσεων ή εγκλεισμάτων λειτουργεί καταλυτικά στη δημιουργία μικροκενών από τα οποία ξεκινά η θραύση</p> | |
| Πηγή: www.sut.ac.th | | | |
| Η επιφάνεια |  <p>Ψαθυρή θραύση που φαίνεται η προέλευση και η διαδρομή της ρωγμής</p> |  <p>Τραχείες και ακανόνιστες επιφάνειες θραύσης. Οι δύο επιφάνειες θραύσης είναι σαν κύπελο και κώνος</p> | |
| Πηγή: http://www.sv.vt.edu/ | | Πηγή: http://pwatlas.mt.umist.ac.uk | |
| Η αναγνώριση |  <p>Οι γραμμές τάσης βρίσκονται μεταξύ των ρωγμών σε παράλληλα επίπεδα και πάντα συγκλίνουν προς την κατεύθυνση της διάδοσης της ρωγμής. Αυτές οι γραμμές είναι χαρακτηριστικό ψαθυρής θραύσης όπως και οι πιο λειές επιφάνειες.</p> |  <p>Η επιφάνεια έχει κοίλες εσοχές που προκύπτουν από τα κενά που δημιουργούνται από τις όλκιμες πτυχώσεις λόγω ένωσης των μικροσκοπικών κενών. Οι τραχείες άκρες των πτυχώσεων είναι εκεί που το τελευταίο κομμάτι που έμεινε να αστοχήσει, τραβήχτηκε προς τα πάνω μέχρι να αστοχήσει.</p> | |
| | Πηγή: http://www.sut.ac.th/ | | Πηγή: http://oregonstate.edu/ |

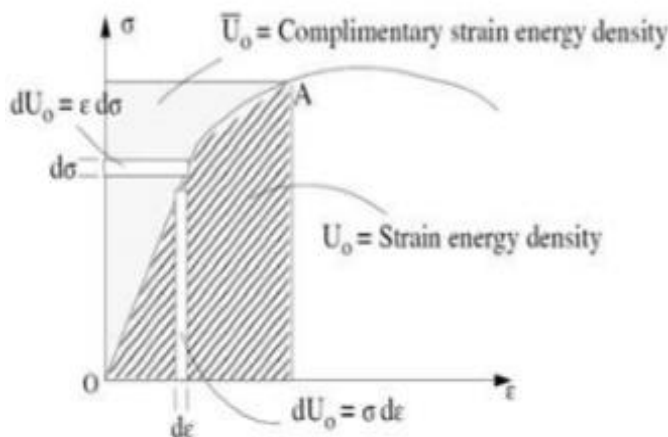
Πίνακας 1.

1.2. Η θεωρία του Griffith για την ψαθυρή θραύση

Για την ερμηνεία και την ποσοτικοποίηση των φαινομένων κατά τη θραύση των πετρωμάτων, έχουν αναπτυχθεί κατά καιρούς διάφορες θεωρίες από τις οποίες αυτή που ξεχωρίζει είναι η θεωρία Griffith ή θεωρία του έργου θραύσης. Ο Griffith το 1920 σε πειράματα σε γυαλί, προσπάθησε να εξηγήσει τη διαφορά ανάμεσα στην θεωρητική και στην πειραματικά παρατηρούμενη αντοχή των υλικών σε θραύση. Σύμφωνα με την θεωρία που ανέπτυξε, κάθε ψαθυρό υλικό περιέχει ένα πλήθος λεπτών ατελειών ή μικρορωγμών, το σχήμα των οποίων προσομοίωσε με έλλειψη και στις οποίες αναπτύσσονται εφελκυστικές τάσεις κατά διεύθυνση κάθετη προς το διαμήκη άξονα των ρωγμών αυτών. Επίσης, στις περιοχές των μικρορωγμών, δημιουργείται συγκέντρωση τάσεων, έτσι ώστε οι τάσεις κοντά σε αυτές να ξεπερνούν την θεωρητική αντοχή του υλικού σε θραύση, ενώ μακριά από αυτές οι τάσεις μπορεί να έχουν χαμηλότερες τιμές. Όταν οποιαδήποτε από τις μικρορωγμές προωθείται μέσα στο υλικό, τότε δημιουργούνται δύο νέες ελεύθερες επιφάνειες.

Κάθε ελεύθερη επιφάνεια χαρακτηρίζεται από ένα ποσό ενέργειας που καλείται επιφανειακή ενέργεια (surface energy), η φυσική προέλευση της οποίας οφείλεται στο γεγονός ότι τα άτομα στις ελεύθερες επιφάνειες έχουν σπασμένους χημικούς δεσμούς και είναι πιο ευκίνητα απ' ό,τι τα άτομα στο εσωτερικό του υλικού. Συνεπώς, με την προώθηση και τη συνεπαγόμενη αύξηση της ελεύθερης επιφανείας της μικρορωγμής, η συνολική ενέργεια του συστήματος αυξάνεται όση επιφανειακή ενέργεια των νέων αυτών ελεύθερων επιφανειών. Κάθε φυσικό σύστημα τείνει αυθόρμητα προς καταστάσεις όπου ελαχιστοποιείται η συνολική του ενέργεια. Έτσι λοιπόν θα αναμέναμε το υλικό μας να μην βοηθάει στην προώθηση των μικρορωγμών.

Το σπάσιμο των χημικών δεσμών που γίνεται κατά την προώθηση της μικρορωγμής, προκαλεί μείωση της ελαστικής ενέργειας παραμόρφωσης (elastic strain energy) του υλικού [<http://www.mie.uth.gr>]. Όπως είναι γνωστό από τη θεωρία, η ενέργεια που αποθηκεύεται σε ένα σώμα λόγω της παραμόρφωσης που υφίσταται από την φόρτιση, ονομάζεται ενέργεια παραμόρφωσης. Η ενέργεια ανά μονάδα όγκου ονομάζεται πυκνότητα της ενέργειας παραμόρφωσης και είναι η περιοχή κάτω από την καμπύλη τάσεων-παραμορφώσεων όπως φαίνεται στο διάγραμμα 2 που ακολουθεί [V. Madhukar]. Είναι προφανές ότι όταν δεν υπάρχουν εξωτερικά φορτία, η ενέργεια αυτή μηδενίζεται. Κατά τον διαχωρισμό του υλικού που προκαλείται από τις μικρορωγμές, τα τμήματα που δημιουργούνται παύουν να καταπονούνται με αποτέλεσμα να απελευθερώνεται η ελαστική ενέργεια παραμόρφωσης που βρισκόταν αποθηκευμένη εκεί.



Strain Energy:

$$U = \int_V U_o dV$$

Strain Energy Density:

$$U_o = \int_0^{\epsilon} \sigma d\epsilon$$

Complimentary Strain Energy Density: $\bar{U}_o = \int_0^{\sigma} \epsilon d\sigma$

Διάγραμμα 2. Η ενέργεια παραμόρφωσης και η πυκνότητα της ενέργειας παραμόρφωσης (Πηγή:

<http://www.mtu.edu/mechanical>)

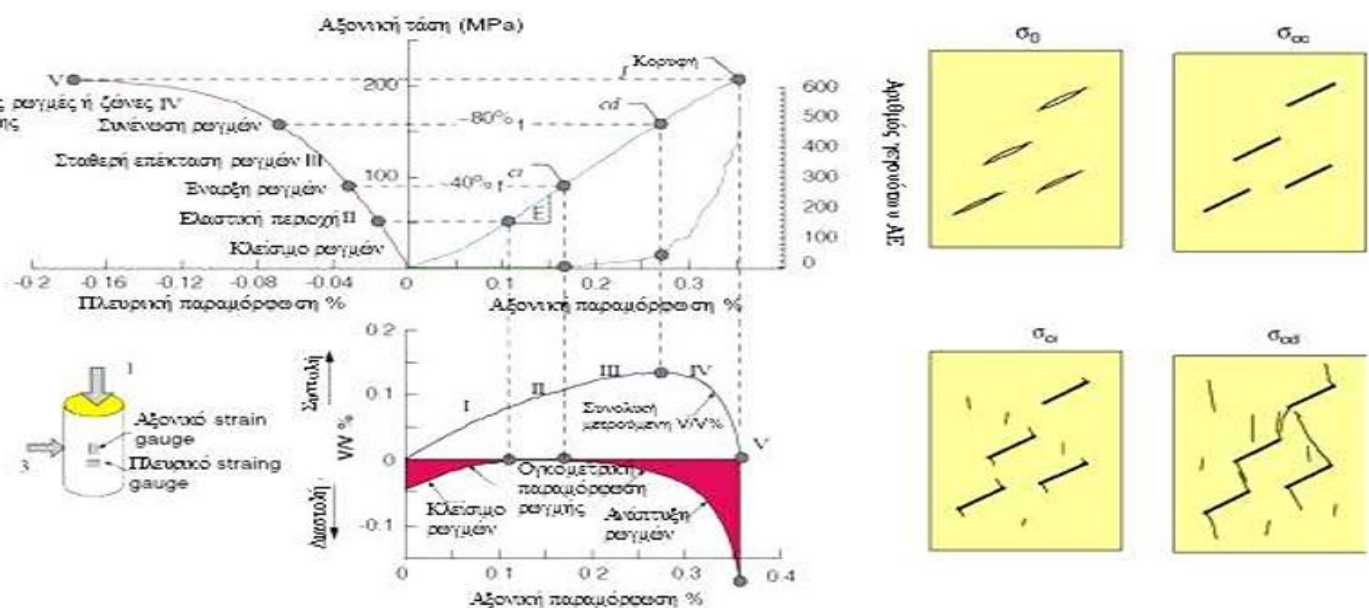
1.3.Μικρομηχανική της ψαθυρής θραύσης

1.3.1.Η σχέση της έναρξης, επέκτασης και συνένωσης ρωγμών με τη στάθμη φόρτισης

Η αστοχία του πετρώματος, χαρακτηρίζεται από διάφορα διακριτά στάδια παραμόρφωσης που περιλαμβάνουν έναρξη, επέκταση και συνένωση ρωγμών και είναι πολύ σημαντικό να γνωρίζουμε τα επίπεδα φόρτισης που σχετίζονται με το κάθε στάδιο για το σχεδιασμό και την πράξη έργων μηχανικού. Οι Cai et al. (2004) πρότειναν όρια έναρξης ρωγμάτωσης και όρια αστοχίας των πετρωμάτων. Το όριο έναρξης της ρωγμάτωσης ορίζεται από τη σχέση $\sigma_1 - \sigma_3 = A \cdot \sigma_{cm}$ ενώ το όριο θραύσης ορίζεται ως $\sigma_1 - \sigma_3 = B \cdot \sigma_{cm}$ για ρωγματωμένες βραχώμαζες, όπου A, B είναι σταθερές του υλικού και σ_{cm} η μονοαξονική θλιπτική αντοχή της βραχώμαζας. Μετά από πειράματα κατέληξαν στο ότι οι μεταβλητές A, B κυμαίνονται μεταξύ 0,4-0,5 και 0,80,9 αντίστοιχα για μέτρια έως καθόλου ρωγματωμένες βραχώμαζες, ενώ για μέτρια έως πολύ ρωγματωμένες βραχώμαζες κυμαίνονται μεταξύ 0,5-0,6 και 0,9-1,0 αντίστοιχα.

Οι βράχοι έχουν αναπόφευκτα πόρους, ελαττώματα και μικρορωγμές. Για παράδειγμα, ασθενώς συνδεμένοι κόκκοι μπορεί να θεωρηθούν σαν θέσεις έναρξης μιας μικρορωγμής. Η μικρορωγμή αυτή θα επεκταθεί όταν το πέτρωμα φορτισθεί πέρα από κάποιο όριο. Από πειράματα έχουν βρεθεί αρκετά επίπεδα φόρτισης τα οποία βοηθούν στην κατανόηση της αστοχίας των ψαθυρών βραχών. Στο διάγραμμα 3 που ακολουθεί, φαίνονται τα επίπεδα αυτά της τάσης, όπου scc (cc-crackclosure) είναι η τάση κλεισίματος των ρωγμών, scsi (ci-crackinitiation) είναι η τάση έναρξης των ρωγμών και scd (cd-crackdamage) είναι η τάση ζημίας η οποία αντιστοιχεί στην μακροπρόθεσμη αντοχή του πετρώματος. Η ακουστική εκπομπή ξεκινάει στο επίπεδο τάσης scsi και αυξάνεται απότομα στο επίπεδο scd όπου καταγράφονται και τα περισσότερα σήματα ΑΕ. Τα χαρακτηριστικά στάδια ως την αστοχία είναι 4:

1. Έναρξη ρωγμών και γεγονότων ΑΕ σε επίπεδο 0,3
2. Σχηματισμός και επέκταση μικρορωγμών σε μέγιστης θλιπτικής τάσης
3. Έναρξη της συνένωσης σε επίπεδα φορτίου 0,7
4. Μεγάλες ρωγμές ή ζώνες διάτμησης ακολουθούν μετά την μέγιστη αντοχή (Cai et al.2004).



Διάγραμμα 3. Διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης που δείχνει τα στάδια εξέλιξης των ρωγμών και σχηματική απεικόνιση των διαφορετικών επιπέδων της τάσης έναρξης, επέκτασης και συνένωσης των ρωγμών. (Πηγή: Cai et al.2004)

1.3.2. Προσομοιώματα μικρομηχανικής για την έναρξη, επέκταση και συνένωση ρωγμών

Τα προσομοιώματα μικρομηχανικής της ψαθυρής αστοχίας ενός πετρώματος ερευνούν την τοπική έναρξη, επέκταση, πολλαπλασιασμό και αλληλεπίδραση των μικρορωγμών μεταξύ τους με την αύξηση της φόρτισης. Θεωρητικά, η έναρξη της μικρορωγμάτωσης στα συμπαγή πολυκρυσταλλικά πετρώματα συμβαίνει σε προϋπάρχουσες μικρορωγμές. (π.χ. όρια των κόκκων).

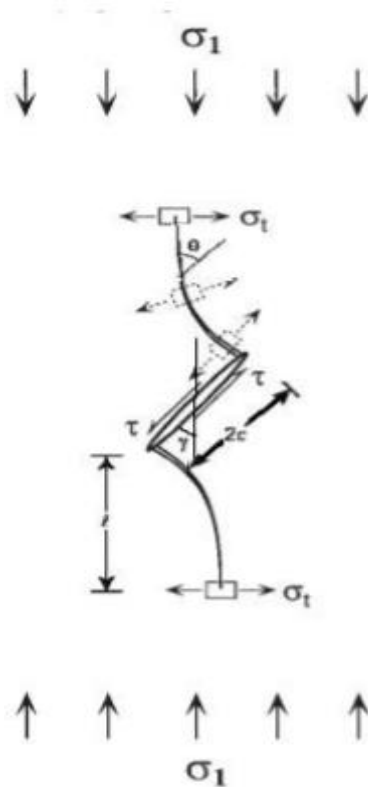
Το πιο γνωστό μικρομηχανικό μοντέλο για την έναρξη της μικρορωγμάτωσης είναι αυτό της «ολισθαίνουσας ρωγμής» (sliding crack model) σύμφωνα με το οποίο μία μικρορωγμή μήκους $2c$ σχηματίζει γωνία γ με τη μέγιστη θλιπτική τάση σ_1 . Η ρωγμή κλείνει υπό την επίδραση των θλιπτικών φορτίων και ολισθαίνει υπό την επίδραση των διατμητικών τάσεων στο επίπεδο της. Στα άκρα της ρωγμής συγκεντρώνονται υψηλές εφελκυστικές τάσεις που κάτω από ορισμένες προϋποθέσεις προκαλούν την έναρξη πλάγιων ρωγμών [Σοφριανός & Νομικός 2008]. Σχηματικά παρουσιάζεται στην εικόνα 2.

Σύμφωνα με τη θεωρία των Cotterell και Rice (1980) οι πλάγιες ρωγμές ξεκινάνε σχηματίζοντας γωνία $\theta=70.5^\circ$ με την προϋπάρχουσα ρωγμή και δημιουργούνται όταν οι τάσεις σ_1 και σ_3 ικανοποιούν τη σχέση:

$$\sigma_1 = \frac{\sin 2\gamma + \mu(1 + \cos 2\gamma)}{\sin 2\gamma - \mu(1 - \cos 2\gamma)} \sigma_3 + \frac{\sqrt{3}}{\sin 2\gamma - \mu(1 - \cos 2\gamma)} \frac{K_{IC}}{\sqrt{\pi c}}$$

Όπου

- K_{IC} η δυσθραυστότητα (fracture toughness) η οποία μπορεί να μετρηθεί πειραματικά (ISRM 1998), έχει μονάδες $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ και εκφράζει την ικανότητα του πετρώματος που περιέχει μια ρωγμή να αντιστέκεται στην θραύση
- μ ο συντελεστής τριβής της προϋπάρχουσας ρωγμής
- γ, θ οι γωνίες που φαίνονται στην εικόνα 2



Εικόνα 2. Έναρξη και διάδοση πλευρικών μικρορωγμών στα άκρα μίας προϋπάρχουσας ολισθαίνουσας μικρορωγμής (Πηγή: E. Eberhardt et.al 1998)

Κατά την αύξηση της φόρτισης, το μήκος l των πλευρικών ρωγμών αυξάνει ενώ η γωνία θ τείνει να γίνει ίση με την γωνία γ , δηλαδή οι πλευρικές ρωγμές τείνουν να γίνουν παράλληλες με τη σ_1 . Ο συντελεστής συγκέντρωσης τάσης K_I στα άκρα των πλευρικών ρωγμών μπορεί να υπολογισθεί από τη σχέση των Horii και NematNasser (1985):

$$\frac{K_I}{\sqrt{\pi c}} = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)\sqrt{1 + \mu^2} - (\sigma_1 + \sigma_3)\mu}{\pi\sqrt{L/c}} \sin\theta - \frac{1}{2}\sqrt{\frac{\ell}{c}}(\sigma_1 + \sigma_3 - (\sigma_1 - \sigma_3)\cos 2(\theta - \gamma))$$

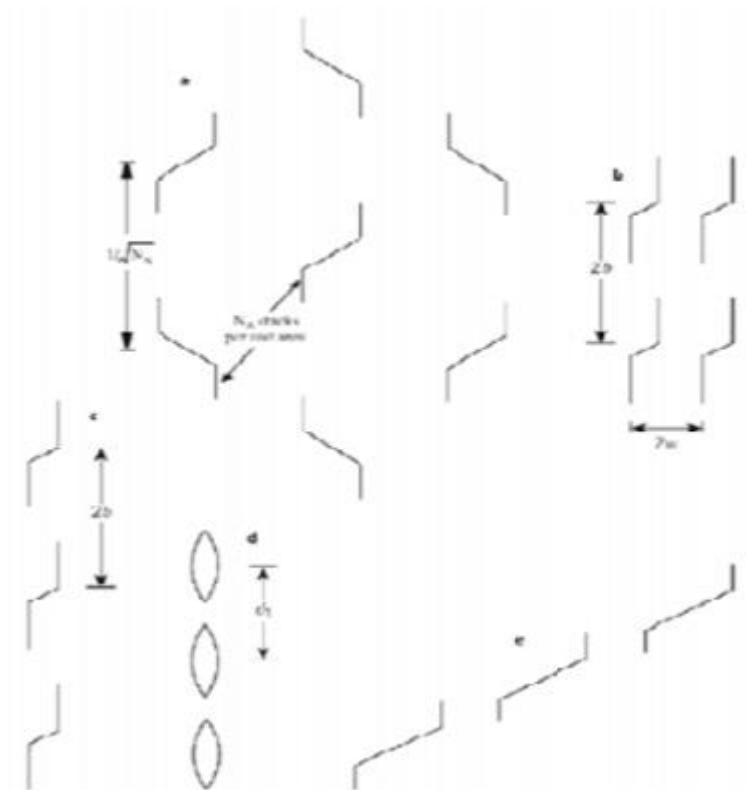
όπου $L = 1 + 8c/3\pi^2$ το ενεργό μήκος των πλευρικών ρωγμών. Η γωνία με την οποία διαδίδονται οι πλευρικές ρωγμές προκύπτει με μεγιστοποίηση του K_I ως προς θ .

Σύμφωνα με τον Broek (1988) ως συντελεστής συγκέντρωσης τάσεων K_I , μπορεί να οριστεί ο λόγος της τοπικά ασκούμενης τάσης στα άκρα μίας ρωγμής προς την «ονομαστική τάση», που μπορεί να είναι η μέση τάση σε μία διατομή του πετρώματος ή η μέση τάση μακριά από τη ρωγμή ή η κύρια τάση του εντατικού πεδίου μακριά από τη ρωγμή.

Όπως παρατηρείται από την παραπάνω εξίσωση ο συντελεστής συγκέντρωσης τάσης στα άκρα της ρωγμής μειώνεται καθώς αυξάνεται το μήκος της. Η μείωση αυτή οφείλεται αφενός στην απομάκρυνση του άκρου της πλευρικής ρωγμής από τη θέση δημιουργίας εφελκυστικών τάσεων στα άκρα της προϋπάρχουσας μικρορωγμής και αφετέρου στην επίδραση της ορθής δύναμης που δρα στο επίπεδο της πλευρικής ρωγμής και τείνει να εμποδίσει την επέκτασή της.

Η αύξηση του μήκους και του αριθμού των επεκτεινόμενων πλευρικών ρωγμών που προκαλείται από την αύξηση της φόρτισης, έχει ως αποτέλεσμα το εντατικό πεδίο στο περιβάλλον μίας μικρορωγμής να αλληλοεπιδρά με το εντατικό πεδίο των γειτονικών μικρορωγμών. Η αστοχία του πετρώματος θεωρείται ότι

επέρχεται λόγω της αλληλεπίδρασης και της συγχώνευσης πολλών πλευρικών μικρορωγμών που ξεκίνησαν από τα άκρα προϋπάρχουσων μικρορωγμών. Το πολύπλοκο αυτό πρόβλημα αντιμετωπίζεται συχνά από τους ερευνητές (π.χ. Ashby και Sammis 1990) μέσω της θεωρίας της μηχανικής της βλάβης των υλικών (damage mechanics). Η βλάβη του πετρώματος αναπαρίσταται από μία παράμετρο που χαρακτηρίζει την πυκνότητα και τη γεωμετρία των μικρορωγμών και των πόρων του ψαθυρού πετρώματος [Σοφινός & Νομικός 2008].



Εικόνα 3. Διάφορα εξιδανικευμένα μοντέλα για την ανάλυση της αλληλεπίδρασης των μικρορωγμών στο πέτρωμα (Πηγή: Σοφινός & Νομικός 2008)

Με την έναρξη των πλευρικών μικρορωγμών, μπορούμε να συσχετίσουμε την έναρξη της διόγκωσης του δοκιμίου σε μία δοκιμή τριαξονικής θλίψης. Αν υποθέσουμε ότι το πέτρωμα περιέχει τυχαία προσανατολισμένες προϋπάρχουσες μικρορωγμές, τότε η έναρξη των πλευρικών μικρορωγμών θα εκείνων με γωνία $\gamma = (1/2)\tan^{-1}(1/\mu)$ σύμφωνα με τη σχέση:

$$\sigma_1 = \frac{\sqrt{1+\mu^2} + \mu}{\sqrt{1+\mu^2} - \mu} \sigma_3 + \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{1+\mu^2} - \mu} \frac{K_{Ic}}{\sqrt{\pi c}}$$

Η έναρξη μικρορωγμών μπορεί να εντοπισθεί πειραματικά με διάφορους τρόπους:

- από την έναρξη καταγραφής της ακουστικής δραστηριότητας
- από το σημείο που το διάγραμμα τάσης τροπής γίνεται μη γραμμικό
- από την αύξηση του όγκου του δοκιμίου.

1.4. Ανακατανομή τάσεων και παραμορφώσεων γύρω από κυκλικά ανοίγματα

Προ της εκσκαφής ενός υπόγειου ανοίγματος, η εντατική κατάσταση ενός τυχαίου σημείου στην εν λόγω περιοχή σε ένα βάθος z από τη φυσική επιφάνεια του εδάφους, δίνεται από τις κύριες τάσεις, κατακόρυφες και οριζόντιες ως εξής:

$$p_z = \gamma * z, \quad p_x = k * p_z = k * \gamma * z$$

Όπου γ το μοναδιαίο βάρος και k ο συντελεστής πλευρικών τάσεων. Κατά την εκσκαφή ενός ανοίγματος, η εντατική κατάσταση μεταβάλλεται με κύριο χαρακτηριστικό τη σημαντική μεταβολή των κυρίων τάσεων. Η αλλαγή της εντατικής κατάστασης θα μπορούσε να περιγραφεί από τον συντελεστή συγκέντρωσης τάσεων δηλαδή το λόγο της νέας τάσης προς την τάση προ της εκσκαφής, όμως αυτό εξαρτάται από πολλούς παράγοντες:

- Τη μορφή του ανοίγματος
- Τη σχέση των διαστάσεων της διατομής
- Την αρχική εντατική κατάσταση (κυρίως ο συντελεστής k)
- Τη θέση του σημείου
- Τις παραμέτρους μηχανικής συμπεριφοράς του υλικού/βραχώμαζας
- Τους γεωλογικούς παράγοντες και την κατανομή τους (π.χ. ασυνέχειες) κλπ.

Η επίλυση του προβλήματος αυτού, προϋποθέτει κατάλληλη διατύπωση των παρακάτω βημάτων:

- Των συνοριακών συνθηκών
- Των διαφορικών εξισώσεων ισορροπίας
- Της καταστατικής εξίσωσης συμπεριφοράς της βραχώμαζας
- Των εξισώσεων συμβατού των παραμορφώσεων.

Με τη χρήση αριθμητικών μεθόδων και προγραμμάτων H/Y (π.χ. με μεθόδους πεπερασμένων στοιχείων), γίνεται εφικτός ο υπολογισμός των τάσεων ακόμα και στις πιο σύνθετες διατομές, τις πιο περίπλοκες συνοριακές συνθήκες και την πιο σύνθετη γεωτεχνική συμπεριφορά της βραχώμαζας.

Η παρουσία μιας γεωμετρικής ασυνέχειας, όπως π.χ. ενός κυκλικού ανοίγματος, όπως προαναφέρθηκε, επιφέρει ανομοιόμορφη κατανομή της εφαπτομενικής τάσης, η οποία ακριβώς στα όρια της οπής εμφανίζει ένα μέγιστο σ_{max} και καθώς απομακρυνόμαστε από την οπή μειώνεται σταδιακά, μέχρις ότου φτάσει στην τιμή σ ομοιόμορφη. Εκτός του ότι μία ασυνέχεια δημιουργεί συγκέντρωση τάσεων κοντά της, μεταβάλλει τοπικά και την εντατική κατάσταση του υλικού. Ακόμη δηλαδή και αν γενικά στο υλικό η εντατική κατάσταση είναι απλός μονοαξονικός εφελκυσμός, κοντά στην ασυνέχεια η εντατική κατάσταση γίνεται σύνθετη (διαξονική ή τριαξονική). Η πρώτη βασική επίλυση του προβλήματος έγινε από τον Kirsch (1898) και σε αυτήν βασίστηκαν πολλοί μεταγενέστεροι ερευνητές. Ο Kirsch έλυσε το πρόβλημα της μονοαξονικής φόρτισης της διατομής κατά τον άξονα z (κατακόρυφα) με φόρτιση p_z , στη συνέχεια με p_x (οριζόντια) και κατόπιν αυτών προέκυψε η τελική εντατική κατάσταση δια της επαλληλίας των επιμέρους επιλύσεων (επαλληλία που είναι αποδεκτή ως απολύτως ακριβής σε προβλήματα γραμμικής ελαστικότητας). Οι βασικές προϋποθέσεις της επίλυσης εντάσσονται στις παραδοχές της θεωρίας γραμμικού ελαστικού

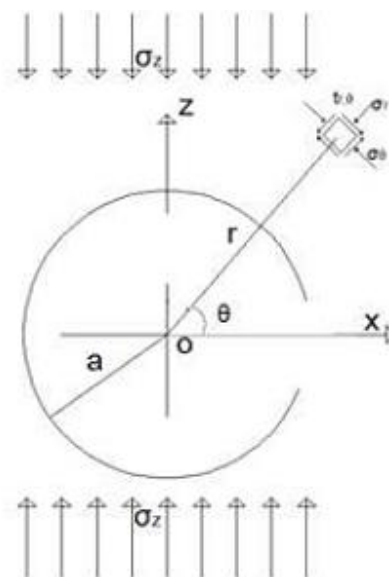
ομοιογενούς και ισότροπου μέσου (ως μέσο νοείται το υλικό στο οποίο διανοίγεται η οπή) καθώς και η υπόθεση της απεριόριστης δυνατότητας μετάδοσης θλιπτικών, εφελκυστικών και διατμητικών τάσεων. Το εξωτερικό πεδίο των αρχικών τάσεων δίνεται από τις τάσεις p_z και p_x , οι δε εξ ανακατονομής σε σύστημα πολικών συντεταγμένων (r, θ) είναι σ_r , σ_θ και $\tau_{r\theta}$ ενώ οι μετατοπίσεις (απόλυτες παραμορφώσεις) κατά την ακτινική και εφαπτομενική διεύθυνση είναι u_r και u_θ αντίστοιχα [Παπαδόπουλος 2007].

Για τις τάσεις

$$\sigma_r = \frac{p}{2} \left[(1+K) \left(1 - \frac{a^2}{r^2} \right) - (1-K) \left(1 - 4 \frac{a^2}{r^2} + 3 \frac{a^4}{r^4} \right) \cos 2\theta \right]$$

$$\sigma_\theta = \frac{p}{2} \left[(1+K) \left(1 + \frac{a^2}{r^2} \right) + (1-K) \left(1 + 3 \frac{a^4}{r^4} \right) \cos 2\theta \right]$$

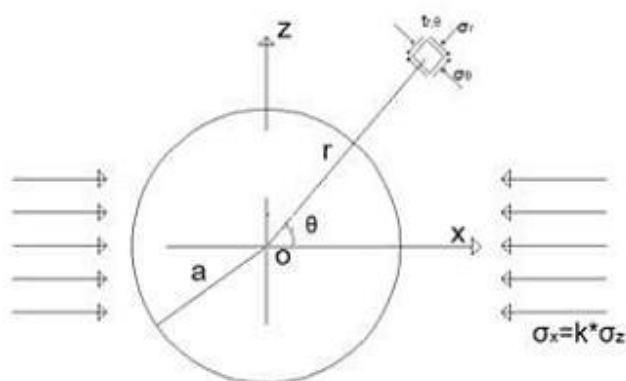
$$\tau_{r\theta} = \frac{p}{2} \left[(1-K) \left(1 + 2 \frac{a^2}{r^2} - 3 \frac{a^4}{r^4} \right) \sin 2\theta \right]$$



Για τις μετατοπίσεις

$$u_r = -\frac{p a^2}{4 G r} \left[(1+K) - (1-K) \left\{ 4(1-\nu) - \frac{a^2}{r^2} \right\} \cos 2\theta \right]$$

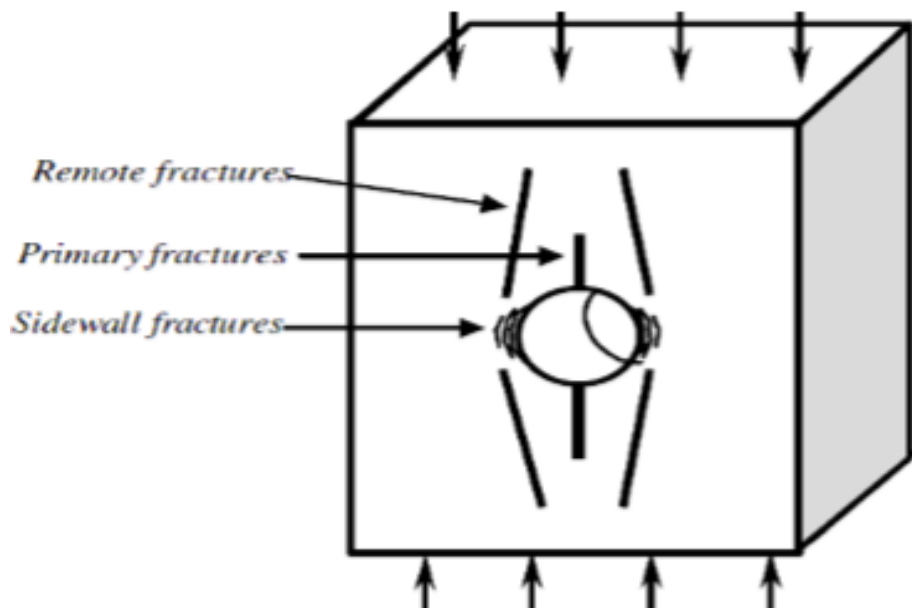
$$u_\theta = -\frac{p a^2}{4 G r} \left[(1-K) \left\{ 2(1-2\nu) + \frac{a^2}{r^2} \right\} \sin 2\theta \right]$$



1.5. Το πρόβλημα της ρωγμάτωσης γύρω από κυκλικά ανοίγματα

Σε μικροσκοπικό επίπεδο, το κύριο χαρακτηριστικό της ρωγμάτωσης είναι η θραύση των ατομικών δεσμών του στερεού υλικού. Σε μακροσκοπικό επίπεδο, ως ρωγμάτωση μπορεί να χαρακτηριστεί η θραύση ενός υλικού σε τμήματα, λόγω προώθησης των ρωγμών σε αυτό. Η θραύση του πετρώματος γύρω από υπόγειες εκσκαφές έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον για τη μηχανική των πετρωμάτων. Όπου κι αν σχηματίζονται οι ρωγμές (υπόγεια λατομεία, σήραγγες, υπόγειες εκσκαφές, εκσκαφές απόθεσης πυρηνικών αποβλήτων, κλπ) η δημιουργία τους παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον. Η θραύση μπορεί να είναι διαφορετικού βαθμού σοβαρότητας, από αβλαβείς αποφλοιώσεις στη περίμετρο της εκσκαφής έως βίαιες εκτινάξεις πετρώματος γνωστές ως rockbursts. Γενικά, παρά το γεγονός ότι τέτοιες αστοχίες είναι συνήθεις, υπάρχουν λίγες πληροφορίες για τη γεωμετρία, τους μηχανισμούς και τις εντατικές καταστάσεις που συμβαίνουν κατά την αστοχία ενός πετρώματος σε μεγάλη κλίμακα. Αντιθέτως σε απλές εργαστηριακές δοκιμές η ανάπτυξη των αστοχιών στα φυσικά μοντέλα με ανοίγματα είναι σχετικά γνωστές. Η ανάπτυξη των ρωγμών γύρω από μία οπή εξετάζεται μέσω φυσικών και αριθμητικών μοντέλων [Carter 1991, 1992]. Κατά τη μονοαξονική θλίψη ή την αξονική θλίψη με σχετικά χαμηλή πλευρική πίεση ένα φυσικό μοντέλο με κυκλικό άνοιγμα θα παρουσιάσει γενικά θραύσεις, που εμφανίζονται σταδιακά, και περιλαμβάνουν (Carter 1991)

- Αρχικές- Πρωτογενείς εφελκυστικές ρωγμές (Primary remote fractures)
- Δευτερογενείς ρωγμές ή ρωγμές σε απομονωμένα τμήματα (Remote fractures)
- Αποφλοιώσεις στη θλιβόμενη ζώνη (Slabbing)



Εικόνα 3. Οι θραύσεις που αναπτύσσονται γύρω από μία κυκλική οπή σε φυσικό μοντέλο πετρώματος κατά τη μονοαξονική θλίψη. (Πηγή Klercket. al 2004)

1.6. Η ερμηνεία του φαινομένου από ερευνητές

1.6.1. Γενικά

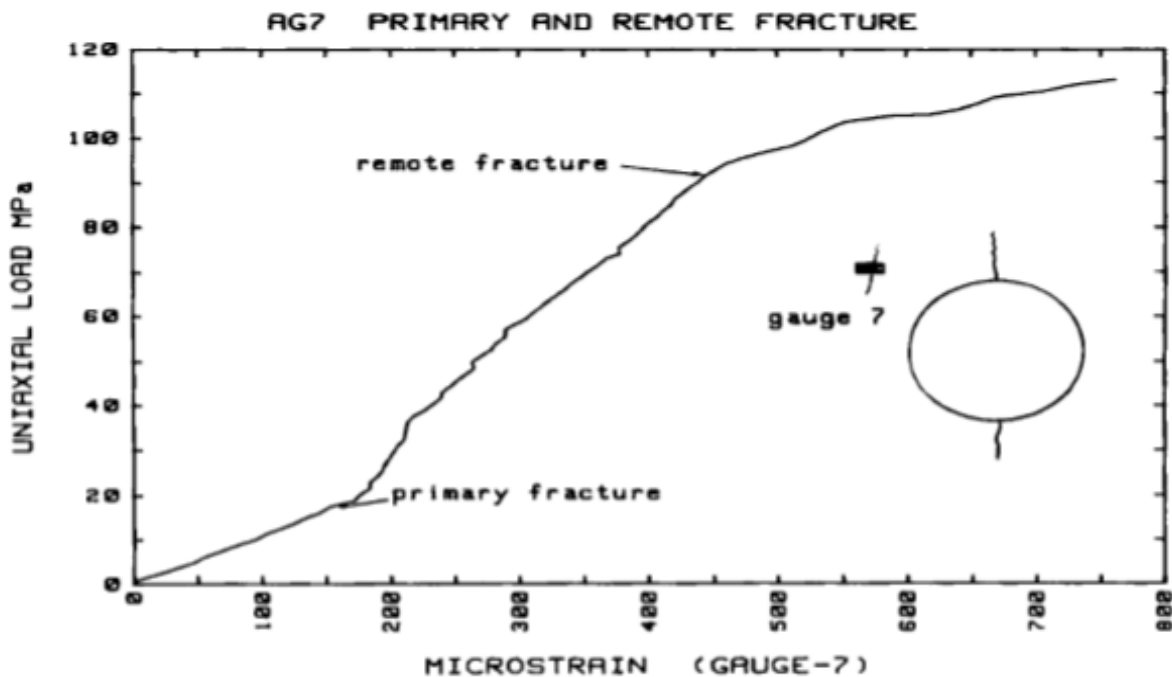
Η έναρξη των ρωγμών από τη συγκέντρωση θλιπτικών τάσεων και η επέκτασή τους σχεδόν κάθετα στη διεύθυνση της μέγιστης θλιπτικής τάσης, μπορεί να περιγραφεί σαν κάθετη διατμητική ρωγή. Η έναρξη και η επέκταση των κάθετων διατμητικών ρωγμών συμβαίνουν κάτω από την επίρεια μιας ετερογενούς διάδοσης τάσεων.

Μιας και τα περισσότερα πετρώματα εμφανίζουν στοιχεία ψαθυρούς θραύσης, έχουν γίνει πολλές προσπάθειες να περιγραφεί και να ερμηνευτεί ο μηχανισμός της δημιουργίας της. Οι ρωγμές έχουν ερμηνευτεί με διάφορες θεωρίες αστοχίας οι οποίες είναι εμπειρικές και βασίζονται στην εμπειρία που αποκομίζεται κατά τις εργαστηριακές δοκιμές και τις δοκιμές πεδίου. Οι θεωρίες αυτές είναι όλες βασισμένες σε μια ιδέα του Griffith για μικροσκοπικό έλεγχο ρωγμών. Οι θεωρίες του Griffith έχουν βασιστεί σε κάποιες θεμελιώδεις θεωρίες:

1. Η θραύση ξεκινάει από ασυνέχειες-ελαττώματα και η διαδικασία της θραύσης ελέγχεται από το πεδίο των τάσεων γύρω της
2. Το υλικό που περιβάλλει τα ελαττώματα μπορεί να θεωρηθεί σαν συνεχές, δηλαδή η ατομική δομή του υλικού μπορεί να αγνοηθεί
3. Οι μεμονωμένες ατέλειες απέχουν αρκετά μεταξύ τους έτσι ώστε οι ανωμαλίες των τάσεων που σχετίζονται με αυτές να μην επικαλύπτονται.

1.6.2. Η ερμηνεία του Carter

Κατά την μονοαξονική θλίψη, η θραύση εξελίσσεται από αρχικές εφελκυστικές ρωγμές (primary fractures), σε ρωγμές σε τμήματα του φυσικού μοντέλου μακριά από την οπή (remotefractures), και στην αποφλοίωση των τοιχωμάτων της οπής στη θλιβόμενη ζώνη (slabbing). Υπάρχει ένα ευρύ διάστημα κατά το οποίο το μόνο γεγονός που συμβαίνει είναι μία σταθερή διάδοση της αρχικής ρωγμής η οποία ξεκινάει από την οπή και επεκτείνεται σχεδόν κάθετα στην μέγιστη θλιπτική τάση. Η άποψη αυτή υποστηρίζεται από εργαστηριακά πειράματα και από αρκετές θεωρητικές γραμμικώς ελαστικές λύσεις θραυστομηχανικής (π.χ. Ashby και Sammis 1986). Καθώς το άνοιγμα γίνεται μεγαλύτερο, η επέκταση των αρχικών ρωγμών χρειάζεται μεγαλύτερο φορτίο για να επεκτείνει την ρωγή στον ίδιο βαθμό. Επίσης, καθώς το άνοιγμα γίνεται μεγαλύτερο, οι ρωγμές εμφανίζονται σε χαμηλότερο φορτίο. Όταν το μήκος της αρχικής ρωγμής γίνει περίπου ίσο με τη διάμετρο της οπής, η κρίσιμη εντατική κατάσταση μετατοπίζεται εκατέρωθεν της αρχικής ρωγμής, προκαλώντας έτσι την ανάπτυξη των απομονωμένων ρωγμών (διάγραμμα 4). Σχεδόν ταυτόχρονα ακολουθεί η θλιπτική αστοχία με αποφλοίωση [Carter 1991]. Με την αύξηση της έντασης, οι ρωγμές της απομονωμένης περιοχής αναπτύσσονται κατά μήκος του εντατικού πεδίου και τελικά ενώνονται με τη θλιβόμενη ζώνη. Αξίζει να σημειωθεί ότι δεν εμφανίζεται καμία διατμητική μετατόπιση μέχρι λίγο πριν αστοχήσει.

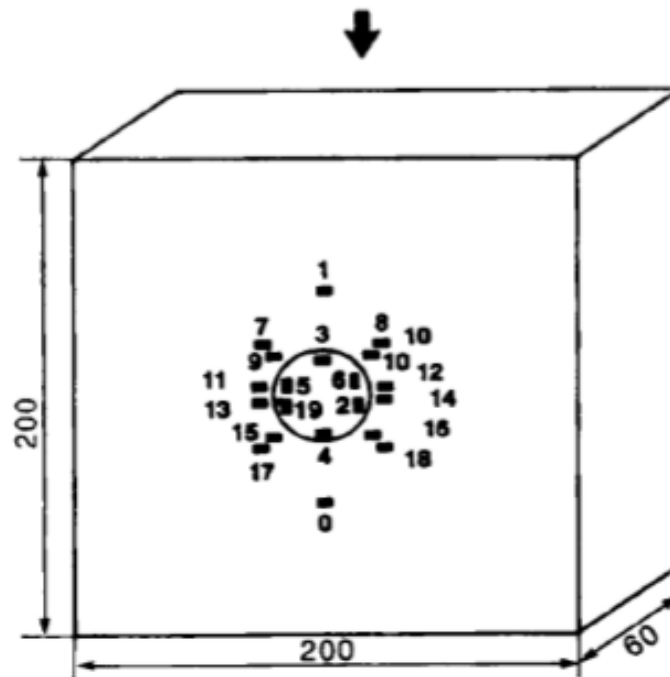


Διάγραμμα 4. Διάγραμμα αξονικού φορτίου-παραμόρφωσης. Η επιτάχυνση της επέκτασης της παραμόρφωσης, σηματοδοτεί την έναρξη των απομονωμένων ρωγμών. Η εκτροπή στο σημείο της αρχικής παραμόρφωσης υποδηλώνει ανακούφιση τάσεων και παραμορφώσεων (Πηγή: Carter 1991)

Όσον αφορά την προέλευση των ρωγμών, οι αρχικές ρωγμές είναι αναμενόμενες λόγω προβλεπόμενης εφελκυστικής τάσης. Εμφανίζονται λόγω εφελκυσμού κάτω από υψηλό θλιπτικό φορτίο, προωθούνται πολύ γρήγορα μόλις δημιουργηθούν αλλά τελικά σταθεροποιούνται καθώς επεκτείνονται μακριά από την οπή και τις υψηλές τάσεις που συγκεντρώνονται γύρω από αυτήν. Ομοίως η αστοχία στη θλιβόμενη ζώνη στην περίμετρο της οπής αναμένεται λόγω υψηλής συγκέντρωσης θλιπτικών τάσεων. Οι θλιπτικές ρωγμές είναι επεκτεινόμενες και η δημιουργία τους ακολουθείται από μια περίπλοκη διαδικασία κλιμακωτής απόσπασης του υλικού στα άκρα της οπής που ονομάζεται αλλιώς και αποφλοιώση. Αντίθετα, η προέλευση των απομονωμένων ρωγμών δεν είναι τόσο εμφανής. Επειδή αυτές εμφανίζονται μακριά από το άνοιγμα, δε μπορούν να γίνουν αντιληπτές κατά την υπόγεια εκσκαφή. Η ύπαρξή τους έχει γίνει γνωστή από δοκιμές φυσικών μοντέλων από τους Hoek, Lajtai, Gay και Ingraffea. Ο Hoek, χρησιμοποιώντας στις δοκιμές του μια επικάλυψη με φωτοελαστικό υλικό (photoelastic coating technique), εξήγησε την προέλευση των απομακρυσμένων ρωγμών στην συγκέντρωση εφελκυστικών τάσεων που δημιουργούνται μακριά από το άνοιγμα καθώς μεγαλώνει το μήκος των αρχικών εφελκυστικών ρωγμών. Η εφελκυστική τάση στην απομακρυσμένη ζώνη μπορεί να γίνει τόσο μεγάλη ώστε να δημιουργήσει και έπειτα να επεκτείνει μια εφελκυστική ρωγή με σταθερό ελεγχόμενο τρόπο. Ο Ingraffea ανέλυσε τα αποτελέσματα του Hoek χρησιμοποιώντας πεπερασμένα στοιχεία και απέδειξε ότι η ένταση που εμφανίζεται στις απομακρυσμένες περιοχές, οδηγεί σε ανάπτυξη ρωγμών. Χρησιμοποιώντας γύψινα δοκίμια, ο Lajtai έδειξε ότι οι απομακρυσμένες ρωγμές συνδέονται με αυτές της θλιβόμενης ζώνης και προκαλούν αστοχία του ανοίγματος. [Lajtai 1975]. Σύμφωνα με τον Carter (1992), οι απομακρυσμένες ρωγμές, εμφανίζονται κάτω από το συνδυασμό εφελκυσμού και θλίψης, παρά το γεγονός ότι μπορούν να εμφανιστούν και μόνο σε θλιπτικό πεδίο. Η ανάπτυξη των ρωγμών αυτών, γίνεται παράλληλα στην μέγιστη θλιπτική τάση, ενώ το δοκίμιο υπόκειται σε σχετικά χαμηλές βαθμίδες έντασης [Carter et al., 1991 a].

Η θεωρία σχετικά με τη θραύση γύρω από κυκλικά ανοίγματα που βρίσκονται σε θλίψη είναι γνωστή γι' αυτό και ο Carter (1991) σχεδίασε τα πειράματά του με σκοπό την ποσοτική συλλογή δεδομένων κατά την εξέλιξη των αρχικών, των απομονωμένων και των ρωγμών στη θλιβόμενη ζώνη. Έτσι, έκοψε δοκίμια από

γρανίτη διαστάσεων 200x200x60mm με διάμετρο κυκλικού ανοίγματος 36mm στο κέντρο. Στη συνέχεια τοποθέτησε 19 τροπόμετρα ηλεκτρικής αντίστασης (straingauges), με μήκος ενεργού στοιχείου μέτρησης 5mm, στην επιφάνεια του δοκιμίου στις θέσεις που αναμένονταν, σύμφωνα με προηγούμενες δοκιμές, η δημιουργία των παραπάνω ρωγμών. Με τα straingauges συνδεδεμένα με καταγραφικό σύστημα, το φυσικό μοντέλο τοποθετήθηκε σε πλαίσιο δυναμικότητας 2500 kN (600,000lb) με σκοπό να φορτιστεί στα 157 MPa. Η θλιπτική αντοχή του άρρηκτου γρανίτη LacduBonne που χρησιμοποίησε υπολογίστηκε στα 226 MPa. Η διαδικασία φόρτισης διακόπηκε πριν την αστοχία αφού στα 157 MPa είχαν σχηματιστεί και τα 3 είδη ρωγμών οπότε έκρινε απαραίτητο να σταματήσει τη δοκιμή για να εξετάσει οπτικά το δοκίμιο. Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται το δοκίμιο του γρανίτη με τα straingauges Τοποθετημένα στις αναμενόμενες θέσεις ρωγμάτωσης.



Εικόνα 4. Το δοκίμιο γρανίτη με τις θέσεις εγκατάστασης των straingauges. Αυτά που φαίνονται μέσα στην οπή τοποθετήθηκαν στο εσωτερικό της τοίχου (Πηγή: Carter 1991)

Η θραύση ακολούθησε ένα αναμενόμενο μοτίβο. Οι αρχικές εφελκυστικές ρωγμές σχηματίστηκαν στα 16 MPa, τάση που είναι μεγαλύτερη από την εφελκυστική αντοχή του γρανίτη όπως προκύπτει από δοκιμές Brazilian (μέση τιμή 14MPa με τυπική απόκλιση 1-2MPa). Χρησιμοποιώντας τη λύση του Kirsch και το κριτήριο μέγιστης τάσης, θα έπρεπε να εμφανιστούν στα 14 MPa. Η κατά 2 MPa μεγαλύτερη τάση που χρειάστηκε για να σχηματιστούν οι αρχικές εφελκυστικές ρωγμές, υποδεικνύει την επιρροή της βάρωσης της τάσης στη δοκιμή. Στα 135 MPa οι αρχικές ρωγμές διαδόθηκαν περίπου κατά 43 mm, ενώ επεκτάθηκαν κατά 4 mm ακόμη μέχρι το τέλος του πειράματος (157 MPa). Οι δευτερογενείς ή αλλιώς απομονωμένες ρωγμές εμφανίστηκαν στα 119 MPa και επεκτάθηκαν μακριά και προς την οπή. Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό των απομονωμένων ρωγμών είναι το γεγονός ότι δεν είναι ενιαίες ρωγμές, αλλά αποτελούν μία ζώνη ρωγμάτωσης με ένα σύνολο παράλληλων ρωγμών. Συγκεκριμένα, μοιάζουν αρκετά με την αξονική κατάκλαση που παρατηρείται στα απλά κυλινδρικά δοκίμια κάτω από τυπική μονοαξονική θλίψη. Η αστοχία στη θλιβόμενη ζώνη εμφανίστηκε με μορφή αποφλοιώσεων στα 126 MPa. Μιας και υπάρχει συγκέντρωση τάσεων στα τρία παραπάνω σημεία, θα ήταν αναμενόμενο να ξεκινήσει η αστοχία στο 1/3 της θλιπτικής αντοχής, δηλαδή μεταξύ 70-80 MPa. Από το παραπάνω πείραμα παρατηρήθηκε ότι στο τελευταίο στάδιο ανάμεσα στα 140-157 MPa οι απομονωμένες ρωγμές ενώθηκαν με τις ρωγμές τις

θλιβόμενης ζώνης. Επίσης παρατηρήθηκαν κάποιες παράξενες οριζόντιες ρωγμές μεταξύ της οπής και των απομονωμένων που αποτελούν δομικές αστοχίες του υλικού.

Σε επόμενα πειράματα ο Carter (1992), χρησιμοποίησε δοκίμια δολομιτικού ασβεστολίθου μεγέθους έως και 750*500*100 mm για τη μελέτη της επίδρασης του μεγέθους και της εντατικής βαθμίδας στη θραύση γύρω από κυκλικά ανοίγματα. Η πειραματική παρατήρηση της επίδρασής τους έχει αναφερθεί από ερευνητές στο παρελθόν (π.χ. Hodgson and Cook 1970, Einstein et al. 1970, Lajtai 1972), όπως η θεωρητική τους εξήγηση αποτελεί θέμα αντιπαράθεσης. Η πιο γνωστή θεωρία είναι αυτή του Weibull (1939) που βασίζεται στην στατιστική κατανομή των μεγεθών των ατελειών στη βραχώμαζα, ενώ υπάρχουν θεωρίες που συσχετίζουν την επίδραση του μεγέθους με τη βάρθρωση της τάσης (stress gradients) όπως των Durelli και Parks (1962), ενεργειακές θεωρίες θραύσης όπως των Gouano και Brown (1975).

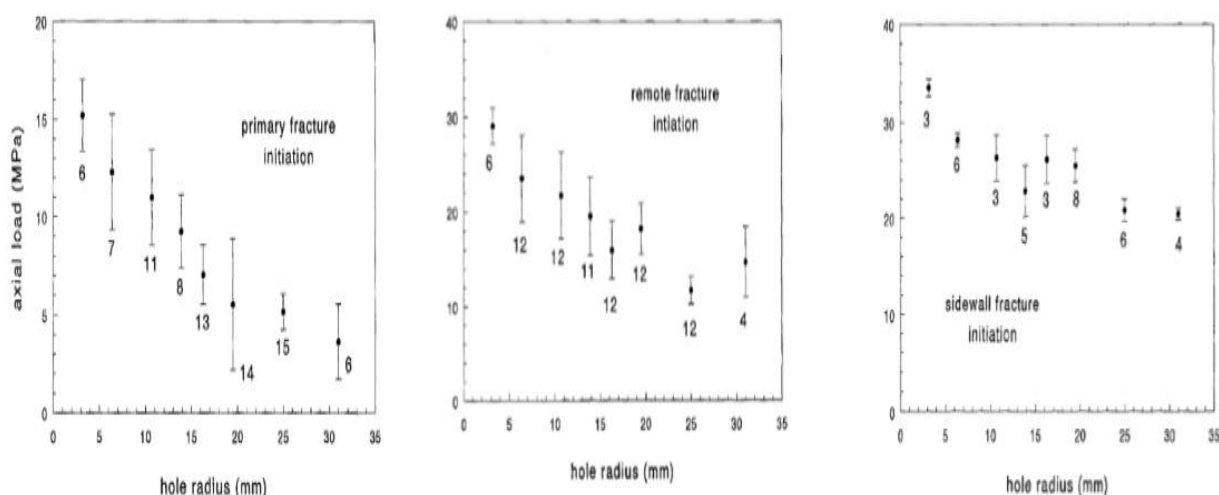
Τα παραπάνω πειράματα έγιναν σε 25 φυσικά μοντέλα με 9 διαφορετικές διαμέτρους οπών από 3,2mm έως 62 mm. Τα δοκίμια είχαν παραλληλόγραμμο σχήμα και κυκλικό άνοιγμα, ενώ το μέγεθός τους μεταβαλλόταν έτσι ώστε το πλάτος του να είναι τουλάχιστον 5 φορές μεγαλύτερο από τη διάμετρο του. Το πάχος των δοκιμίων ήταν από 84 έως 89 mm, διάσταση αρκετή ώστε να αποτρέψει το λυγισμό και την επίδραση των άκρων. Ξανά σε κάθε δοκίμιο τοποθετήθηκαν strain gauges (εκτός του μικρότερου με διάμετρο 3,2 mm) με τέτοιο τρόπο ώστε να παρέχουν 80 μετρήσεις για τις αρχικές, 81 για τις δευτερογενείς και 38 για τις ρωγμές της θλιβόμενης ζώνης. Η μονοαξονική δοκιμή έγινε σε πλαίσιο δυναμικότητας 5000 kN, ενώ ο ρυθμός φόρτισης μεταβαλλόταν ώστε να γίνεται οπτική εξέταση των φαινομένων.

Και σε αυτά τα πειράματα, η έναρξη και εξέλιξη της θραύσης ακολούθησε το αναμενόμενο μοτίβο σύμφωνα με τα προηγούμενα πειράματά του (1991). Όλα τα δοκίμια παρουσίασαν το ίδιο μοτίβο θραύσης ανεξάρτητα από το μέγεθος της οπής, το οποίο όμως όπως φάνηκε, επηρέασε την τάση έναρξης της ρωγμάτωσης. Παρά το γεγονός ότι οι 3 τύποι ρωγμών είναι σχετικά όμοιοι, εμφανίζονται κάτω από διαφορετικές μακροσκοπικά εντατικές βαθμίδες. Οι τέσσερις απομονωμένες ρωγμές δεν εμφανίστηκαν όλες στο ίδιο φορτίο και γενικά υπήρξαν περιπτώσεις που δεν εμφανίστηκαν και οι τέσσερις. Οι ρωγμές αυτές αναπτύσσονται κατευθυνόμενες προς την οπή όπου εμφανίζονται οι θλιπτικές ρωγμές, με τις οποίες ενώνονται συχνά προκαλώντας τη θραύση του δοκιμίου. Όλες οι ρωγμές είναι εφελκυστικές και δεν συμβαίνει καμία διάτμηση μέχρι λίγο πριν αστοχήσει το δοκίμιο [Carter 1992].

Η έναρξη των ρωγμών φάνηκε από τις καμπύλες τάσης-τροπής των strain gauges που είχαν τοποθετηθεί στις περιοχές που αναμενόταν να εμφανιστούν οι ρωγμές. Η έναρξη επιβεβαιώθηκε και οπτικά με τη βοήθεια μικροσκοπίου. Στα δοκίμια με τις μικρές διαμέτρους που δεν μπορούσαν να μουν strain gauges, δεν ήταν δυνατό να προσδιοριστεί η τάση έναρξης της ρωγμάτωσης. Αντίθετα, στα μεγαλύτερα ανοίγματα όπου μπορούσαν να τοποθετηθούν strain gauges εσωτερικά, αποκαλύπτουν το σημείο έναρξης από την εκτροπή της καμπύλης τάσης-τροπής από την ευθυγραμμία. Λόγω της γραμμικά ελαστικής συμπεριφορά του πετρώματος σε αυτό το εύρος τάσεων, η εκτροπή της καμπύλης θα μπορούσε να προκαλείται μόνο από την ρωγμάτωση του. Γενικά, όλα τα strain gauges που βρίσκονται κοντά στη περιοχή της έναρξης θα δώσουν σημάδια διαταραχής. Όσον αφορά το δοκίμιο οπτικά, μοιάζει με δοκίμιο που έχει αστοχήσει υπό θλιπτική μονοαξονική καταπόνηση με πολλαπλές αξονικές ρωγμές σε όλη την επιφάνειά του.

Η τάση έναρξης της ρωγμάτωσης για όλους τους τύπους ρωγμών (αρχικές, δευτερογενείς και θλιπτικές) παρουσιάζει μια φθίνουσα πορεία όσο το μέγεθος της οπής αυξάνεται. Στα διαγράμματα που ακολουθούν (5.1, 5.2, 5.3) φαίνονται τα αποτελέσματα σχετικά με την επίδραση του μεγέθους της οπής στις αρχικές, τις απομονωμένες και τις θλιπτικές ρωγμές κατά τη διάρκεια της θλίψης δοκιμίου. Τα σημεία στα διαγράμματα αντιπροσωπεύουν μέσες τιμές, οι ράβδοι σφάλματος μια τυπική απόκλιση και τα νούμερα

κάτω από τις ράβδους δείχνουν τον αριθμό των μετρητών παραμόρφωσης (straingauges) που παρείχαν τα στοιχεία ρωγμάτωσης [Carter 1992].



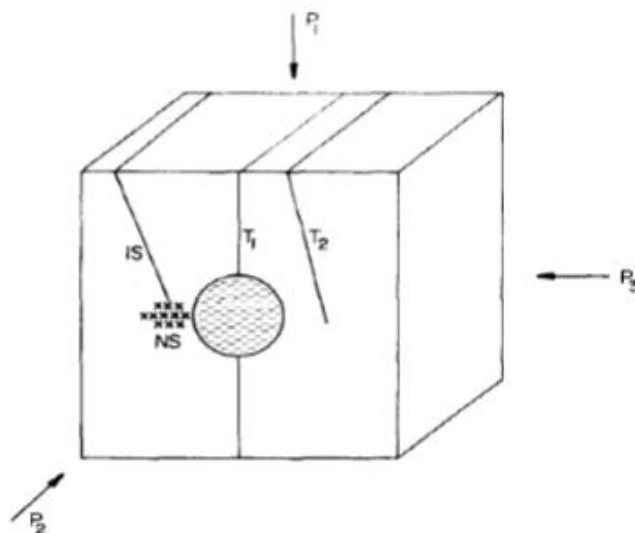
Αρχικές Απομονωμένες Θλιπτικές

Διάγραμμα 5.(Πηγή: Carter 1992)

1.6.3. Η ερμηνεία του Lajtai

Ο Lajtai, πραγματοποίησε πειράματα πολυαξονικής θλίψης σε δοκίμια, με σκοπό να παρατηρήσει την σειρά των γεγονότων θραύσης που οδηγούν στην αστοχία του δοκιμίου. Αυτή η σειρά μπορεί να περιλαμβάνει αρχικές εφελκυστικές, κάθετες διατμητικές, δευτερογενείς εφελκυστικές και πλάγιες διατμητικές ρωγμές. Με χαμηλή πλευρική πίεση, κυριαρχούν οι εφελκυστικές ρωγμές με την αστοχία να εξελίσσεται ως απότομη εμφάνιση δευτερευόντων εφελκυστικών ρωγμών που επιφέρουν αστοχία στις περιοχές συγκέντρωσης θλιπτικών τάσεων. Με υψηλή πλευρική πίεση, ο εφελκυσμός περιορίζεται και η αστοχία γίνεται μετά από μεγάλη παραμόρφωση που περιλαμβάνει προοδευτική κατάκλαση στις περιοχές συγκέντρωσης θλιπτικών τάσεων. Αυτό μπορεί να γίνει χωρίς την ανάπτυξη εμφανούς επιφάνειας αστοχίας μέχρις ότου η οπή κλείσει εντελώς (πολύ υψηλή πλευρική πίεση). Συχνά εμφανίζεται μια μορφή αστάθειας που περιλαμβάνει επιφάνειες διάτμησης κατά μήκος των οποίων γίνεται ολίσθηση των τμημάτων του υλικού προς την οπή.

Τα δοκίμια που χρησιμοποίησε ήταν γύψινα με μέγεθος κυρίως 7,5x15x15 cm και ανοίγματα 1,5 ή 2,5 cm αλλά και 25x25x7,5 cm για τον έλεγχο επιρροής της κλίμακας. Η δοκιμή έγινε με τη βοήθεια τριών ορθογωνικά διατεταγμένων υδραυλικών πρεσσών για την πολυαξονική πίεση των δοκιμίων. Η τεχνική φόρτισης που ακολούθησε ήταν να αυξήσει την πίεση των πρεσών σε μια χαμηλή σχετικά τιμή P3, μετά να την αυξήσει σε μια ενδιάμεση τιμή P2 και στη συνέχεια σε μια μέγιστη τιμή φόρτισης P1 έως την αστοχία του δοκιμίου. Η γενική μορφή θραύσης που παρατήρησε, είναι αυτή που φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.

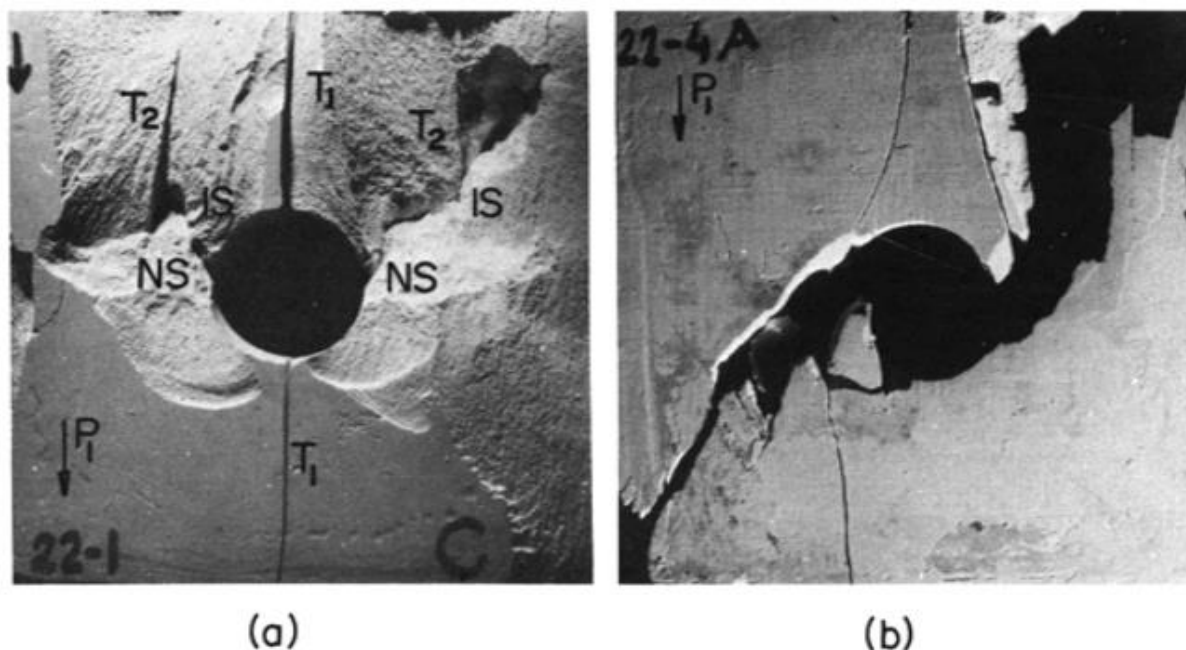


Εικόνα 5.Μορφέςθραύσης, T1:Πρωτογενείςρωγμές, NS:κάθετεςδιατμητικέςρωγμές, IS:Ρωγμέςδιάτμησης μεκλίση, T2:δευτερογενείςεφελκυστηκεςρωγμές (Πηγή: Lajtai 1975)

Οι 2 πρώτες (T1 και NS) εμφανίζονται σε σημεία συγκέντρωσης εφελκυστικών και θλιπτικών τάσεων που υπάρχουν γύρω από το άνοιγμα στην άρρηκτη μορφή του. Οι αρχικές εφελκυστικές, είναι επίπεδες επιφάνειες ρωγμάτωσης που σχηματίζονται παράλληλα με τη διεύθυνση της μέγιστης θλιπτικής τάσης. Η κάθετη ρωγή διάτμησης δεν είναι επίπεδη αλλά αποτελείται από μια ζώνη ρωγμάτωσης με διακριτό πλάτος. Θεωρείται σαν επιφάνεια αστοχίας που σχηματίζεται σε περιοχές όπου η τοπική θλιπτική τάση υπερβαίνει την αντοχή του υλικού σε θλίψη. Αρχικά η επιφάνεια αυτή εξαπλώνεται σε μια στενή περιοχή σχεδόν κάθετα στη διεύθυνση της μέγιστης θλίψης και στη συνέχεια επεκτείνεται σε πλάτος ώστε να δημιουργήσει μεγαλύτερο όγκο θρυμματισμένου υλικού. Οι πλάγιες ρωγμές διάτμησης και οι δευτερογενείς εφελκυστικές συνδυάζονται ώστε να προκαλέσουν την αστοχία του ανοίγματος. Και οι δύο τύποι ρωγμάτωσης σχετίζονται με την επέκταση της ζώνης κατάκλασης προς την περιοχή συγκέντρωσης θλιπτικών τάσεων. Οι πλάγιες ρωγμές σχηματίζονται μέσα σε αυτή τη ζώνη αστοχίας και μοιάζουν με την επιφάνεια διάτμησης που παρατηρείται κατά την αστοχία άμμου στην κλασική τριαξονική δοκιμή φόρτισης της εδαφομηχανικής. Οι δευτερογενείς εφελκυστικές, σχηματίζονται κατά μήκος του άρρηκτου υλικού δίπλα στην ζώνη κατάκλασης και ακολουθούν την τροχιά της αρχικής ρωγμάτωσης της μέγιστης τάσης. Η εξέλιξη της θραύσης πέρα από το στάδιο εμφάνισης των αρχικών εφελκυστικών και των κάθετων διατμητικών ρωγμών, είναι υπεύθυνη για την αστοχία του ανοίγματος σε ψαθυρά υλικά.

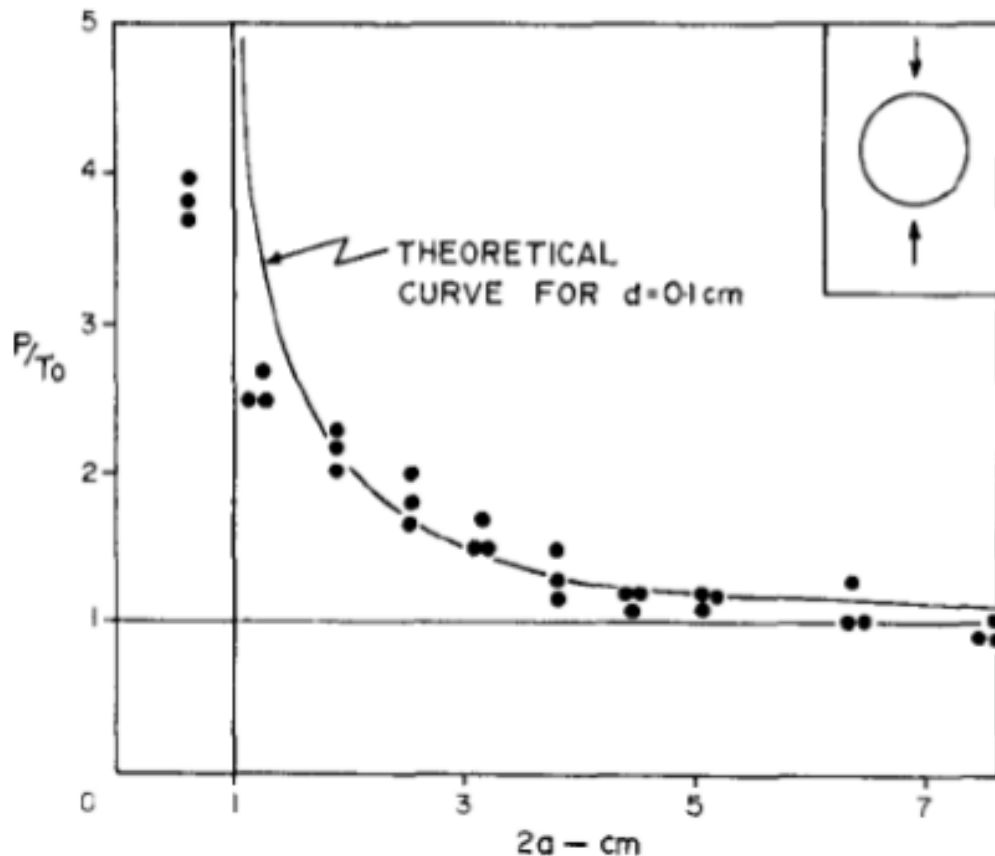
Στα πειράματα σε γύψο, οι δευτερογενείς εφελκυστικές ρωγμές ενώνονται είτε με τις κάθετες είτε με τις επικλινείς ρωγμές διάτμησης. Είναι ακόμα κατανοητό ότι η ανάπτυξη ενός ζεύγους δευτερευόντων εφελκυστικών ρωγμών και ο επακόλουθος λυγισμός των τεμαχίων του υλικού μεταξύ τους, μπορεί να γίνει χωρίς την ανάπτυξη μηχανισμού διάτμησης. Το χαρακτηριστικό γνώρισμα της θραύσης κάτω από χαμηλή πλευρική πίεση, φαίνεται να είναι ο έλεγχός της από τις δευτερογενείς αυτές εφελκυστικές ρωγμές. Η εμφάνιση αυτού του γεγονότος συνοδεύεται πάντα από έκλυση μεγάλης ποσότητας ενέργειας που σηματοδοτείται από ισχυρά ακουστικά και σεισμικά σήματα. Αντίθετα, η θραύση κάτω από υψηλή πλευρική πίεση, ελέγχεται από τις επικλινείς ρωγμές διάτμησης, χωρίς όμως να εξαλείφεται τελείως ο ρόλος των δευτερογενών εφελκυστικών. Στην περίπτωση αυτή, ο ρόλος των αρχικών εφελκυστικών περιορίζεται ή εμφανίζεται αργότερα μαζί σχεδόν με τις δευτερογενείς και ο μηχανισμός αστοχίας είναι η κατάκλαση. Η επιφάνεια αστοχίας κατά μήκος της οποίας το δοκίμιο αστοχεί, ποικίλει σε θέση και κλίση ανάλογα με εξωτερικές επιδράσεις. Δύο από αυτές τις επιδράσεις είναι το σχήμα της οπής και τη σύστημα των πλακών φόρτισης. Το σχήμα της οπής επηρεάζει το μοτίβο της αστοχίας και μπορεί να διευκολύνει την

πτώση τεμαχίων του υλικού που οριοθετείται από τις δευτερογενείς εφελκυστικές και τις πλάγιες διατμητικές ρωγμές [Lajtai 1975].



Εικόνα 6.α) Ρωγμάτωση πριν τη θραύση γύψινου δοκιμίου με χαμηλή πλευρική πίεση όπου οι δευτερογενείς εφελκυστικές ρωγμές έχουν ενωθεί με τις πλάγιες διατμητικές και b) δοκίμιο γύψου που έχει αστοχήσει σε θλίψη με μικρή πλευρική πίεση και χωρίς την ανάπτυξη πλάγιων διατμητικών ρωγμών (Πηγή: Lajtai 1975)

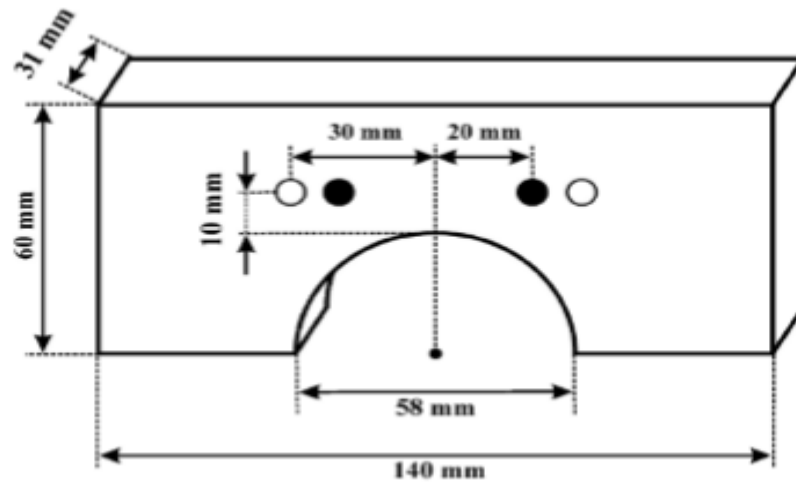
Σε παλαιότερα πειράματά του (1972), ο Lajtai επισήμανε την επιρροή της βάρθρωσης της τάσης σε προβλήματα θραυστομηχανικής, καθώς οι περισσότερες θεωρίες θραύσης βασίζονται σε ομοιογενή πεδία τάσεων όμως στην πραγματικότητα το πεδίο είναι ανομοιογενές. Αφού οι ασυνέχειες του υλικού δημιουργούν περιοχές συγκέντρωσης τάσεων, η έναρξη ρωγμών από αυτές τις περιοχές μπορεί να ελέγχεται από τη βάρθρωση της τάσης (stressgradient). Το μοντέλο υλικού που χρησιμοποίησε, ήταν αυτό που χρησιμοποιείται σε όλες τις θεωρίες που βασίζονται στον Griffith και περιλαμβάνει ένα μόνο ελάττωμα, την οπή στο κέντρο. Μιας όμως που το υλικό (γύψος) έχει από μόνο του φυσικά ελαττώματα (μικροκενά), τα οποία θα αλληλεπιδρούν με το τεχνητό ελάττωμα (την οπή), η θεωρία θα δώσει λανθασμένες τιμές αντοχής στην ρωγμάτωση. Αν το μέγεθος της οπής είναι σχετικά μεγάλο, τότε θα περιοριστεί η επιρροή των φυσικών ελαττωμάτων του υλικού. Στο διάγραμμα που ακολουθεί φαίνονται τα πειραματικά αποτελέσματα σε δοκίμια με κυκλικές οπές όπου επιβεβαιώνεται η υπερεκτίμηση της τάσης ρωγμάτωσης σε μικρά ανοίγματα, λόγω του ότι στην θεωρία δεν λαμβάνονται υπόψη τα φυσικά ελαττώματα του υλικού.



Διάγραμμα 6. Πειραματικά αποτελέσματα και θεωρητική καμπύλη φορτίου-διαμέτρου σε δοκίμια με κυκλικά ανοίγματα κάτω από μονοαξονική θλίψη (Πηγή: Lajtai, 1971)

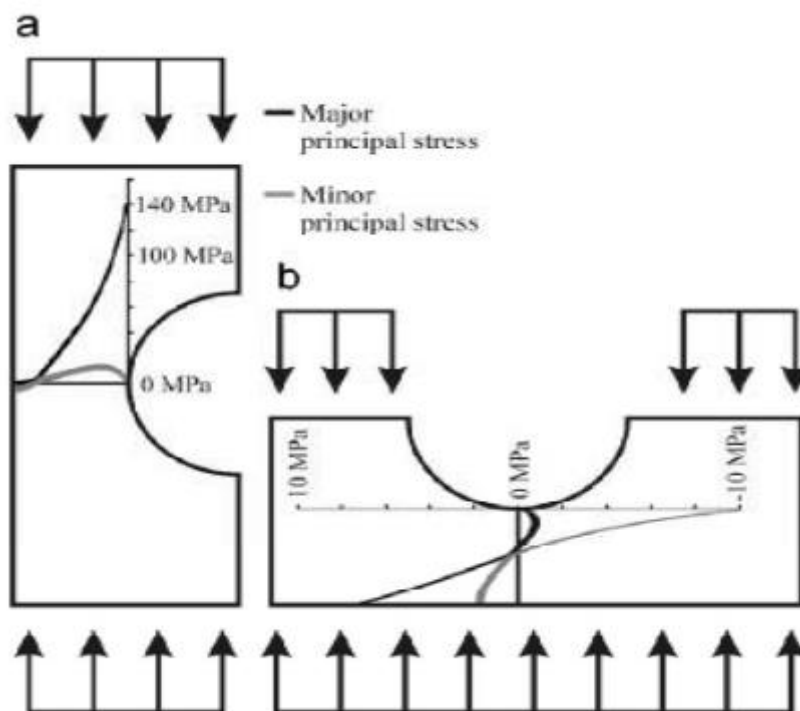
1.6.4. Η ερμηνεία των P. Ganne, A. Vervoort και M. Wevers

Άλλη μια ενδιαφέρουσα προσέγγιση του προβλήματος προέρχεται από τους ερευνητές P. Ganne, A. Vervoort και M. Wevers (2006), οι οποίοι περιέγραψαν τις φάσεις αστοχίας δοκιμίων ασβεστολίθου σύμφωνα με την καταγραφείσα αθροιστική ενέργεια (cumulative energy) ακουστικής εκπομπής. Η μεθοδολογία τους χρησιμοποιείται για την περιγραφή και έλεγχο της αστοχίας δοκιμίων κάτω από θλιπτικές τάσεις αλλά και κάτω από εφελκυστικές τάσεις (σε μια διεύθυνση). Όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα, τα δοκίμια ήταν ορθογωνικά, διαστάσεων 31x60x140 mm με οπή διαμέτρου 58 mm στο κέντρο, ενώ καθόλη τη διάρκεια της δοκιμής, δύο ευρυζωνικοί αισθητήρες με εύρος συχνοτήτων 50kHz – 2MHz, κατέγραφαν τα γεγονότα ακουστικής εκπομπής.



Εικόνα 7. Γεωμετρία δοκιμίων και θέση τοποθέτησης των αισθητήρων (Πηγή: P. Ganne, A. Vervoort και M. Wevers 2006)

Η διεύθυνση φόρτισης των δοκιμίων καθορίζει τη διανομή των τάσεων. Αν το εξωτερικό φορτίο εφαρμόζεται στις μικρές πλευρές του ορθογωνίου (60x31mm), έχουμε συγκέντρωση θλιπτικών τάσεων δίπλα στην οπή, ενώ αν το φορτίο εφαρμόζεται στις μεγάλες πλευρές (140x60mm), οι τάσεις που συγκεντρώνονται στην οπή (ακτινικές και εφαπτομενικές) είναι εφελκυστικές.



Εικόνα 8. Οι δυο διευθύνσεις φόρτισης των δοκιμίων (Πηγή: P. Ganne, A. Vervoort και M. Wevers 2006)

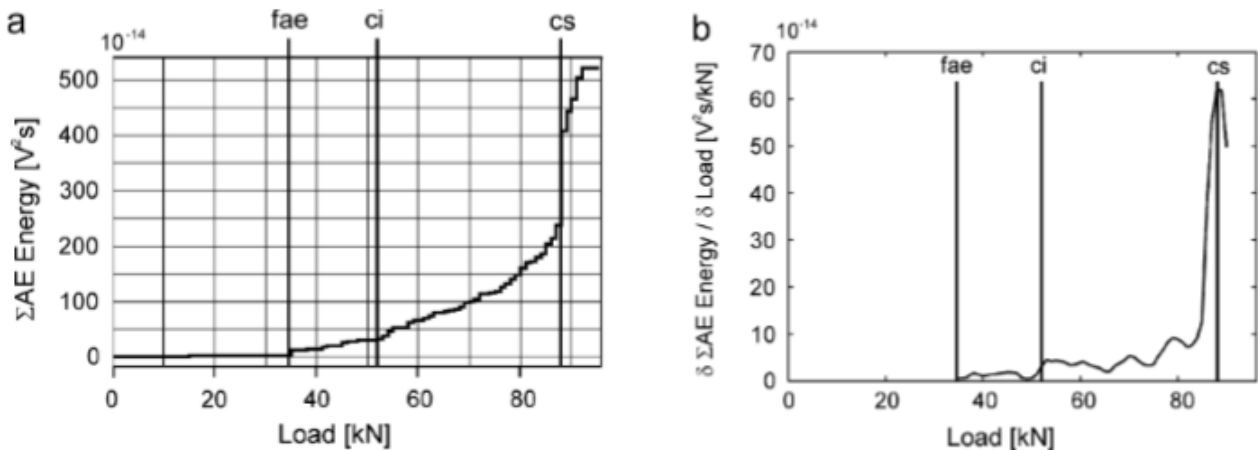
Μεταξύ μηχανής φόρτισης και δοκιμίου τοποθετήθηκε φύλλο τεφλών για τον περιορισμό των δυνάμεων τριβής. Οι αισθητήρες στηρίχθηκαν με ταινία τεφλών και εξασφαλίστηκε η σύζευξη τους με το υλικό, μέσω γράσου (vacuum grease). Η προενίσχυση ορίστηκε στα 49dB ενώ το κατώφλι στα 16dB. Η ταχύτητα του διαμήκου ελαστικού κύματος υπολογίστηκε στα 5700m/s. Όλα τα γεγονότα με πλάτη μικρότερα των 22dB παραλείπονται για τη διατήρηση της ακρίβειας του εντοπισμού. Η ενέργεια ενός γεγονότος υπολογίζεται ως ολοκλήρωμα του πλάτους στο τετράγωνο προς το χρόνο (του πρώτου Hit από κάθε event).

Η προέλευση των ρωγμών μπορεί να είναι:

1. Φυσική (προυπάρχουσες ρωγμές)
2. Προερχόμενη από τη φόρτιση ή
3. Προερχόμενη από την προετοιμασία του δείγματος

Αστοχία στη διάταξη θλίψης του δοκιμίου

Βασιζόμενοι στην εξέλιξη της καταγραφόμενης ενέργειας ΑΕ, εντοπίστηκαν 4 φάσεις κατά τη θλίψη.



Διαγράμμα 7. α)αθροιστικής ενέργειας σε συνάρτηση με το φορτίο και β)παραγώγου αθροιστικής ενέργειας προς το φορτίο σε συνάρτηση με το φορτίο fae=πρώτο σήμα ΑΕ, ci=Αρχή συστηματικής εξέλιξης ρωγμών, cs=Αλληλεπίδραση και συνένωση ρωγμών (Πηγή: P. Ganne, A. Vervoort και M. Wevers 2006)

1^ο στάδιο - «Κανένα σήμα»: Σε αυτό το στάδιο, δεν καταγράφεται κανένα σήμα ΑΕ. Γίνεται λοιπόν η υπόθεση πως δεν δημιουργείται καμία νέα ρωγμή ούτε μεγαλώνει κάποια ήδη υπάρχουσα. Αυτό φυσικά δεν είναι απόλυτο, καθώς υπάρχουν και ρωγμές που δεν απελευθερώνουν ενέργεια που να μπορεί να καταγραφεί.

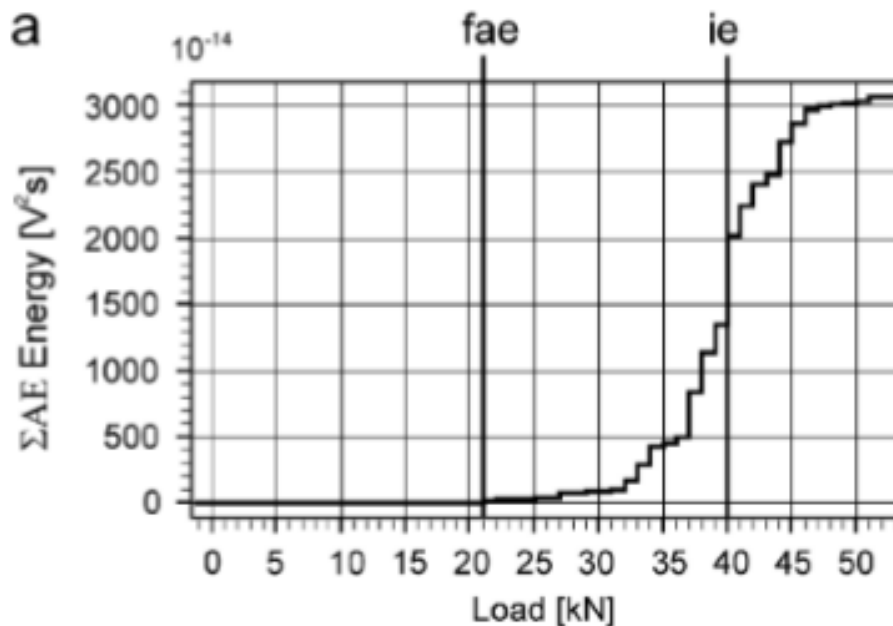
2^ο στάδιο – «Γραμμική αύξηση»: Μετά το πρώτο σήμα ΑΕ (fae) η αθροιστική ενέργεια ΑΕ αυξάνεται γραμμικά σε συνάρτηση με το επιβαλλόμενο φορτίο. Το στάδιο αυτό ξεκινά περίπου στο 23-37% της τάσης αστοχίας. Σύμφωνα με τους μελετητές (P. Ganne, A. Vervoort και M. Wevers), το στάδιο αυτό εξαρτάται από τις ρυθμίσεις, τη θέση, το εύρος συχνοτήτων και το υλικό σύζευξης των αισθητήρων.

3^ο στάδιο– «Συστηματική δημιουργία και προώθηση των ρωγμών»: Στο στάδιο αυτό παρατηρούμε ότι αυξάνει η κλίση της αθροιστικής ενέργειας ΑΕ σε συνάρτηση με το φορτίο. Η αρχή του σταδίου αυτού υπολογίζεται στο 56-62% του φορτίου αστοχίας. Οι Cai et al.(2004) παρατήρησαν ότι το στάδιο αυτό ξεκινάει σε φορτίο 40-60% του φορτίου αστοχίας ανάλογα με το είδος του υλικού, ενώ άλλοι ερευνητές υποστηρίζουν ότι η αύξηση της ρωγμάτωσης μπορεί να παρατηρηθεί σε φορτίο μεγαλύτερο του 60% του φορτίου αστοχίας.

4^ο στάδιο – «Αλληλεπίδραση και συνένωση ρωγμών»: Στο στάδιο αυτό συμβαίνει μια δεύτερη αύξηση της κλίσης της αθροιστικής ενέργειας ΑΕ σε συνάρτηση με το φορτίο, σε στάθμη φορτίο 86-90% του φορτίου αστοχίας. Οι Cai et al. (2004) συσχέτισαν τη στάθμη του φορτίου με την έναρξη συνένωσης των ρωγμών στους διάφορους τύπους βράχου και κατέληξαν στο ότι αυτή συμβαίνει στο 70-90% του φορτίου αστοχίας.

Αστοχία στη διάταξη εφελκυσμού του δοκιμίου

Βασιζόμενοι στην εξέλιξη της καταγραφόμενης ενέργειας ΑΕ, εντοπίστηκαν 3 φάσεις κατά τη θλίψη του δοκιμίου στην άλλη διεύθυνση όπου οι αναπτυσσόμενες τάσεις είναι εφελκυστικές:



Διάγραμμα 8. Αθροιστική ενέργεια σε συνάρτηση με το φορτίο (Πηγή: P. Ganne, A. Vervoort και M. Wevers 2006)

1^ο στάδιο-«Κανένα σήμα»: Αντίστοιχα με την προηγούμενη περίπτωση, υπάρχει και εδώ το στάδιο στο οποίο δεν καταγράφεται κανένα σήμα ΑΕ.

2^ο στάδιο-«Αύξηση των γεγονότων»: Μετά το fae, η αθροιστική ενέργεια ΑΕ αυξάνεται σε συνάρτηση του επιβαλλόμενου φορτίου. Το στάδιο αυτό ξεκινά στο 50-70% της δύναμης στην οποία ξεκινάει το επόμενο στάδιο, ie.

3^ο στάδιο- «Συστηματική δημιουργία και προώθηση των ρωγμών»: Το στάδιο αυτό έχει σαν χαρακτηριστικό γνώρισμα μια ενδοκρυσταλλική ρωγμή (intergranular crack). Η ρωγμή αυτή έχει κλίση 0^ο και εξελίσσεται κατά μήκος των ορίων των κόκκων αλλά και κατά μήκος των επιπέδων διάσπασης των κρυστάλλων. Εάν το φορτίο συνεχίζει να αυξάνεται, συμβαίνει και μια δεύτερη αυξομείωση της αθροιστικής ενέργειας κατά την οποία η παραπάνω ρωγμή επεκτείνεται και σταματάει μετά.

1.7. Τα φαινόμενα κλίμακας και σχέση τους με την τάση ρωγμάτωσης

Με τον όρο φαινόμενα κλίμακας υποδηλώνεται η εξάρτηση της μηχανικής συμπεριφοράς ενός υλικού από το μέγεθος του δοκιμίου για γεωμετρικά όμοια δοκίμια. Σε εργαστηριακές δοκιμές, οι αποκλίσεις στην αντοχή των υλικών σε σχέση με την επί τόπου (in-situ) αντοχή μπορεί να είναι αρκετά μεγάλες. Η αντοχή όμως επηρεάζεται και από την ύπαρξη ατελειών στο υλικό των οποίων η κλίμακα παίζει επίσης πολύ σημαντικό ρόλο.

Υπάρχουν αρκετά θεωρητικά μοντέλα που εξηγούν την επίδραση του μεγέθους και τη συνεπαγόμενη μεταβολή στην αντοχή των υλικών. Αυτά περιλαμβάνουν γραμμικές και μη-γραμμικές ελαστικές θεωρίες θραύσης (π.χ. Inghaffea, 1987), το ρυθμό απελευθέρωσης την κρίσιμης ενέργειας παραμόρφωσης (π.χ. Gonano, 1974), μεθόδους εξισορρόπησης της τάσης (π.χ. Nestova και Lajtai 1973) καθώς και μεθόδους που λαμβάνουν υπόψη το εξαρτώμενο από την πίεση μέτρο ελαστικότητας (π.χ. Santarelli et.al. 1986). Σε δοκίμια με οπή στο κέντρο, οι αρχικές ρωγμές έχουν ερμηνευθεί με θεωρίες της θραυστομηχανικής (π.χ. Sammis και Ashby 1986) και προτείνεται κλειστή λύση της τάσης έναρξης της ρωγμής σε συνάρτηση του μεγέθους της οπής και της δυσθραυστότητας.

Η επιρροή των οπών στην αντοχή των υλικών έχει εξεταστεί από πολλούς ερευνητές και η δημιουργία των ρωγμών εξηγείται με 2 θεωρίες:

1. Στην ψαθυρή εφελκυστική θραύση, τα φυσικά κενά του υλικού, σε μικροσκοπική κλίμακα, θεωρείται ότι αποτελούν εστίες συγκέντρωσης τάσεων από όπου μπορούν να ξεκινήσουν μικροθραύσεις,
2. Σε υπόγεια μεταλλεία ή σήραγγες τα ίδια τα ανοίγματα αποτελούν ασυνέχεια της βραχόμαζας η οποία με τη σειρά της μπορεί να περιέχει (μακροσκοπική κλίμακα), ασυνέχειες όπως ρήγματα, στρώση, πτύχωση, έγκοιλα κατά την ψύξη του μάγματος, κοιλότητες από τη διάλυση υλικού κλπ.

Στην ψαθυρή θραύση, οι περισσότεροι ερευνητές αγνοούν την αστοχία στη θλιβόμενη ζώνη της οπής και λίγοι αναγνωρίζουν τη συνεισφορά των απομονωμένων ρωγμών. Αντίθετα, στα υπόγεια ανοίγματα οι ερευνητές δίνουν περισσότερο σημασία στην αστοχία της θλιβόμενης ζώνης. Αυτό συμβαίνει γιατί οι αρχικές εφελκυστικές ρωγμές είναι σπάνιες αφού η πλευρική πίεση είναι αρκετά υψηλή ώστε να περιορίζει την συγκέντρωση εφελκυστικών τάσεων στα τοιχώματα της κοιλότητας. Επίσης, οι απομονωμένες ρωγμές δεν παίζουν ρόλο αφού πολύ σπάνια φτάνουν στην περίμετρο του ανοίγματος [Carter 1991].

Σε εφαρμογές μηχανικού, ο πιο κοινός τύπος φόρτισης είναι με εφαρμογή εφελκυστικής δύναμης. Η θλιπτική συνιστώσα της έντασης δεν παίζει σημαντικό ρόλο. Κατά τη φόρτιση, η αστοχία ενός ανοίγματος είναι φαινόμενο ενός σταδίου. Η πρώτη ρωγμή που εμφανίζεται είναι και η τελευταία, καθώς η έναρξη της ρωγμής και η αστοχία του υλικού συμβαίνουν μαζί στο ίδιο φορτίο (ασταθής ανάπτυξη ρωγμής). Το πρόβλημα της αστοχίας μπορεί να αντιμετωπιστεί εξετάζοντας την συγκέντρωση των τάσεων γύρω από την κοιλότητα πριν την αστοχία. Έχει αποδειχθεί πειραματικά, ότι υπάρχει ποιοτική σχέση μεταξύ του πεδίου των τάσεων πριν τη ρωγμάτωση και της αστοχίας των ανοιγμάτων υπό ένταση και αυτό μπορεί να αποτελέσει βάση σχηματισμού των κριτηρίων ρωγμάτωσης. Αντίθετα, σε εφαρμογές βραχομηχανικής, η εφελκυστική συνιστώσα της έντασης είναι αυτή που δεν παίζει σημαντικό ρόλο. [Lajtai 1975].

Μια ακριβής κατανόηση του προβλήματος της θραύσης μπορεί να γίνει με την παρατήρηση της διαφοράς ανάμεσα στη μακροσκοπική και τη μικροσκοπική θεώρηση του προβλήματος. Παρά το γεγονός ότι οι δύο αυτές προσεγγίσεις μπορεί να είναι πολύ διαφορετικές, είναι σημαντική η εύρεση μιας σχέσης μεταξύ τους και όταν οι δύο θεωρήσεις εφαρμοσθούν στο ίδιο σύστημα να δίνουν ένα κοινό αποτέλεσμα. Συγκεκριμένα, πρέπει να προβλέπουν το ίδιο φορτίο αστοχίας που βασίζεται σε κάποιο κοινό κριτήριο αστοχίας. Σύμφωνα

με τον G.C. Sih (1973), το κριτήριο της μέγιστης εφελκυστικής τάσης που εφαρμόζεται συχνά στη βιβλιογραφία, δε θα πρέπει να αποτελεί το συνδυαστικό κριτικό μεταξύ των δυο θεωρήσεων [Sih 1973].

Εργαστηριακά, δοκιμάζοντας διάφορες διαμέτρους οπών στα δοκίμια, είναι δυνατή η διάκριση της επιρροής του μεγέθους της οπής στη ρωγμάτωση και κατ' επέκταση στην αστοχία του υλικού. Σύμφωνα με πειράματα του Carter (1992) σε ασβεστόλιθο, το γενικό μοτίβο της θραύσης είναι ίδιο και ανεξάρτητο από το μέγεθος της οπής. Όμως το μέγεθος της οπής επηρεάζει την τάση έναρξης της ρωγμάτωσης (Παράγραφος 1.8). Έτσι μπορούμε να εξάγουμε το συμπέρασμα ότι όσο μεγαλύτερο είναι το άνοιγμα, τόσο χαμηλότερη τάση απαιτείται για το σχηματισμό των ρωγμών [Carter 1992].

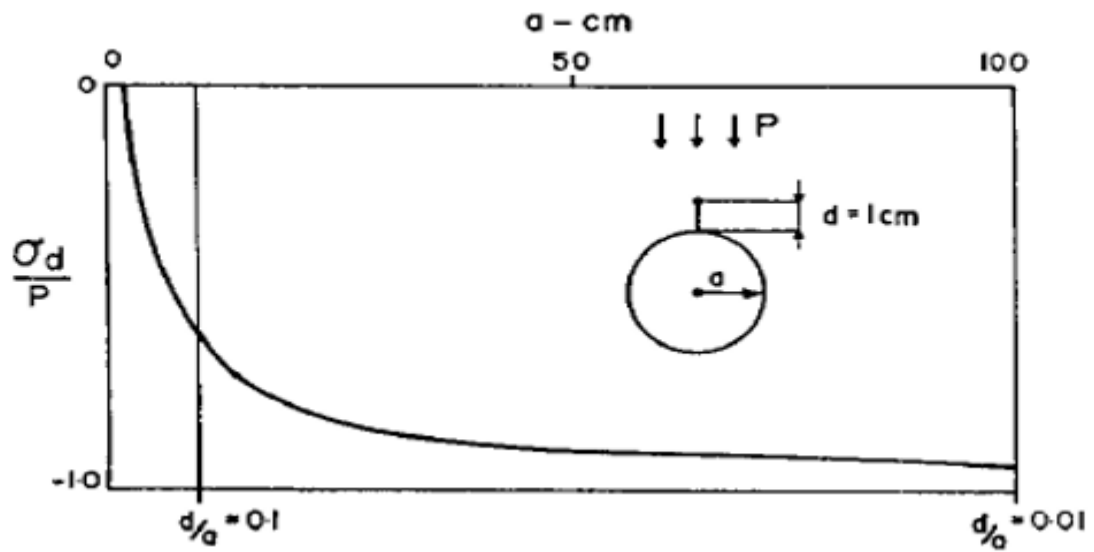
Η θεωρία του Griffith οι επακόλουθές της (Murrel) και οι τροποποιήσεις (Mc Clintoc-Walsh) βασίζονται στη απλή θεώρηση ότι η ρωγμή ξεκινάει όταν η συγκέντρωση της μέγιστης εφελκυστικής τάσης στα όρια μιας ασυνέχειας φτάσει την εφελκυστική αντοχή του υλικού. Αυτή η υπόθεση θέτει σαν αίτημα την ισοδυναμία του ομοιογενούς πεδίου τάσεων της δοκιμής με τις εξαιρετικά ανομοιογενείς συνθήκες που επικρατούν στην περιφέρεια της ρωγμής. Σύμφωνα με τον Lajtai (1972), η παραπάνω υπόθεση είναι μια απαραίτητη αλλά όχι μοναδική προϋπόθεση για την έναρξη των ρωγμών. Μια πιο ολοκληρωμένη άποψη, θα ήταν να συμπεριληφθεί τη βάθμωση της τάσης κατά μήκος της πιθανής επιφάνειας θραύσης. Ο πιο απλός τρόπος να το πετύχουμε αυτό, είναι να υποθέσουμε ότι η ρωγμή θα δημιουργηθεί όταν η μέγιστη εφελκυστική τάση σε μια απόσταση d πέρα από την περιφέρεια, αλλά κατά μήκος της διαδρομής της ρωγμής, φτάσει την μονοαξονική εφελκυστική αντοχή του υλικού. Η υπόθεση αυτή μπορεί να αιτιολογηθεί ως εξής: Η μαθηματική θεωρία της ελαστικότητας προβλέπει πολύ υψηλές συγκεντρώσεις τάσεων που δεν συμβαίνουν στην πραγματικότητα. Αυτό που είναι πιο πιθανό, είναι ότι ακόμα και τα ψαθυρά υλικά θα αναδιανείμουν τις συγκεντρώσεις των τάσεων σε μια περιοχή, το μέγεθος της οποίας εξαρτάται από την “ψαθυρότητα” του υλικού. Αυτό όπως είναι γνωστό, είναι χαρακτηριστικό των “όλκιμων” υλικών. Η ένταση της αναδιανομής, και σε μεγάλο βαθμό εξισορρόπησης του πεδίου των τάσεων, θα είναι μικρότερη από τη μέγιστη συγκέντρωση των τάσεων στα όρια του υλικού. Η αναδιανομή των τάσεων σχεδόν για κάθε σχήμα ρωγμής είναι σχεδόν γραμμική για μια μικρή απόσταση και η μέση ένταση της τάσης καθώς και η κατάσταση της ρωγμής μπορούν να εκφραστούν με την παρακάτω σχέση:

$$\sigma_d = \frac{\sigma_m + \sigma_{2d}}{2} = T_0$$

Όπου σ_d η μέση ένταση της τάσης για το πεδίο των τάσεων που αναδιανέμεται ομοιόμορφα σε μια απόσταση $2d$, ενώ η συγκέντρωση των τάσεων σε απόσταση d υπολογίζεται με τη μαθηματική θεωρία της ελαστικότητας [Lajtai 1972].

Στα πειράματα του Lajtai (1971), η κρίσιμη απόσταση d θεωρείται σταθερά του υλικού. Σε αντίθεση με τη μέγιστη συγκέντρωση των τάσεων σ_m , η ένταση του πεδίου των τάσεων σε δεδομένη απόσταση d είναι συνάρτηση του μεγέθους της οπής όπως φαίνεται στο διάγραμμα 9. Η επίδραση του μεγέθους είναι πιο σαφής σε μικρά μεγέθη οπών, δείχνοντας έτσι ότι οι ρωγμές για μεγάλα ανοίγματα ελέγχονται από τη μέγιστη συγκέντρωση των τάσεων. Η πραγματική τιμή της απόστασης d μπορεί να αποτελέσει δείκτη της σχετικής ψαθυρότητας του υλικού. Τα πολύ ψαθυρά υλικά μπορούν να διατηρήσουν υψηλές συγκεντρώσεις τάσεων και ως εκ τούτου, η κρίσιμη τάση σ_d θα είναι πολύ κοντά στα όρια. Αντίθετα, τα πιο όλκιμα υλικά μπορούν να αναδιανείμουν τις συγκεντρώσεις των τάσεων σε μεγαλύτερη περιοχή κάνοντας έτσι μεγαλύτερη και την απόσταση d . Είναι προφανές ότι η απόσταση d δε μπορεί να είναι μεγαλύτερη από το

μήκος της εφελκόμενης ζώνης κατά μήκος της διαδρομής της ρωγμής. Πράγματι, αναμένεται μόνο μια ρωγή σε αυτήν την απόσταση [Σοφιανός & Νομικός 2008].



Διάγραμμα 9. Σχέση τάσης έναρξης της ρωγμάτωσης και λόγου απόστασης d προς μέγεθος οπής (Πηγή: Lajtai 1971)

2. Το λογισμικό Phase 2

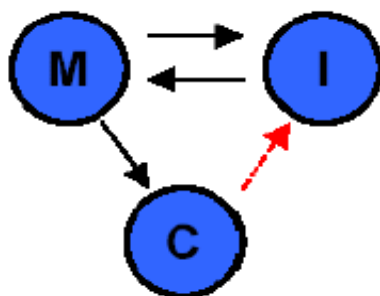
Το λογισμικό Phase 2 είναι ένα δισδιάστατο πρόγραμμα ελαστοπλαστικών πεπερασμένων στοιχείων για την ανάλυση της μηχανικής συμπεριφοράς σε υπόγειες ή επιφανειακές εκσκαφές σε εδαφικούς και βραχώδεις σχηματισμούς. Το λογισμικό Phase 2 της Rocscience έχει ευρύτατη χρήση από γεωτεχνικούς μηχανικούς για τον υπολογισμό των τάσεων και παραμορφώσεων και των υδραυλικών ιδιοτήτων του εδάφους που επικρατούν σε περιοχές εγκατάστασης γεωτεχνικών έργων, όπως πρηνών, υπόγειων εκσκαφών σιηράγγων και ορυγμάτων, τοίχων αντιστήριξης, φραγμάτων κ.α. Με χρήση αλγορίθμου πεπερασμένων στοιχείων και εφαρμογή κριτηρίων αστοχίας (όπως τα κριτήρια Mohr-Coulomb, Hoek – Brown, κ.α.) υπολογίζεται η εντατική κατάσταση της περιοχής που ενδιαφέρει για το σχεδιασμό και την κατασκευή του έργου. Επίσης πολύπλοκα μοντέλα με πολλά στάδια μπορούν να δημιουργηθούν και να αναλυθούν εύκολα και γρήγορα όπως σήραγγες σε αδύναμους σχηματισμούς είτε σε σχηματισμούς με ασυνέχειες, πρηνή και αναχώματα. Με αυτό το πρόγραμμα υπάρχει η δυνατότητα μελέτης μηχανικών προβλημάτων όπως της προοδευτικής αστοχίας ή της αλληλεπίδρασης της υποστήριξης με την περιβάλλουσα γεωμάζα.

Ένα από τα κύρια χαρακτηριστικά του προγράμματος είναι η ανάλυση ευστάθειας πρηνών με πεπερασμένα στοιχεία με τη μέθοδο της μείωσης της διατμητικής αντοχής, η οποία μπορεί να εκτελεστεί με το κριτήριο Mohr-Coulomb ή με τις μηχανικές παραμέτρους από το κριτήριο Hoek-Brown.

Το phase προσφέρει ένα ευρύ φάσμα επιλογών μοντελοποίησης της υποστήριξης. Γραμμικά στοιχεία μπορούν να εφαρμοστούν στη μοντελοποίηση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος, του σκυροδέματος, σε σύνολα συστημάτων χάλυβα, σε τοίχους αντιστήριξης, σε πασσάλους κ.ά. Με τα γραμμικά εργαλεία σχεδιασμού επιτρέπεται ο προσδιορισμός του συντελεστή ασφαλείας της οπλισμένης υποστήριξης, όπως για παράδειγμα σε διάφορους τύπους αγκυρίων και σε πλαίσια.

2.1 Τρόπος ανάλυσης αποτελεσμάτων από το πρόγραμμα Phase 2

Με το πρόγραμμα Phase 2 εύκολα δημιουργείται ένα μοντέλο και κατασκευάζεται το πλέγμα των πεπερασμένων στοιχείων και έπειτα γίνεται η ανάλυση των τάσεων και η ερμηνεία των αποτελεσμάτων. Αυτά γίνονται με τη χρήση των τριών υποπρογραμμάτων από τα οποία αποτελείται το phase 2 και είναι: το Μοντέλο (MODEL), ο Υπολογιστής (COMPUTE) και η Ερμηνεία των Αποτελεσμάτων (INTERPRET). Το Μοντέλο (MODEL) είναι ένα πρόγραμμα προ-επεξεργασίας που χρησιμοποιείται για την εισαγωγή και τροποποίηση των ορίων του μοντέλου, την υποστήριξη, τις επί τόπου τάσεις, τις οριακές συνθήκες, για την ανάθεση των ιδιοτήτων των υλικών και για τη δημιουργία του πλέγματος των πεπερασμένων στοιχείων. Το phase 2 δίνει τη δυνατότητα εύκολης κατασκευής του μοντέλου με διάφορα εργαλεία. Η εκσκαφή, τα σύνορα των υλικών και των σταδίων καθορίζονται με τη βοήθεια εργαλείων σχεδίασης ή απλά με την εισαγωγή συντεταγμένων. Επίσης μπορεί να γίνει προσομοίωση των ασυνεχειών του πετρώματος. Ο χρήστης μπορεί να συμπεριλάβει την πίεση πόρων στην ανάλυση ενεργών τάσεων, υδροφόρους ορίζοντες, πιεζομετρικές επιφάνειες κλπ. Το Μοντέλο (MODEL), ο Υπολογιστής (COMPUTE) και η Ερμηνεία των αποτελεσμάτων (INTERPRET) λειτουργούν και ως ανεξάρτητα προγράμματα. Μπορούν επίσης να αλληλεπιδρούν μεταξύ τους όπως παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 9.Ο συσχετισμός των τριών υποπρογραμμάτων που αποτελούν το πρόγραμμαPhase2

Ο Υπολογιστής(COMPUTE) και η Ερμηνεία των Αποτελεσμάτων(INTERPRET) μπορούν να ενεργοποιηθούν μέσα από το Μοντέλο(MODEL).

•Ο Υπολογιστής(COMPUTE) πρέπει να τρέξει σε ένα αρχείο πριν να είναι δυνατή η ανάλυση των αποτελεσμάτων με το INTERPRET (κόκκινο βέλος).

▪ Το Μοντέλο(MODEL) μπορεί να ενεργοποιηθεί από το INTERPRET.

Ο υπολογιστής(COMPUTE) του μοντέλου που έχουμε κατασκευάσει μπορεί να γίνει μόνο εφόσον υπάρχει το πλέγμα των πεπερασμένων στοιχείων και έχουμε αποθηκεύσει το μοντέλο σε ένα αρχείο. Η Ερμηνεία των Αποτελεσμάτων (INTERPRET) είναι το μετά – επεξεργαστικό πρόγραμμα που χρησιμοποιείται για την οπτικοποίηση και ερμηνεία της ανάλυσης των αποτελεσμάτων του phase2. Είναι αναγκαίο να τρέξουμε πρώτα το μοντέλο με το COMPUTE, ώστε να έχουμε τη δυνατότητα να δούμε τα αποτελέσματα INTERPRET.

2.2 Διαδικασία σχεδιασμού

- Γεωμετρία μοντέλου: Ο αρχικός σχεδιασμός του μοντέλου στο πρόγραμμα Phase2πραγματοποιείται με γραφική εισαγωγή της γεωμετρίας του και με εισαγωγή των παραμέτρων σε αντίστοιχες φόρμες εισαγωγής. Η γραφική εισαγωγή της γεωμετρίας γίνεται σε αυτόνομο περιβάλλον μορφής CAD.
- Γενικές ρυθμίσεις του μοντέλου: Καθορίζεται ο τύπος της ανάλυσης, ο τύπος επίλυσης καθώς και οι μονάδες μέτρησης.
- Δημιουργία πλέγματος και διακριτοποίηση: Η δημιουργία του πλέγματος των πεπερασμένων στοιχείων γίνεται αυτόματα μέσω ενσωματωμένης γεννήτριας, που χειρίζεται πολύπλοκες και σύνθετες εκσκαφές. Ο χρήστης επιλέγει μεταξύ των τύπων πλέγματος graded, uniform και radial ανάλογα με την περίπτωση μελέτης. Για παράδειγμα για τη μελέτη ευστάθειας πρανού συστεινεται από τους δημιουργούς του προγράμματος ο τύπος uniform, ενώ για υπόγειες εκσκαφές ο τύπος graded. Τα στοιχεία του πλέγματος μπορεί να είναι τριγωνικά τριών ή έξι κόμβων ή τετραπλευρικά τεσσάρων ή οκτώ κόμβων. Ύστερα από τον καθορισμό του αριθμού των στοιχείων του περιγράμματος του μοντέλου, μπορεί να πραγματοποιηθεί η διακριτοποίηση. Ο έλεγχος του δικτύματος γίνεται μέσω της επιλογής showmeshquality.
- Ιδιότητες υλικών γεωμάζας: Στον πίνακα Materialproperties εισάγονται στοιχεία που αφορούν την αντοχή και τα μηχανικά χαρακτηριστικά του υλικού. Τα στοιχεία που προσομοιώνουν το υλικό της γεωμάζας μπορεί να έχουν ελαστική ή πλαστική συμπεριφορά. Το υλικό μπορεί να είναι ισότροπο, εγκαρσίως ισότροπο ή ορθότροπο. Για να σχεδιασθεί ένα ψαθυρό υλικό αρχικά επιλέγεται ο τύπος του να είναι plastic και στη συνέχεια μηδενίζεται η απομένουσα αντοχή του. Προκειμένου να αναλυθεί η πλαστική συμπεριφορά υλικών διατίθενται διάφορα κριτήρια αστοχίας, όπως Mohr-Coulomb, Hoek-Brown και Drucker-Prager.
- Τύπος στήριξης μοντέλου: Ο τύπος στήριξης περιλαμβάνει στήριξη σταθερή με άρθρωση, στήριξη με κύλιση και χωρίς στήριξη.

- Καθορισμός φόρτισης: Ο χρήστης έχει ποικίλες επιλογές να καθορίσει, όπως το αρχικό εντατικό πεδίο, κατανεμημένες φορτίσεις, σεισμικές φορτίσεις κτλ.
 - Στάδια Εκσκαφής –Υποστήριξης: Τα στάδια εκσκαφής και υποστήριξης της σήραγγαςπροσομοιώνονται στο Phase2 μέσω σταδίων προσομοίωσης όπου είναι δυνατή ηαφαίρεση στοιχείων της γεωμάζας, η αλλαγή των ιδιοτήτων τους, και της αρχικής τους φόρτισης, η προσθήκη ή αφαίρεση των στοιχείων της υποστήριξης και η αλλαγή τωνιδιοτήτων τους. Επίσης είναι δυνατή η προσθήκη ή αφαίρεση εξωτερικής φόρτισης σεκάθε στάδιο προσομοίωσης.
 - Compute: Επεξεργασία-Ανάλυση του αρχείου
-
- Interpret: Παροχή συνόλου εργαλείων για την παρουσίαση των αποτελεσμάτων της ανάλυσης.

3. Προσομοίωση δοκιμής μονοαξονικής θλίψης σε ασβεστολιθικά μοντέλα

Αυτό το κεφάλαιο περιλαμβάνει κατά κύριο λόγο την παρατήρηση του φαινομένου της θραύσης υπό μονοαξονική θλίψη μοντέλων με διαφορετική οπή μέσω του προγράμματος phase 2. Παράλληλα θα καταγραφούν τα γεγονότα έναρξης των διάφορων φαινομένων που θα συντελεστούν σε σχέση με την κατακόρυφη τάση σ_{yy} εμφάνισής τους. Στο τέλος θα γίνει σύγκριση της επίδρασης της οπής στη διαμόρφωση αυτών των τιμών.

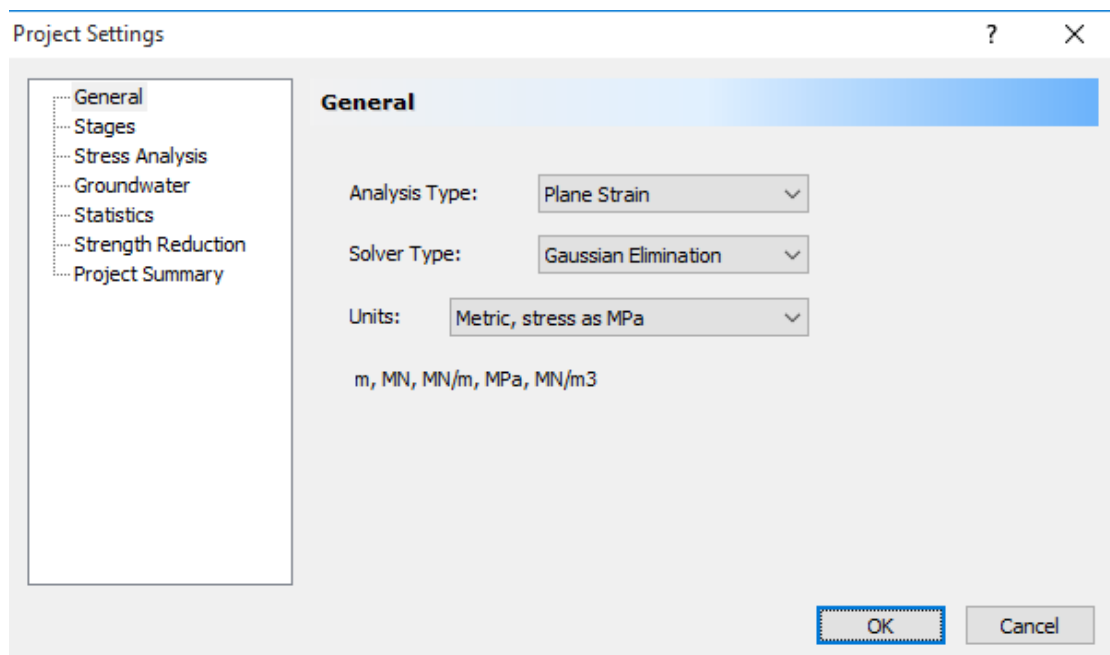
Τα μηχανικά χαρακτηριστικά των μοντέλων θα προσομοιώσουν ασβεστόλιθο με μονοαξονική αντοχή 70MPa και εφελκυστική αντοχή 5 MPa.

Για να επιβεβαιωθούν τα παραπάνω μηχανικά χαρακτηριστικά θα διεξαχθεί δοκιμή μονοαξονικής θλίψης σε μοντέλο με αυτά τα μηχανικά χαρακτηριστικά χωρίς οπή. Θα πρέπει το μοντέλο να υποστεί ψαθυρή θάυση, ενώ παράλληλα η μέγιστη αντοχή του να φτάσει τα 70 MPa.

3.1. Μοντέλο επιβεβαίωσης

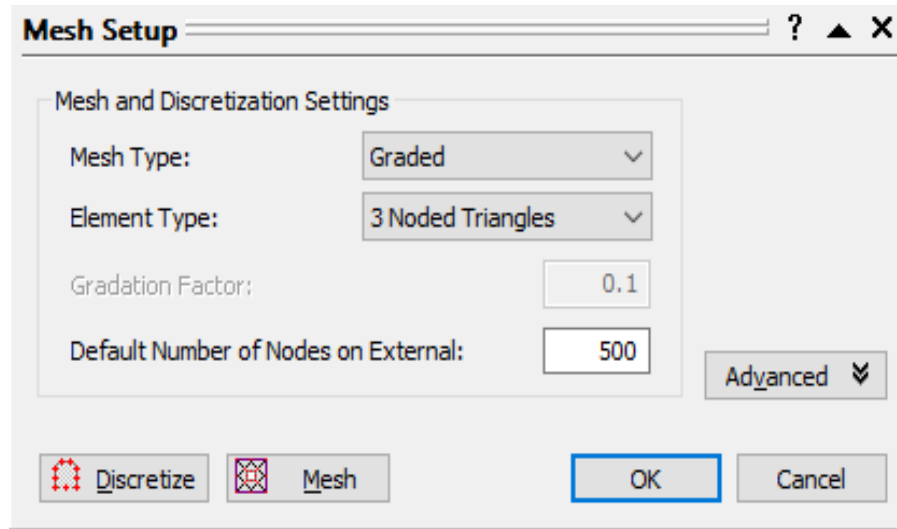
Καταρχάς εισάγουμε τα παρακάτω δεδομένα στο πρόγραμμα:

- Γεωμετρία μοντέλου: $0,2*0,1m^2$
- Γενικές ρυθμίσεις του μοντέλου:



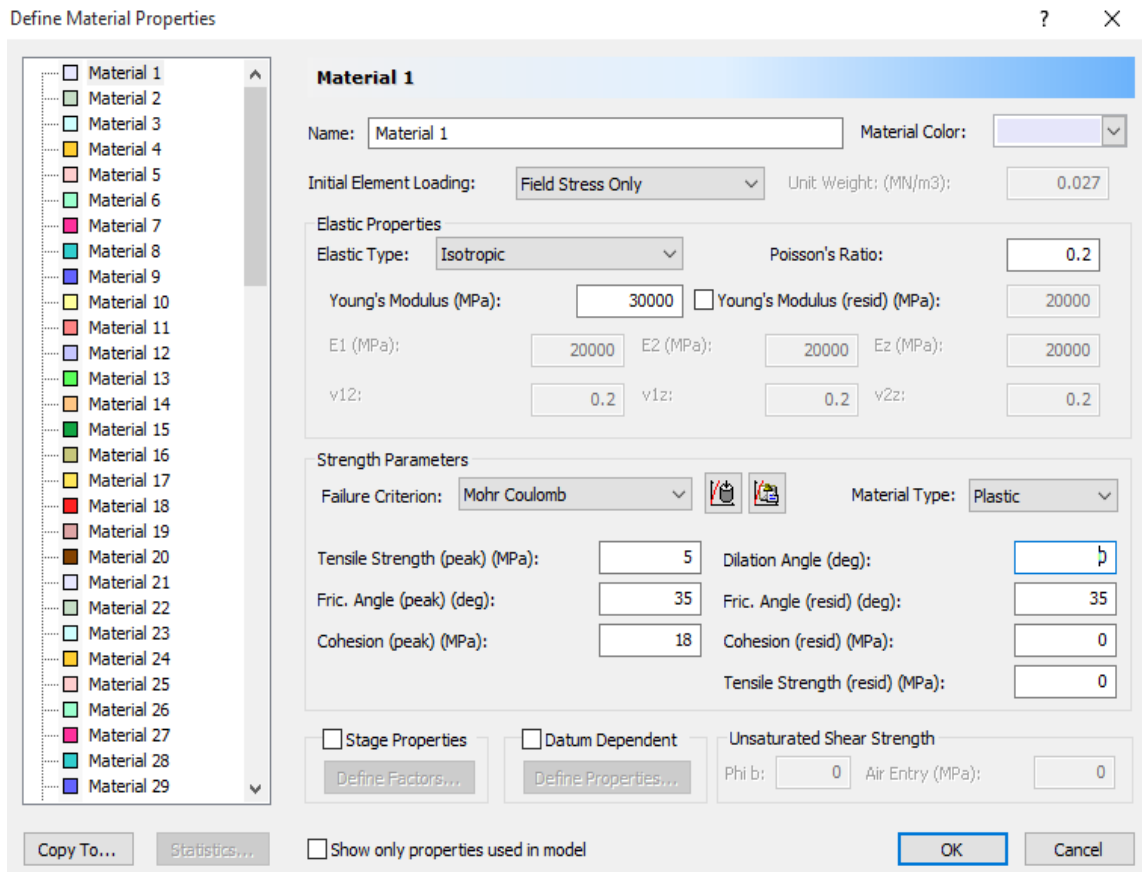
Εικόνα 10

- Πλέγμα και διακριτοποίηση: Επιλέγουμε τύπο graded με τριγωνικά στοιχεία τριών κόμβων.



Εικόνα 11

- Ιδιότητες υλικού: Το υλικό είναι ισότροπο με μέτρο ελαστικότητας $E=30\text{GPa}$, πλαστικού τύπου με μηδενική απομένουσα συνοχή με σκοπό την δημιουργία ψαθυρότητας. Το κριτήριο αστοχίας του πετρώματος είναι το Mohr-Coulomb.



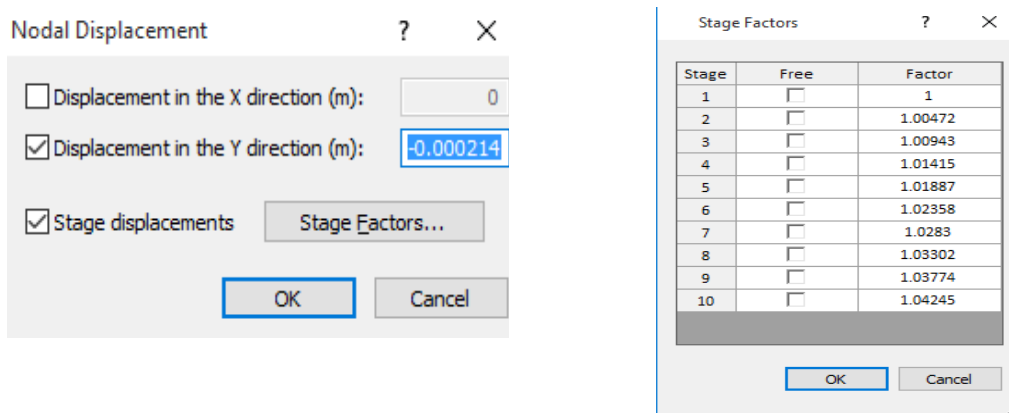
Εικόνα 12

- Τύπος στήριξης μοντέλου: Η στήριξη θα είναι με κύλιση στη βάση του μοντέλου και ελεύθερη στις υπόλοιπες περιοχές. Λόγω της «κατοπτρικότητας» αυτής της στήριξης έχουν δοθεί και οι παραπάνω γεωμετρικές διαστάσεις.
- Καθορισμός φόρτισης: Επιλέχθηκε φυσικό πεδίο τάσεων (fieldstressonly) με constant field stress type με μηδενικές τιμές στις κατακόρυφες και οριζόντιες τάσεις.



Εικόνα 13

- Στάδια Δοκιμής:** Η δοκιμή θα χωριστεί σε 10 στάδια. Η άσκηση τάσης κατά τη δοκιμή μονοαξονικής θλίψης περιλαμβάνει μετακίνηση της πλάκας φόρτισης προς τα κάτω. Γι' αυτό το λόγο η φόρτιση του μοντέλου γίνεται με κατακόρυφη μετακίνηση προς την πλάκα στήριξης αυξανόμενη ανά στάδιο. Στο 1^ο στάδιο η μετακίνηση είναι 0.214 mm και ανά στάδιο αυξάνεται η μετακίνηση ανά 0,0001mm, έως η τελική μετακίνηση να γίνει 0,2231 mm. Αξίζει να σημειωθεί ότι όσον αφορά τη μετακίνηση της πλάκας προηγήθηκαν δοκιμές για διάφορες τιμές της με αρχικό στόχο τον χονδροειδή υπολογισμό της μέγιστης αντοχής του μοντέλου, ώστε στη συνέχεια να εισαχθούν πιο λεπτομερείς τιμές μετατόπισης ανά στάδιο για τον ακριβέστερο υπολογισμό της αντοχής. Λόγω της επιβολής πολύ μικρής τιμής μετακίνησης απαιτείται υπερβολικός αριθμός σταδίων. Γι' αυτό το λόγο η φόρτιση ξεκινά λίγο πριν τελική θραύση του μοντέλου.



Εικόνα 14

Μέσω της επιλογής infoviewer παρουσιάζονται τα αναλυτικά στοιχεία του σχεδιασμού.

Phase2 Analysis Information

Project1

Project Summary

-
- File Name: Project1
 - Last saved with Phase2 version: 8.014
 - Project Title: Project1

General Settings

-
- Number of Stages: 10
 - Analysis Type: Plane Strain
 - Solver Type: Gaussian Elimination
 - Units: Metric, stress as MPa

Analysis Options

-
- Maximum Number of Iterations: 500
 - Tolerance: 0.001
 - Number of Load Steps: Automatic
 - Convergence Type: Absolute Energy
 - Tensile Failure: Does Not Reduce Shear Strength
 - Joint tension reduces joint stiffness by a factor of 0.01

Groundwater Analysis

-
- Method: Piezometric Lines
 - Pore Fluid Unit Weight: 0.00981 MN/m³
 - Probability: None

Field Stress

-
- Field stress: constant
 - Sigma one: 0 MPa (compression positive)

- Sigma three: 0 MPa (compression positive)
- Sigma Z: 0 MPa (compression positive)
- Angle from the horizontal to sigma 1: 0 degrees (counter-clockwise)

Mesh

-
- Mesh type: graded
 - Element type: 3 noded triangles
 - Number of elements on Stage 1: 17104
 - Number of nodes on Stage 1: 8803
 - Number of elements on Stage 2: 17104
 - Number of nodes on Stage 2: 8803
 - Number of elements on Stage 3: 17104
 - Number of nodes on Stage 3: 8803
 - Number of elements on Stage 4: 17104
 - Number of nodes on Stage 4: 8803
 - Number of elements on Stage 5: 17104
 - Number of nodes on Stage 5: 8803
 - Number of elements on Stage 6: 17104
 - Number of nodes on Stage 6: 8803
 - Number of elements on Stage 7: 17104
 - Number of nodes on Stage 7: 8803
 - Number of elements on Stage 8: 17104
 - Number of nodes on Stage 8: 8803
 - Number of elements on Stage 9: 17104
 - Number of nodes on Stage 9: 8803
 - Number of elements on Stage 10: 17104
 - Number of nodes on Stage 10: 8803

Mesh Quality

-
- All elements are of good quality

Poor quality elements defined as:

- Side length ratio (maximum / minimum) > 30.00
- Minimum interior angle < 2.0 degrees
- Maximum interior angle > 175.0 degrees


| | |
|-------------------|-------|
| Angle | |
| Residual Cohesion | 0 MPa |
| Piezo to use | None |
| Ru value | 0 |

Material Properties

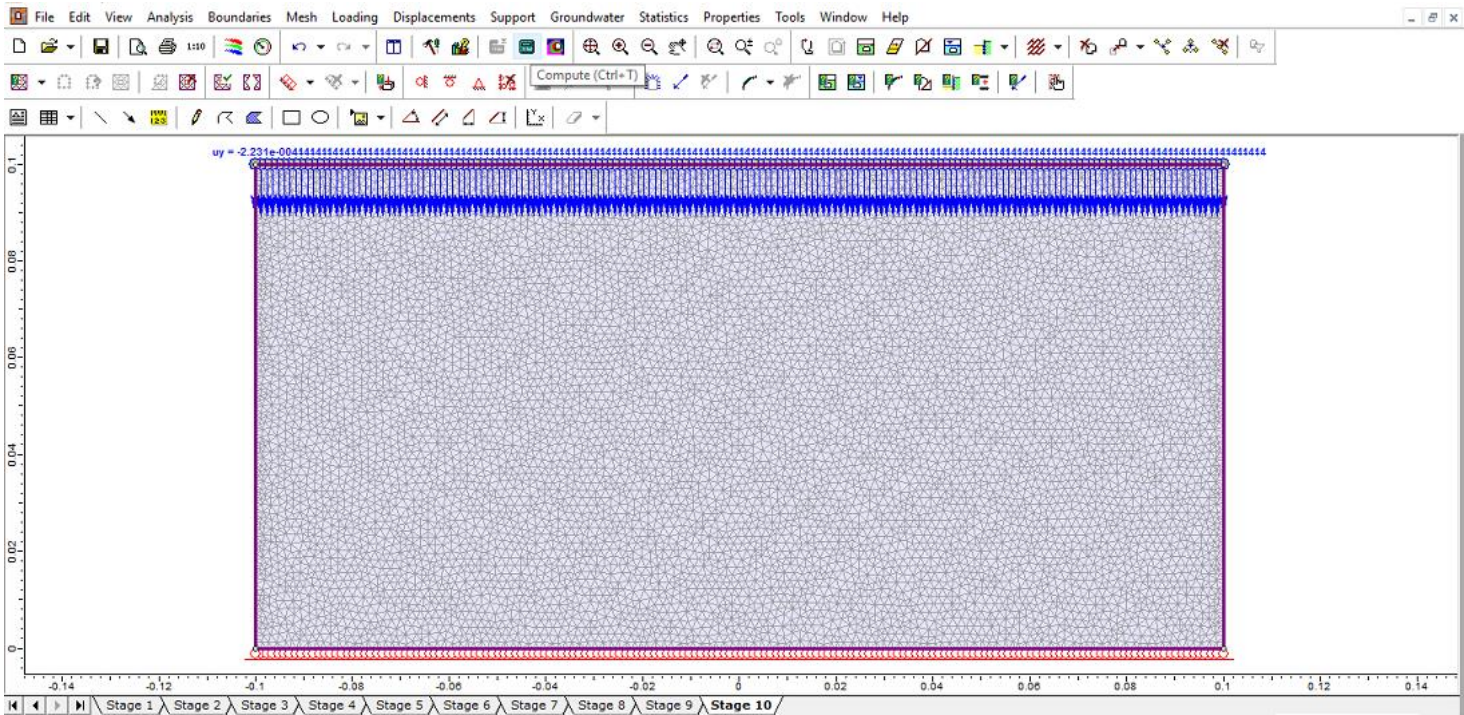
List of All Coordinates

Material: Material 1

External boundary

| | |
|---------------------------|---|
| Color |  |
| Initial element loading | field stress only |
| Elastic type | isotropic |
| Young's modulus | 30000 MPa |
| Poisson's ratio | 0.2 |
| Failure criterion | Mohr-Coulomb |
| Peak tensile strength | 5 MPa |
| Residual tensile strength | 0 MPa |
| Peak friction angle | 35 degrees |
| Peak cohesion | 18 MPa |
| Material type | Plastic |
| Dilation Angle | 0 degrees |
| Residual Friction | 35 degrees |

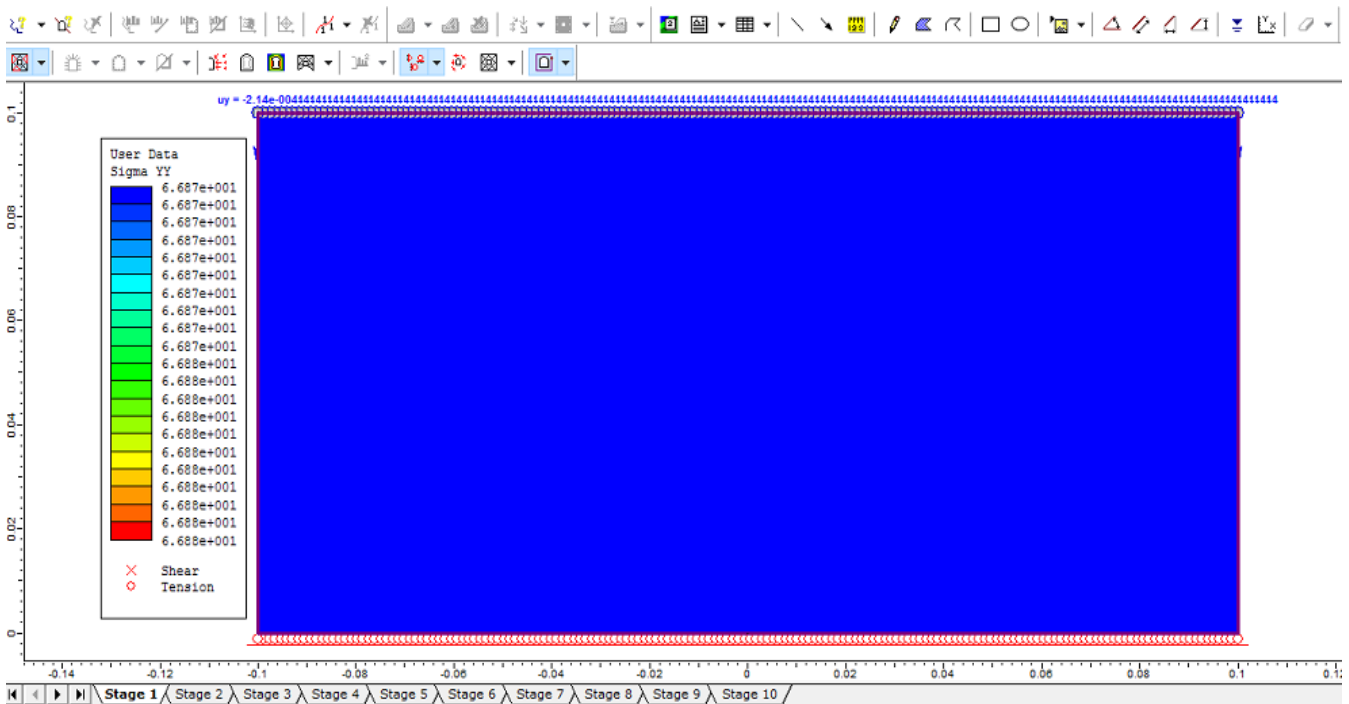
| X | Y |
|------|-----|
| 0.1 | 0 |
| 0.1 | 0.1 |
| -0.1 | 0.1 |
| -0.1 | 0 |



Εικόνα 15. Το μοντέλο πλέον είναι έτοιμο για ανάλυση.

3.1.1. Ανάλυση αποτελεσμάτων

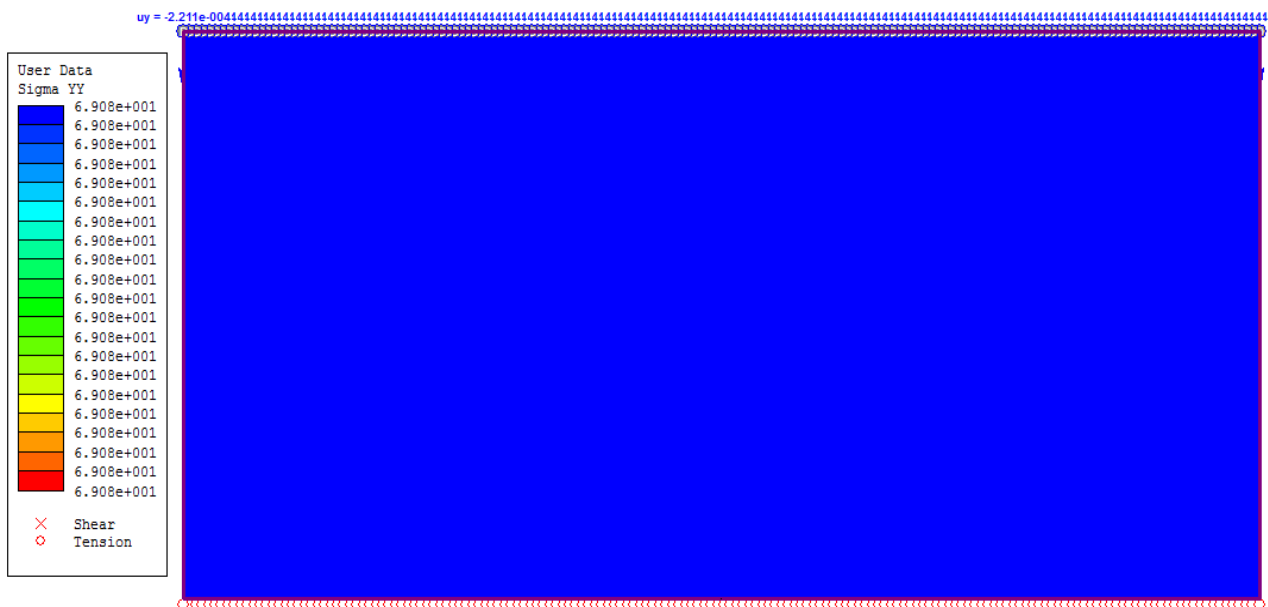
Στο 1^ο στάδιο της φόρτισης το μοντέλο δέχεται κατακόρυφη τάση $\sigma_{\psi\psi}$ 66,87 MPa. Το μοντέλο δεν περιλαμβάνει οπή και είναι χωρίς ασυνέχειες, οπότε οι τάσεις σε όλη την επιφάνεια είναι ομοιόμορφα κατανομημένες. Επίσης για τους παραπάνω λόγους αναμένεται το μοντέλο να αστοχήσει σε διάτμηση.



Stage 1: Κατανομή κατακόρυφης τάσης $\sigma_{\psi\psi}$

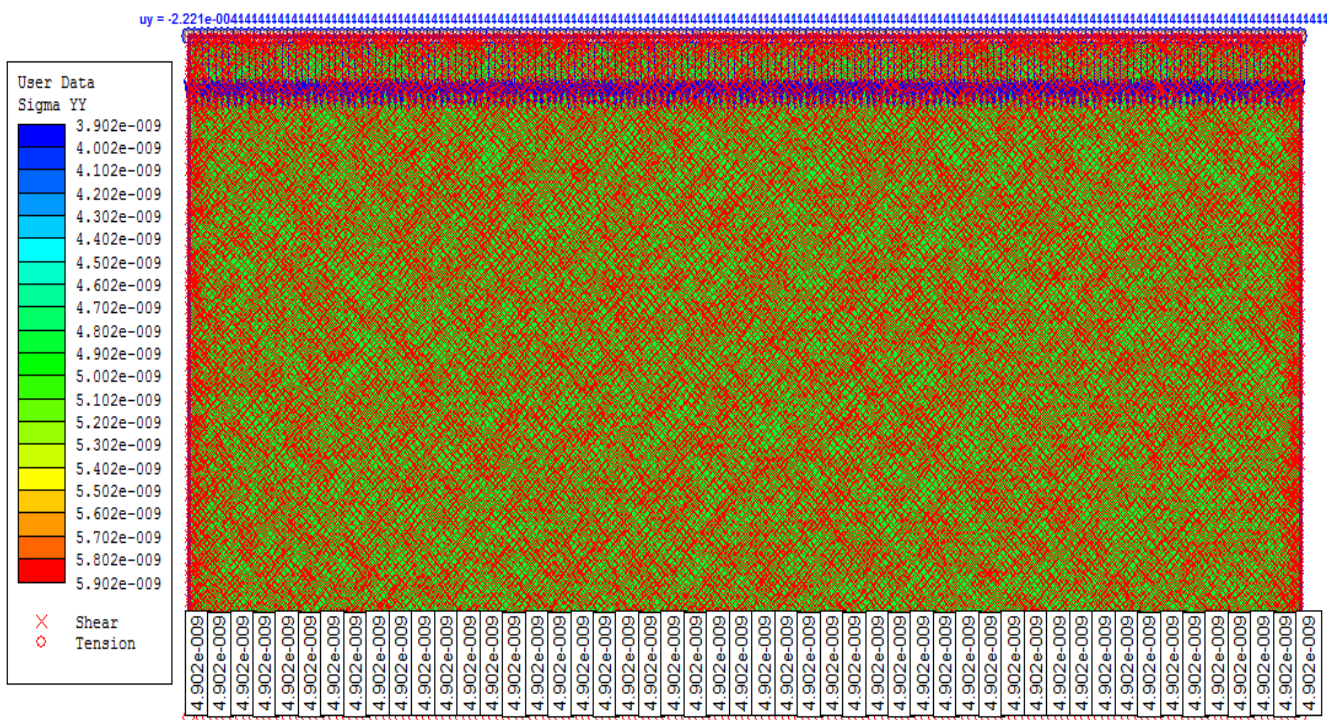
Από το 1^ο στάδιο έως και το 8^ο στάδιο δεν παρατηρείται αστοχία, ούτε αλλαγή στην κατανομή του εντατικού πεδίου.

Στο 8^ο στάδιο το μοντέλο υπόκειται σε κατακόρυφη τάση 69,08 MPa για μετακίνηση πλαισίου 0,02211 mm.



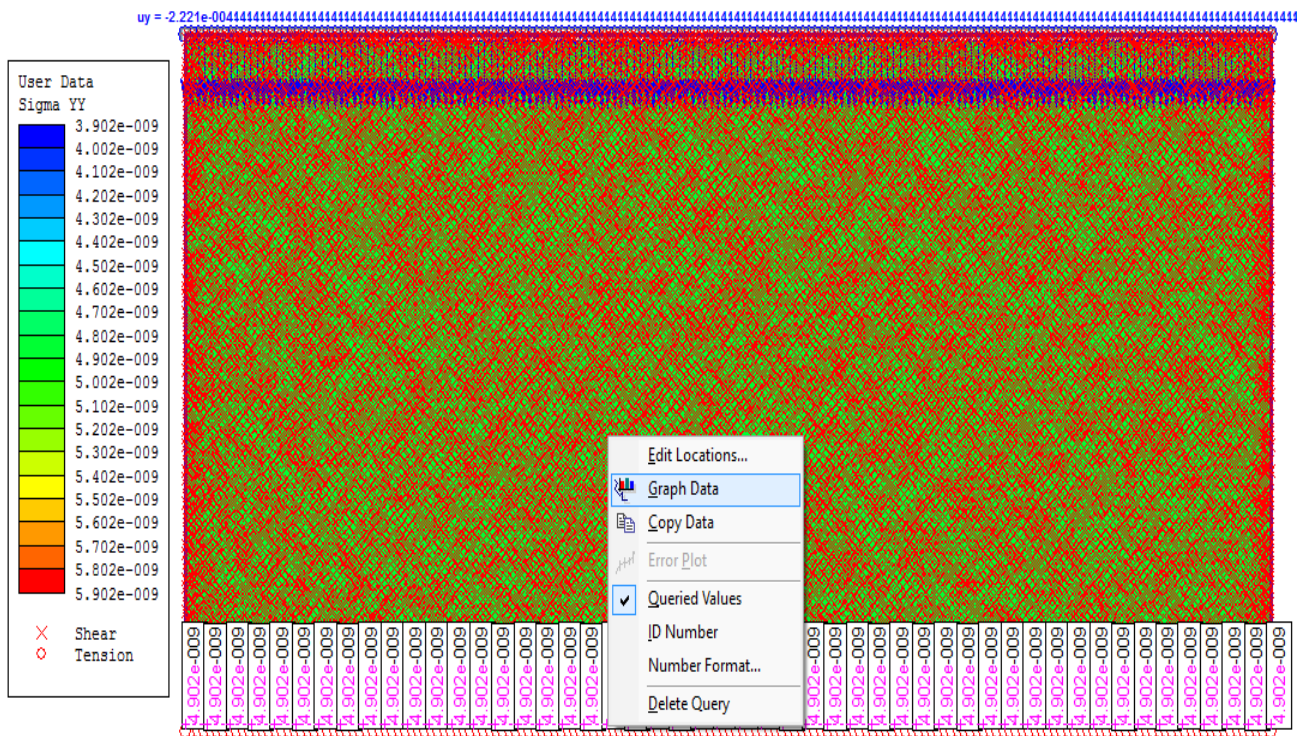
Stage8

Η αστοχία επέρχεται στο 9^ο στάδιο και οφείλεται σε διάτμηση. Η μέγιστη αντοχή του μοντέλου θεωρείται 69,08 MPa (από το 8^ο στάδιο). Όσον αφορά την αντοχή στο στάδιο της θραύσης μέσω query που σχεδιάζεται στη βάση του μοντέλου υπολογίζεται ο μέσος όρος (average) των τάσεων σ_{avg} .



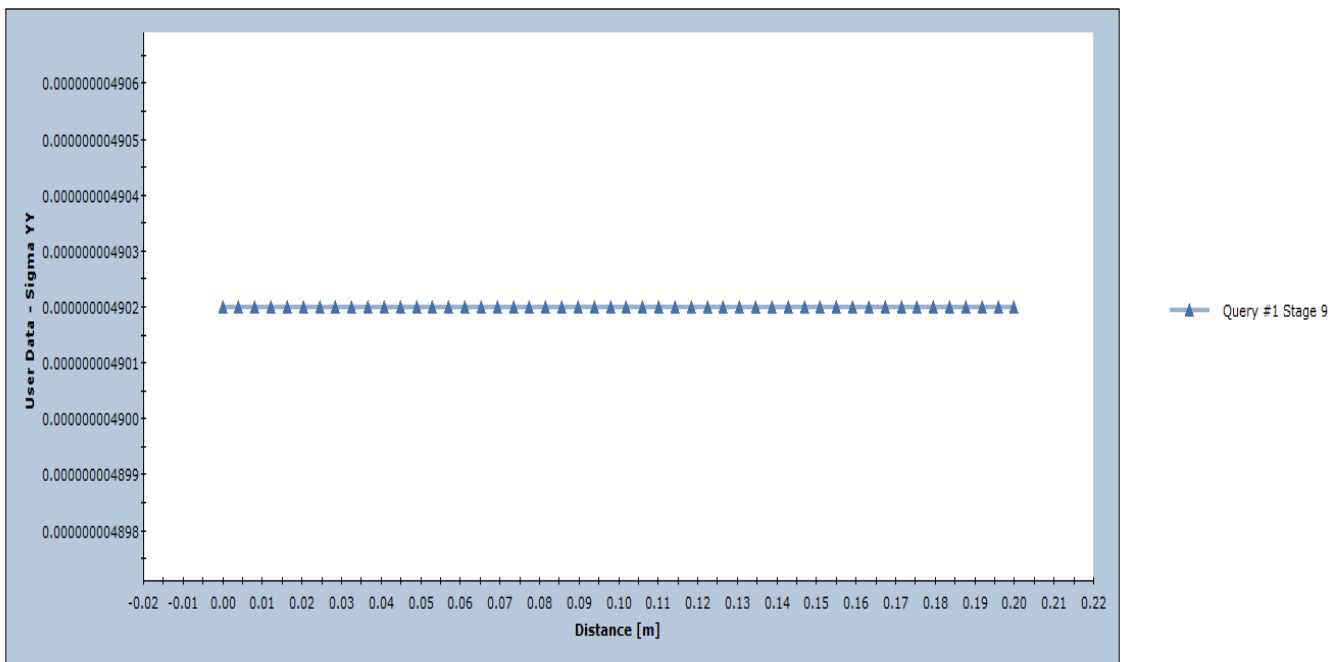
Stage 9: Διατμητική αστοχία του μοντέλου και δημιουργία quarries με 50 σημεία.

Για την εμφάνιση των πληροφοριών της τάσης σε διαγραμματική μορφή επιλέγουμε το graphdata.



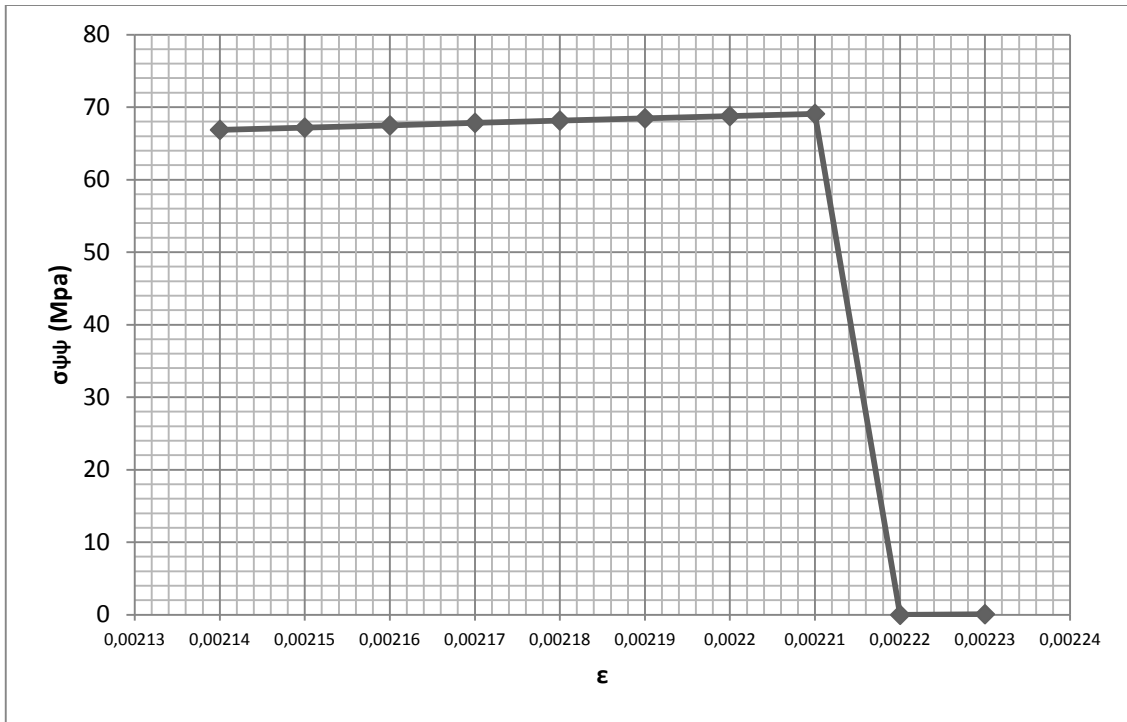
Stage 9

User Data - Sigma YY



Διάγραμμα 10. Τάση συναρτήσει της απόστασης

Από το διάγραμμα της τάσης συναρτήσει της απόστασης παρατηρείται ότι σε όλα τα σημεία της επιλεγμένης περιοχής η τάση είναι ίδια με τιμή $0,049$ MPa.

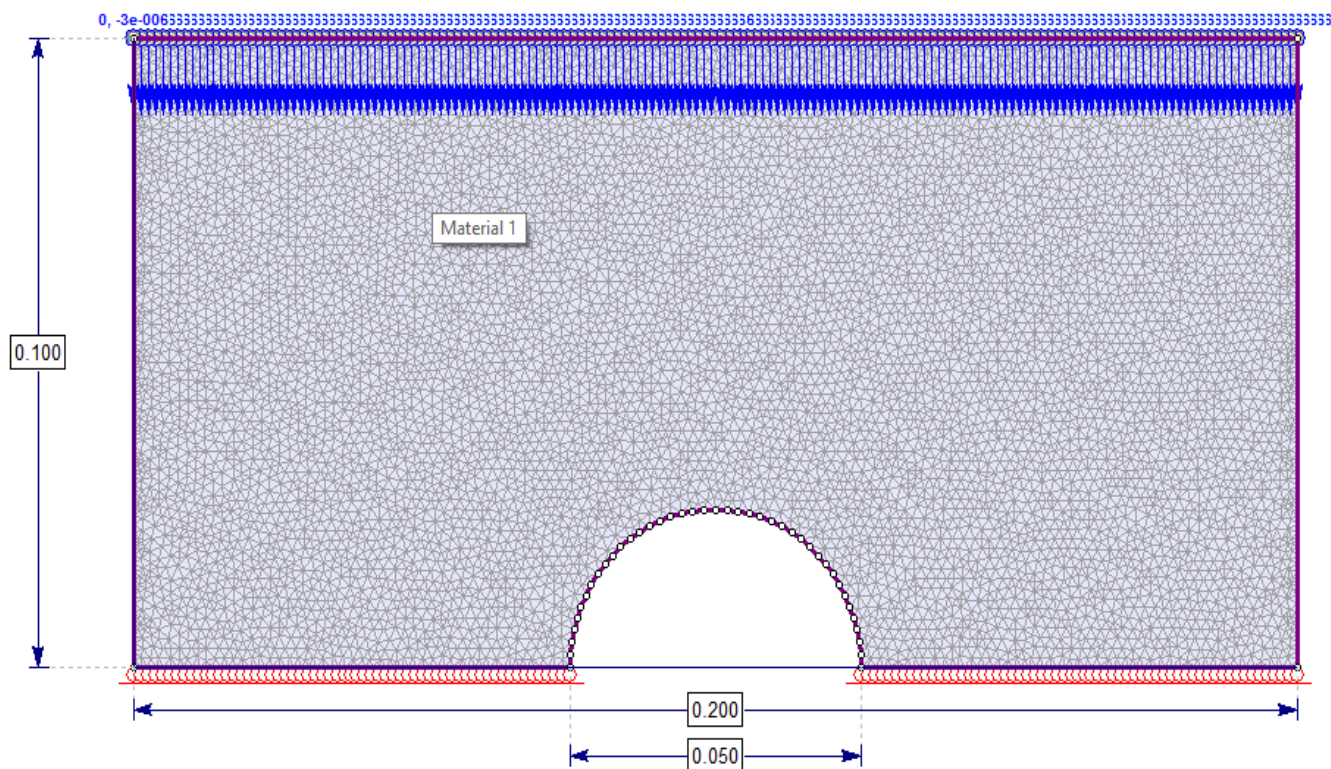


Διάγραμμα 11. Τάση - τροπή

Από το διάγραμμα τάσης τροπής επιβεβαιώνεται η ψαθυρότητα του υλικού. Η κατακόρυφη τάση αυξάνεται γραμμικά έως τα 69 MPa και για μετακίνηση 0,00298 m πέφτει απότομα στα 0,94 MPa.

3.2.Μοντέλο 1

Το συγκεκριμένο μοντέλο έχει τα ίδια μηχανικά χαρακτηριστικά του μοντέλου επιβεβαίωσης.



Εικόνα 21

Το μοντέλο είναι μήκους 0,2 m, ύψους 0,1 m ενώ η διάμετρος της κυκλική οπής είναι 0,050 m. Η μονοαξονική φόρτιση του μοντέλου προσομοιώνεται με πολύ μικρή κατακόρυφη μετακίνηση σε 50 στάδια. Στο πρώτο στάδιο η μετακίνηση της πλάκας είναι 3μm και αυτή η τιμή προστίθεται αναλογικά σε όλα τα υπόλοιπα στάδια της δοκιμής.

Τα στοιχεία της ανάλυσης παρατίθενται παρακάτω

Phase2 Analysis Information

Project2

- Analysis Type: Plane Strain
- Solver Type: Gaussian Elimination
- Units: Metric, stress as MPa

Project Summary

-
- File Name: model 1(0.05)
 - Last saved with Phase2 version: 8.014
 - Project Title: Project1

General Settings

-
- Number of Stages: 50

Analysis Options

-
- Maximum Number of Iterations: 500
 - Tolerance: 0.001
 - Number of Load Steps: Automatic
 - Convergence Type: Absolute Energy
 - Tensile Failure: Does Not Reduce Shear Strength
 - Joint tension reduces joint stiffness by a factor of 0.01

Groundwater Analysis

- Method: Piezometric Lines
- Pore Fluid Unit Weight: 0.00981 MN/m³
- Probability: None

Field Stress

Mesh

- Mesh type: graded
- Element type: 3 noded triangles
- Number of elements on Stage 1: 16135
- Number of nodes on Stage 1: 8308
- Number of elements on Stage 2: 16135
- Number of nodes on Stage 2: 8308
- Number of elements on Stage 3: 16135
- Number of nodes on Stage 3: 8308
- Number of elements on Stage 4: 16135
- Number of nodes on Stage 4: 8308
- Number of elements on Stage 5: 16135
- Number of nodes on Stage 5: 8308
- Number of elements on Stage 6: 16135
- Number of nodes on Stage 6: 8308
- Number of elements on Stage 7: 16135
- Number of nodes on Stage 7: 8308
- Number of elements on Stage 8: 16135
- Number of nodes on Stage 8: 8308
- Number of elements on Stage 9: 16135
- Number of nodes on Stage 9: 8308
- Number of elements on Stage 10: 16135
- Number of nodes on Stage 10: 8308
- Number of elements on Stage 11: 16135
- Number of nodes on Stage 11: 8308

-
- Field stress: constant
 - Sigma one: 0 MPa (compression positive)
 - Sigma three: 0 MPa (compression positive)
 - Sigma Z: 0 MPa (compression positive)
 - Angle from the horizontal to sigma 1: 0 degrees (counter-clockwise)

- Number of elements on Stage 12: 16135
- Number of nodes on Stage 12: 8308
- Number of elements on Stage 13: 16135
- Number of nodes on Stage 13: 8308
- Number of elements on Stage 14: 16135
- Number of nodes on Stage 14: 8308
- Number of elements on Stage 15: 16135
- Number of nodes on Stage 15: 8308
- Number of elements on Stage 16: 16135
- Number of nodes on Stage 16: 8308
- Number of elements on Stage 17: 16135
- Number of nodes on Stage 17: 8308
- Number of elements on Stage 18: 16135
- Number of nodes on Stage 18: 8308
- Number of elements on Stage 19: 16135
- Number of nodes on Stage 19: 8308
- Number of elements on Stage 20: 16135
- Number of nodes on Stage 20: 8308
- Number of elements on Stage 21: 16135
- Number of nodes on Stage 21: 8308
- Number of elements on Stage 22: 16135
- Number of nodes on Stage 22: 8308
- Number of elements on Stage 23: 16135
- Number of nodes on Stage 23: 8308
- Number of elements on Stage 24: 16135

- Number of nodes on Stage 24: 8308
- Number of elements on Stage 25: 16135
- Number of nodes on Stage 25: 8308
- Number of elements on Stage 26: 16135
- Number of nodes on Stage 26: 8308
- Number of elements on Stage 27: 16135
- Number of nodes on Stage 27: 8308
- Number of elements on Stage 28: 16135
- Number of nodes on Stage 28: 8308
- Number of elements on Stage 29: 16135
- Number of nodes on Stage 29: 8308
- Number of elements on Stage 30: 16135
- Number of nodes on Stage 30: 8308
- Number of elements on Stage 31: 16135
- Number of nodes on Stage 31: 8308
- Number of elements on Stage 32: 16135
- Number of nodes on Stage 32: 8308
- Number of elements on Stage 33: 16135
- Number of nodes on Stage 33: 8308
- Number of elements on Stage 34: 16135
- Number of nodes on Stage 34: 8308
- Number of elements on Stage 35: 16135
- Number of nodes on Stage 35: 8308
- Number of elements on Stage 36: 16135
- Number of nodes on Stage 36: 8308
- Number of elements on Stage 37: 16135
- Number of nodes on Stage 37: 8308

Mesh Quality

-
- All elements are of good quality


Poor quality elements defined as:

- Number of elements on Stage 38: 16135
- Number of nodes on Stage 38: 8308
- Number of elements on Stage 39: 16135
- Number of nodes on Stage 39: 8308
- Number of elements on Stage 40: 16135
- Number of nodes on Stage 40: 8308
- Number of elements on Stage 41: 16135
- Number of nodes on Stage 41: 8308
- Number of elements on Stage 42: 16135
- Number of nodes on Stage 42: 8308
- Number of elements on Stage 43: 16135
- Number of nodes on Stage 43: 8308
- Number of elements on Stage 44: 16135
- Number of nodes on Stage 44: 8308
- Number of elements on Stage 45: 16135
- Number of nodes on Stage 45: 8308
- Number of elements on Stage 46: 16135
- Number of nodes on Stage 46: 8308
- Number of elements on Stage 47: 16135
- Number of nodes on Stage 47: 8308
- Number of elements on Stage 48: 16135
- Number of nodes on Stage 48: 8308
- Number of elements on Stage 49: 16135
- Number of nodes on Stage 49: 8308
- Number of elements on Stage 50: 16135
- Number of nodes on Stage 50: 8308

- Side length ratio (maximum / minimum) > 30.00
- Minimum interior angle < 2.0 degrees
- Maximum interior angle > 175.0 degrees

Material Properties

Material: Material 1

| | |
|---------------------------|---|
| Color |  |
| Initial element loading | field stress only |
| Elastic type | isotropic |
| Young's modulus | 30000 MPa |
| Poisson's ratio | 0.2 |
| Failure criterion | Mohr-Coulomb |
| Peak tensile strength | 5 MPa |
| Residual tensile strength | 0 MPa |
| Peak friction angle | 35 degrees |
| Peak cohesion | 18 MPa |
| Material type | Plastic |
| Dilation Angle | 0 degrees |
| Residual Friction Angle | 35 degrees |
| Residual Cohesion | 0 MPa |
| Piezo to use | None |
| Ru value | 0 |

List of All Coordinates

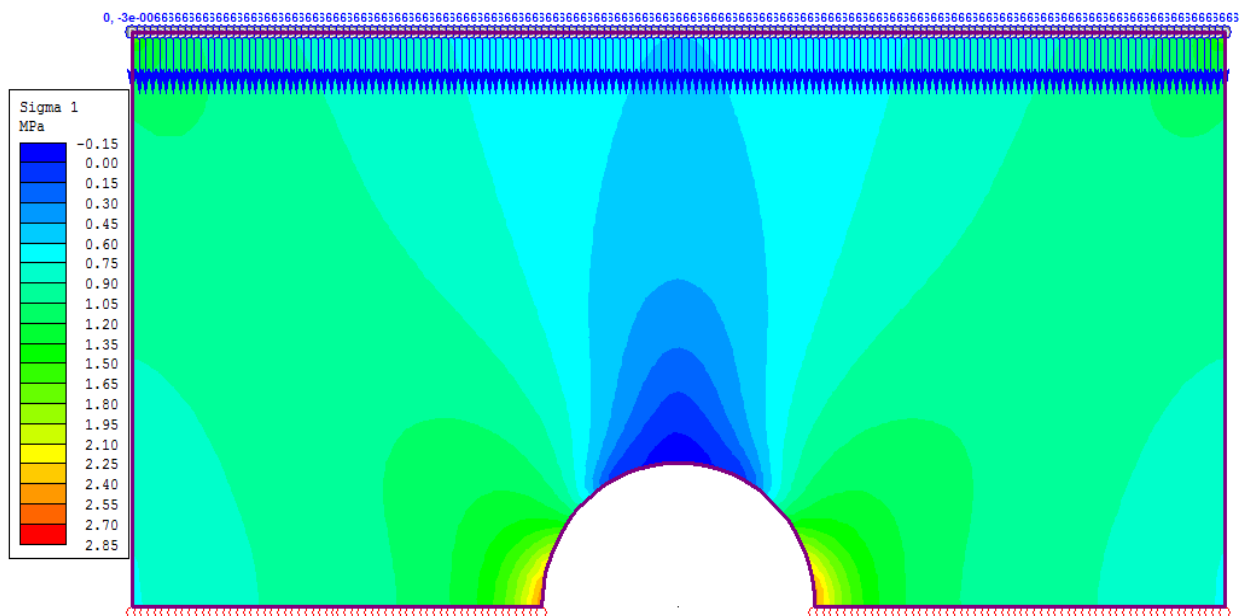
External boundary

| X | Y |
|-------------|------------|
| -0.1 | 0 |
| -0.025 | 0 |
| -0.0249229 | 0.00196148 |
| -0.0246922 | 0.00391086 |
| -0.0243092 | 0.00583613 |
| -0.0237764 | 0.00772542 |
| -0.023097 | 0.00956709 |
| -0.0222752 | 0.0113498 |
| -0.021316 | 0.0130625 |
| -0.0202254 | 0.0146946 |
| -0.0190101 | 0.0162362 |
| -0.0176777 | 0.0176777 |
| -0.0162362 | 0.0190101 |
| -0.0146946 | 0.0202254 |
| -0.0130625 | 0.021316 |
| -0.0113498 | 0.0222752 |
| -0.00956709 | 0.023097 |
| -0.00772542 | 0.0237764 |
| -0.00583613 | 0.0243092 |
| -0.00391086 | 0.0246922 |

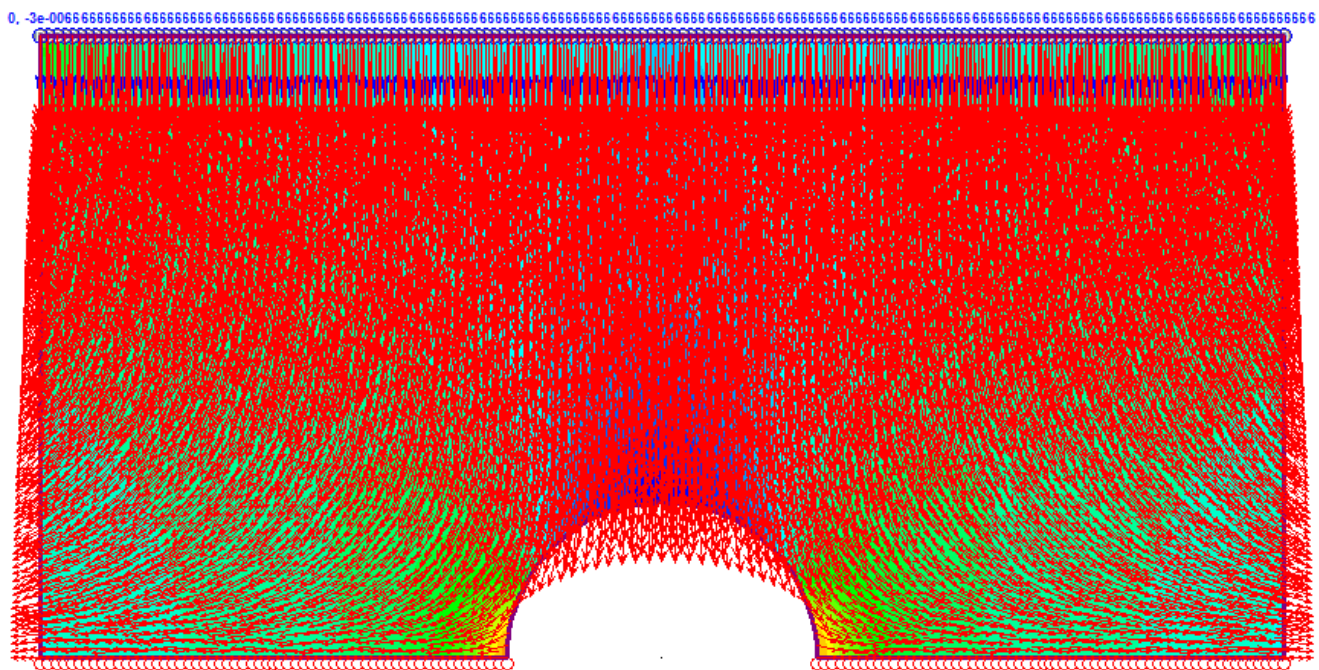
| | |
|--------------|------------|
| -0.00196148 | 0.0249229 |
| 1.53081e-018 | 0.025 |
| 0.00196148 | 0.0249229 |
| 0.00391086 | 0.0246922 |
| 0.00583613 | 0.0243092 |
| 0.00772542 | 0.0237764 |
| 0.00956709 | 0.023097 |
| 0.0113498 | 0.0222752 |
| 0.0130625 | 0.021316 |
| 0.0146946 | 0.0202254 |
| 0.0162362 | 0.0190101 |
| 0.0176777 | 0.0176777 |
| 0.0190101 | 0.0162362 |
| 0.0202254 | 0.0146946 |
| 0.021316 | 0.0130625 |
| 0.0222752 | 0.0113498 |
| 0.023097 | 0.00956709 |
| 0.0237764 | 0.00772542 |
| 0.0243092 | 0.00583613 |
| 0.0246922 | 0.00391086 |
| 0.0249229 | 0.00196148 |
| 0.025 | 0 |
| 0.1 | 0 |
| 0.1 | 0.1 |
| -0.1 | 0.1 |

3.2.1. Ανάλυση

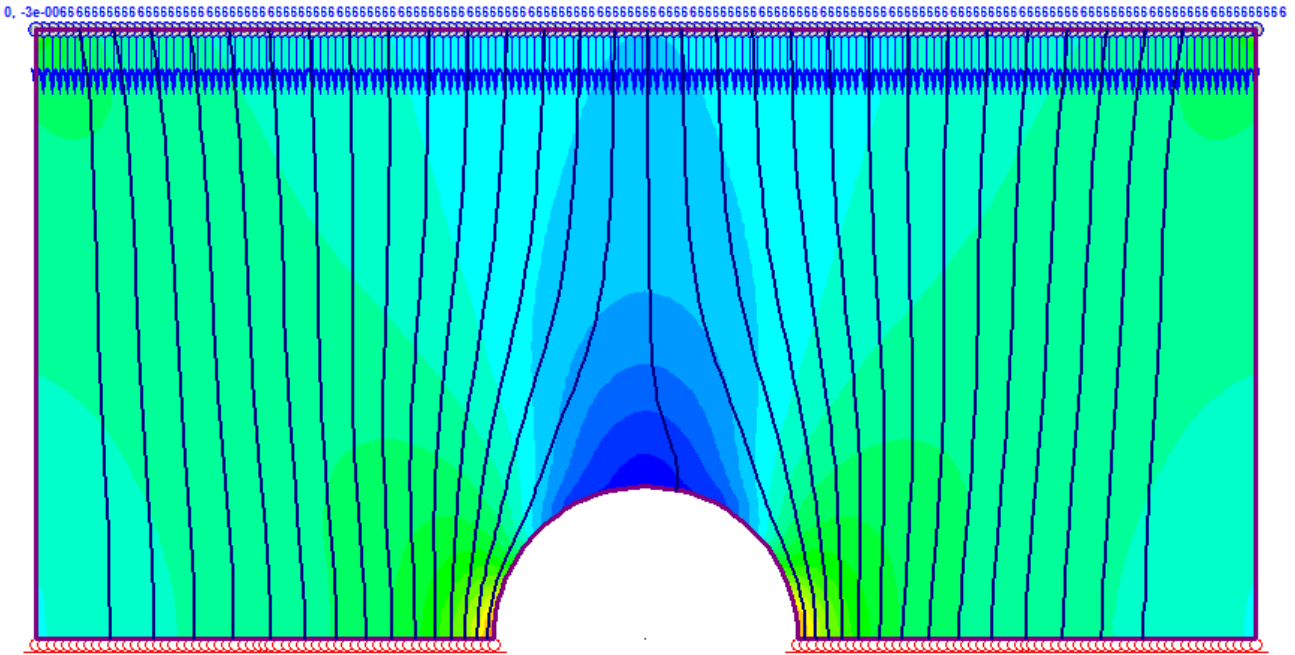
Στο 1^ο στάδιο της φόρτισης του μοντέλου η μέγιστη κύρια τάση $\sigma_{\psi 1\psi}$ παρουσιάζει μηδενικές προς αρνητικές τιμές, δηλαδή η τάση είναι εφελκυστική, πάνω από την κυκλική οπή, ενώ στις παρειές επικρατούν οι υψηλότερες θλιπτικές τάσεις. Αυτό εξηγείται από την παρακάτω εικόνα των ισοτασικών καμπύλων. Οι τάσεις πάνω από το κυκλικό άνοιγμα αλλάζουν διεύθυνση και συγκεντρώνονται στις παρειές της οπής προκαλώντας έτσι την τοπική αύξηση της θλιπτικής τάσης και την τοπική αύξηση της εφελκυστικής τάσης πάνω από την οπή. Επίσης παρατηρείται ότι τα διανύσματα της παραμόρφωσης ακολουθούν και αυτά το εντατικό πεδίο που έχει δημιουργηθεί.



Stage 1: Κατανομή τάσης $\sigma_{\psi 1\psi}$ για μετακίνηση πλαισίου 3 μm .

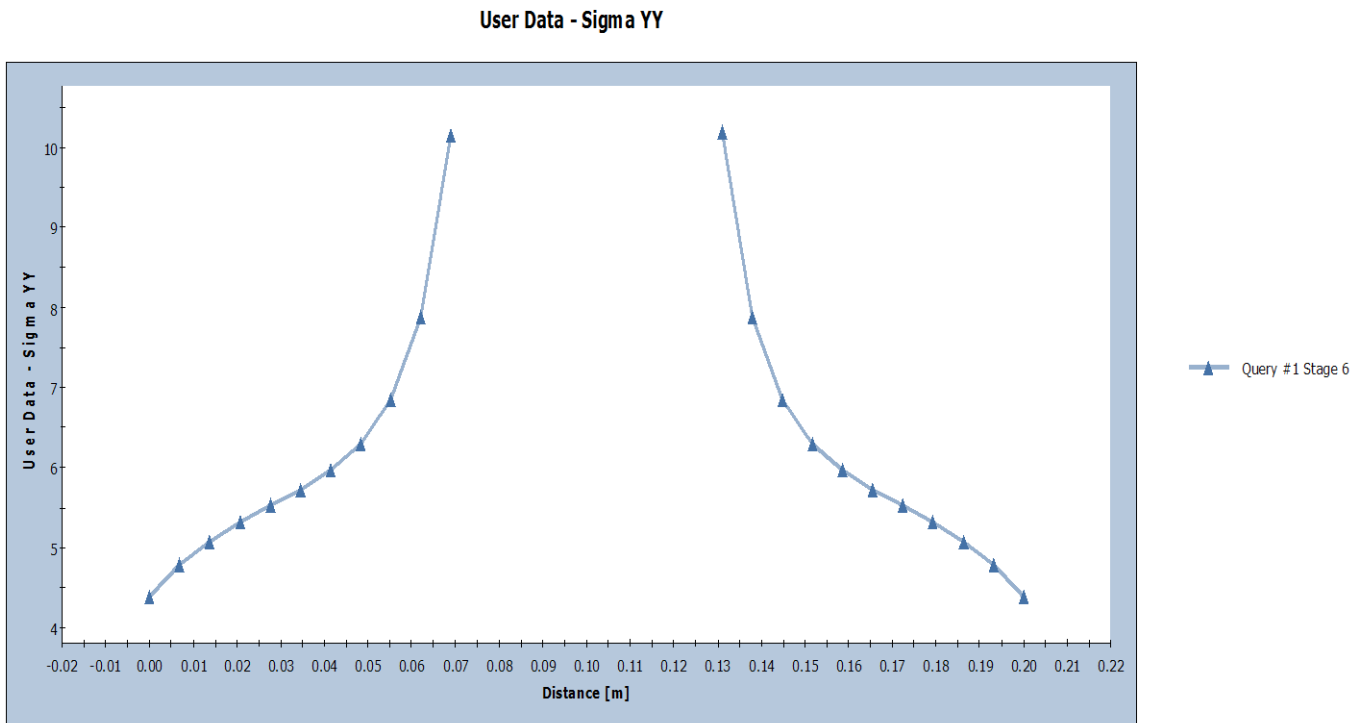


Stage 1: Διανύσματα μετατόπισης



Stage1: Ισοτασικές καμπύλες

Από το 1^ο έως και το 6^ο στάδιο δεν παρατηρείται κάποιου είδους αστοχία. Από τα διαγράμματα φαίνεται ότι η κατακόρυφη τάση αυξάνεται ραγδαία οριζόντια του ανοίγματος. Η μέγιστη εμφανίζεται στην περιφέρεια της σπής.



Διάγραμμα 12.Κατακόρυφη τάση σε σχέση με την απόσταση από το κέντρο της σπής.

Η πρώτη εφελκυστική ρωγή εμφανίζεται στο στάδιο 7, για μετακίνηση πλαισίου 0,21μm, πάνω από την κυκλική οπή. Για τον υπολογισμό της τάσης που αντιστοιχεί σε αυτό το συμβάν δημιουργούμε query στη βάση του μοντέλου και υπολογίζουμε τη μέση τάση. Για την υπολογισμό της οριζόντιας τάσης σ_{xx} το query τοποθετείται κάθετα της οπής.

Η εφελκυστική ρωγμάτωση εντοπίζεται στο 7^ο στάδιο οπότε γίνεται η υπόθεση ότι η αντίστοιχη κατακόρυφη και οριζόντια τάση σχηματισμού της είναι ο μέσος όρος των σταδίων 6 και 7.

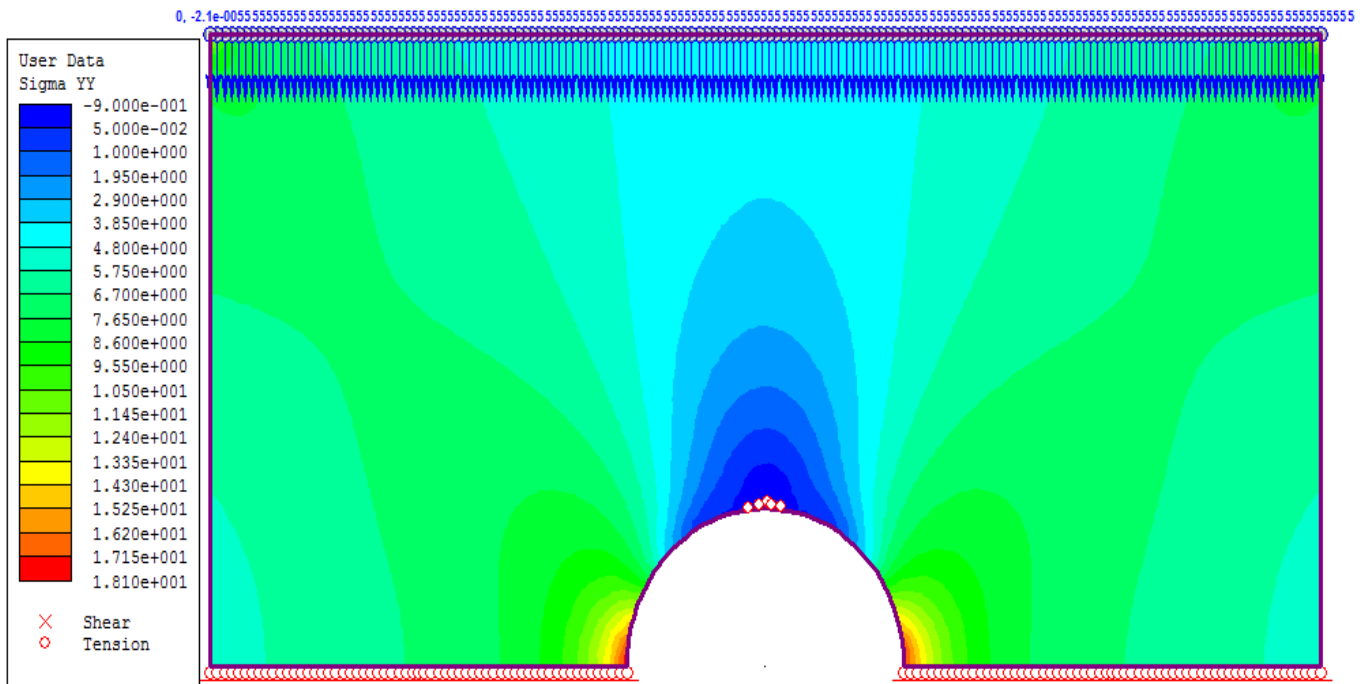
User Data – Sigma YY

| Query #1 Stage 6 | | | | Query #1 Stage 7 | | | |
|---------------------|---|-----------------|-------------------------------|---------------------|---|-----------------|----------------------------|
| X | Y | Distance [m] | User Data – Sigma YY | X | Y | Distance [m] | User Data – Sigma YY |
| -0,1 | 0 | 0 | 4,3935 | -0,1 | 0 | 0 | 5,1167 |
| -0,0931034 | 0 | 0,0069 | 4,78312 | -0,09310345 | 0 | 0,0069 | 5,57341094 |
| -0,0862069 | 0 | 0,01379 | 5,07737 | -0,0862069 | 0 | 0,01379 | 5,91839567 |
| -0,0793103 | 0 | 0,02069 | 5,31739 | -0,07931034 | 0 | 0,02069 | 6,19969175 |
| -0,0724138 | 0 | 0,02759 | 5,52726 | -0,07241379 | 0 | 0,02759 | 6,44553031 |
| -0,0655172 | 0 | 0,03448 | 5,72236 | -0,06551724 | 0 | 0,03448 | 6,67386041 |
| -0,0586207 | 0 | 0,04138 | 5,97057 | -0,05862069 | 0 | 0,04138 | 6,96426185 |
| -0,0517241 | 0 | 0,04828 | 6,30021 | -0,05172414 | 0 | 0,04828 | 7,34978212 |
| -0,0448276 | 0 | 0,05517 | 6,85463 | -0,04482759 | 0 | 0,05517 | 7,99774949 |
| -0,037931 | 0 | 0,06207 | 7,87366 | -0,03793103 | 0 | 0,06207 | 9,18784523 |
| -0,0310345 | 0 | 0,06897 | 10,1553 | -0,03103448 | 0 | 0,06897 | 11,8496161 |
| -0,0241379 | 0 | 0,07586 | | -0,02413793 | 0 | 0,07586 | |
| -0,0172414 | 0 | 0,08276 | | -0,01724138 | 0 | 0,08276 | |
| -0,0103448 | 0 | 0,08966 | | -0,01034483 | 0 | 0,08966 | |
| -0,0034483 | 0 | 0,09655 | | -0,00344828 | 0 | 0,09655 | |
| 0,0034483 | 0 | 0,10345 | | 0,003448276 | 0 | 0,10345 | |
| 0,0103448 | 0 | 0,11034 | | 0,010344828 | 0 | 0,11034 | |
| 0,0172414 | 0 | 0,11724 | | 0,017241379 | 0 | 0,11724 | |
| 0,0241379 | 0 | 0,12414 | | 0,024137931 | 0 | 0,12414 | |
| 0,0310345 | 0 | 0,13103 | 10,1798 | 0,031034483 | 0 | 0,13103 | 11,8787836 |
| 0,037931 | 0 | 0,13793 | 7,87702 | 0,037931034 | 0 | 0,13793 | 9,19214429 |
| 0,0448276 | 0 | 0,14483 | 6,84386 | 0,044827586 | 0 | 0,14483 | 7,98537542 |
| 0,0517241 | 0 | 0,15172 | 6,30342 | 0,051724138 | 0 | 0,15172 | 7,35357013 |
| 0,0586207 | 0 | 0,15862 | 5,96672 | 0,05862069 | 0 | 0,15862 | 6,95975704 |
| 0,0655172 | 0 | 0,16552 | 5,72281 | 0,065517241 | 0 | 0,16552 | 6,67437186 |
| 0,0724138 | 0 | 0,17241 | 5,52692 | 0,072413793 | 0 | 0,17241 | 6,44503226 |
| 0,0793103 | 0 | 0,17931 | 5,3162 | 0,079310345 | 0 | 0,17931 | 6,19812018 |
| 0,0862069 | 0 | 0,18621 | 5,08102 | 0,086206897 | 0 | 0,18621 | 5,92245166 |
| 0,0931034 | 0 | 0,1931 | 4,78126 | 0,093103448 | 0 | 0,1931 | 5,57095795 |

| | | | | | | | | |
|-----|---|-----------------------------------|----------------|--|-----|---|-----------------------------------|-------------------|
| 0,1 | 0 | 0,2 | 4,3936 | | 0,1 | 0 | 0,2 | 5,1164 |
| | | | | | | | | |
| | | average σ_{ψψ} | 6,18036 | | | | average σ_{ψψ} | 7,20790038 |

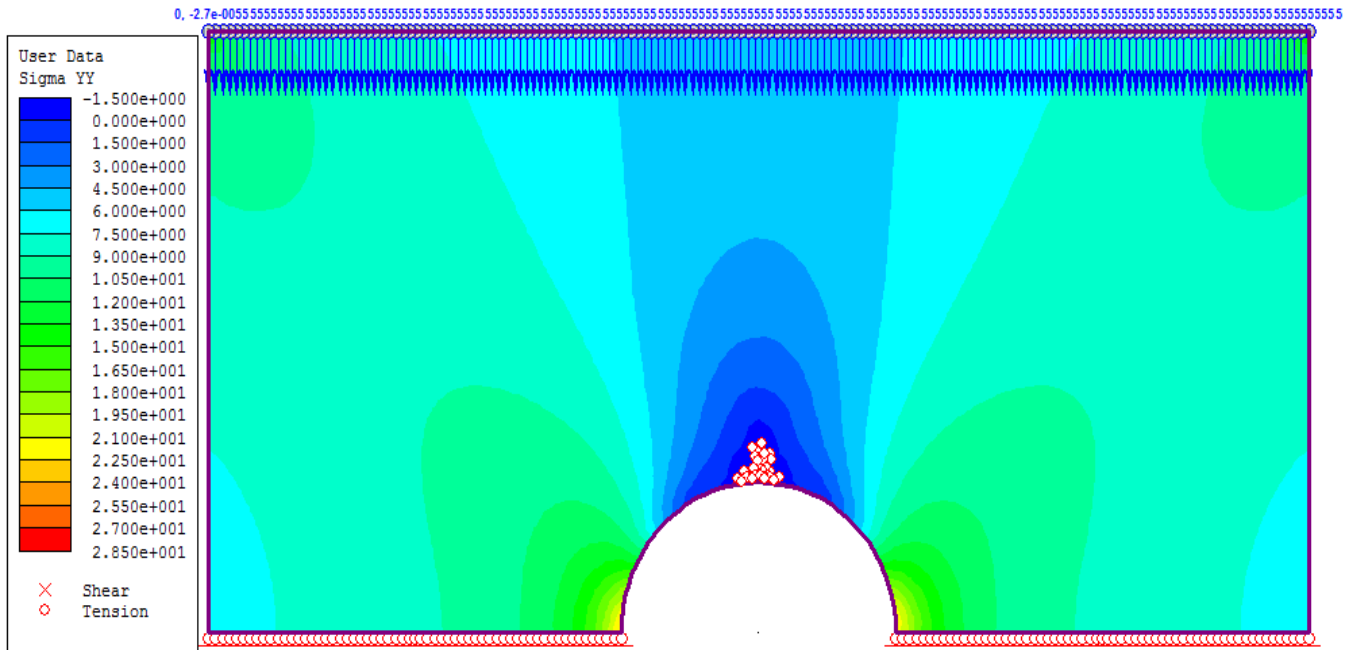
Πίνακας 2.

Άρα η τάση $\sigma_{\psi\psi}$ που αντιστοιχεί στην εμφάνιση των πρώτων εφελκυστικών ρωγμών είναι **6,69 MPa**.



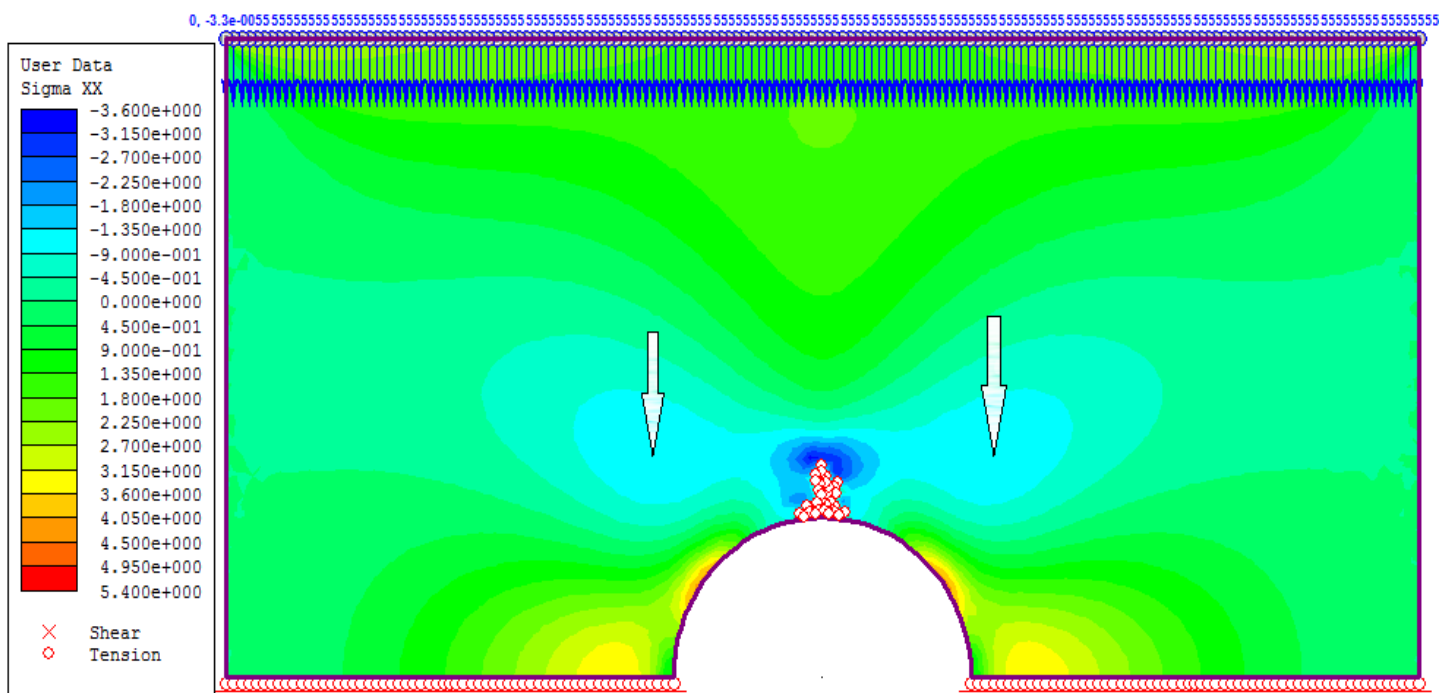
Stage 7: Εμφάνιση πρώτης εφελκυστικής αστοχίας

Στα επόμενα στάδια με περαιτέρω μετακίνηση του πλαισίου παρατηρείται η επέκταση προς τα πάνω της αρχικής εφελκυστικής ρωγμής.

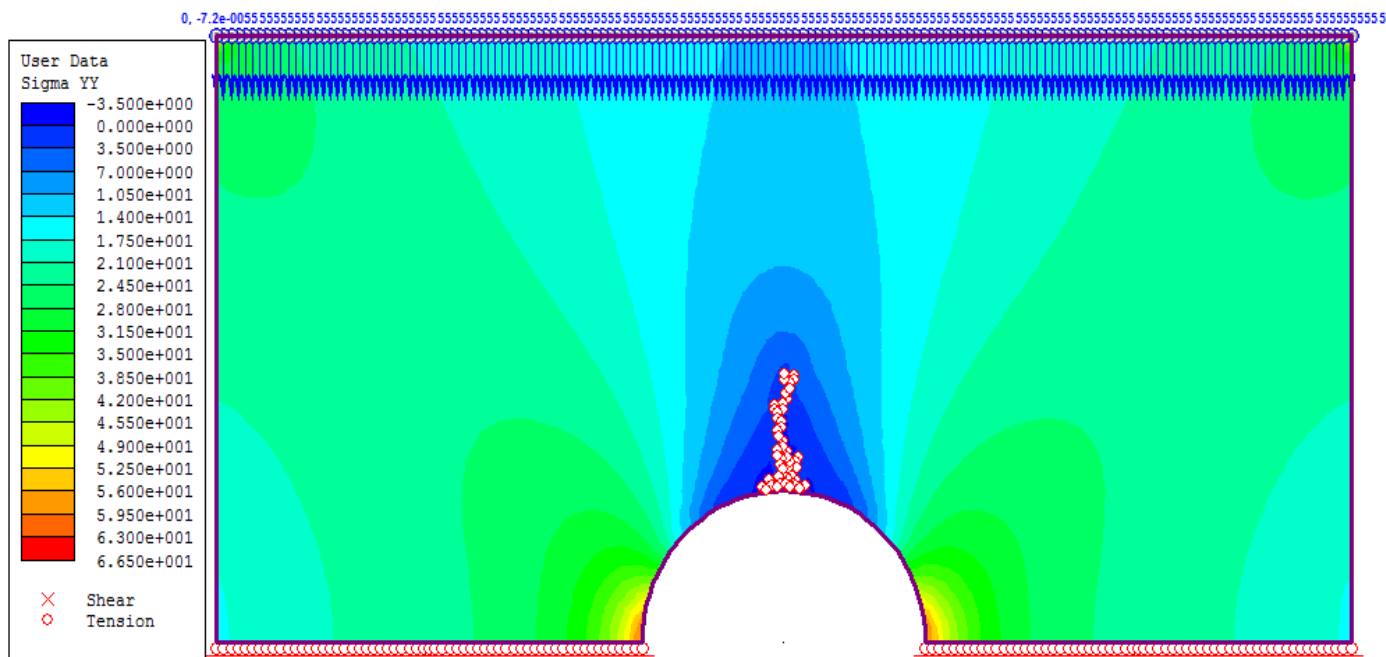


Stage 9: Επέκταση εφελκυστικής ρωγμής για μετακίνηση 0,27 μ m

Παρατηρείται κατοπτρικά του ανοίγματος ένα εφελκυστικό πεδίο οριζόντιων τάσεων, γύρω από την εφελκυστική ρωγμάτωση, το οποίο γίνεται πιο έντονο με την πάροδο των σταδίων.

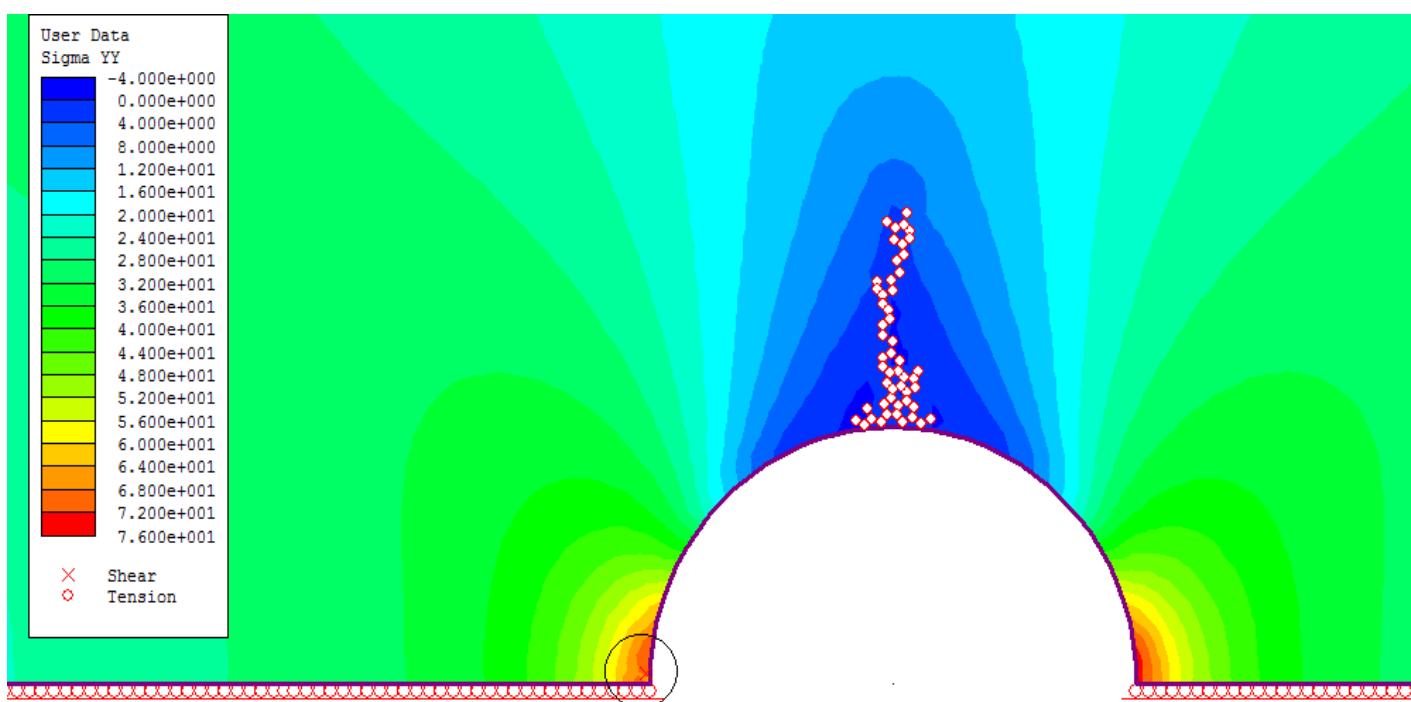


Stage 11: Περαιτέρω αύξησης της σ_{xx} στις μαρκαρισμένες περιοχές



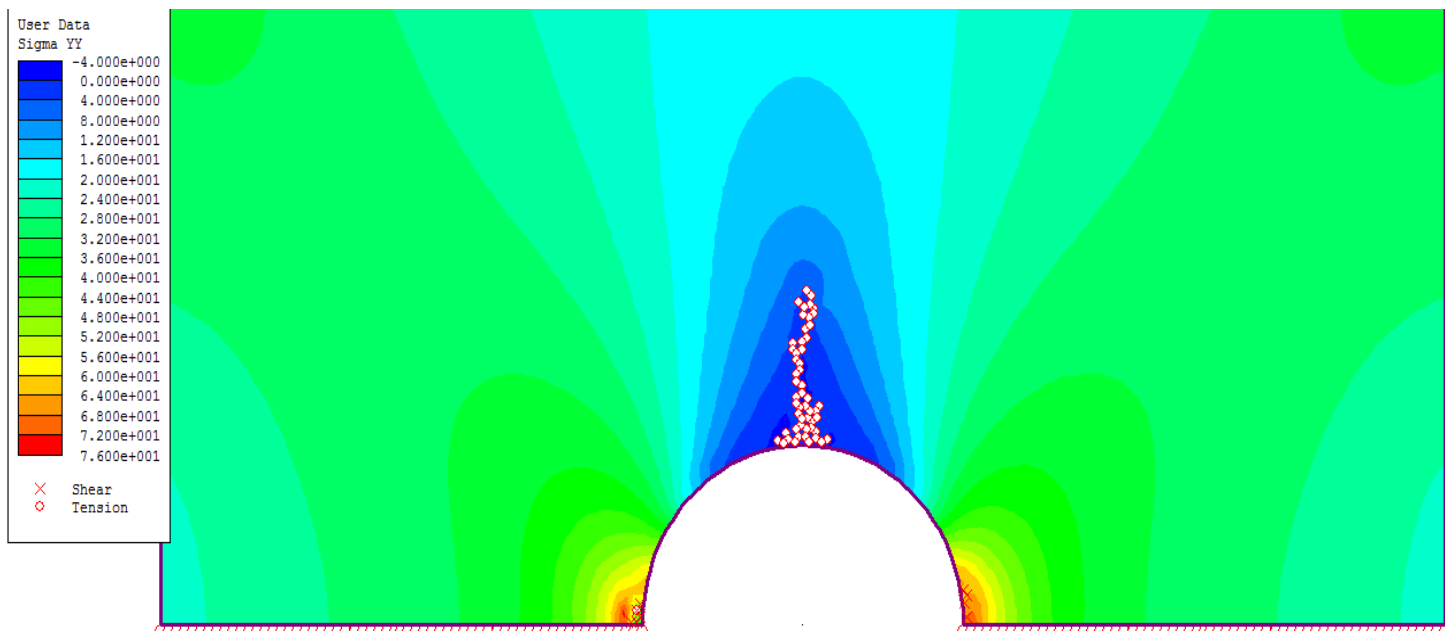
Stage24: Επέκταση της εφελκυστικής ρωγμής

Στο στάδιο 30 για μετακίνηση πλαισίου 0,9μm εμφανίζεται αστοχία λόγω διάτμησης στα αριστερά της οπής. Η κατακόρυφη τάση σ_{yy} που αντιστοιχεί σε αυτό το συμβάν είναι 30,2 MPa. Παράλληλα η εφελκυστική ρωγμή κάθετα της οπής επεκτείνεται περαιτέρω.



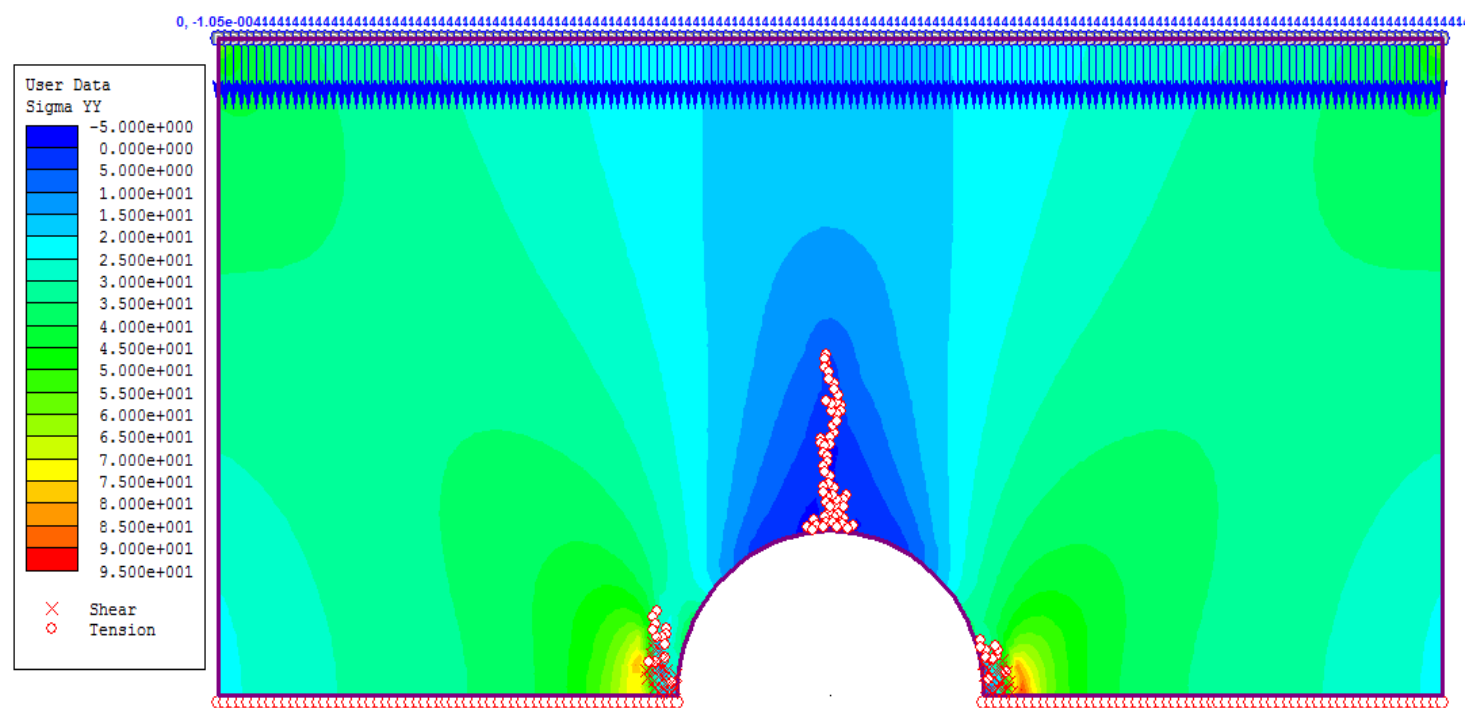
Stage 30: Διατμητική αστοχία αριστερά της οπής

Από αυτό το στάδιο παρατηρούνται διαδοχικές αστοχίες στις παρειές του ανοίγματος.



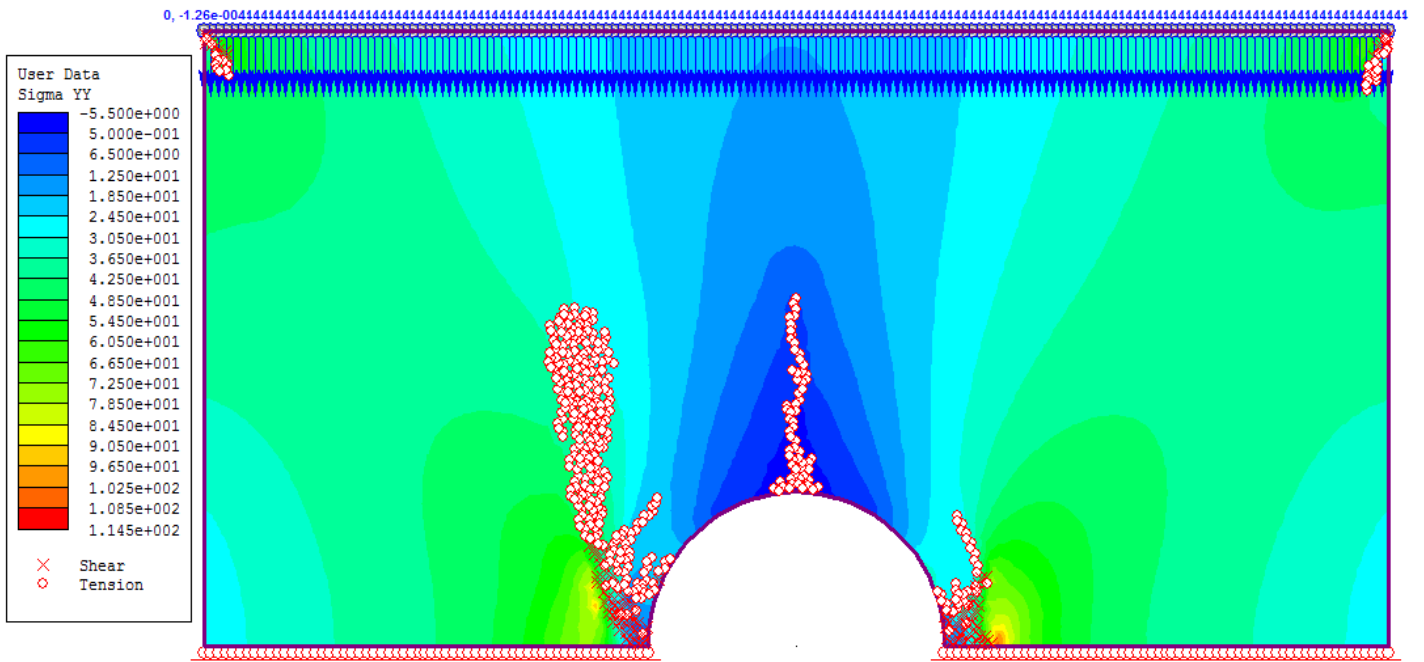
Stage 31: Αύξηση διατμητικών αστοχιών αριστερά και δεξιά της οπής

Σταδιακά αρχίζουν να συντελούνται πλέον και εφελκυστικές αστοχίες στις παρειές της οπής μαζί με τις διατμητικές με κατεύθυνση προς το πλαίσιο. Η πρώτη απομονωμένη ρωγμάτωση εμφανίζεται στο στάδιο 34 σε αντίστοιχη τάση $\sigma_{\psi\psi}=35,8$ MPa.

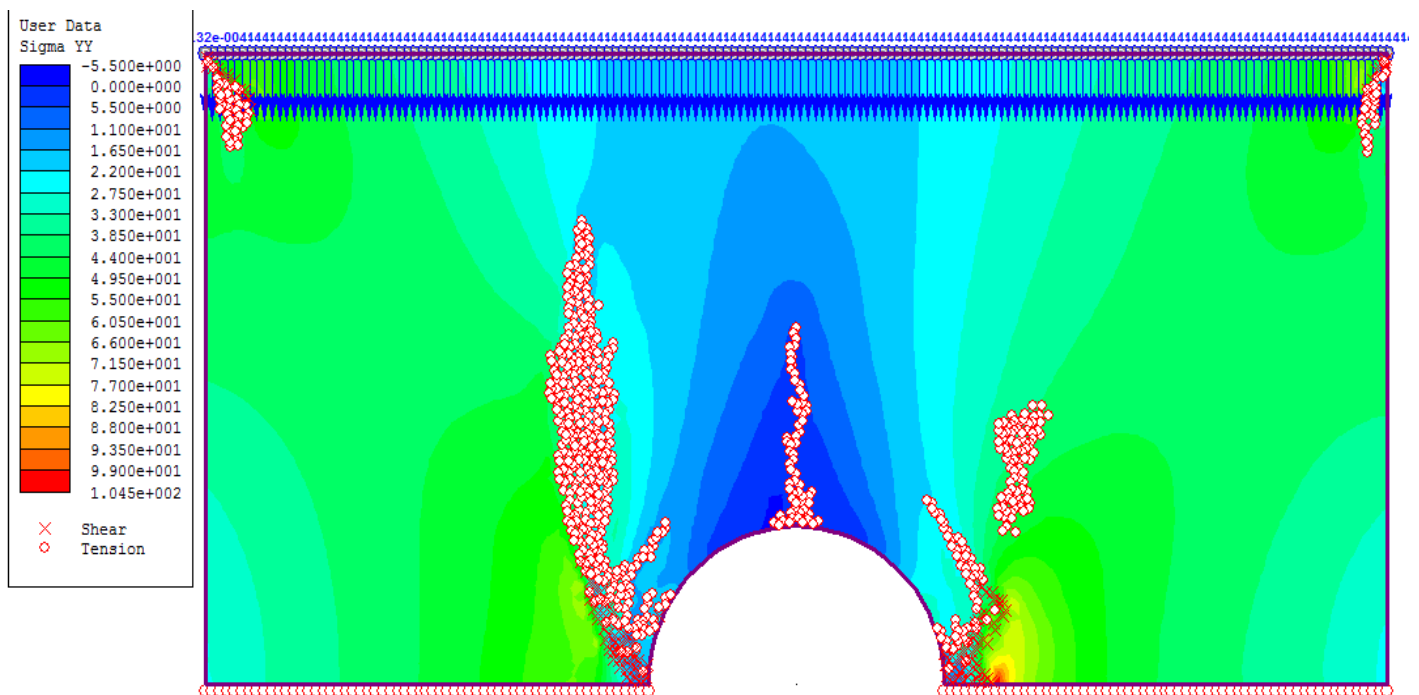


Stage 35: Επέκταση εφελκυστικών-απομονωμένων ρωγμών από αριστερά και δεξιά της οπής

Στο στάδιο 42 για μετακίνηση της πλάκας 126mm εμφανίζονται απομονωμένες ρωγμές, λόγω εφελκυσμού και διάτμησης στα όρια του μοντέλου με το πλαίσιο φόρτισης, καθώς και εφελκυστικές απομονωμένες ρωγμές αριστερά του ανοίγματος, οι οποίες ενώνονται με τις προηγούμενες.

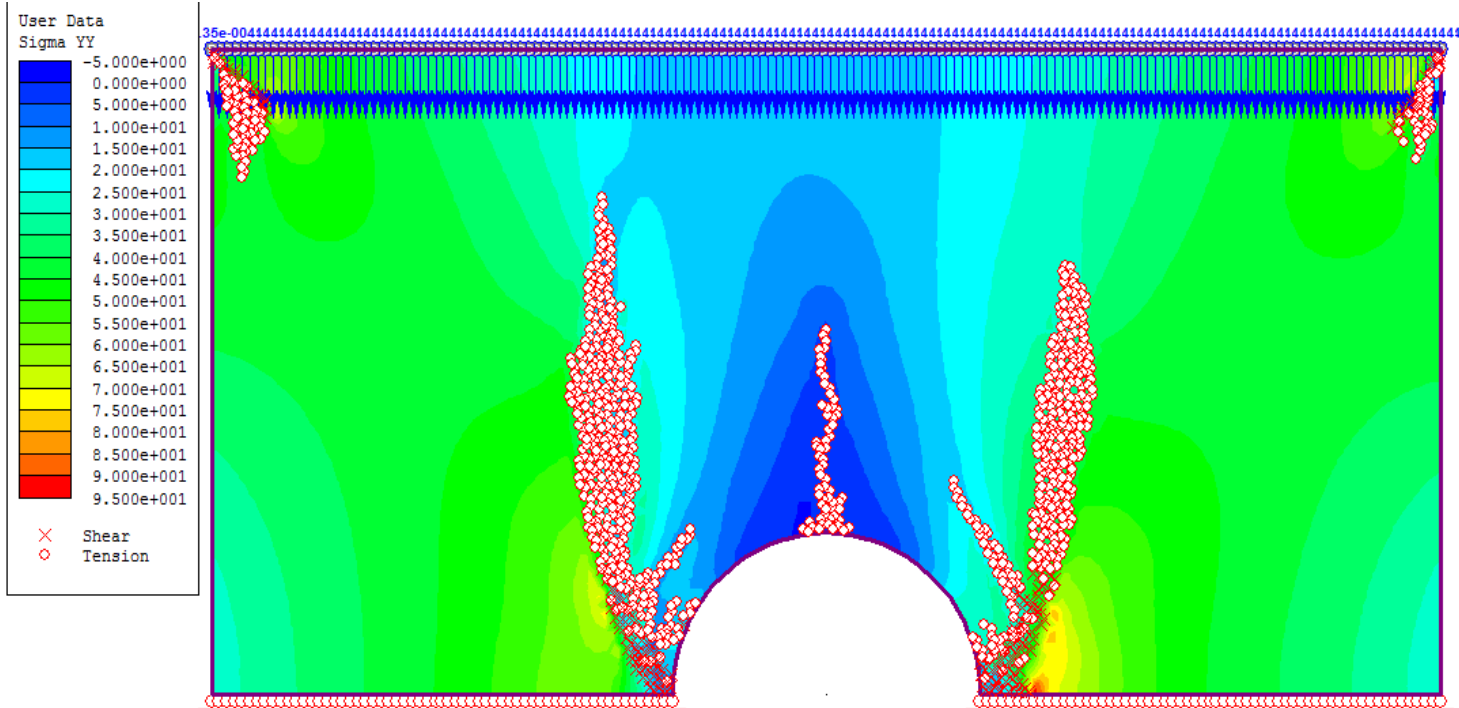


Stage 42: Απομονωμένες ρωγμές



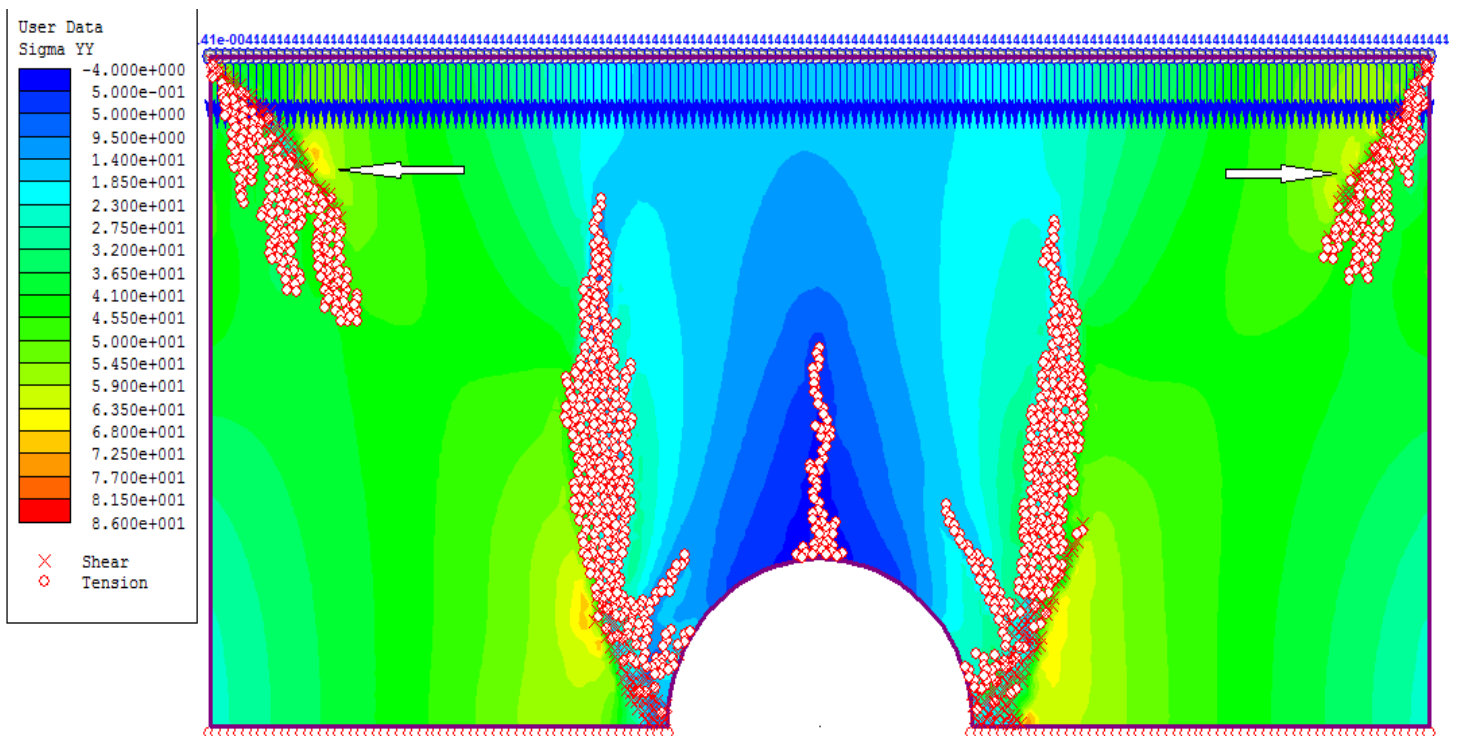
Stage 44: Απομονωμένες ρωγμές δεξιά της οπής

Η θραύση του μοντέλου συντελείται στο στάδιο 45 σε κατακόρυφη τάση $\sigma_{\gamma\eta} = 42,54$ MPa και για μετακίνηση πλαισίου 0,135mm. Μετά από αυτό το στάδιο η αντοχή του μοντέλου μειώνεται απότομα. Η μετατόπιση του πλαισίου συνεχίζεται και σε επόμενα στάδια για την παρατήρηση της διάδοσης των απομονωμένων ρωγμών.

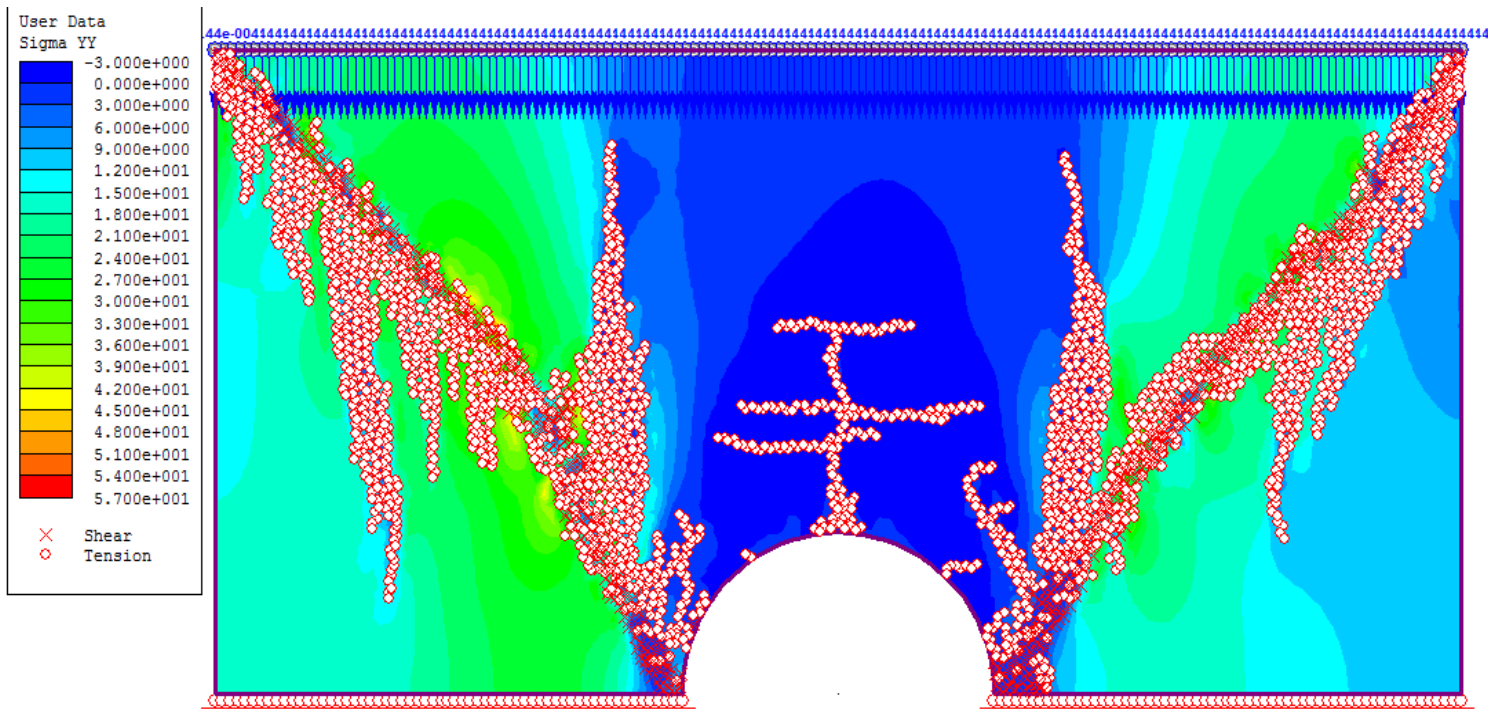


Stage 45: Συνένωση των ρωγμών δεξιά της οπής και τελική θραύση

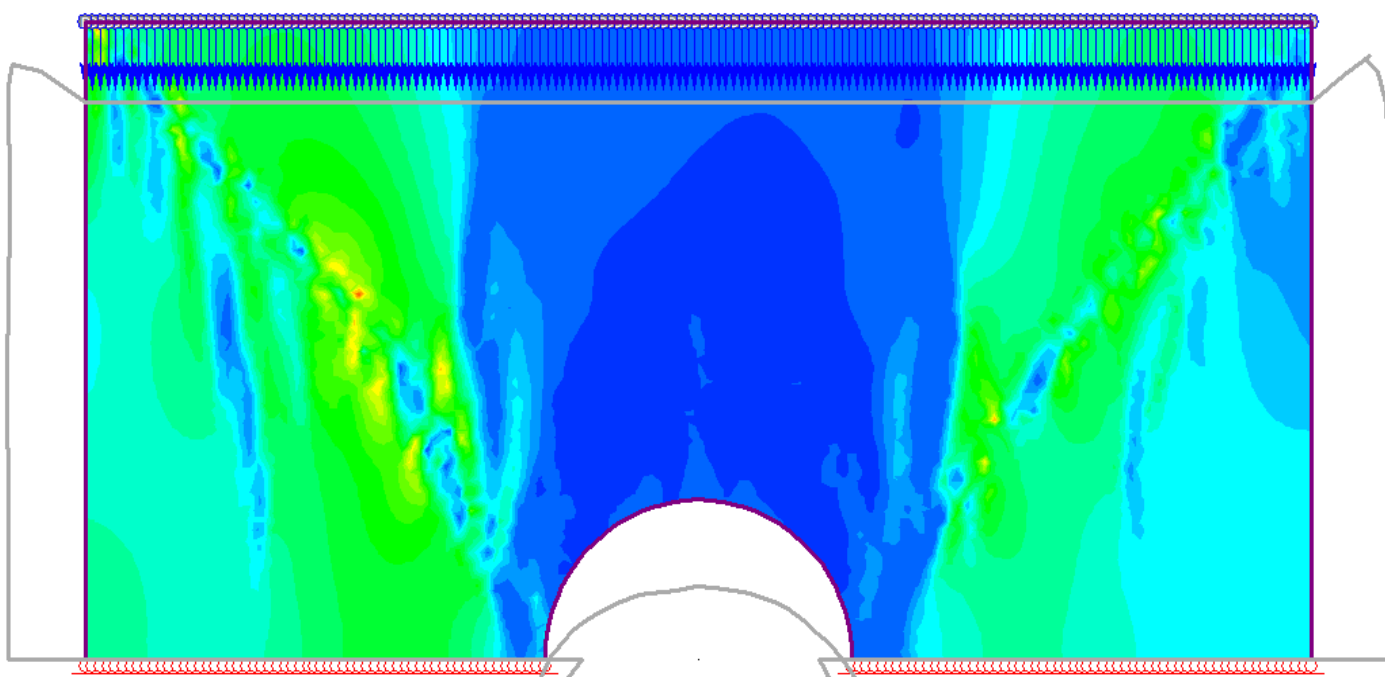
Στη συνέχεια στο στάδιο 47 οι διαμητικές αστοχίες στα άκρα του μοντέλου επεκτείνονται προς την οπή, ενώ κάτω από αυτές συντελούνται διαδοχικές εφελκυστικές αστοχίες λόγω σχετικής ολίσθησης.



Stage 47: Επέκταση απομονωμένων ρωγμών

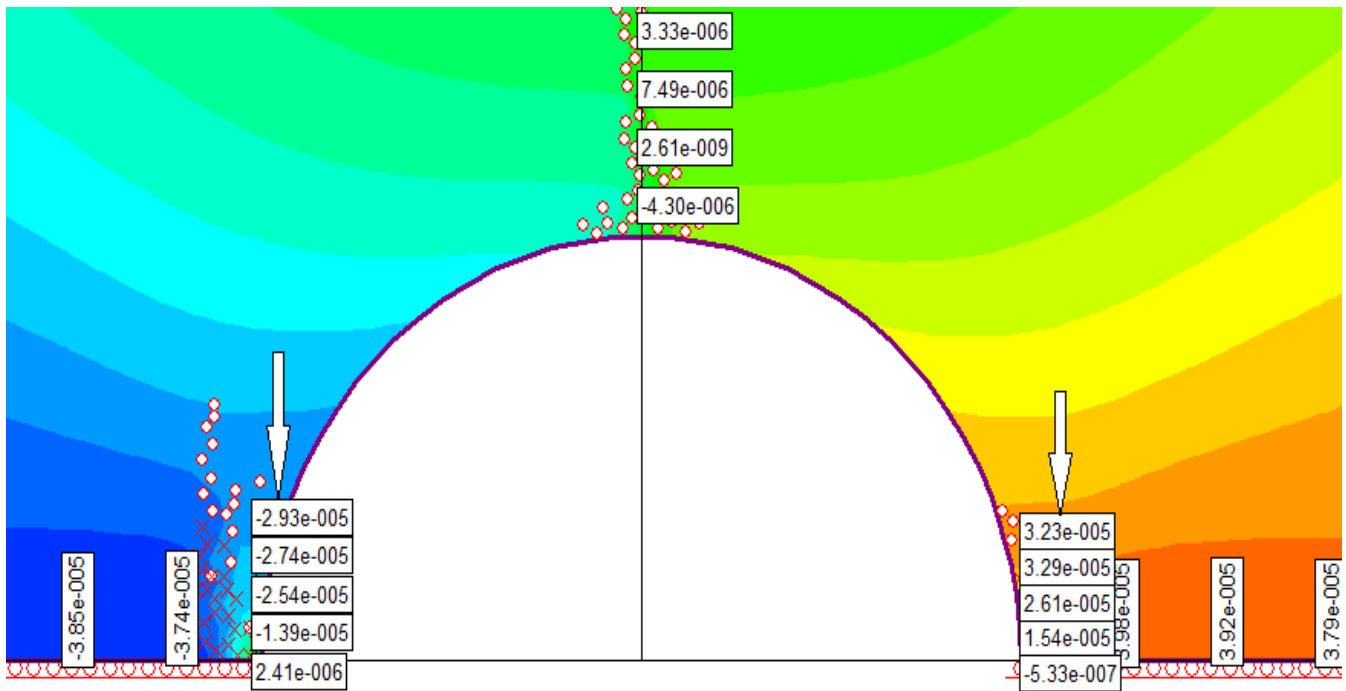


Stage 48: Κατοπτρική ένωση των ρωγματώσεων



Stage 50: Περίγραμμα της παραμόρφωσης του μοντέλου

Για τον εντοπισμό του φαινομένου slabbing εξετάζονται οι οριζόντιες μετακινήσεις οριακά στην οπή. Για να θεωρηθεί η ύπαρξη αυτού του φαινομένου αριστερά της οπής, οι μετακινήσεις θα πρέπει να έχουν θετικό πρόσημο, ενώ δεξιά από την οπή θα πρέπει να έχουν αρνητικό πρόσημο.



Εικόνα 16: Materialqueries οριακά της σπής για εύρεση οριζόντιων μετακινήσεων

Αριστερά της σπής:

| Query #3 Stage 35 | Query #3 Stage 36 | Query #3 Stage 37 | Query #3 Stage 38 |
|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| Horizontal Displacement [m] | Horizontal Displacement [m] | Horizontal Displacement [m] | Horizontal Displacement [m] |
| -2,50591E-06 | 2,40814E-06 | 6,7399E-06 | 1,03976E-05 |
| -1,59279E-05 | -1,3917E-05 | -1,21741E-05 | -1,15327E-05 |
| -2,57822E-05 | -2,5376E-05 | -2,44063E-05 | -2,43037E-05 |
| -2,71677E-05 | -2,7376E-05 | -2,65307E-05 | -2,59532E-05 |
| -2,86644E-05 | -2,92837E-05 | -2,95667E-05 | -2,96764E-05 |

Πίνακας 3.

Από το παραπάνω διάγραμμα φαίνεται ότι το slabbing αρχίζει από το στάδιο 36 με πρώτη οριζόντια μετακίνηση $2,40814 \cdot 10^{-6} \text{m}$.

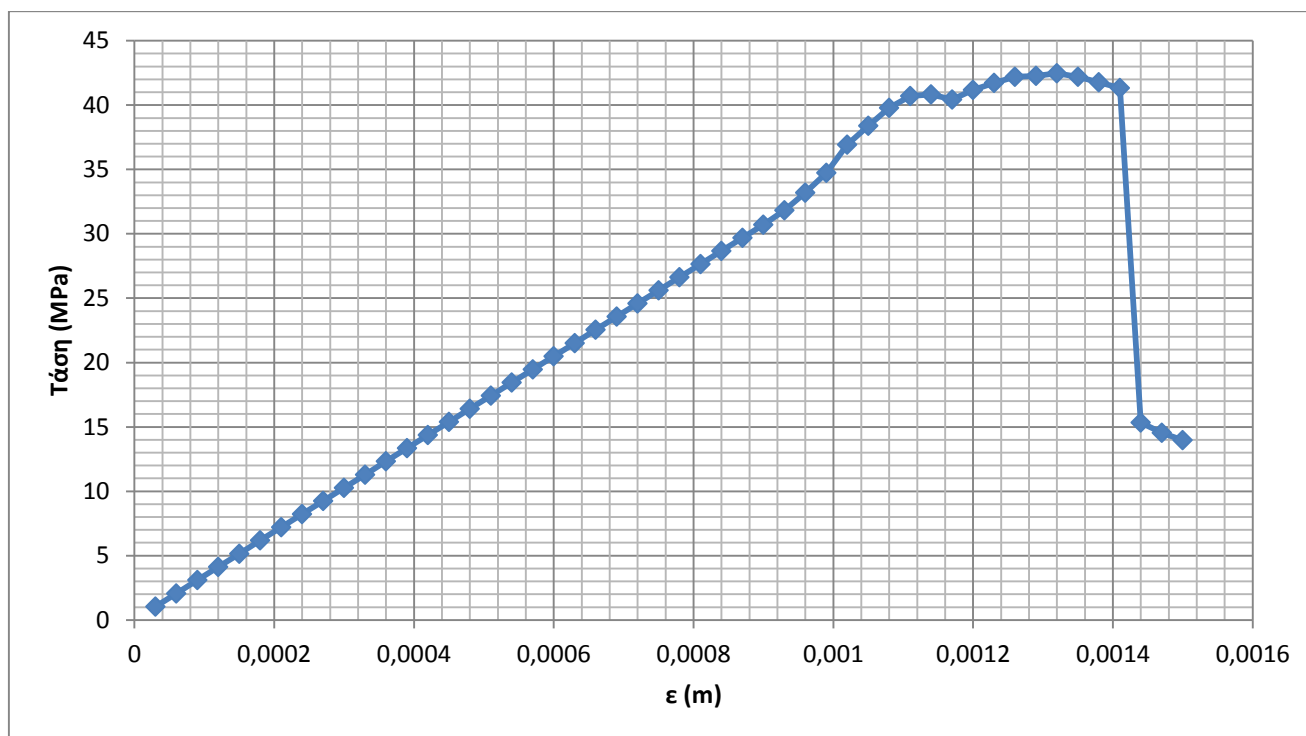
Δεξιά της σπής:

| Query #4 Stage 35 | Query #4 Stage 36 | Query #4 Stage 37 | Query #4 Stage 38 |
|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| Horizontal Displacement [m] | Horizontal Displacement [m] | Horizontal Displacement [m] | Horizontal Displacement [m] |
| 4,16548E-06 | -5,33281E-07 | -3,68395E-06 | -8,04892E-06 |

| | | | |
|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 1,71452E-05 | 1,53516E-05 | 1,46989E-05 | 1,28161E-05 |
| 2,59075E-05 | 2,60638E-05 | 2,6577E-05 | 2,65277E-05 |
| 3,15941E-05 | 3,28777E-05 | 3,39632E-05 | 3,48112E-05 |
| 3,08086E-05 | 3,23407E-05 | 3,37322E-05 | 3,49538E-05 |

Πίνακας 4.

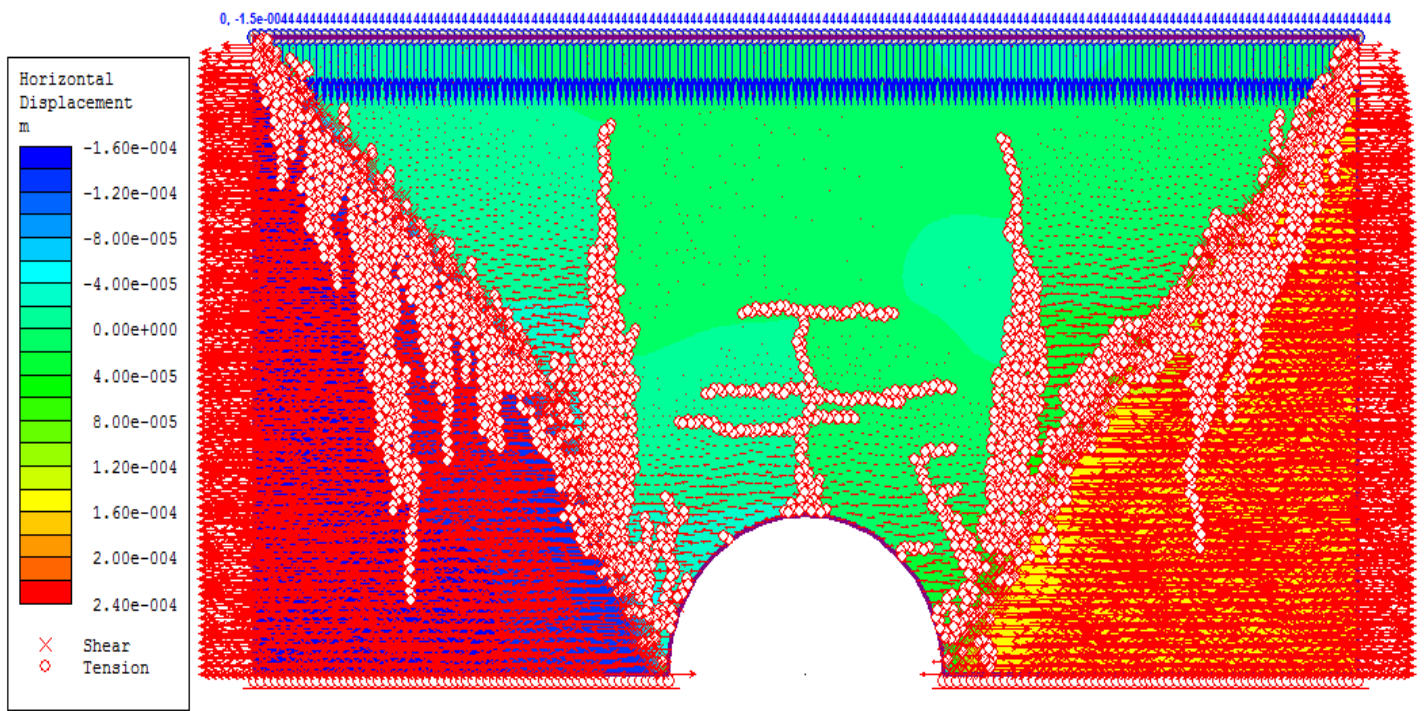
Από το παραπάνω διάγραμμα φαίνεται ότι το slabbing αρχίζει από το στάδιο 36 με πρώτη οριζόντια μετακίνηση $-5,33281 \cdot 10^{-7} \text{m}$. Η αντίστοιχη τάση $\sigma_{\psi\psi}=39,1 \text{MPa}$.



Διάγραμμα 13. Τάση - Τροπή

Η θραύση είναι ψαθυρή με απότομη πτώση της αντοχής του μοντέλου από τα 42,5 MPa στα 15.33 MPa.

Από τα διανύσματα των μετακινήσεων παρατηρείται ότι καταρχάς η οριζόντια μετακίνηση είναι κατοπτρική στον κατακόρυφο άξονα της διαμέτρου από το κέντρο της σπής, με κατεύθυνση προς την κοντινότερη «έξοδο». Άξιο προσοχής είναι ότι τα μεγέθη των μετακινήσεων εξαρτώνται από τη θέση τους σε σχέση με τις εφελκυστικές ρωγματώσεις που έχουν δημιουργηθεί.



Εικόνα 17. Οριζόντιες μετακινήσεις

Η διαδικασία της θραύσης στο παραπάνω μοντέλο διεξήχθη όπως αναμενόταν. Πρώτα το δοκίμιο αστόχησε εφελκυστικά πάνω από την οπή, και στη συνέχεια εμφανίσθηκε διατμητική αστοχία στις περιοχές συγκέντρωσης των θλιπτικών τάσεων στα πλευρικά τοιχώματα της οπής. Ύστερα εμφανίζονται απομονωμένες ρωγματώσεις περιμετρικά του ανοίγματος, στη συνέχεια παρατηρείται το slabbing στο εσωτερικό του ανοίγματος και στο τέλος το μοντέλο υπέστη την τελική θραύση με απότομη πτώση της αντοχής, υποδηλώνοντας έτσι ψαθυρή θραύση.

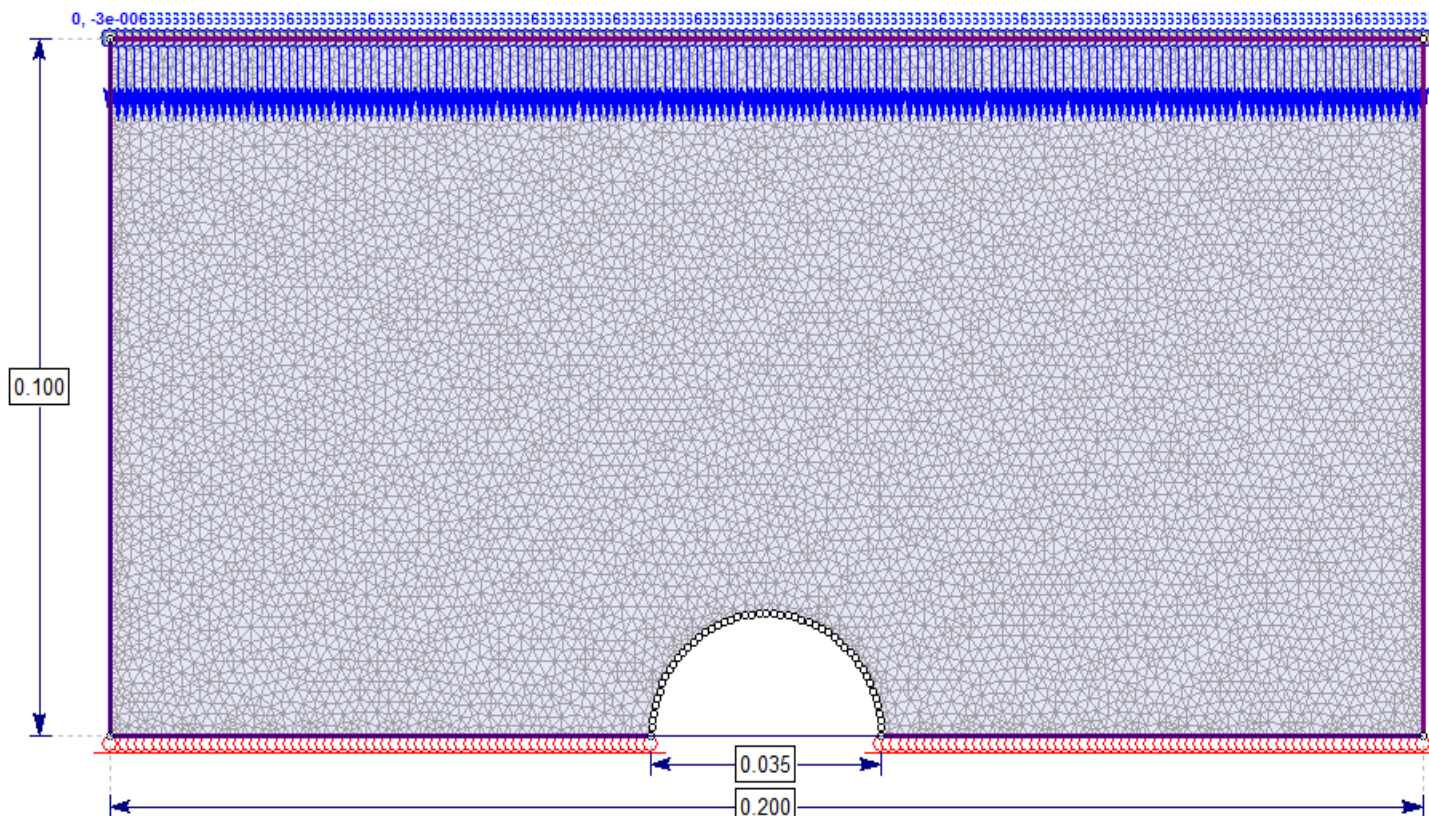
Συνοπτικά τα στάδια των γεγονότων σε συσχέτισμό με την κατακόρυφη τάση παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

| Γεγονός | Κατακόρυφη τάση (MPa) |
|-----------------------------------|-----------------------|
| Εμφάνιση εφελκυστικής ρωγμής | 6,69 |
| Εμφάνιση απομονωμένων ρωγματώσεων | 35,8 |
| Slabbing | 39,1 |
| Μέγιστη αντοχή αντοχή (MPa) | 42,5 |

Πίνακας 5

3.3.Μοντέλο 2

Σε αυτή τη δοκιμή το υπο μονοαξονική θλίψη μοντέλο περιλαμβάνει ημικυκλική οπή διαμέτρου 0,035m και έχει τα ίδια μηχανικά χαρακτηριστικά με το μοντέλο επιβεβαίωσης των μηχανικών παραμέτρων.



Εικόνα 18

Τα στοιχεία του σχεδιασμού παρατίθενται παρακάτω.

Phase2 Analysis Information

Project1

Project Summary

- File Name: model 2(0.035)
- Last saved with Phase2 version: 8.014
- Project Title: Project2

General Settings

- Number of Stages: 52
- Analysis Type: Plane Strain
- Solver Type: Gaussian Elimination
- Units: Metric, stress as MPa

Analysis Options

- Maximum Number of Iterations: 500
- Tolerance: 0.001
- Number of Load Steps: Automatic
- Convergence Type: Absolute Energy
- Tensile Failure: Does Not Reduce Shear Strength
- Joint tension reduces joint stiffness by a factor of 0.01

Groundwater Analysis

-
- Method: Piezometric Lines
 - Pore Fluid Unit Weight: 0.00981 MN/m³
 - Probability: None

Field Stress

-
- Field stress: constant
 - Sigma one: 0 MPa (compression positive)
 - Sigma three: 0 MPa (compression positive)
 - Sigma Z: 0 MPa (compression positive)
 - Angle from the horizontal to sigma 1: 0 degrees (counter-clockwise)

Mesh

-
- Mesh type: graded
 - Element type: 3 noded triangles
 - Number of elements on Stage 1: 16587
 - Number of nodes on Stage 1: 8547
 - Number of elements on Stage 2: 16587
 - Number of nodes on Stage 2: 8547
 - Number of elements on Stage 3: 16587
 - Number of nodes on Stage 3: 8547
 - Number of elements on Stage 4: 16587
 - Number of nodes on Stage 4: 8547
 - Number of elements on Stage 5: 16587
 - Number of nodes on Stage 5: 8547
 - Number of elements on Stage 6: 16587
 - Number of nodes on Stage 6: 8547
 - Number of elements on Stage 7: 16587
 - Number of nodes on Stage 7: 8547
 - Number of elements on Stage 8: 16587
 - Number of nodes on Stage 8: 8547

- Number of elements on Stage 9: 16587
- Number of nodes on Stage 9: 8547
- Number of elements on Stage 10: 16587
- Number of nodes on Stage 10: 8547
- Number of elements on Stage 11: 16587
- Number of nodes on Stage 11: 8547
- Number of elements on Stage 12: 16587
- Number of nodes on Stage 12: 8547
- Number of elements on Stage 13: 16587
- Number of nodes on Stage 13: 8547
- Number of elements on Stage 14: 16587
- Number of nodes on Stage 14: 8547
- Number of elements on Stage 15: 16587
- Number of nodes on Stage 15: 8547
- Number of elements on Stage 16: 16587
- Number of nodes on Stage 16: 8547
- Number of elements on Stage 17: 16587
- Number of nodes on Stage 17: 8547
- Number of elements on Stage 18: 16587
- Number of nodes on Stage 18: 8547
- Number of elements on Stage 19: 16587
- Number of nodes on Stage 19: 8547
- Number of elements on Stage 20: 16587
- Number of nodes on Stage 20: 8547
- Number of elements on Stage 21: 16587
- Number of nodes on Stage 21: 8547
- Number of elements on Stage 22: 16587
- Number of nodes on Stage 22: 8547
- Number of elements on Stage 23: 16587
- Number of nodes on Stage 23: 8547
- Number of elements on Stage 24: 16587
- Number of nodes on Stage 24: 8547
- Number of elements on Stage 25: 16587

Number of nodes on Stage 25: 8547
 Number of elements on Stage 26: 16587
 Number of nodes on Stage 26: 8547
 Number of elements on Stage 27: 16587
 Number of nodes on Stage 27: 8547
 Number of elements on Stage 28: 16587
 Number of nodes on Stage 28: 8547
 Number of elements on Stage 29: 16587
 Number of nodes on Stage 29: 8547
 Number of elements on Stage 30: 16587
 Number of nodes on Stage 30: 8547
 Number of elements on Stage 31: 16587
 Number of nodes on Stage 31: 8547
 Number of elements on Stage 32: 16587
 Number of nodes on Stage 32: 8547
 Number of elements on Stage 33: 16587
 Number of nodes on Stage 33: 8547
 Number of elements on Stage 34: 16587
 Number of nodes on Stage 34: 8547
 Number of elements on Stage 35: 16587
 Number of nodes on Stage 35: 8547
 Number of elements on Stage 36: 16587
 Number of nodes on Stage 36: 8547
 Number of elements on Stage 37: 16587
 Number of nodes on Stage 37: 8547
 Number of elements on Stage 38: 16587
 Number of nodes on Stage 38: 8547
 Number of elements on Stage 39: 16587
 Number of nodes on Stage 39: 8547
 Number of elements on Stage 40: 16587
 Number of nodes on Stage 40: 8547
 Number of elements on Stage 41: 16587
 Number of nodes on Stage 41: 8547

Number of elements on Stage 42: 16587
 Number of nodes on Stage 42: 8547
 Number of elements on Stage 43: 16587
 Number of nodes on Stage 43: 8547
 Number of elements on Stage 44: 16587
 Number of nodes on Stage 44: 8547
 Number of elements on Stage 45: 16587
 Number of nodes on Stage 45: 8547
 Number of elements on Stage 46: 16587
 Number of nodes on Stage 46: 8547
 Number of elements on Stage 47: 16587
 Number of nodes on Stage 47: 8547
 Number of elements on Stage 48: 16587
 Number of nodes on Stage 48: 8547
 Number of elements on Stage 49: 16587
 Number of nodes on Stage 49: 8547
 Number of elements on Stage 50: 16587
 Number of nodes on Stage 50: 8547
 Number of elements on Stage 51: 16587
 Number of nodes on Stage 51: 8547
 Number of elements on Stage 52: 16587
 Number of nodes on Stage 52: 8547

Mesh Quality


All elements are of good quality

Poor quality elements defined as:

- Side length ratio (maximum / minimum) > 30.00
- Minimum interior angle < 2.0 degrees
- Maximum interior angle > 175.0 degrees

Material Properties

Material: Material 1

| | |
|---------------------------|---|
| Color |  |
| Initial element loading | field stress only |
| Elastic type | isotropic |
| Young's modulus | 30000 MPa |
| Poisson's ratio | 0.2 |
| Failure criterion | Mohr-Coulomb |
| Peak tensile strength | 5 MPa |
| Residual tensile strength | 0 MPa |
| Peak friction angle | 35 degrees |
| Peak cohesion | 18 MPa |
| Material type | Plastic |
| Dilation Angle | 0 degrees |
| Residual Friction Angle | 35 degrees |
| Residual Cohesion | 0 MPa |
| Piezo to use | None |
| Ru value | 0 |

List of All Coordinates

External boundary

| X | Y |
|------------|---------------|
| -0.0175 | -5.62843e-018 |
| -0.0174655 | 0.00109883 |
| -0.017362 | 0.00219333 |
| -0.01719 | 0.00327917 |

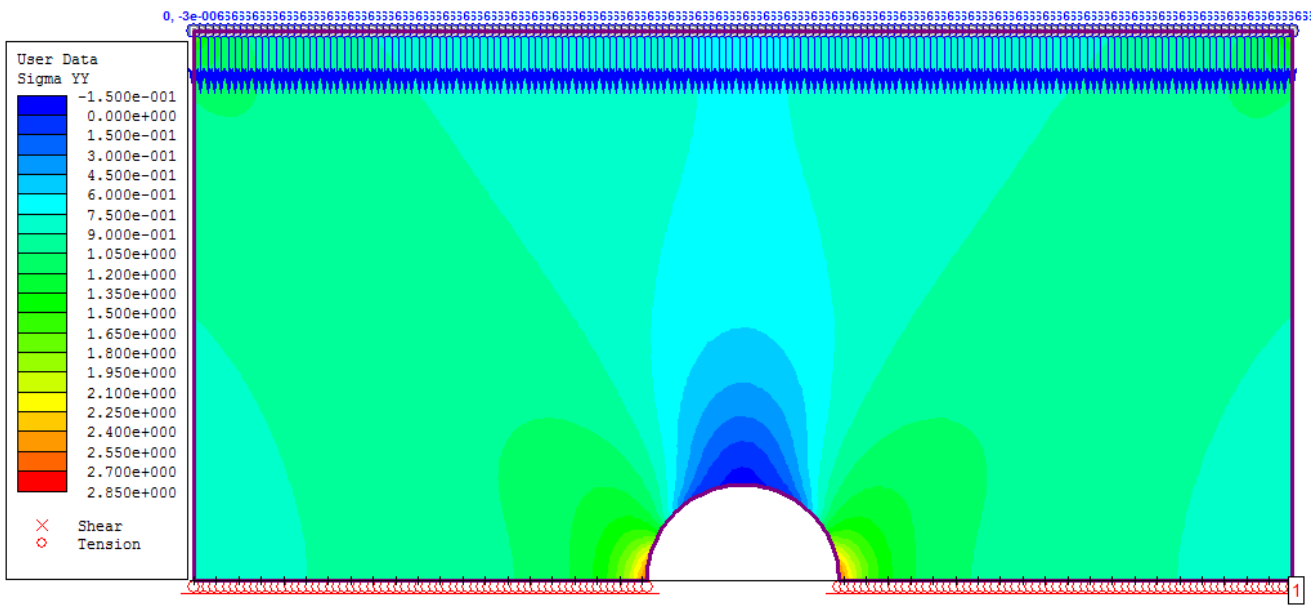
| | |
|---------------|------------|
| -0.0169502 | 0.00435207 |
| -0.0166435 | 0.0054078 |
| -0.0162711 | 0.00644218 |
| -0.0158345 | 0.00745114 |
| -0.0153354 | 0.00843069 |
| -0.0147757 | 0.00937697 |
| -0.0141578 | 0.0102862 |
| -0.013484 | 0.0111549 |
| -0.012757 | 0.0119796 |
| -0.0119796 | 0.012757 |
| -0.0111549 | 0.013484 |
| -0.0102862 | 0.0141578 |
| -0.00937697 | 0.0147757 |
| -0.00843069 | 0.0153354 |
| -0.00745114 | 0.0158345 |
| -0.00644218 | 0.0162711 |
| -0.0054078 | 0.0166435 |
| -0.00435207 | 0.0169502 |
| -0.00327917 | 0.01719 |
| -0.00219333 | 0.017362 |
| -0.00109883 | 0.0174655 |
| -2.81421e-018 | 0.0175 |
| 0.00109883 | 0.0174655 |
| 0.00219333 | 0.017362 |
| 0.00327917 | 0.01719 |
| 0.00435207 | 0.0169502 |
| 0.0054078 | 0.0166435 |
| 0.00644218 | 0.0162711 |
| 0.00745114 | 0.0158345 |
| 0.00843069 | 0.0153354 |
| 0.00937697 | 0.0147757 |
| 0.0102862 | 0.0141578 |
| 0.0111549 | 0.013484 |
| 0.0119796 | 0.012757 |
| 0.012757 | 0.0119796 |
| 0.013484 | 0.0111549 |
| 0.0141578 | 0.0102862 |
| 0.0147757 | 0.00937697 |
| 0.0153354 | 0.00843069 |
| 0.0158345 | 0.00745114 |
| 0.0162711 | 0.00644218 |

| | |
|-----------|------------|
| 0.0166435 | 0.0054078 |
| 0.0169502 | 0.00435207 |
| 0.01719 | 0.00327917 |
| 0.017362 | 0.00219333 |
| 0.0174655 | 0.00109883 |
| 0.0175 | 0 |

| | |
|------|-----|
| 0.1 | 0 |
| 0.1 | 0.1 |
| -0.1 | 0.1 |
| -0.1 | 0 |

3.3.1. Ανάλυση

Στο πρώτο στάδιο φόρτισης το πλαίσιο μετακινείται κατακόρυφα 3μm.



Stage 1

Όπως και στην προηγούμενη δοκιμή φόρτισης στα αρχικά στάδια φόρτισης δεν συμβαίνει κάποιου είδους αστοχία. Το πεδίο των τάσεων στις παρειές της οπής είναι θλιπτικό και εφελκυστικό πάνω από αυτή.

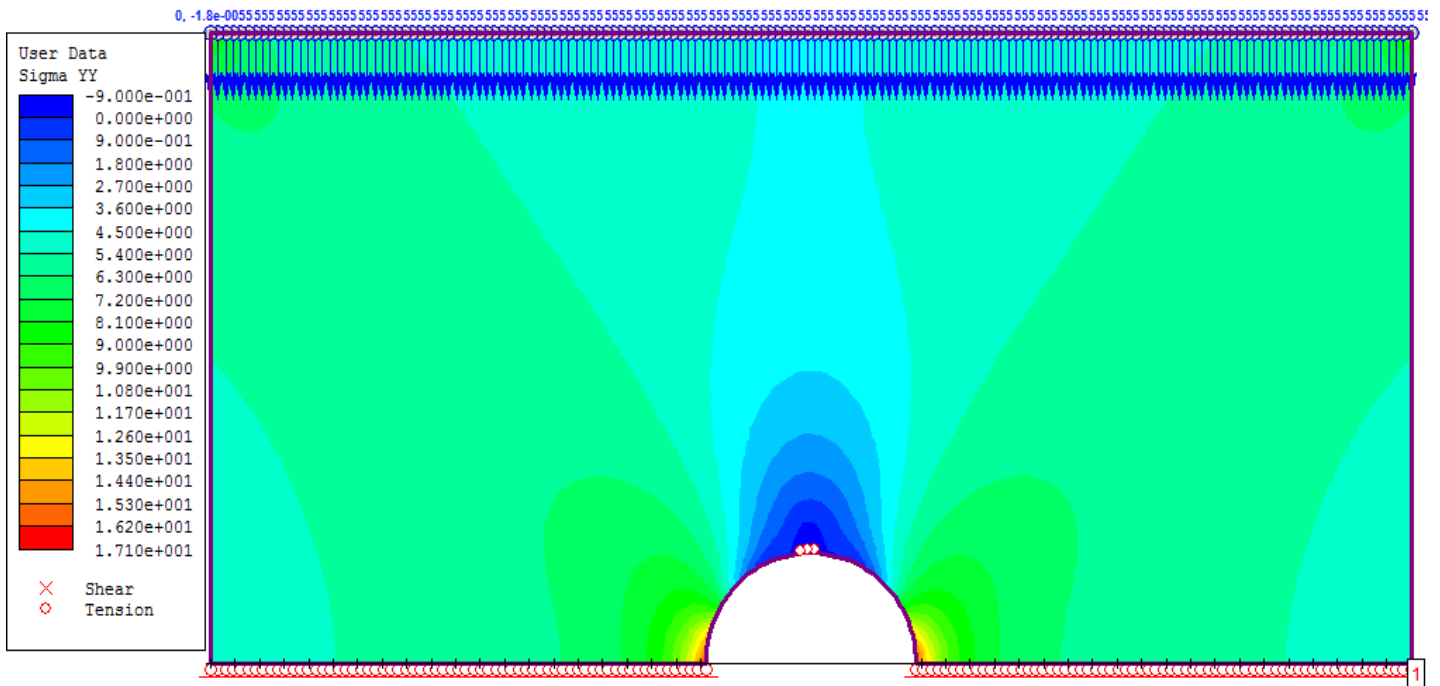
Η πρώτη αστοχία είναι εφελκυστική και συμβαίνει στο 6^ο στάδιο φόρτισης για μετακίνηση 18 μm. Από τον παρακάτω πίνακα υπολογίζεται ότι η τάση στην οποία σχηματίζεται η ρωγμάτωση αντιστοιχεί στα 6 MPa.

| Query #1 Stage 5 | | Query #1 Stage 6 | |
|------------------|----------------------|------------------|----------------------|
| Distance [m] | User Data – Sigma YY | Distance [m] | User Data – Sigma YY |
| 0 | 3,9934 | 0 | 4,7869 |
| 0,004081633 | 4,112553061 | 0,004081633 | 4,930644218 |
| 0,008163265 | 4,230626531 | 0,008163265 | 5,073059184 |
| 0,012244898 | 4,329030612 | 0,012244898 | 5,191702721 |

| | | | |
|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 0,016326531 | 4,418885034 | 0,016326531 | 5,299928571 |
| 0,020408163 | 4,49377415 | 0,020408163 | 5,390197279 |
| 0,024489796 | 4,564397959 | 0,024489796 | 5,475219728 |
| 0,028571429 | 4,630085714 | 0,028571429 | 5,554295238 |
| 0,032653061 | 4,690819728 | 0,032653061 | 5,627317687 |
| 0,036734694 | 4,753148299 | 0,036734694 | 5,702264626 |
| 0,040816327 | 4,818296599 | 0,040816327 | 5,780562585 |
| 0,044897959 | 4,885657143 | 0,044897959 | 5,861561905 |
| 0,048979592 | 4,96732381 | 0,048979592 | 5,959752381 |
| 0,053061224 | 5,069490476 | 0,053061224 | 6,082656463 |
| 0,057142857 | 5,19312381 | 0,057142857 | 6,231352381 |
| 0,06122449 | 5,403466667 | 0,06122449 | 6,484434694 |
| 0,065306122 | 5,678751701 | 0,065306122 | 6,815580272 |
| 0,069387755 | 6,109576871 | 0,069387755 | 7,33362381 |
| 0,073469388 | 7,005086395 | 0,073469388 | 8,409654422 |
| 0,07755102 | 8,519743537 | 0,07755102 | 10,22796735 |
| 0,081632653 | 12,86245578 | 0,081632653 | 15,43621088 |
| 0,085714286 | | 0,085714286 | |
| 0,089795918 | | 0,089795918 | |
| 0,093877551 | | 0,093877551 | |
| 0,097959184 | | 0,097959184 | |
| 0,102040816 | | 0,102040816 | |
| 0,106122449 | | 0,106122449 | |
| 0,110204082 | | 0,110204082 | |
| 0,114285714 | | 0,114285714 | |
| 0,118367347 | 12,15918367 | 0,118367347 | 14,59115306 |
| 0,12244898 | 8,525896599 | 0,12244898 | 10,23386735 |
| 0,126530612 | 6,978322449 | 0,126530612 | 8,376594558 |
| 0,130612245 | 6,130115646 | 0,130612245 | 7,357757823 |
| 0,134693878 | 5,67042517 | 0,134693878 | 6,805290476 |
| 0,13877551 | 5,395037415 | 0,13877551 | 6,474180952 |
| 0,142857143 | 5,201161905 | 0,142857143 | 6,241 |
| 0,146938776 | 5,067865306 | 0,146938776 | 6,080695918 |
| 0,151020408 | 4,967617687 | 0,151020408 | 5,960140136 |
| 0,155102041 | 4,885357823 | 0,155102041 | 5,861306803 |
| 0,159183673 | 4,815509524 | 0,159183673 | 5,777281633 |
| 0,163265306 | 4,754568707 | 0,163265306 | 5,704068707 |
| 0,167346939 | 4,692772109 | 0,167346939 | 5,629738095 |
| 0,171428571 | 4,630695238 | 0,171428571 | 5,555119048 |
| 0,175510204 | 4,56692381 | 0,175510204 | 5,478385034 |
| 0,179591837 | 4,492942177 | 0,179591837 | 5,38932381 |
| 0,183673469 | 4,416521088 | 0,183673469 | 5,297265986 |
| 0,187755102 | 4,331504082 | 0,187755102 | 5,194855102 |
| 0,191836735 | 4,227910884 | 0,191836735 | 5,069987755 |

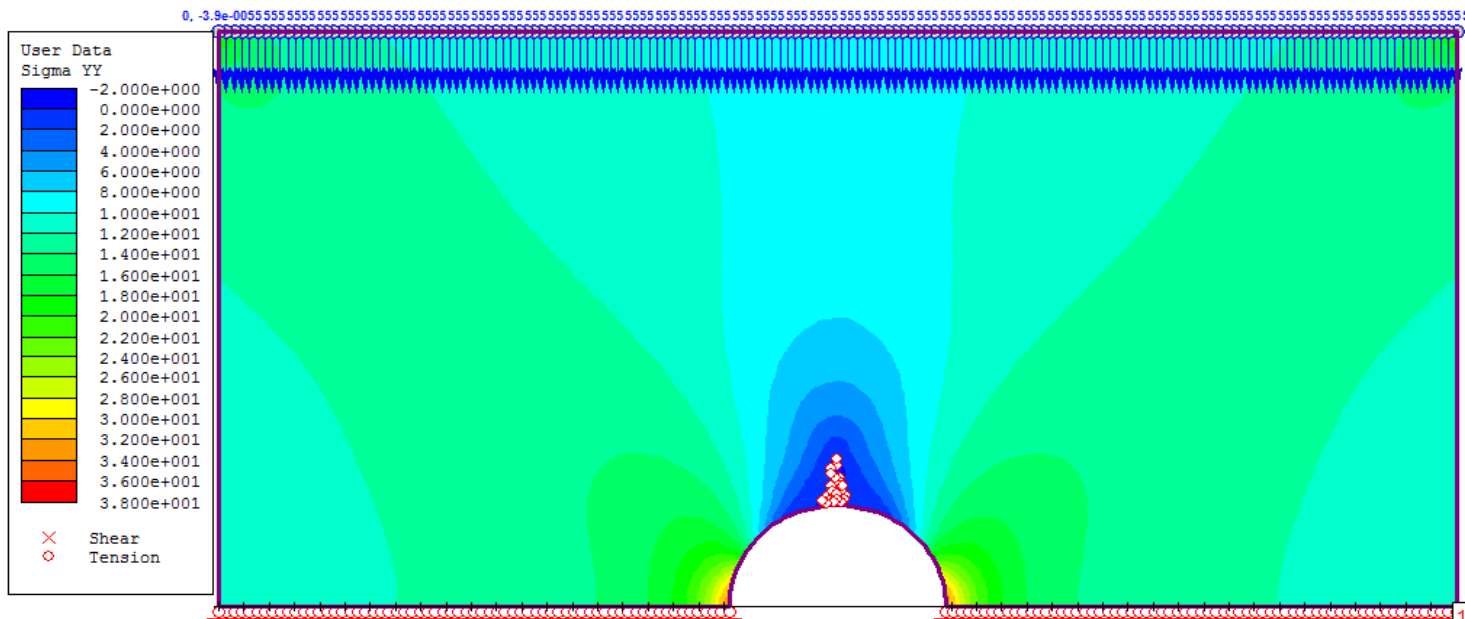
| | | | |
|-----------------------------|-------------|-------------|-------------|
| 0,195918367 | 4,115980272 | 0,195918367 | 4,935078231 |
| 0,2 | 3,99165 | 0,2 | 4,78515 |
| average $\sigma_{\psi\psi}$ | | 5,990485504 | |

Πίνακας 6

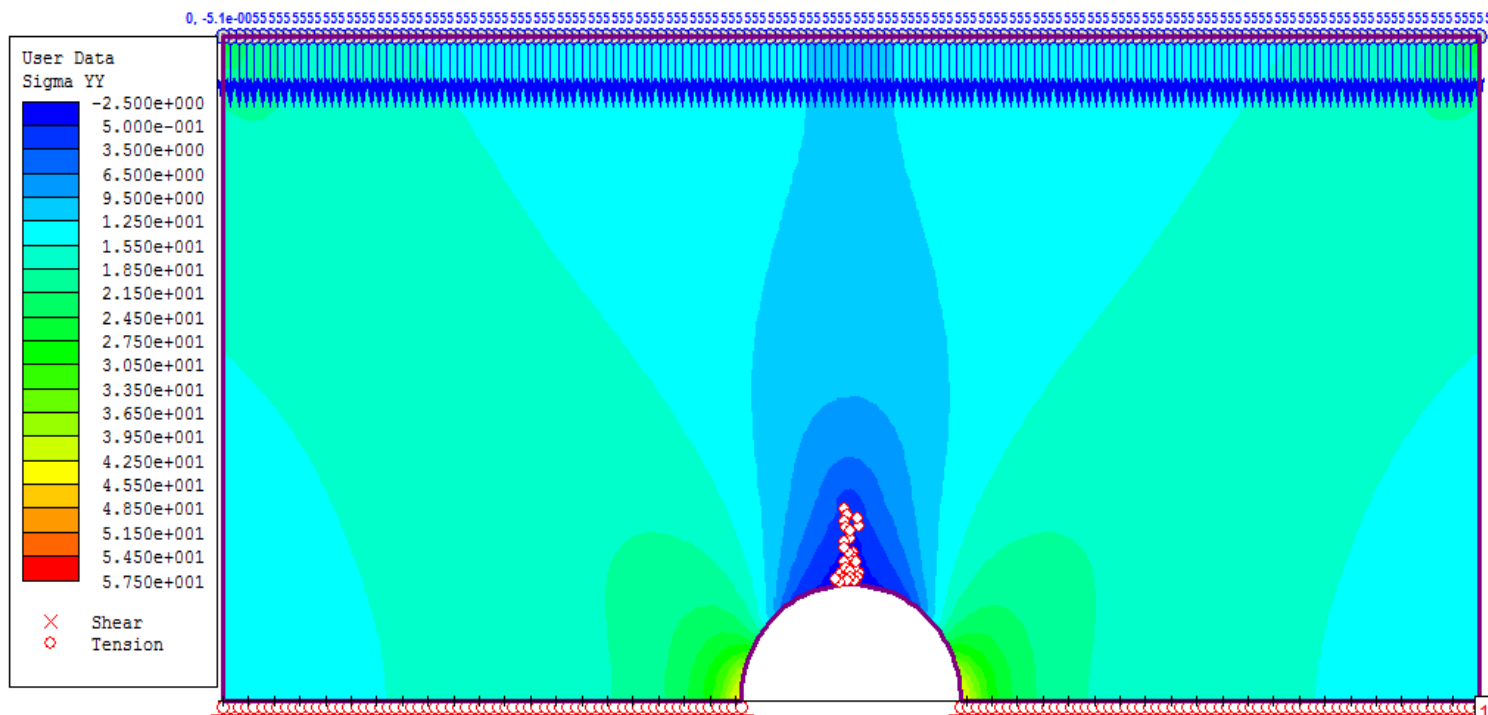


Stage 6: Αρχική εφελκυστική ρωγμάτωση

Με την περαιτέρω μετατόπιση της πλάκας το εφελκυστικό πεδίο πάνω από την οπή αυξάνεται με αποτέλεσμα τη δημιουργία πρόσθετων εφελκυστικών αστοχιών οι οποίες αναπτύσσονται προς το πλαίσιο.

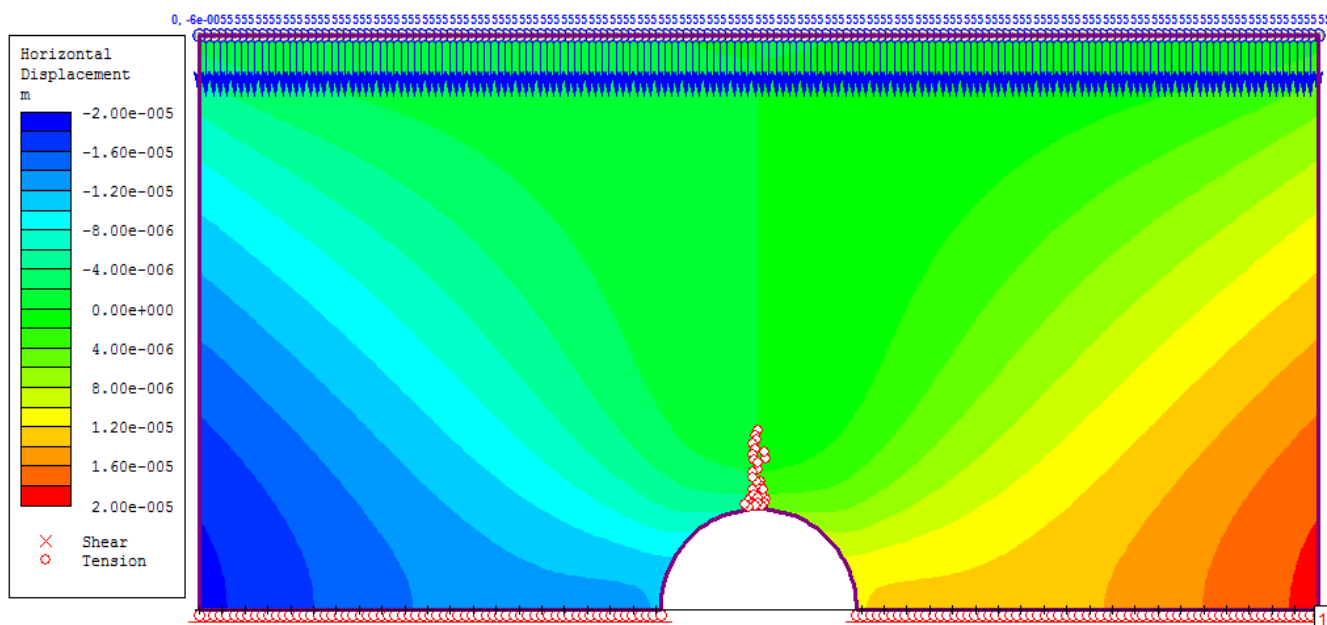


Stage 13

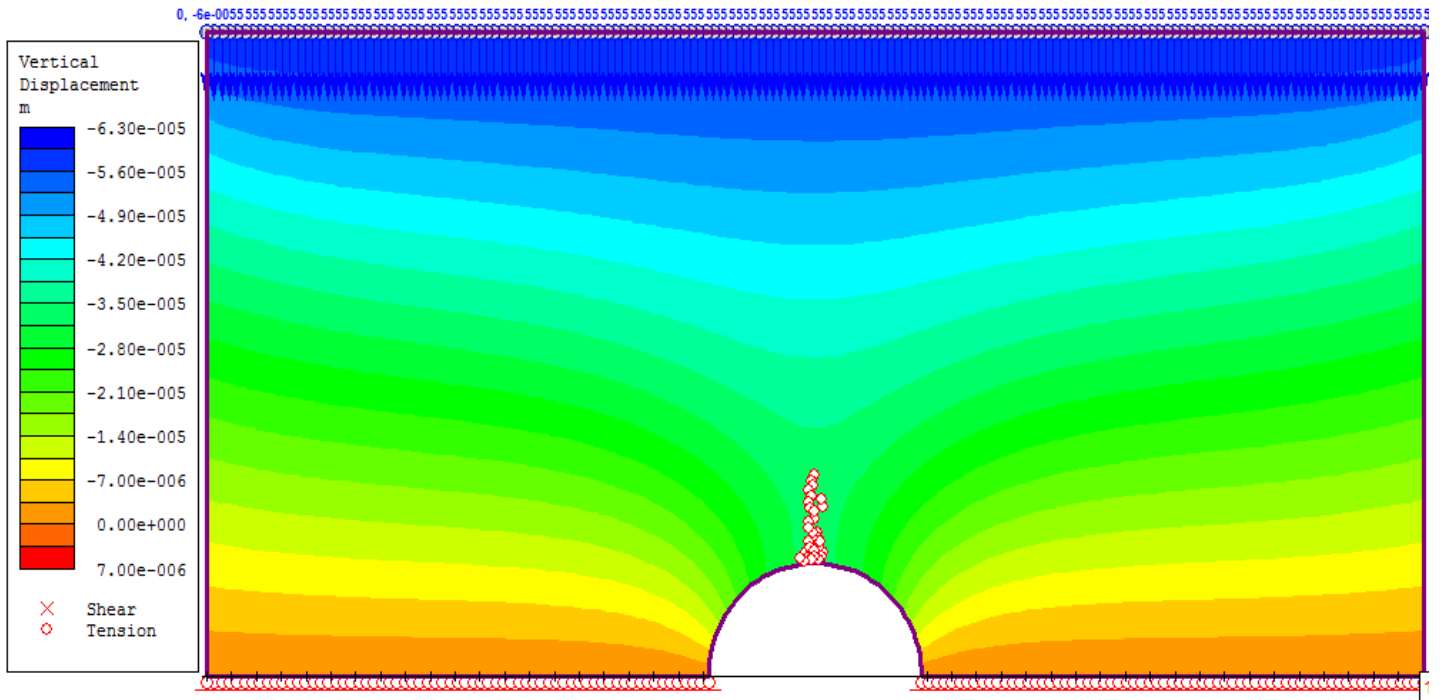


Stage 17

Το μοντέλο συμπιεζόμενο υπόκειται σε οριζόντιες μετακινήσεις οι οποίες προς το παρόν έχουν αντίθετη κατεύθυνση προς την οπή. Αυτές οι μετακινήσεις λαμβάνουν την μέγιστη τιμή τους οριζόντια της διαμέτρου της οπής (0,2 μ m). Αντίθετα οι κάθετες μετακινήσεις λαμβάνουν την μέγιστη τιμή στα όρια της συσκευής φόρτισης(0,63 μ m), ενώ οριζόντια αυτής είναι μηδενικές.

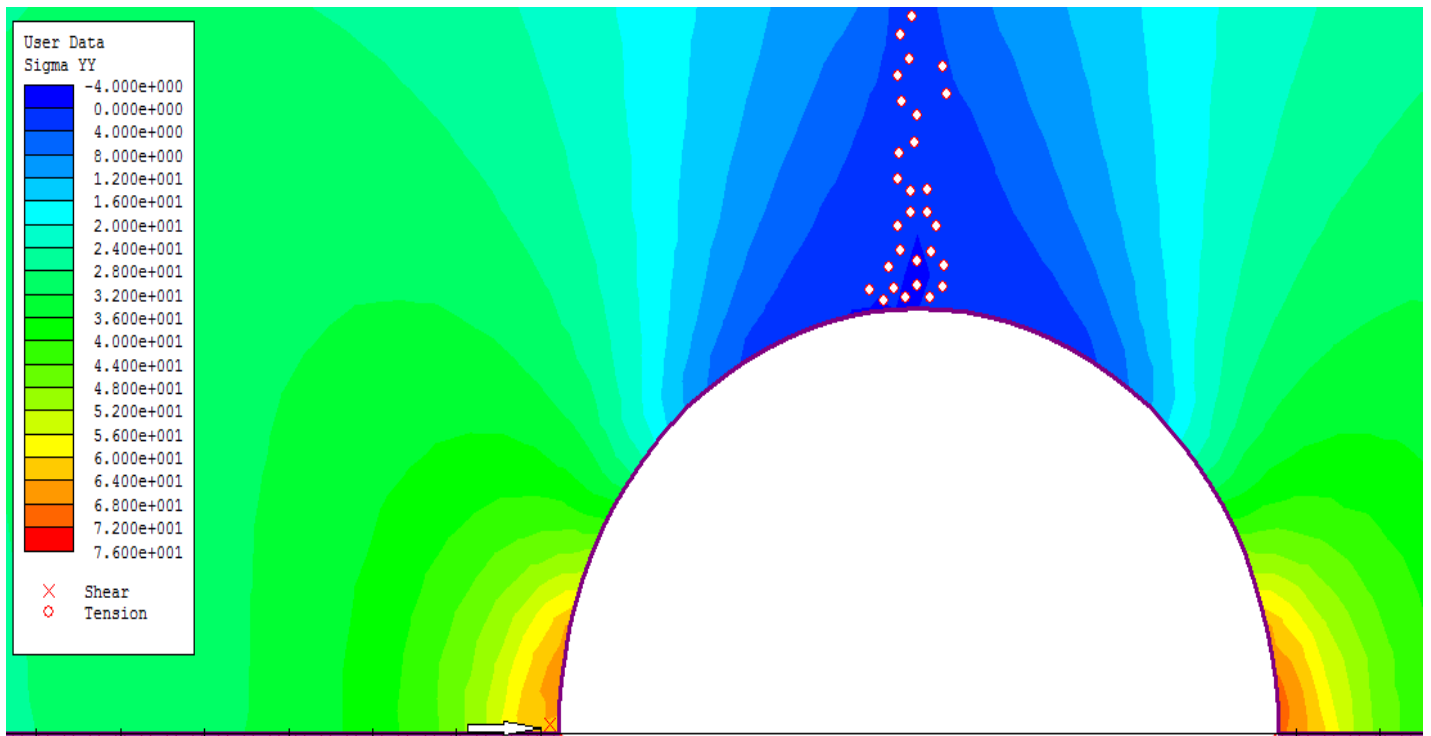


Stage 20: Οριζόντιες μετακινήσεις

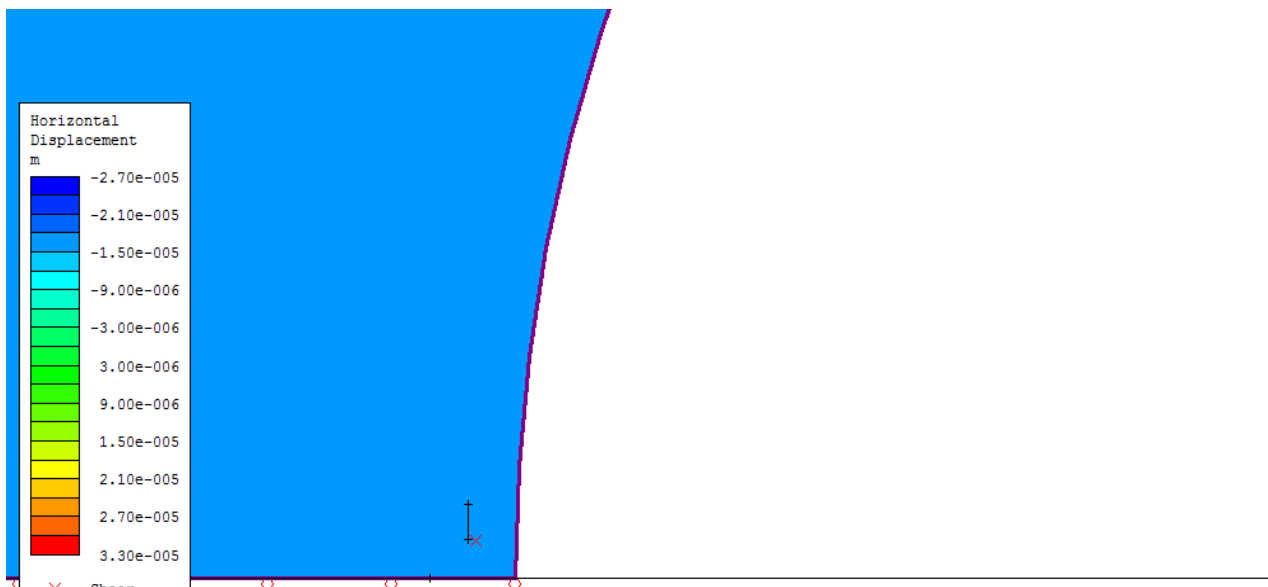


Stage 20: Κατακόρυφες μετακινήσεις

Στο 27^ο στάδιο το μοντέλο υπόκειται σε διατμητική αστοχία αριστερά της οπής σε αντίστοιχη κατακόρυφη τάση 28,7 MPa. Η οριζόντια μετακίνηση σε αυτό το σημείο είναι αρνητική (-27 μ m), δηλαδή δεν έχει συντελεσθεί ακόμη το φαινόμενο slabbing.



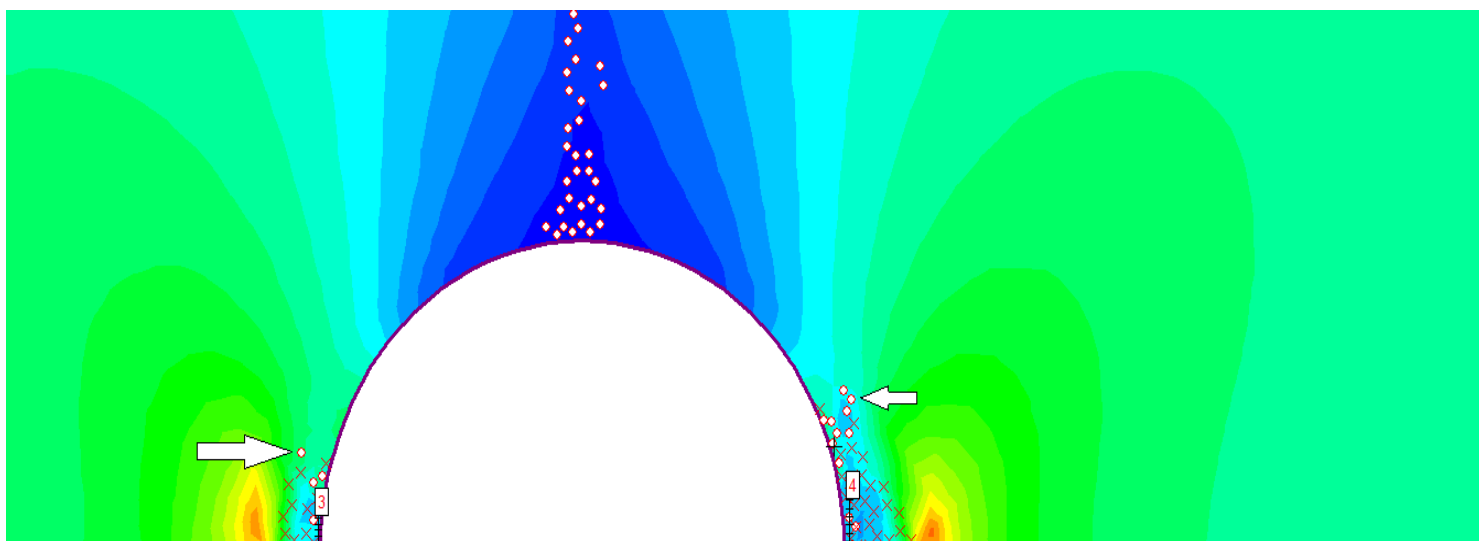
Stage 27



Stage 27: Οριζόντια μετακίνηση στο σημείο διατμητικής αστοχίας

Στο στάδιο 32 εμφανίζονται αστοχίες που οφείλονται σε εφελκυσμό στις παρειές της οπής, ενώ παράλληλα οι διατμητικές αστοχίες έχουν πυκνώσει.

Στο στάδιο 33 εμφανίζονται οι απομονωμένες αστοχίες σε αντίστοιχη κατακόρυφη τάση 34 MPa.



Stage 33

Απο το στάδιο 35 αρχίζει το slabbing στις παρειές της οπής, όπως φαίνεται στους παρακάτω πίνακες.

Αριστερά της οπής:

| Query #3 Stage 33 | Query #3 Stage 34 | Query #3 Stage 35 | Query #3 Stage 36 |
|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| Horizontal Displacement [m] | Horizontal Displacement [m] | Horizontal Displacement [m] | Horizontal Displacement [m] |
| -6,45659E-06 | -1,75448E-06 | 2,05945E-06 | 4,15477E-06 |
| -8,26505E-06 | -3,84126E-06 | -2,29345E-07 | 1,70132E-06 |

| | | | |
|--------------|--------------|--------------|--------------|
| -1,00735E-05 | -5,92804E-06 | -2,51814E-06 | -7,5213E-07 |
| -1,12546E-05 | -7,29704E-06 | -4,05657E-06 | -2,43797E-06 |
| -1,15822E-05 | -7,8807E-06 | -4,89485E-06 | -3,49001E-06 |
| -1,19798E-05 | -8,58965E-06 | -5,89269E-06 | -4,72476E-06 |
| -1,24102E-05 | -9,40598E-06 | -7,06E-06 | -6,13679E-06 |
| -1,31567E-05 | -1,08457E-05 | -9,11109E-06 | -8,48365E-06 |
| -1,45194E-05 | -1,29452E-05 | -1,18731E-05 | -1,16084E-05 |
| -1,5882E-05 | -1,50447E-05 | -1,46351E-05 | -1,47331E-05 |

Πίνακας 7.

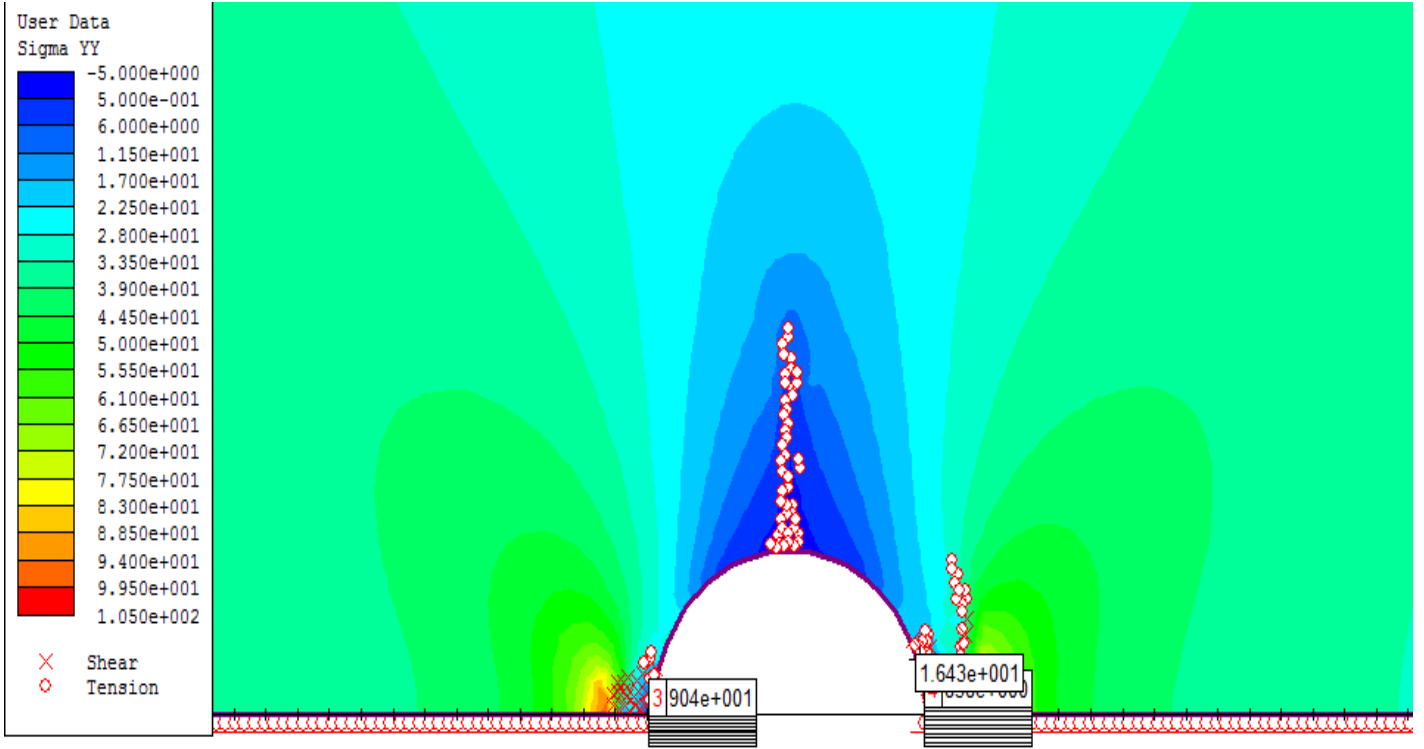
Δεξιά της οπής:

| Query #4 Stage 33 | Query #4 Stage 34 | Query #4 Stage 35 | Query #4 Stage 36 |
|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| Horizontal Displacement [m] | Horizontal Displacement [m] | Horizontal Displacement [m] | Horizontal Displacement [m] |
| 7,88868E-06 | 3,95716E-06 | -1,87511E-06 | -6,52588E-06 |
| 8,43304E-06 | 4,64183E-06 | -1,04449E-06 | -5,55101E-06 |
| 8,95594E-06 | 5,28603E-06 | -2,10668E-07 | -4,45335E-06 |
| 9,27207E-06 | 5,74191E-06 | 5,52922E-07 | -3,33001E-06 |
| 1,01446E-05 | 6,77681E-06 | 1,84085E-06 | -1,70521E-06 |
| 1,13238E-05 | 8,29451E-06 | 3,77987E-06 | 6,43544E-07 |
| 1,28693E-05 | 1,03811E-05 | 6,47757E-06 | 3,84133E-06 |
| 1,46128E-05 | 1,27271E-05 | 9,46562E-06 | 7,39963E-06 |
| 1,6182E-05 | 1,5001E-05 | 1,25583E-05 | 1,10645E-05 |
| 1,77367E-05 | 1,7269E-05 | 1,56597E-05 | 1,47383E-05 |

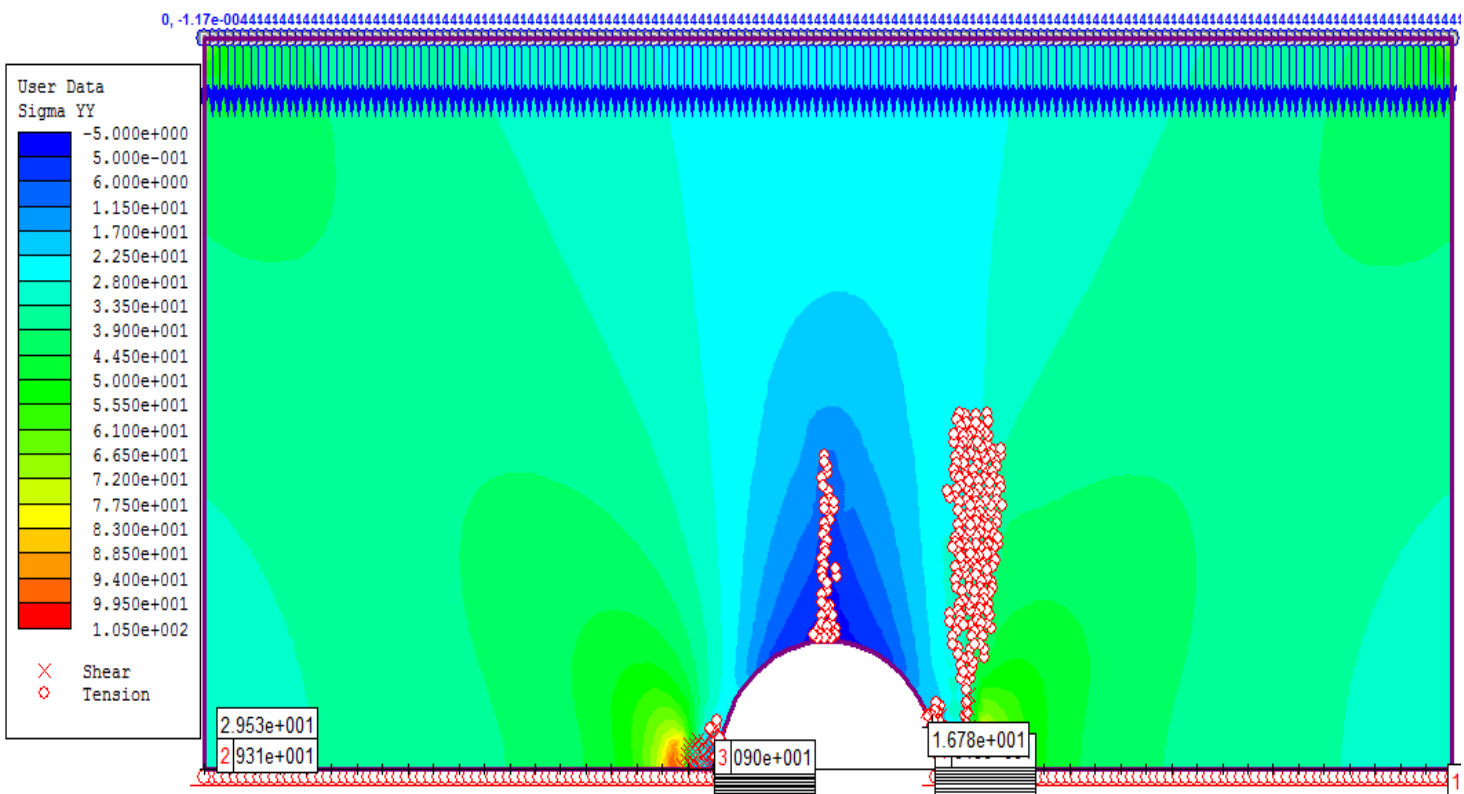
Πίνακας 8.

Η κατακόρυφη τάση δημιουργίας του slabbing είναι 35,5 MPa.

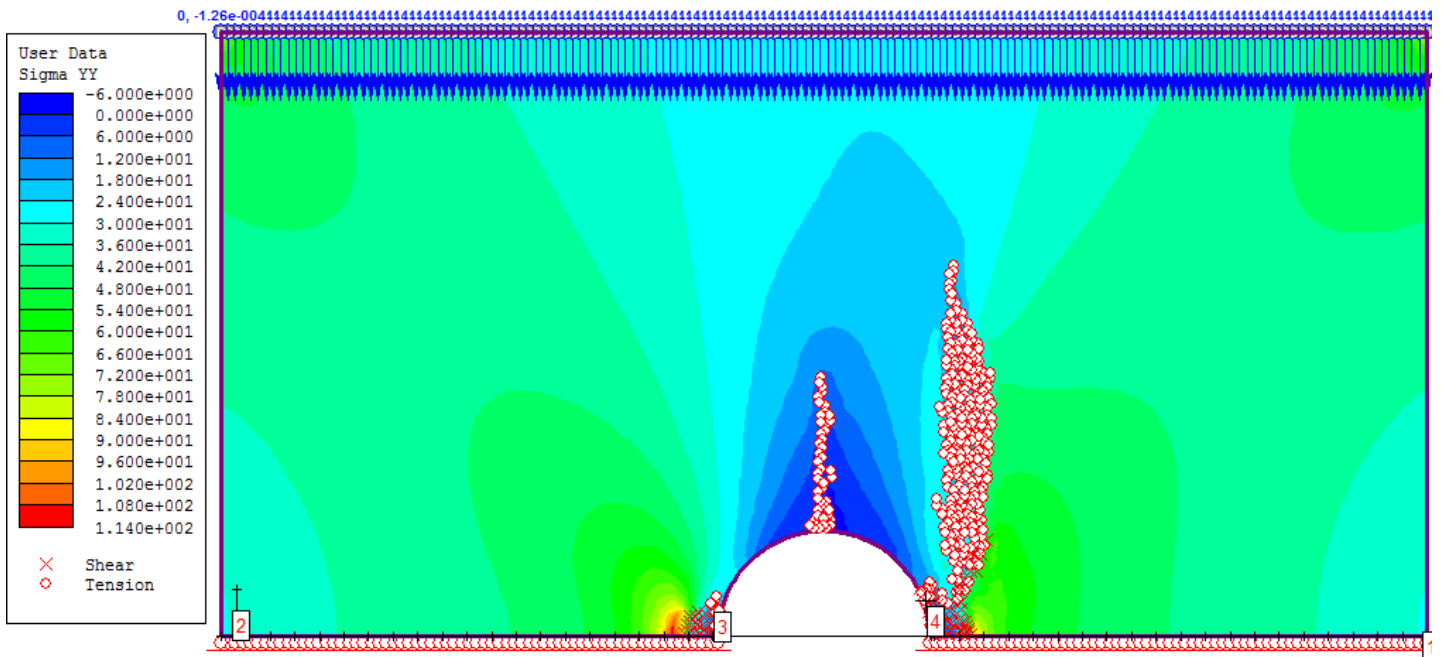
Πλέον το μοντέλο βρίσκεται στα τελευταία στάδια καταστροφής, όπου οι ρωγμές είτε διατμητικές είτε εφελκυστικές εξαπλώνονται στο μοντέλο, ενώ οι απομονωμένες ενώνονται μεταξύ τους.



Stage 38

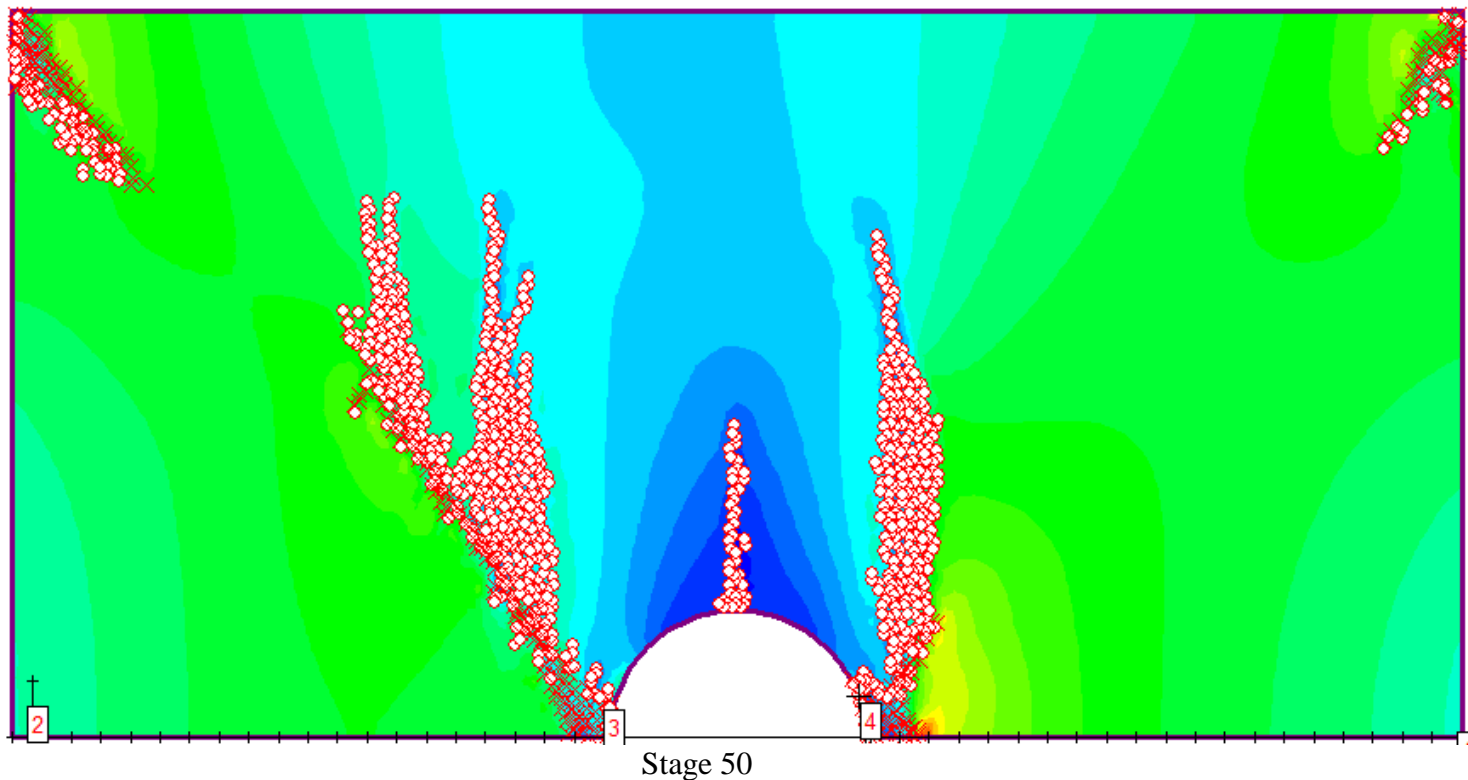


Stage 39

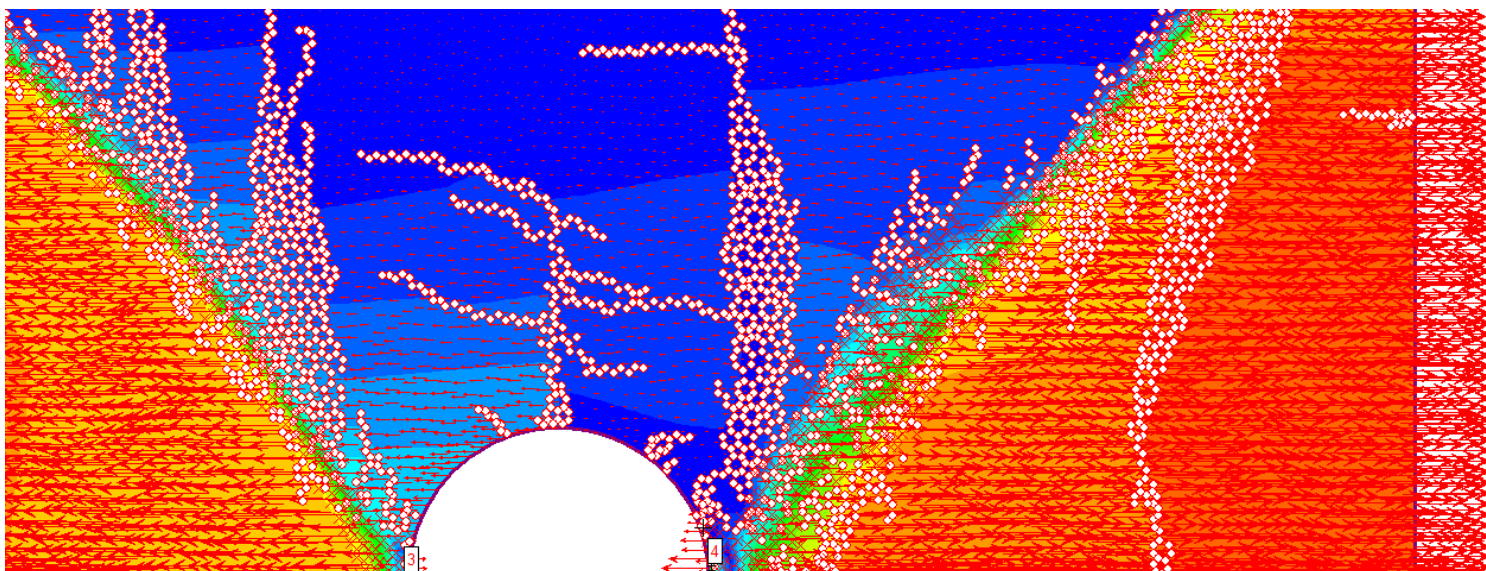


Stage 42

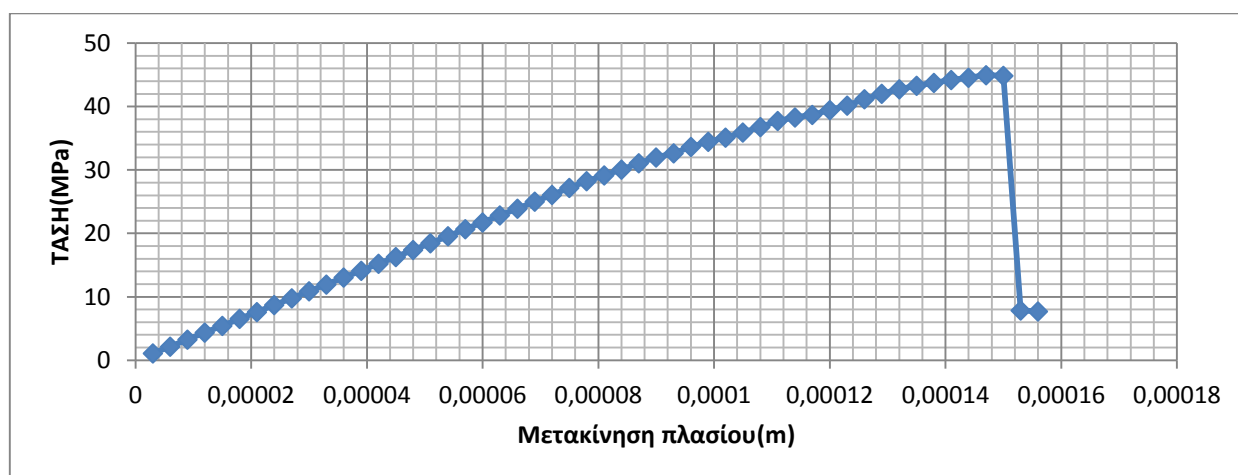
Η τελική θραύση επέρχεται στο 50ο στάδιο σε κατακόρυφη τάση 44,95 MPa με ένωση των απομονωμένων ρωγματώσεων και των διατμητικών αστοχιών.



Η τάση σε συνδυασμό με τις κατοπτρικές ζώνες διάτμησης ωθούν την κίνηση του μοντέλου κάτω από αυτές προς τα έξω.



Stage 51: Τελική μορφή δοκιμίου συνδυαστικά με τις οριζόντιες μετακινήσεις



Διάγραμμα 14. Τάση – μετακίνηση πλασίου

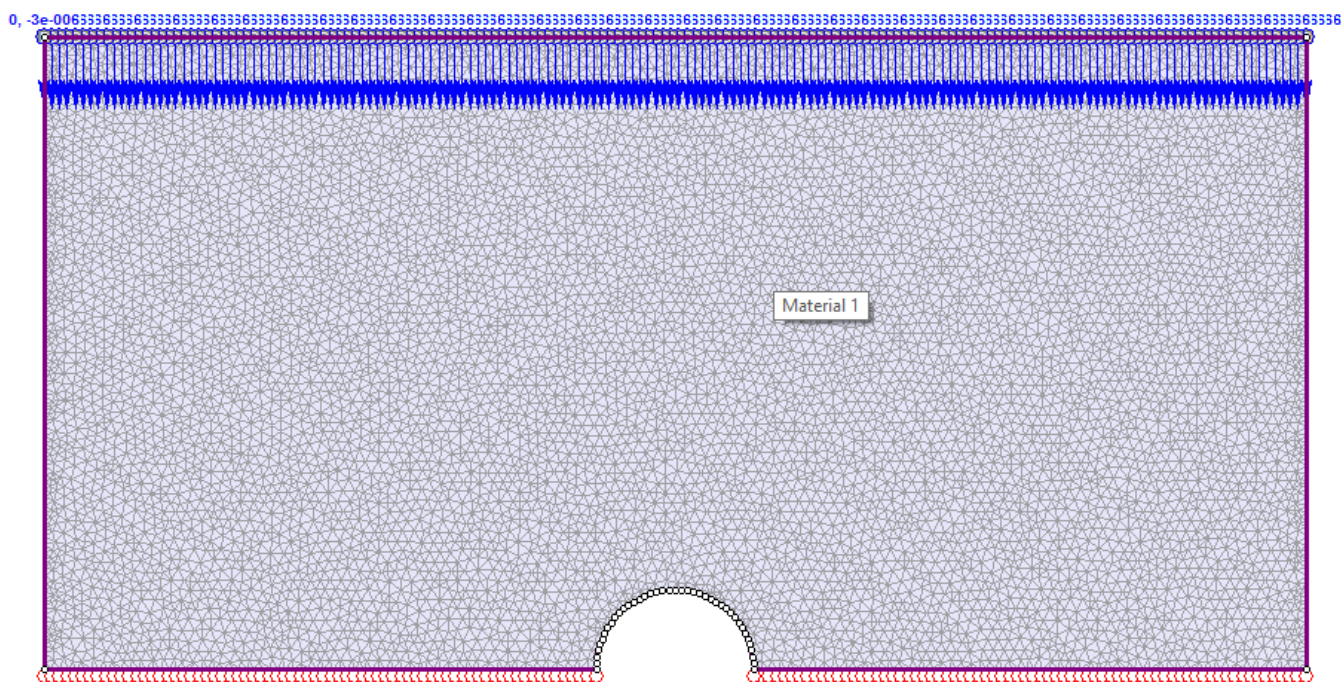
Η διαδικασία της θραύσης στο παραπάνω μοντέλο διεξήχθη όπως αναμενόταν. Πρώτα το δοκίμιο αστόχησε εφελκυστικά πάνω από την οπή, ύστερα εμφανίζονται απομονωμένες ρωγματώσεις περιμετρικά του ανοίγματος, στη συνέχεια παρατηρείται το slabbing στο εσωτερικό του ανοίγματος και στο τέλος το μοντέλο υπέστη την τελική θραύση με απότομη πτώση της αντοχής, υποδηλώνοντας έτσι ψαθυρή θραύση.

| Γεγονός | Κατακόρυφη τάση (MPa) |
|-----------------------------------|-----------------------|
| Εμφάνιση εφελκυστικής ρωγμής | 5,99 |
| Εμφάνιση απομονωμένων ρωγματώσεων | 34 |
| Slabbing | 35.5 |
| Μέγιστη αντοχή αντοχή (MPa) | 44.95 |

Πίνακας 9

3.4.Μοντέλο 3

Το 3^ο μοντέλο έχει οπή διαμέτρου 0,025 m. Η διαδικασία καταστροφής είναι ίδια με την προηγούμενη προσομοίωση.



Εικόνα 20

Τα στοιχεία του σχεδιασμού παρουσιάζονται παρακάτω

Phase2 Analysis Information

Project1

Project Summary

-
- File Name: model 3 (0.025)
 - Last saved with Phase2 version: 8.014
 - Project Title: Project3

General Settings

-
- Number of Stages: 50
 - Analysis Type: Plane Strain
 - Solver Type: Gaussian Elimination
 - Units: Metric, stress as MPa

Analysis Options

-
- Maximum Number of Iterations: 500
 - Tolerance: 0.001
 - Number of Load Steps: Automatic
 - Convergence Type: Absolute Energy
 - Tensile Failure: Does Not Reduce Shear Strength
 - Joint tension reduces joint stiffness by a factor of 0.01

Groundwater Analysis

-
- Method: Piezometric Lines
 - Pore Fluid Unit Weight: 0.00981 MN/m³
 - Probability: None

Field Stress

-
- Field stress: constant
 - Sigma one: 0 MPa (compression positive)
 - Sigma three: 0 MPa (compression positive)
-

- Mesh type: graded
- Element type: 3 noded triangles
- Number of elements on Stage 1: 16867
- Number of nodes on Stage 1: 8688
- Number of elements on Stage 2: 16867
- Number of nodes on Stage 2: 8688
- Number of elements on Stage 3: 16867
- Number of nodes on Stage 3: 8688
- Number of elements on Stage 4: 16867
- Number of nodes on Stage 4: 8688
- Number of elements on Stage 5: 16867
- Number of nodes on Stage 5: 8688
- Number of elements on Stage 6: 16867
- Number of nodes on Stage 6: 8688
- Number of elements on Stage 7: 16867
- Number of nodes on Stage 7: 8688
- Number of elements on Stage 8: 16867
- Number of nodes on Stage 8: 8688
- Number of elements on Stage 9: 16867
- Number of nodes on Stage 9: 8688
- Number of elements on Stage 10: 16867
- Number of nodes on Stage 10: 8688
- Number of elements on Stage 11: 16867
- Number of nodes on Stage 11: 8688
- Number of elements on Stage 12: 16867
- Number of nodes on Stage 12: 8688
- Number of elements on Stage 13: 16867

- Sigma Z: 0 MPa (compression positive)
- Angle from the horizontal to sigma 1: 0 degrees (counter-clockwise)

Mesh

- Number of nodes on Stage 13: 8688
- Number of elements on Stage 14: 16867
- Number of nodes on Stage 14: 8688
- Number of elements on Stage 15: 16867
- Number of nodes on Stage 15: 8688
- Number of elements on Stage 16: 16867
- Number of nodes on Stage 16: 8688
- Number of elements on Stage 17: 16867
- Number of nodes on Stage 17: 8688
- Number of elements on Stage 18: 16867
- Number of nodes on Stage 18: 8688
- Number of elements on Stage 19: 16867
- Number of nodes on Stage 19: 8688
- Number of elements on Stage 20: 16867
- Number of nodes on Stage 20: 8688
- Number of elements on Stage 21: 16867
- Number of nodes on Stage 21: 8688
- Number of elements on Stage 22: 16867
- Number of nodes on Stage 22: 8688
- Number of elements on Stage 23: 16867
- Number of nodes on Stage 23: 8688
- Number of elements on Stage 24: 16867
- Number of nodes on Stage 24: 8688
- Number of elements on Stage 25: 16867
- Number of nodes on Stage 25: 8688
- Number of elements on Stage 26: 16867
- Number of nodes on Stage 26: 8688

Number of elements on Stage 27:
 16867
 Number of nodes on Stage 27: 8688
 Number of elements on Stage 28:
 16867
 Number of nodes on Stage 28: 8688
 Number of elements on Stage 29:
 16867
 Number of nodes on Stage 29: 8688
 Number of elements on Stage 30:
 16867
 Number of nodes on Stage 30: 8688
 Number of elements on Stage 31:
 16867
 Number of nodes on Stage 31: 8688
 Number of elements on Stage 32:
 16867
 Number of nodes on Stage 32: 8688
 Number of elements on Stage 33:
 16867
 Number of nodes on Stage 33: 8688
 Number of elements on Stage 34:
 16867
 Number of nodes on Stage 34: 8688
 Number of elements on Stage 35:
 16867
 Number of nodes on Stage 35: 8688
 Number of elements on Stage 36:
 16867
 Number of nodes on Stage 36: 8688
 Number of elements on Stage 37:
 16867
 Number of nodes on Stage 37: 8688
 Number of elements on Stage 38:
 16867
 Number of nodes on Stage 38: 8688

Number of elements on Stage 39:
 16867
 Number of nodes on Stage 39: 8688
 Number of elements on Stage 40:
 16867
 Number of nodes on Stage 40: 8688
 Number of elements on Stage 41:
 16867
 Number of nodes on Stage 41: 8688
 Number of elements on Stage 42:
 16867
 Number of nodes on Stage 42: 8688
 Number of elements on Stage 43:
 16867
 Number of nodes on Stage 43: 8688
 Number of elements on Stage 44:
 16867
 Number of nodes on Stage 44: 8688
 Number of elements on Stage 45:
 16867
 Number of nodes on Stage 45: 8688
 Number of elements on Stage 46:
 16867
 Number of nodes on Stage 46: 8688
 Number of elements on Stage 47:
 16867
 Number of nodes on Stage 47: 8688
 Number of elements on Stage 48:
 16867
 Number of nodes on Stage 48: 8688
 Number of elements on Stage 49:
 16867
 Number of nodes on Stage 49: 8688
 Number of elements on Stage 50:
 16867
 Number of nodes on Stage 50: 8688

Poor quality elements defined as:


- Side length ratio (maximum / minimum) > 30.00
- Minimum interior angle < 2.0 degrees
- Maximum interior angle > 175.0 degrees

Mesh Quality

All elements are of good quality

Material Properties

Material: Material 1

| | |
|-------------------------|---|
| Color |  |
| Initial element loading | field stress only |
| Elastic type | isotropic |
| Young's modulus | 30000 MPa |
| Poisson's ratio | 0.2 |
| Failure criterion | Mohr-Coulomb |
| Peak tensile strength | 5 MPa |

List of All Coordinates

External boundary

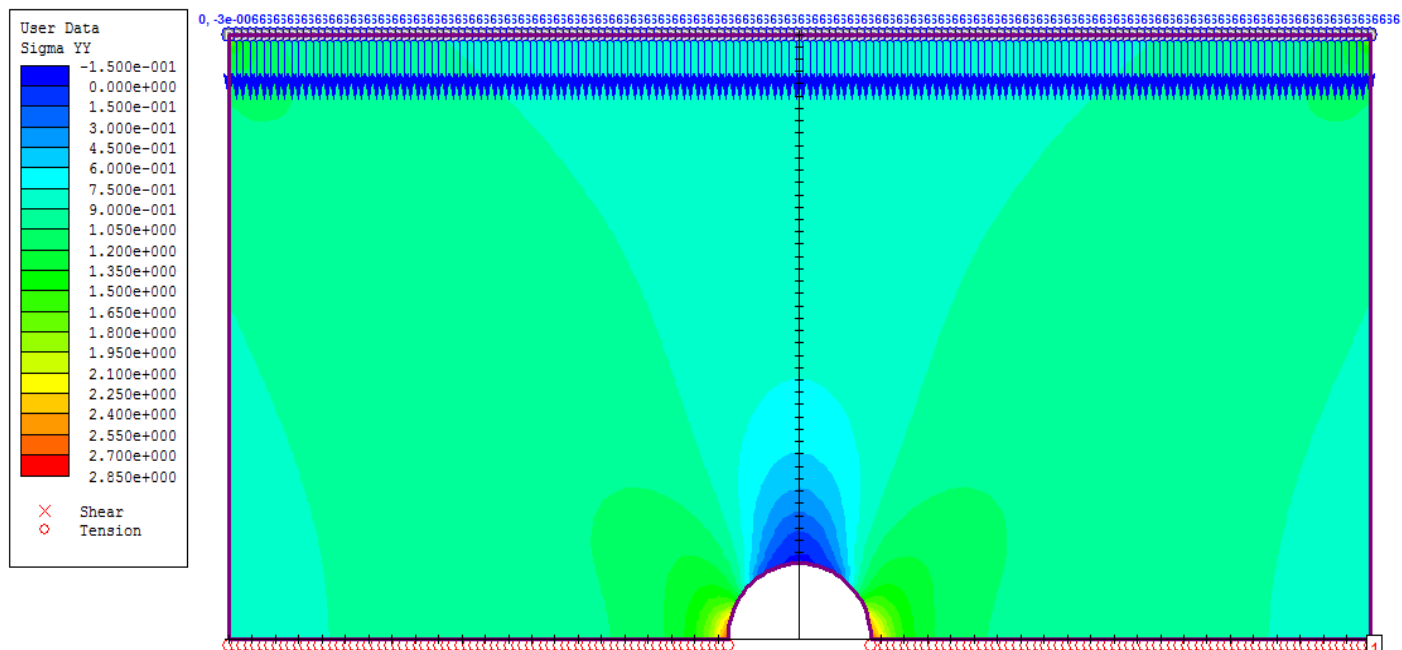
| X | Y |
|-------------|--------------|
| 0.1 | 0 |
| 0.1 | 0.1 |
| -0.1 | 0.1 |
| -0.1 | 0 |
| -0.0125 | 1.53081e-018 |
| -0.0124615 | 0.000980739 |
| -0.0123461 | 0.00195543 |
| -0.0121546 | 0.00291807 |
| -0.0118882 | 0.00386271 |
| -0.0115485 | 0.00478354 |
| -0.0111376 | 0.00567488 |
| -0.010658 | 0.00653123 |
| -0.0101127 | 0.00734732 |
| -0.00950507 | 0.0081181 |
| -0.00883883 | 0.00883883 |
| -0.0081181 | 0.00950507 |
| -0.00734732 | 0.0101127 |
| -0.00653123 | 0.010658 |
| -0.00567488 | 0.0111376 |
| -0.00478354 | 0.0115485 |

| | |
|---------------------------|------------|
| Residual tensile strength | 0 MPa |
| Peak friction angle | 35 degrees |
| Peak cohesion | 18 MPa |
| Material type | Plastic |
| Dilation Angle | 0 degrees |
| Residual Friction Angle | 35 degrees |
| Residual Cohesion | 0 MPa |
| Piezo to use | None |
| Ru value | 0 |

| | |
|--------------|-------------|
| -0.00386271 | 0.0118882 |
| -0.00291807 | 0.0121546 |
| -0.00195543 | 0.0123461 |
| -0.000980739 | 0.0124615 |
| 7.65404e-019 | 0.0125 |
| 0.000980739 | 0.0124615 |
| 0.00195543 | 0.0123461 |
| 0.00291807 | 0.0121546 |
| 0.00386271 | 0.0118882 |
| 0.00478354 | 0.0115485 |
| 0.00567488 | 0.0111376 |
| 0.00653123 | 0.010658 |
| 0.00734732 | 0.0101127 |
| 0.0081181 | 0.00950507 |
| 0.00883883 | 0.00883883 |
| 0.00950507 | 0.0081181 |
| 0.0101127 | 0.00734732 |
| 0.010658 | 0.00653123 |
| 0.0111376 | 0.00567488 |
| 0.0115485 | 0.00478354 |
| 0.0118882 | 0.00386271 |
| 0.0121546 | 0.00291807 |
| 0.0123461 | 0.00195543 |
| 0.0124615 | 0.000980739 |
| 0.0125 | 0 |

3.4.1. Ανάλυση

Οι τάσεις πάνω από το κυκλικό άνοιγμα αλλάζουν διεύθυνση και συγκεντρώνονται στις παρειές της οπής προκαλώντας έτσι την τοπική αύξηση της θλιπτικής τάσης και την τοπική αύξηση της εφελκυστικής τάσης πάνω από την οπή.



Stage 1: Κατανομή κατακόρυφης τάσης

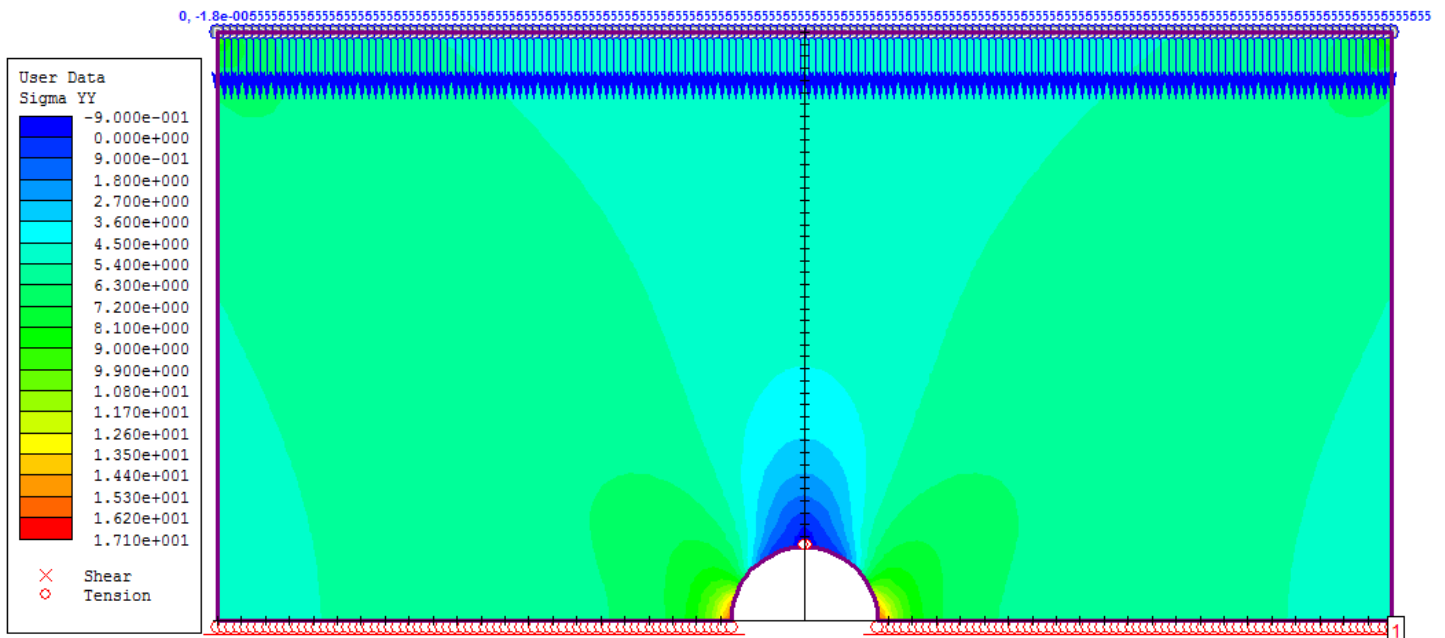
Η πρώτη εφελκυστική αστοχία συμβαίνει στο στάδιο 6 για μετακίνηση πλαισίου 0,18 μm. Η μέση τιμή της κατακόρυφης τάσης υπολογίζεται από τον πίνακα που προκύπτει από το query στη βάση του μοντέλου.

| Query #1 Stage 5 | | | | Query #1 Stage 6 | | | |
|------------------|---|--------------|----------------------|------------------|---|--------------|----------------------|
| X | Y | Distance [m] | User Data - Sigma YY | X | Y | Distance [m] | User Data - Sigma YY |
| -0,1 | 0 | 0 | 4,1604 | -0,1 | 0 | 0 | 4,9892 |
| -0,09591837 | 0 | 0,004081633 | 4,253817687 | -0,09591837 | 0 | 0,004081633 | 5,101841108 |
| -0,09183673 | 0 | 0,008163265 | 4,33481895 | -0,09183673 | 0 | 0,008163265 | 5,199504276 |
| -0,0877551 | 0 | 0,012244898 | 4,406903207 | -0,0877551 | 0 | 0,012244898 | 5,286278717 |
| -0,08367347 | 0 | 0,016326531 | 4,482278863 | -0,08367347 | 0 | 0,016326531 | 5,377022012 |
| -0,07959184 | 0 | 0,020408163 | 4,542611273 | -0,07959184 | 0 | 0,020408163 | 5,449658309 |
| -0,0755102 | 0 | 0,024489796 | 4,595122935 | -0,0755102 | 0 | 0,024489796 | 5,512805637 |
| -0,07142857 | 0 | 0,028571429 | 4,651092857 | -0,07142857 | 0 | 0,028571429 | 5,580087755 |
| -0,06734694 | 0 | 0,032653061 | 4,697045675 | -0,06734694 | 0 | 0,032653061 | 5,635264723 |
| -0,06326531 | 0 | 0,036734694 | 4,741481535 | -0,06326531 | 0 | 0,036734694 | 5,688632459 |

| | | | | | | | | |
|-------------|---|-------------|-----------------------|-------------|---|-------------|-------------|--|
| -0,05918367 | 0 | 0,040816327 | 4,787083188 | -0,05918367 | 0 | 0,040816327 | 5,743434208 | |
| -0,05510204 | 0 | 0,044897959 | 4,832306997 | -0,05510204 | 0 | 0,044897959 | 5,797711273 | |
| -0,05102041 | 0 | 0,048979592 | 4,879441788 | -0,05102041 | 0 | 0,048979592 | 5,854301944 | |
| -0,04693878 | 0 | 0,053061224 | 4,931135374 | -0,04693878 | 0 | 0,053061224 | 5,91626725 | |
| -0,04285714 | 0 | 0,057142857 | 4,998627211 | -0,04285714 | 0 | 0,057142857 | 5,997402041 | |
| -0,03877551 | 0 | 0,06122449 | 5,076094072 | -0,03877551 | 0 | 0,06122449 | 6,090535277 | |
| -0,03469388 | 0 | 0,065306122 | 5,186144218 | -0,03469388 | 0 | 0,065306122 | 6,222845141 | |
| -0,03061224 | 0 | 0,069387755 | 5,37520311 | -0,03061224 | 0 | 0,069387755 | 6,450312245 | |
| -0,02653061 | 0 | 0,073469388 | 5,663327891 | -0,02653061 | 0 | 0,073469388 | 6,797004665 | |
| -0,02244898 | 0 | 0,07755102 | 6,156096501 | -0,02244898 | 0 | 0,07755102 | 7,389647376 | |
| -0,01836735 | 0 | 0,081632653 | 7,375899417 | -0,01836735 | 0 | 0,081632653 | 8,855381973 | |
| -0,01428571 | 0 | 0,085714286 | 11,2809551 | -0,01428571 | 0 | 0,085714286 | 13,54006803 | |
| -0,01020408 | 0 | 0,089795918 | | -0,01020408 | 0 | 0,089795918 | | |
| -0,00612245 | 0 | 0,093877551 | | -0,00612245 | 0 | 0,093877551 | | |
| -0,00204082 | 0 | 0,097959184 | | -0,00204082 | 0 | 0,097959184 | | |
| 0,002040816 | 0 | 0,102040816 | | 0,002040816 | 0 | 0,102040816 | | |
| 0,006122449 | 0 | 0,106122449 | | 0,006122449 | 0 | 0,106122449 | | |
| 0,010204082 | 0 | 0,110204082 | | 0,010204082 | 0 | 0,110204082 | | |
| 0,014285714 | 0 | 0,114285714 | 11,45253741 | 0,014285714 | 0 | 0,114285714 | 13,74611565 | |
| 0,018367347 | 0 | 0,118367347 | 7,444277551 | 0,018367347 | 0 | 0,118367347 | 8,937545141 | |
| 0,02244898 | 0 | 0,12244898 | 6,171906268 | 0,02244898 | 0 | 0,12244898 | 7,408778717 | |
| 0,026530612 | 0 | 0,126530612 | 5,656236929 | 0,026530612 | 0 | 0,126530612 | 6,788477551 | |
| 0,030612245 | 0 | 0,130612245 | 5,374081633 | 0,030612245 | 0 | 0,130612245 | 6,448989504 | |
| 0,034693878 | 0 | 0,134693878 | 5,187433673 | 0,034693878 | 0 | 0,134693878 | 6,224379446 | |
| 0,03877551 | 0 | 0,13877551 | 5,078766375 | 0,03877551 | 0 | 0,13877551 | 6,093695627 | |
| 0,042857143 | 0 | 0,142857143 | 4,997612245 | 0,042857143 | 0 | 0,142857143 | 5,99617415 | |
| 0,046938776 | 0 | 0,146938776 | 4,932811662 | 0,046938776 | 0 | 0,146938776 | 5,918315841 | |
| 0,051020408 | 0 | 0,151020408 | 4,879120505 | 0,051020408 | 0 | 0,151020408 | 5,85383965 | |
| 0,055102041 | 0 | 0,155102041 | 4,832624101 | 0,055102041 | 0 | 0,155102041 | 5,798081341 | |
| 0,059183673 | 0 | 0,159183673 | 4,785838581 | 0,059183673 | 0 | 0,159183673 | 5,741921477 | |
| 0,063265306 | 0 | 0,163265306 | 4,741939164 | 0,063265306 | 0 | 0,163265306 | 5,689224684 | |
| 0,067346939 | 0 | 0,167346939 | 4,697849174 | 0,067346939 | 0 | 0,167346939 | 5,636269096 | |
| 0,071428571 | 0 | 0,171428571 | 4,652695918 | 0,071428571 | 0 | 0,171428571 | 5,582018707 | |
| 0,075510204 | 0 | 0,175510204 | 4,594384451 | 0,075510204 | 0 | 0,175510204 | 5,511902624 | |
| 0,079591837 | 0 | 0,179591837 | 4,541495335 | 0,079591837 | 0 | 0,179591837 | 5,448323712 | |
| 0,083673469 | 0 | 0,183673469 | 4,482593878 | 0,083673469 | 0 | 0,183673469 | 5,37745 | |
| 0,087755102 | 0 | 0,187755102 | 4,408111953 | 0,087755102 | 0 | 0,187755102 | 5,287749854 | |
| 0,091836735 | 0 | 0,191836735 | 4,335675316 | 0,091836735 | 0 | 0,191836735 | 5,200489407 | |
| 0,095918367 | 0 | 0,195918367 | 4,251313411 | 0,095918367 | 0 | 0,195918367 | 5,098803499 | |
| 0,1 | 0 | 0,2 | 4,1605 | 0,1 | 0 | 0,2 | 4,9893 | |
| | | average σψψ | 5,251538486 | | | average σψψ | 6,301205729 | |
| | | | average σψψst1,2=5,77 | | | | | |

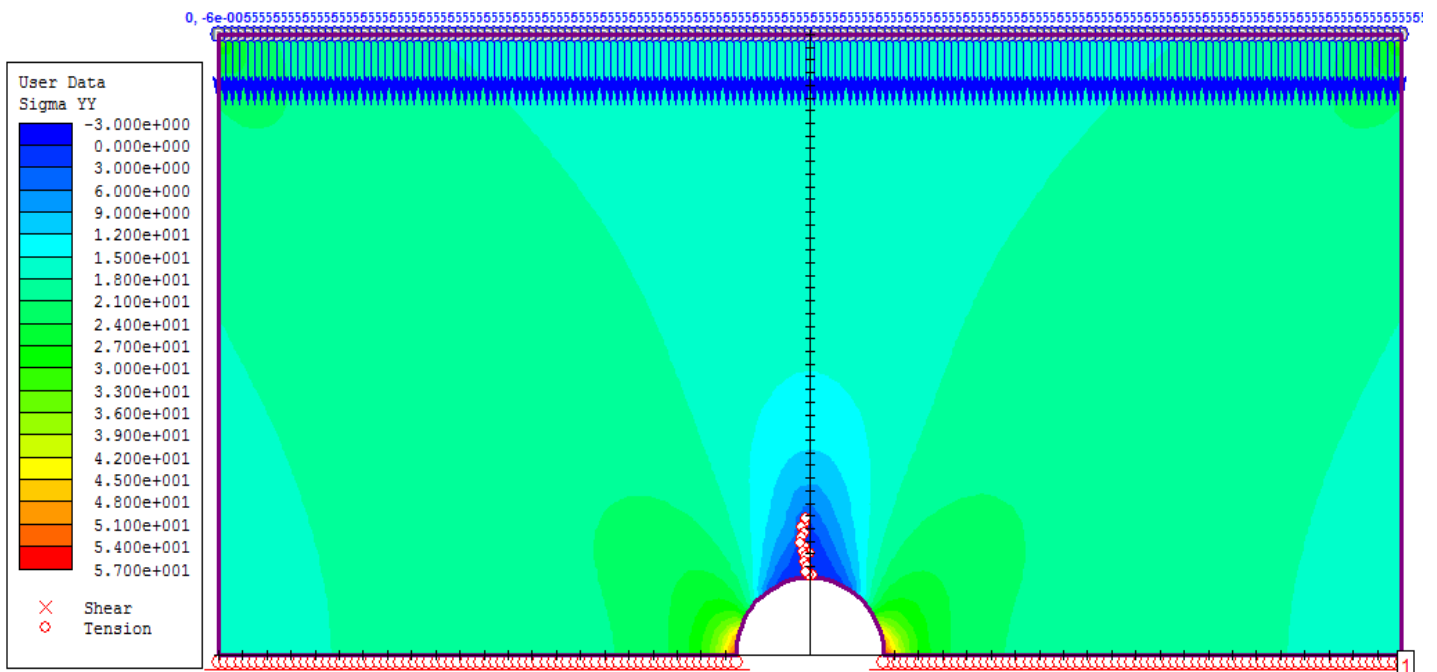
Πίνακας 10.

Από τον πίνακα προκύπτει ότι η μέγιστη τάση εντοπίζεται στις παρειές της διατομής. Στο 5^ο στάδιο η τάση στις παρειές είναι 11,36 MPa και στο 6^ο στάδιο είναι 13,6 MPa.



Stage 6: Δημιουργία εφελκυστικής ρωγμής πάνω από την οπή

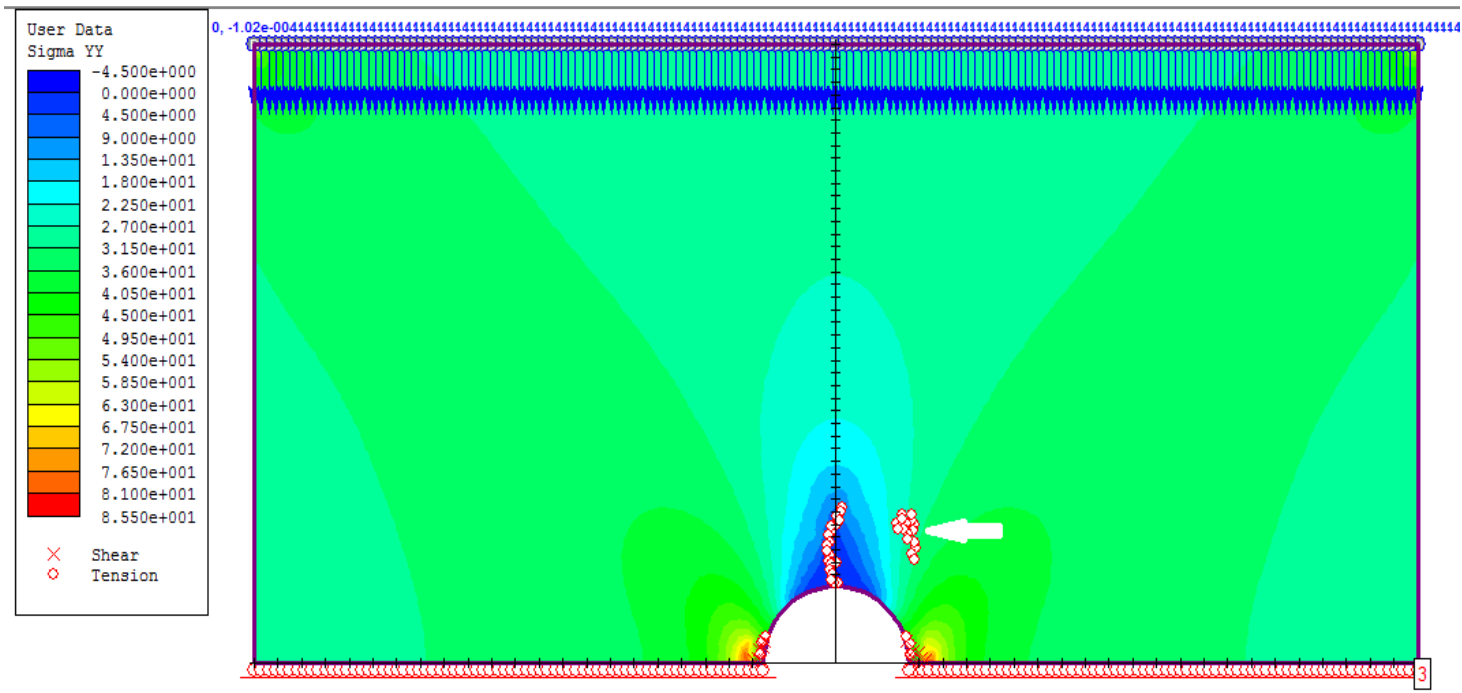
Στη συνέχεια αυξανόμενης της μετακίνησης του πλαισίου οι εφελκυστικές αστοχίες πάνω από την οπή πλυθαίνουν, ενώ παράλληλα στις παρειές της οπής αυξάνει η θλιπτική τάση.



Stage 20: Επέκταση αρχικής εφελκυστικής ρωγμής

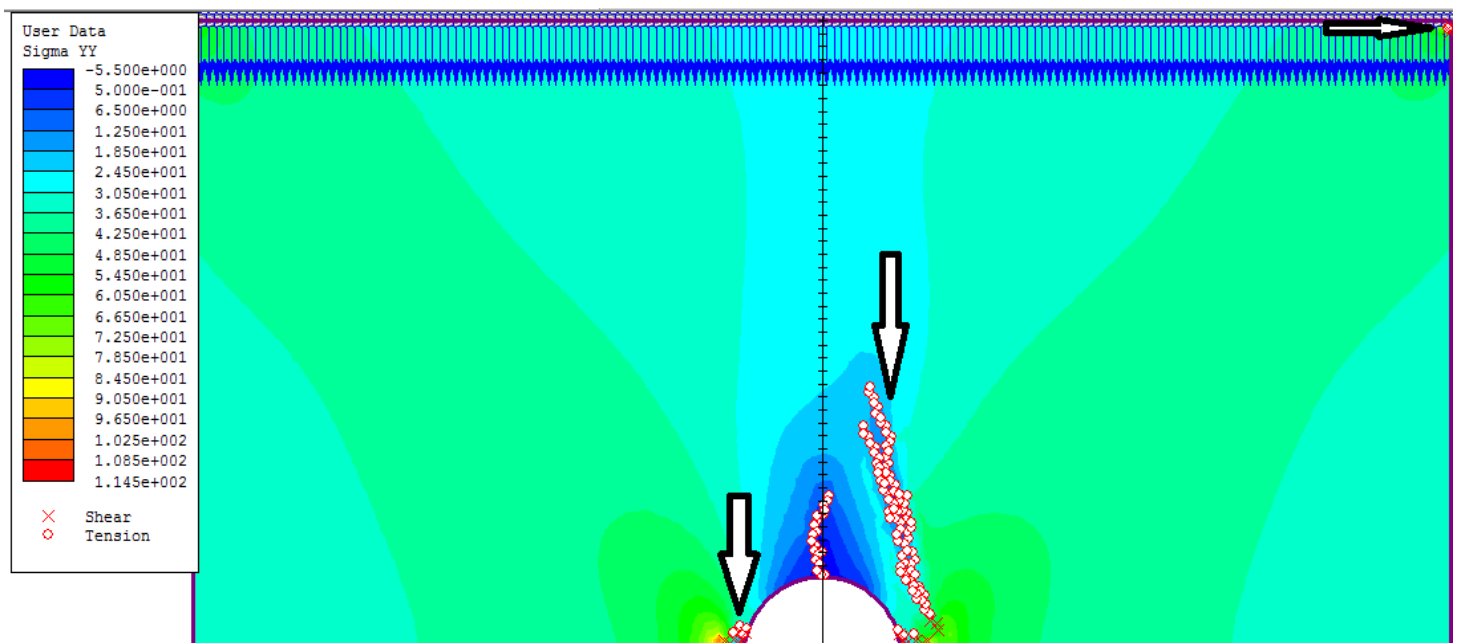
Στο στάδιο 27 για μετακίνηση πλαισίου 0,81 μ συντελείται διατμητική αστοχία δεξιά της οπής σε κατακόρυφη τάση $\sigma_{\psi\psi}=27,76$ MPa, η οποία ακολουθείται από αστοχίες διατμητικές και εφελκυστικές αντίστοιχα.

Η πρώτη απομονωμένη ρωγμή εμφανίζεται στο 34^ο στάδιο για μετακίνηση πλαισίου 0,102 mm που αντιστοιχεί σε κατακόρυφη τάση $\sigma_{\psi\psi}$ 34,3 MPa.

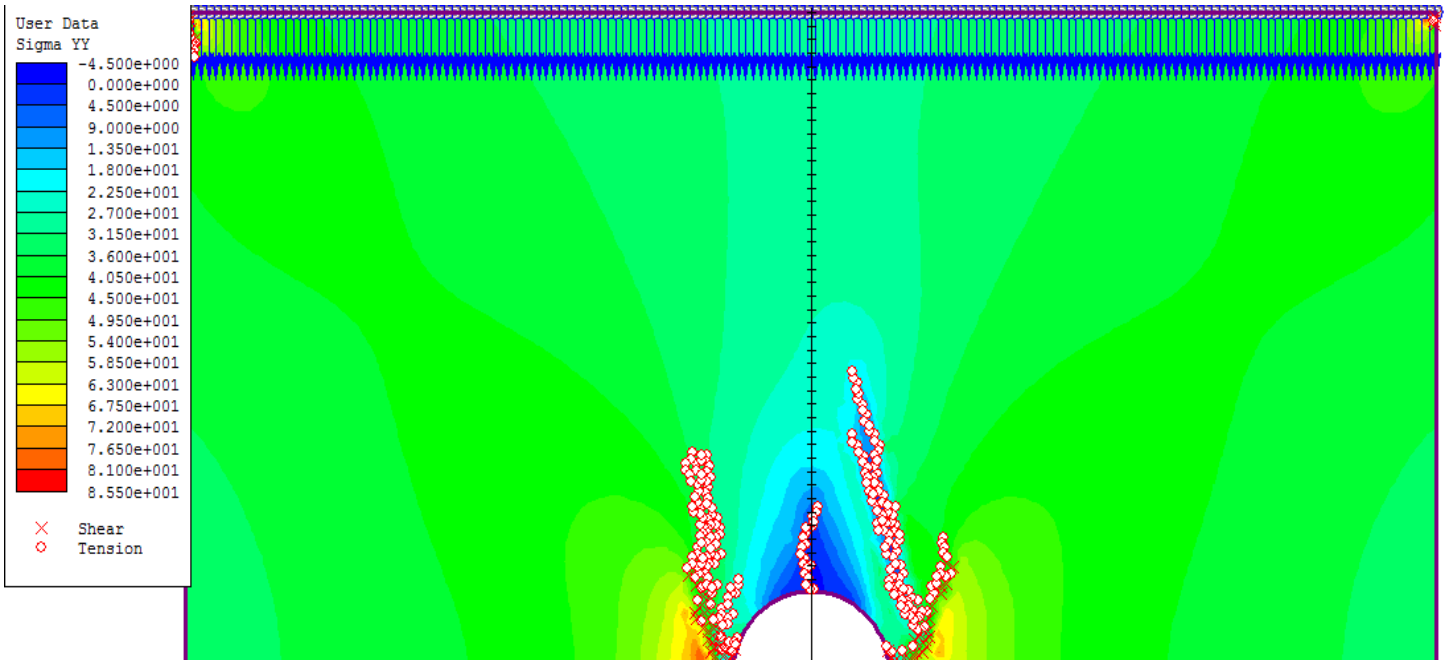


Stage 34: Εμφάνιση πρώτης απομονωμένης ρωγμής

Στο 39^ο στάδιο εμφανίζεται αστοχία σε εφελκυσμό και διάτμηση στα όρια του μοντέλου, και οι απομονωμένες ρωγμές επεκτείνονται περαιτέρω.

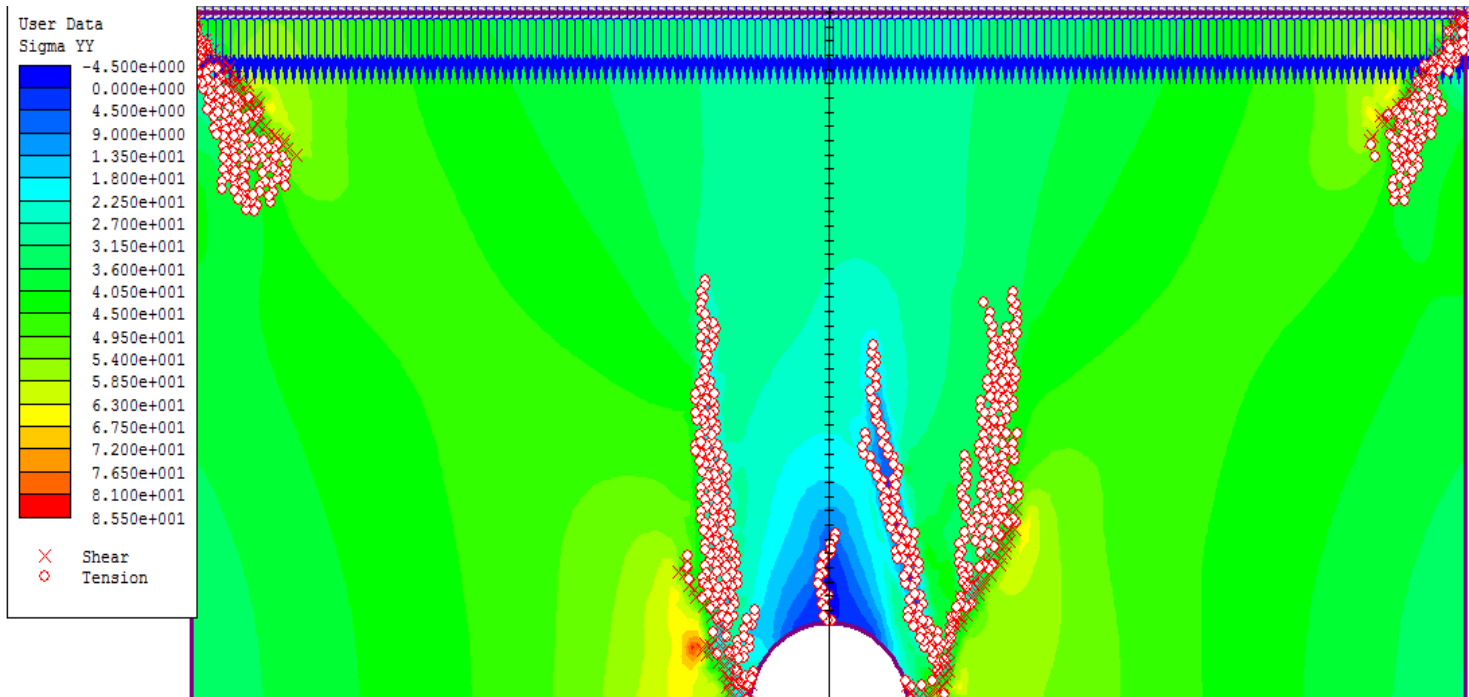


Stage 39: Διατμητική αστοχία στην άκρη του μοντέλου

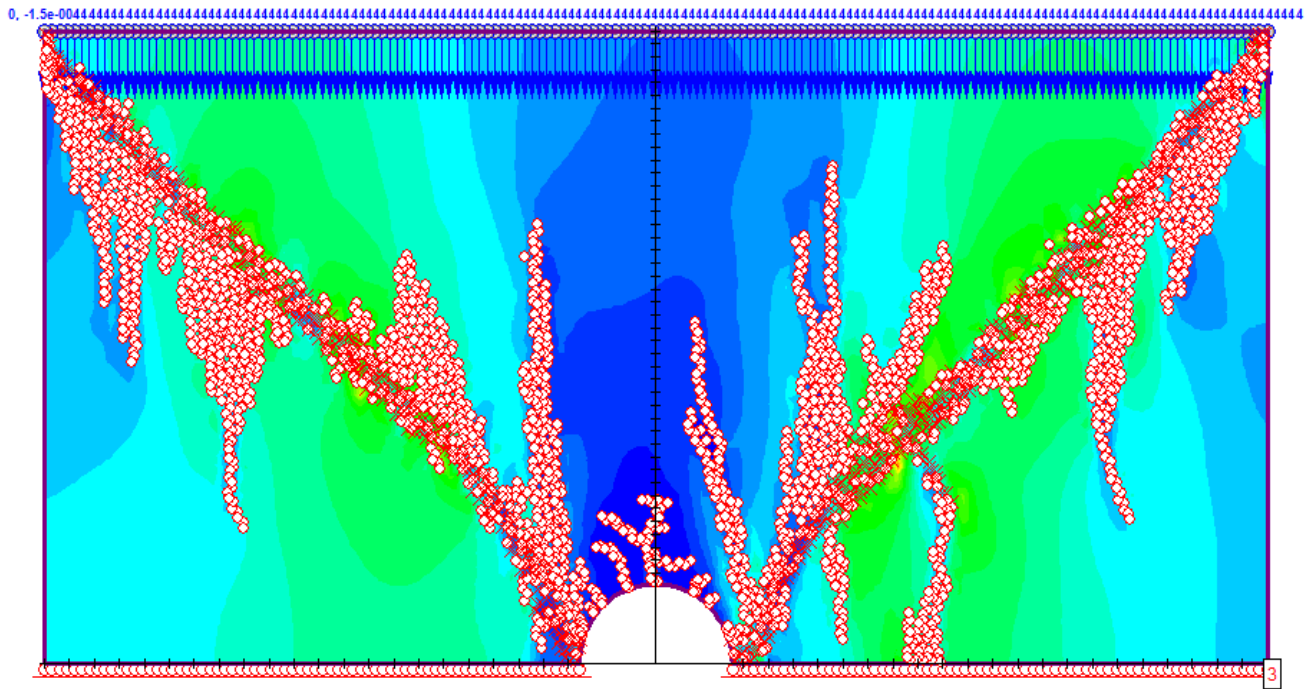


Stage 42

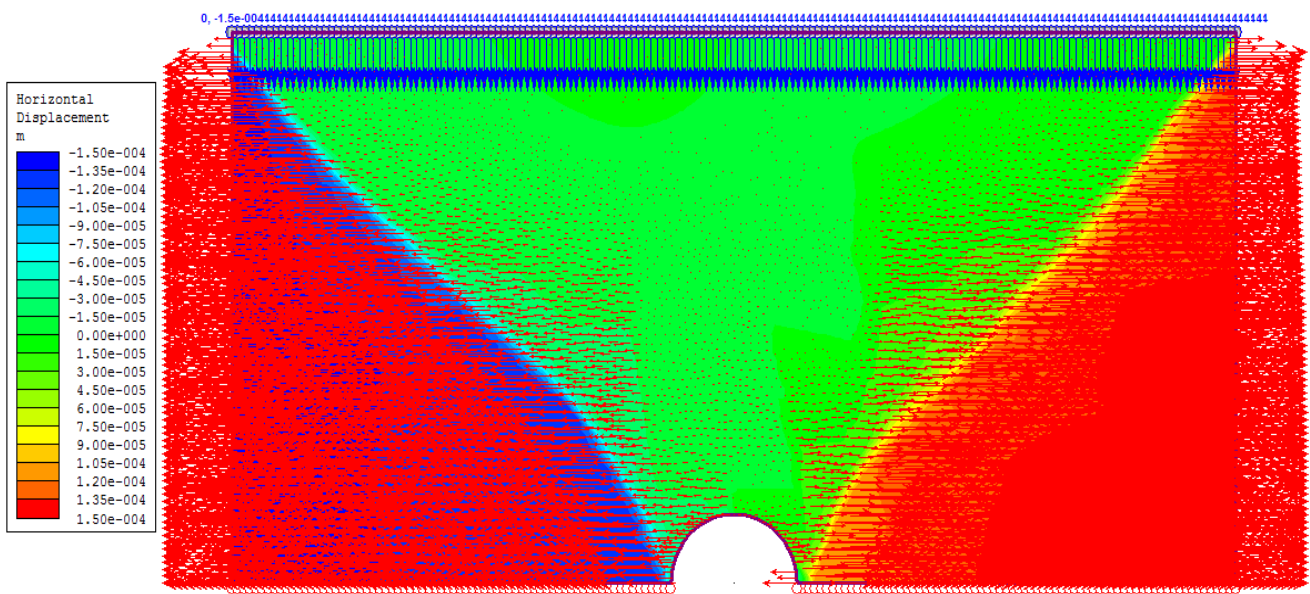
Στο στάδιο 47 για μετακίνηση πλαισίου 0,141 mm το μοντέλο υπόκειται σε τελική θραύση με μέγιστη αντοχή τα 45,69MPa. Στη συνέχεια η αντοχή μειώνεται απότομα, ενώ οι αστοχίες πολλαπλασιάζονται.



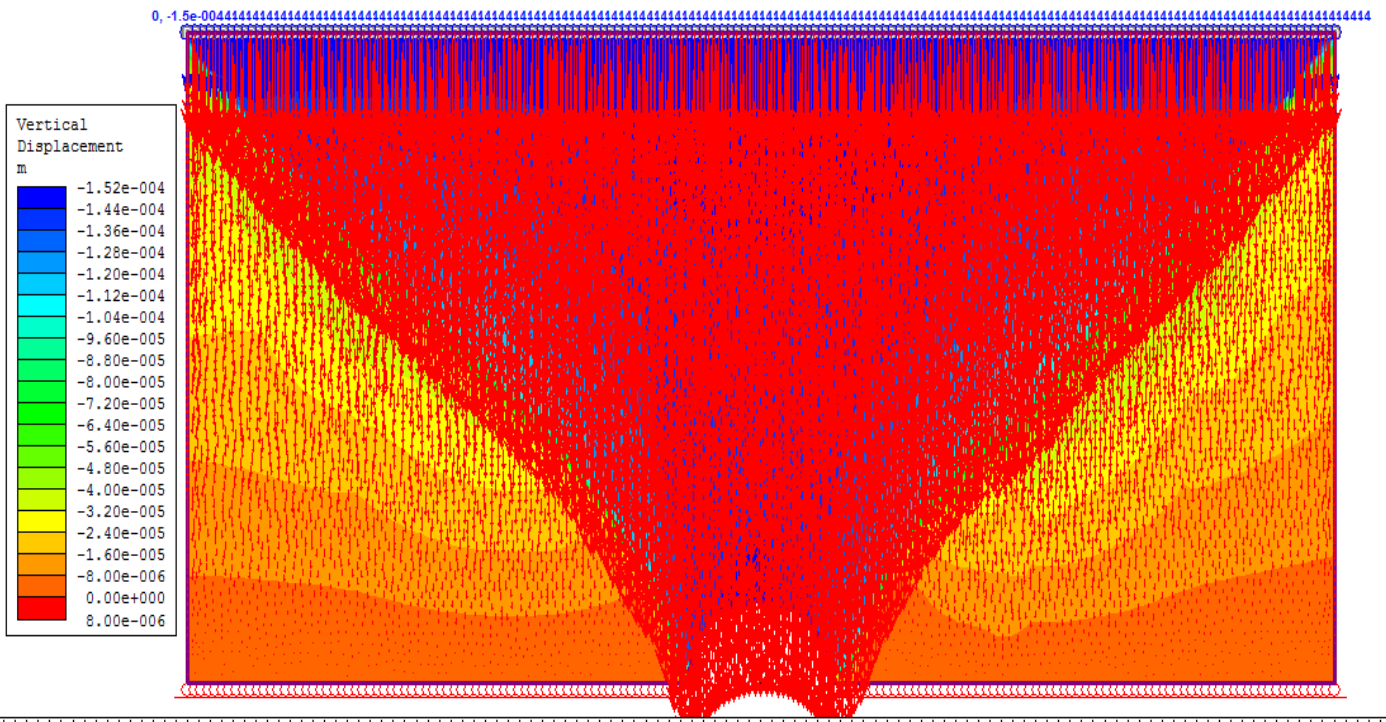
Stage 47: Τελική θραύση



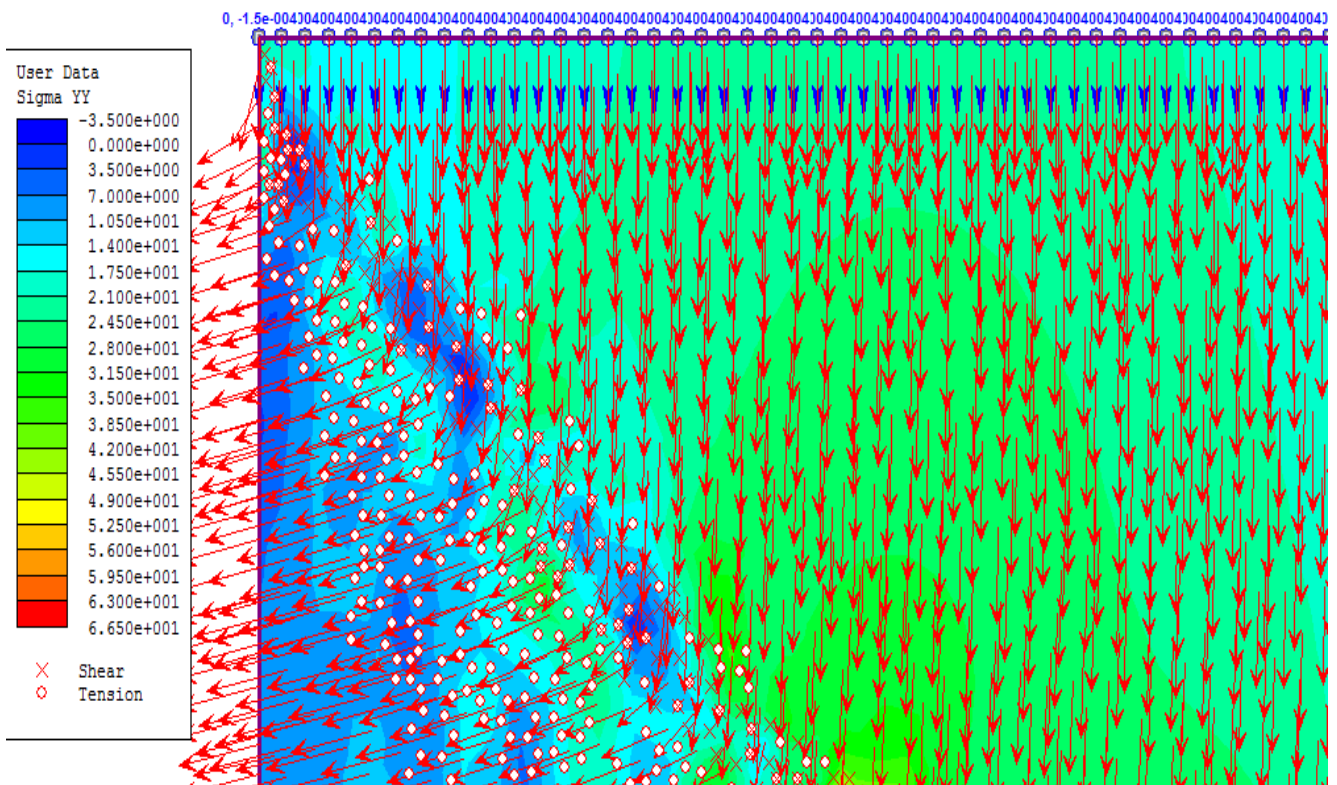
Stage 50: Μετά τη θραύση



Stage 50: Οριζόντιες μετακινήσεις



Stage 50: Κατακόρυφες μετακινήσεις



Stage 50: Οριζόντιες μετακινήσεις. Στα όρια της διατμητικής αστοχίας αλλάζει η διεύθυνση των διανυσμάτων.

Για την εύρεση της ύπαρξης του φαινομένου slabbing και της τιμής της τάσης έναρξης δημιουργούνται queries στα όρια της οπής, με σκοπό την εύρεση των οριζόντιων μετακινήσεων. Τα αποτελέσματα παρατίθενται παρακάτω.

Αριστερά της οπής:

| Query #4 Stage 37 | Query #4 Stage 38 | Query #4 Stage 39 | Query #4 Stage 40 |
|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| Horizontal Displacement [m] | Horizontal Displacement [m] | Horizontal Displacement [m] | Horizontal Displacement [m] |
| -1,10479E-06 | -1,42559E-07 | 3,69141E-07 | 2,41538E-06 |
| -6,6277E-06 | -6,18337E-06 | -6,15414E-06 | -4,54795E-06 |
| -9,32103E-06 | -9,17947E-06 | -9,38627E-06 | -7,87423E-06 |
| -1,27947E-05 | -1,30362E-05 | -1,35253E-05 | -1,18622E-05 |
| -1,69354E-05 | -1,76226E-05 | -1,84229E-05 | -1,68505E-05 |

Πίνακας 11

Δεξιά της οπής:

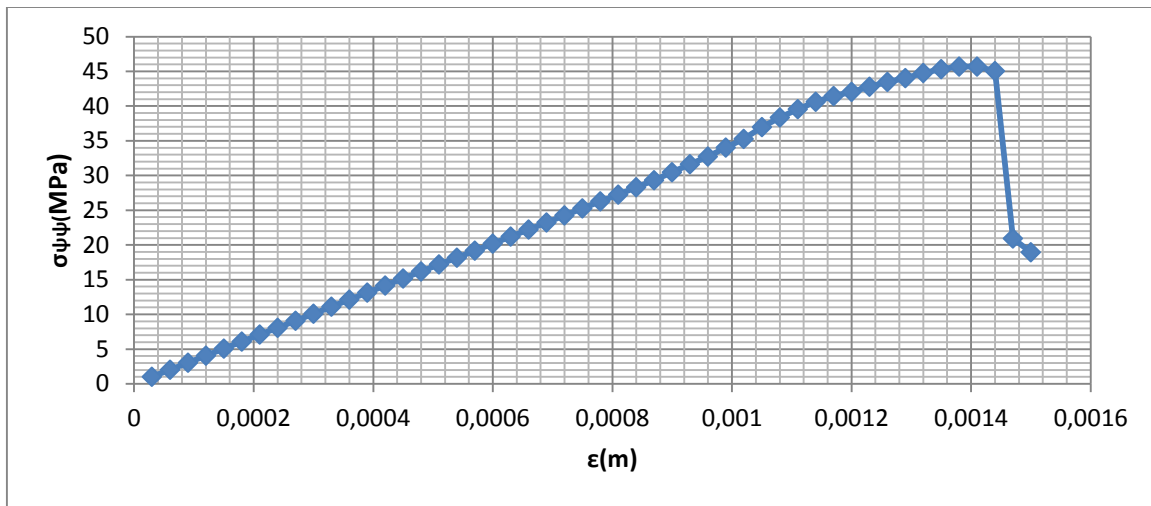
| Query #5 Stage 36 | Query #5 Stage 37 | Query #5 Stage 38 | Query #5 Stage 39 |
|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| Horizontal Displacement [m] | Horizontal Displacement [m] | Horizontal Displacement [m] | Horizontal Displacement [m] |
| 4,5318E-07 | -6,37784E-07 | -1,58381E-06 | -5,56598E-06 |
| 4,33029E-06 | 3,76457E-06 | 3,30266E-06 | -1,95683E-07 |
| 7,08085E-06 | 6,88023E-06 | 6,74333E-06 | 3,60189E-06 |
| 6,52467E-06 | 6,16871E-06 | 5,83181E-06 | 2,74116E-06 |
| 8,15058E-06 | 7,95078E-06 | 7,68607E-06 | 5,0615E-06 |

Πίνακας 12

Από τους παραπάνω πίνακες προκύπτει ότι το slabbing ξεκινά από το 37^ο στάδιο για κατακόρυφη τάση $\sigma_{\psi\psi} = 36,61$ MPa.

Η διαδικασία της θραύσης στο παραπάνω μοντέλο διεξήχθη όπως αναμενόταν. Πρώτα το δοκίμιο αστόχησε εφελκυστικά πάνω από την οπή, ύστερα εμφανίζονται απομονωμένες ρωγματώσεις περιμετρικά του ανοίγματος, στη συνέχεια παρατηρείται το slabbing στο εσωτερικό του ανοίγματος και στο τέλος το μοντέλο υπέστη την τελική θραύση με απότομη πτώση της αντοχής, υποδηλώνοντας έτσι ψαθυρή θραύση.

Συνοπτικά τα στάδια των γεγονότων σε συσχέτισμό με την κατακόρυφη τάση παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:



Διάγραμμα 15. Τάση - Τροπή

Το διάγραμμα τάσης τροπής απεικονίζει ψαθυρό υλικό με μέγιστη αντοχή 45,7 MPa.

Τα συνοπτικά αποτελέσματα παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

| Γεγονός | Κατακόρυφη τάση (MPa) |
|-----------------------------------|-----------------------|
| Εμφάνιση εφελκυστικής ρωγμής | 5,77 |
| Εμφάνιση απομονωμένων ρωγματώσεων | 34,3 |
| Slabing | 36,61 |
| Μέγιστη αντοχή (MPa) | 45,69 |

Πίνακας 13.

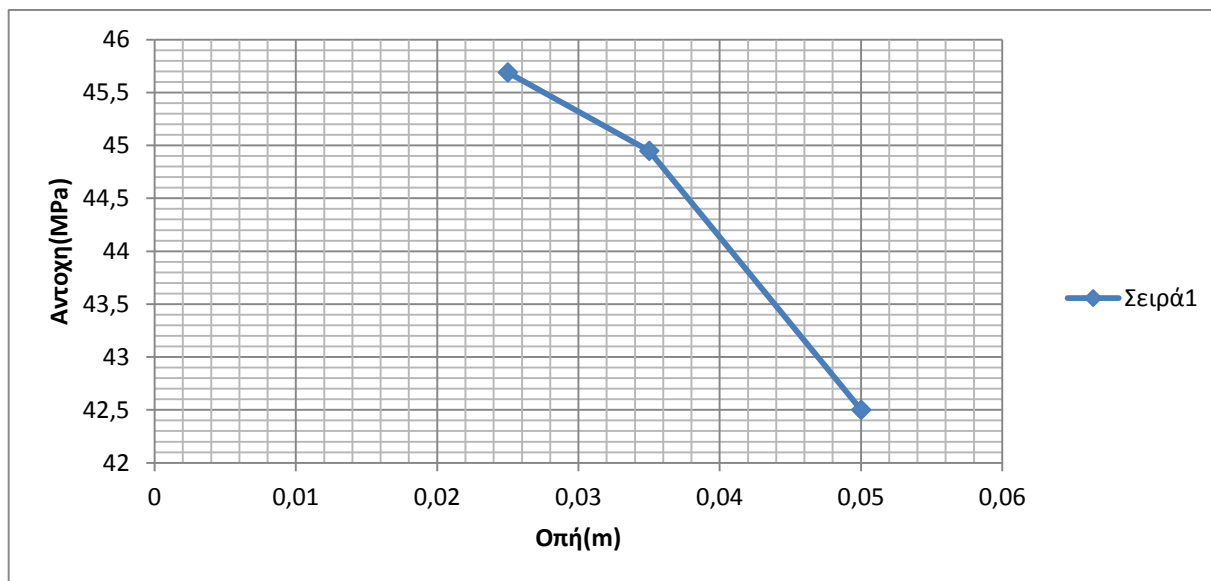
3.5.Συμπεράσματα

Συνοψίζοντας τα παραπάνω αποτελέσματα στον παρακάτω πίνακα και συνδυαστικά με το διάγραμμα 16 παρατηρούνται τα εξής:

- Με αύξηση της διαμέτρου της οπής η αντοχή των μοντέλων μειώνεται μη γραμμικά.
- Η τιμή της τάσης έναρξης της πρώτης ρωγμάτωσης αυξάνεται με την αύξηση της διαμέτρου της οπής. Το γεγονός αυτό δεν ακολουθεί την πραγματικότητα.
- Από τη σχέση της διαμέτρου της οπής με τις απομονωμένες ρωγμές και τις αποφλοιώσεις στην οπή δεν μπορεί να προκύψει ασφαλές συμπέρασμα.

| ΟΠΗ(m) | ΑΝΤΟΧΗ(MPa) | 1η εφελκυστική(MPa) | remote(MPa) | slabing(MPa) |
|--------|-------------|---------------------|-------------|--------------|
| 0,025 | 45,69 | 5,77 | 34,3 | 36,61 |
| 0,035 | 44,95 | 5,99 | 34 | 35,5 |
| 0,05 | 42,5 | 6,69 | 35,8 | 39,1 |

Πίνακας 14.



Διάγραμμα 16.Συσχετισμός διαμέτρου οπής ως προς την αντοχή

4. Προσομοίωση Carter

Σε αυτό το κεφάλαιο θα προσομοιωθεί το πείραμα του Carter για το δοκίμιο γρανίτη της λίμνης Bonnet. Για το υπό κατασκευή μοντέλο απουσιάζουν πληροφορίες που αφορούν μηχανικά χαρακτηριστικά του γρανίτη, όπως η γωνία τριβής, η συνοχή, η απομένουσα γωνία τριβής και συνοχή καθώς και η διαστολικότητα. Από τα δεδομένα του παρακάτω πίνακα που έδωσε ο Carter και μέσω του προγράμματος Roclab της Rocscience υπολογίζονται αυτές οι παράμετροι με στόχο την επιβεβαίωση αυτών.

B. J. CARTER, E. Z. LAJTAI AND A. PETUKHOV

Table I. Mechanical properties of Lac du Bonnet Granite*

| Parameter | Number of tests | Value | Standard deviation |
|--|-----------------|------------|--------------------|
| Tensile strength | 66 | 14 MPa | 1.2 MPa |
| Uniaxial compressive strength | 28 | 226 MPa | 15 MPa |
| Modulus of elasticity | 15 | 71.3 GPa | 4.7 GPa |
| Fracture toughness† | 15 | 2.45 MPa√m | 0.2 MPa√m |
| Poisson's ratio | 15 | 0.25 | 0.04 |
| Triaxial strength parameters (426 tests) $m = 31$ ($s = 1$), $\sigma_c = 245$ MPa‡ | | | |

* Lac du Bonnet quarry.

† From the double torsion test.

‡ Obtained from curve fitting to data from 426 tests.

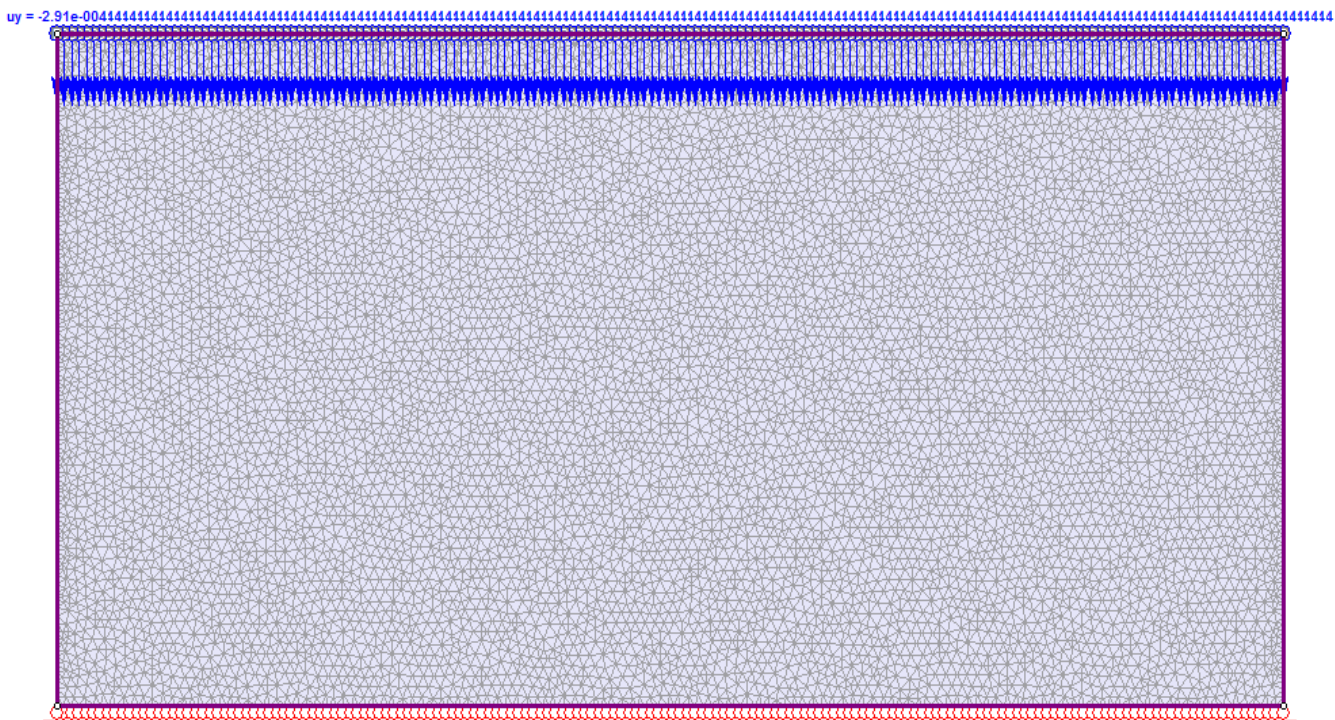
Πίνακας 15

Για τις παραμέτρους διατμητικής αντοχής του μοντέλου έγινε η υπόθεση ότι η διατμητική αντοχή πριν την κορυφαία αντοχή οφείλεται αποκλειστικά στη συνοχή, ενώ η παραμένουσα αντοχή οφείλεται στην παραμένουσα συνοχή και την παραμένουσα γωνία τριβής. Επιπλέον, θεωρήθηκε ότι εφόσον το πέτρωμα είναι ψαθυρό, μετά την κορυφαία αντοχή θα εμφανίζει διασταλτικότητα που αντιπροσωπεύεται από τη γωνία διαστολής. Οι τιμές των μηχανικών χαρακτηριστικών του μοντέλου είναι οι εξής:

- c (cohesion)= 113 MPa
- ϕ (friction angle)= 0
- d (dilation angle)= 12
- ϕ_r (residual friction angle)=18
- c_r (residual cohesion)= 4.4 MPa

Η επιβεβαίωση των παραπάνω παραμέτρων γίνεται με δοκιμή μονοαξονικής θλίψης σε μοντέλο με αυτά τα χαρακτηριστικά, χωρίς οπή.

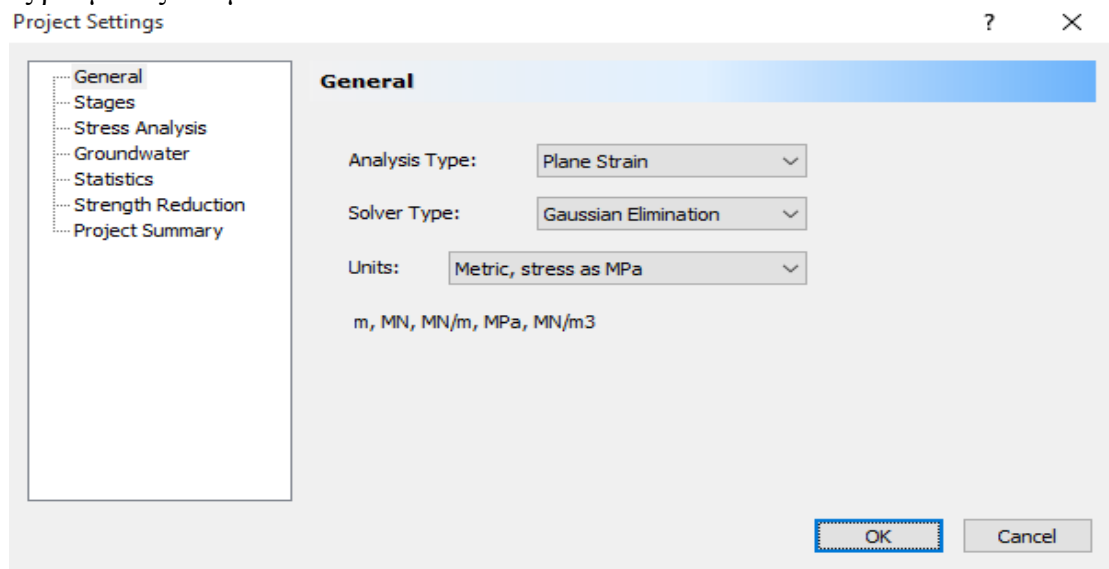
4.1.Μοντέλο επιβεβαίωσης



Εικόνα 21

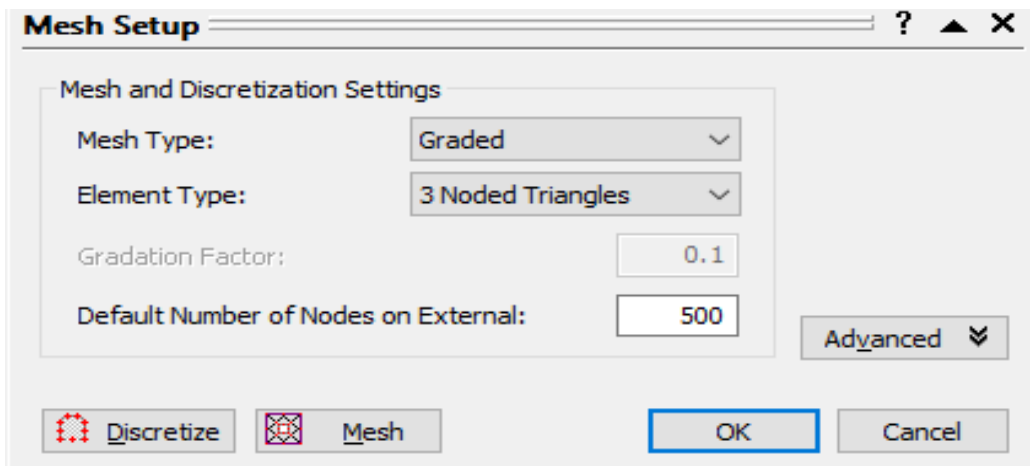
Καταρχάς εισάγουμε τα παρακάτω δεδομένα στο πρόγραμμα:

- Γεωμετρία μοντέλου: $0,2*0,1\text{m}^2$
- Γενικές ρυθμίσεις του μοντέλου:



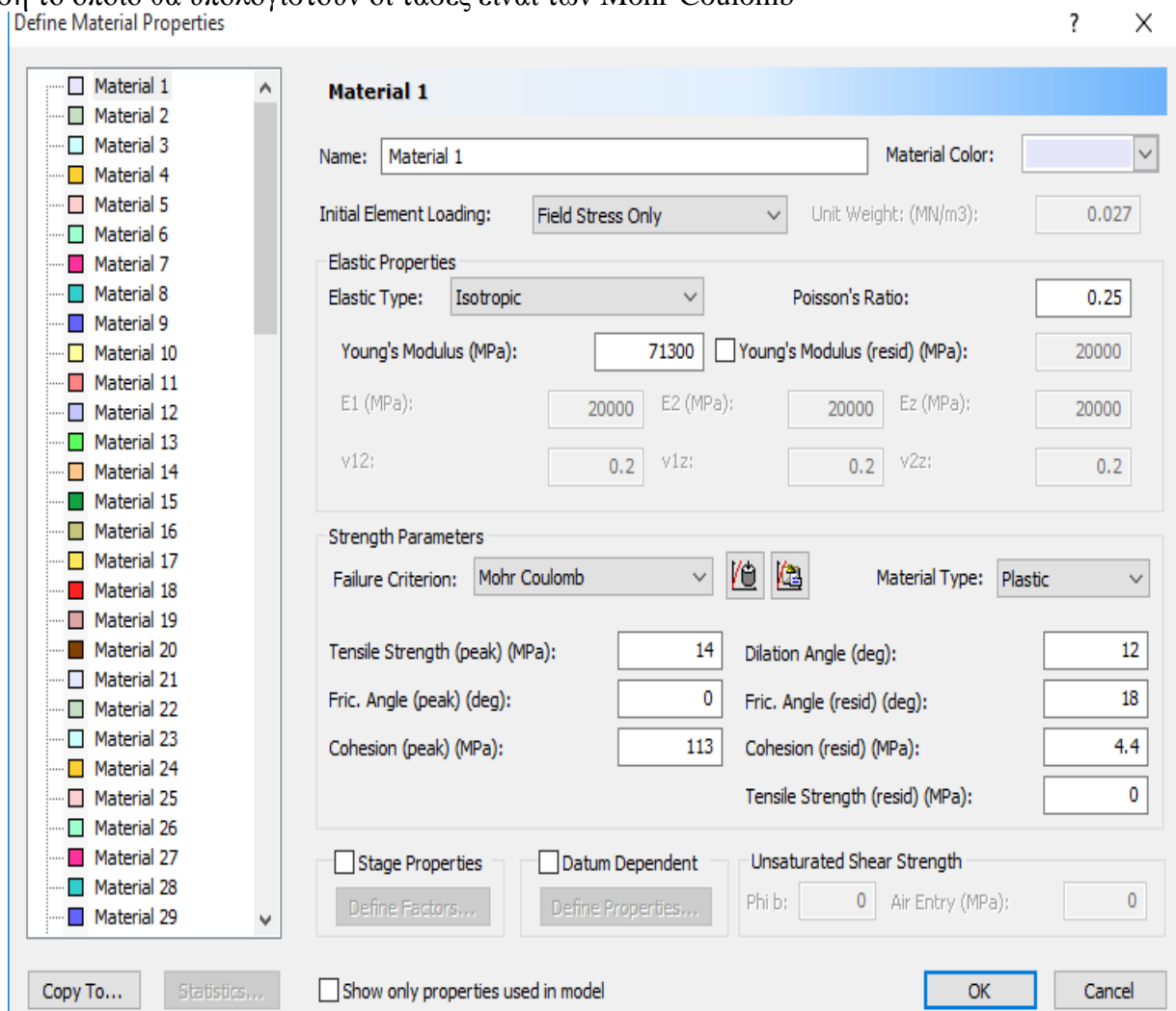
Εικόνα 22

- Πλέγμα και διακριτοποίηση: Επιλέγουμε τύπο graded με τριγωνικά στοιχεία τριών κόμβων.



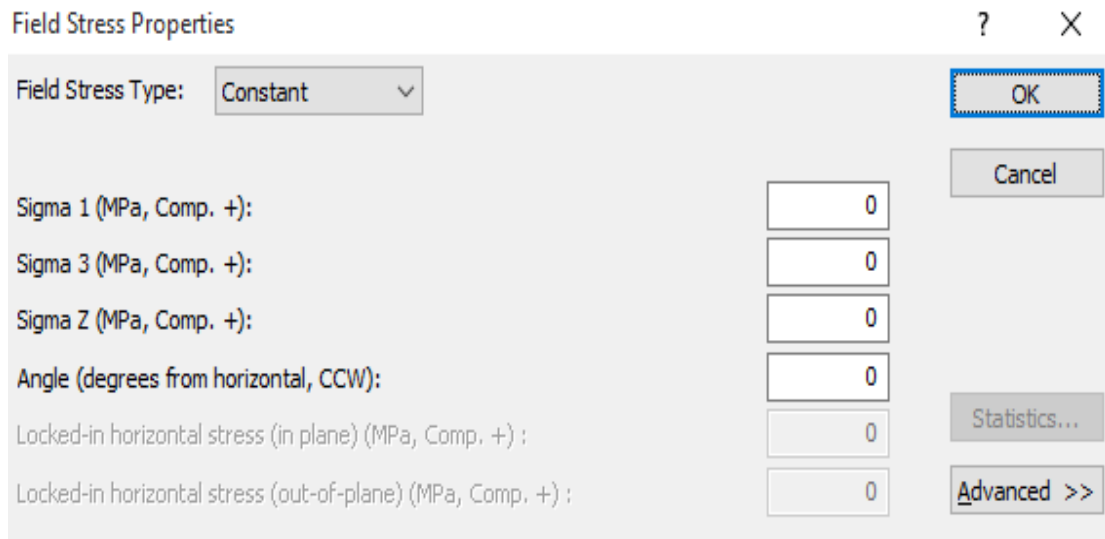
Εικόνα 23

- Ιδιότητες υλικού: Το υλικό είναι ισότροπο με μέτρο ελαστικότητας $E=71,3\text{GPa}$, πλαστικού τύπου με μηδενική απομένουσα αντοχή με σκοπό την δημιουργία ψαθυρότητας. Το κριτήριο αστοχίας με βάση το οποίο θα υπολογιστούν οι τάσεις είναι των Mohr-Coulomb



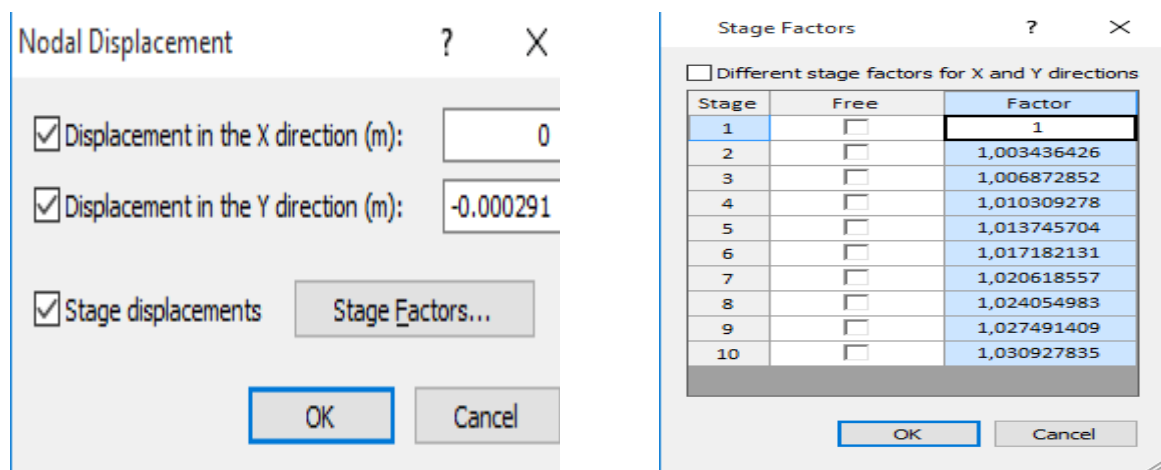
Εικόνα 24

- Τύπος στήριξης μοντέλου: Η στήριξη θα είναι με κύλιση στη βάση του μοντέλου και ελεύθερη στις υπόλοιπες περιοχές. Λόγω της «κατοπτρικής» αυτής της στήριξης έχουν δοθεί και οι παραπάνω γεωμετρικές διαστάσεις.
- Καθορισμός φόρτισης: Επιλέχθηκε φυσικό πεδίο τάσεων (fieldstressonly) με constantfieldstressype με μηδενικές τιμές στις κατακόρυφες τάσεις.



Εικόνα 25

Στάδια Δοκιμής: Η δοκιμή θα χωριστεί σε 10 στάδια. Η άσκηση τάσης κατά τη δοκιμή μονοαξονικής θλίψης περιλαμβάνει μετακίνηση της πλάκας φόρτισης προς τα κάτω. Γι' αυτό το λόγο η φόρτιση του μοντέλου γίνεται με κατακόρυφη μετακίνηση προς την πλάκα στήριξης αυξανόμενη ανά στάδιο. Το μοντέλο φορτίζεται μονοαξονικά σε δέκα στάδια με αρχική παραμόρφωση 0,291 mm



Εικόνα 26

Μέσω της επιλογής infoviewer παρουσιάζονται τα αναλυτικά στοιχεία του σχεδιασμού

Project Summary

- File Name:
ΕΠΙΒΕΒΑΙΩΣΗΤΙΜΩΝΓΡΑΝΙΘ
- Last saved with Phase2 version:
8.014
- Project Title: Project1

General Settings

- Number of Stages: 10
- Analysis Type: Plane Strain
- Solver Type: Gaussian Elimination
- Units: Metric, stress as MPa

Analysis Options

- Maximum Number of Iterations: 500
- Tolerance: 0.001
- Number of Load Steps: Automatic
- Convergence Type: Absolute Energy
- Tensile Failure: Does Not Reduce Shear Strength
- Joint tension reduces joint stiffness by a factor of 0.01

Groundwater Analysis

- Method: Piezometric Lines
- Pore Fluid Unit Weight: 0.00981 MN/m³
- Probability: None

Field Stress

- Field stress: constant
- Sigma one: 0 MPa (compression positive)
- Sigma three: 0 MPa (compression positive)

- Sigma Z: 0 MPa (compression positive)
- Angle from the horizontal to sigma 1: 0 degrees (counter-clockwise)

Mesh

- Mesh type: graded
- Element type: 3 noded triangles
- Number of elements on Stage 1: 17104
- Number of nodes on Stage 1: 8803
- Number of elements on Stage 2: 17104
- Number of nodes on Stage 2: 8803
- Number of elements on Stage 3: 17104
- Number of nodes on Stage 3: 8803
- Number of elements on Stage 4: 17104
- Number of nodes on Stage 4: 8803
- Number of elements on Stage 5: 17104
- Number of nodes on Stage 5: 8803
- Number of elements on Stage 6: 17104
- Number of nodes on Stage 6: 8803
- Number of elements on Stage 7: 17104
- Number of nodes on Stage 7: 8803
- Number of elements on Stage 8: 17104
- Number of nodes on Stage 8: 8803
- Number of elements on Stage 9: 17104
- Number of nodes on Stage 9: 8803
- Number of elements on Stage 10: 17104
- Number of nodes on Stage 10: 8803

Mesh Quality

- All elements are of good quality


Poor quality elements defined as:

- Side length ratio (maximum / minimum) > 30.00
- Minimum interior angle < 2.0 degrees
- Maximum interior angle > 175.0 degrees

Material Properties

| | |
|-------------------------|------------|
| angle | |
| Peak cohesion | 113 MPa |
| Material type | Plastic |
| Dilation Angle | 12 degrees |
| Residual Friction Angle | 18 degrees |
| Residual Cohesion | 4.4 MPa |
| Piezo to use | None |
| Ru value | 0 |

Material: Material 1

| | |
|---------------------------|---|
| Color |  |
| Initial element loading | field stress only |
| Elastic type | isotropic |
| Young's modulus | 71300 MPa |
| Poisson's ratio | 0.25 |
| Failure criterion | Mohr-Coulomb |
| Peak tensile strength | 14 MPa |
| Residual tensile strength | 0 MPa |
| Peak friction | 0 degrees |

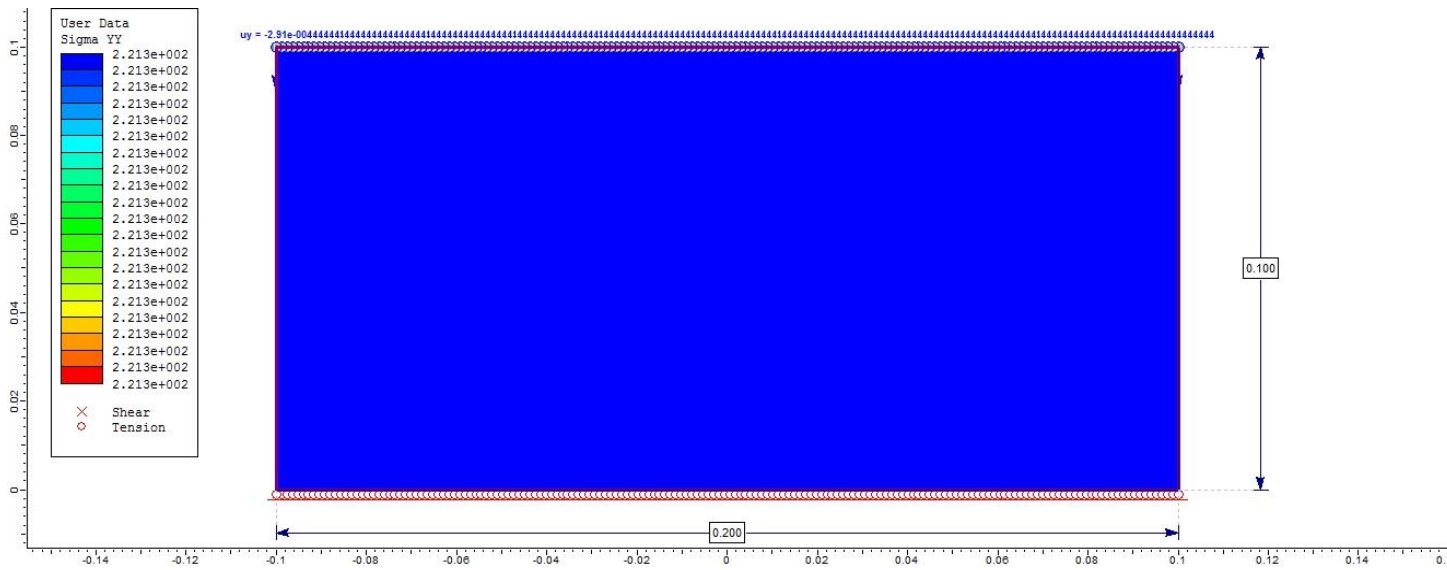
List of All Coordinates

External boundary

| X | Y |
|------|-----|
| 0.1 | 0 |
| 0.1 | 0.1 |
| -0.1 | 0.1 |
| -0.1 | 0 |

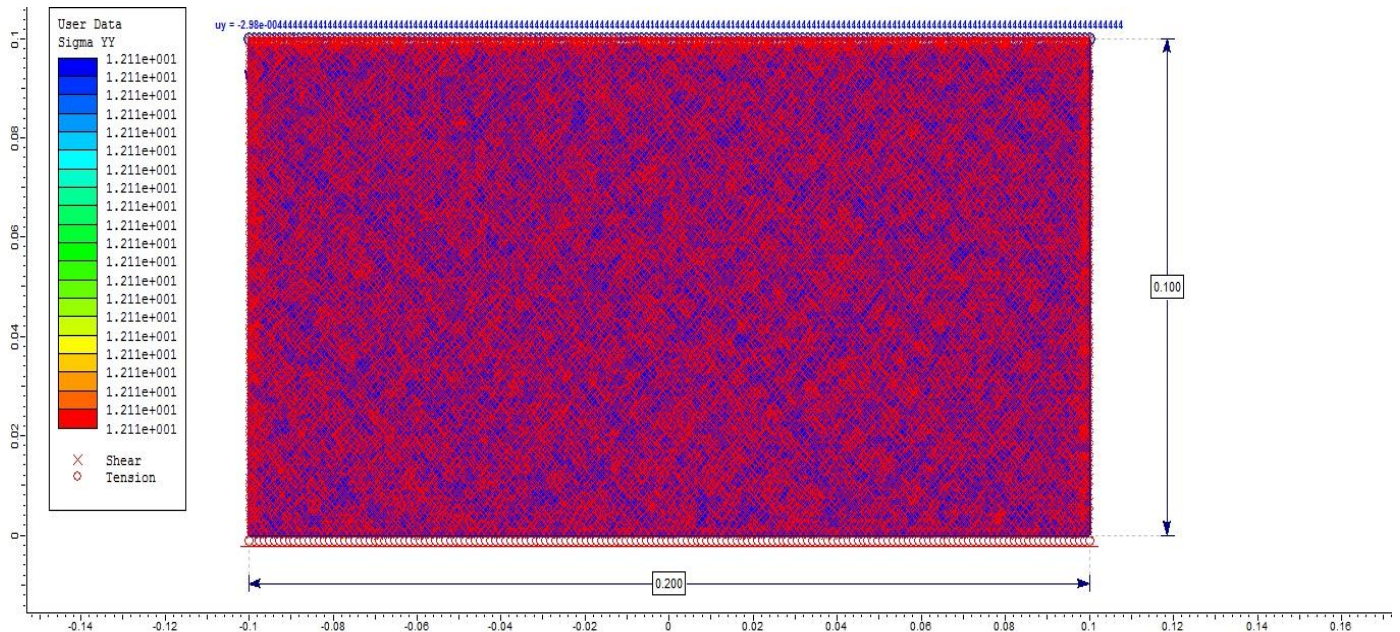
4.1.1 Ανάλυση

Η δοκιμή εξελίσσεται ομαλά από το πρώτο στάδιο, αφού οι τάσεις παρουσιάζουν ομοιομορφία στην κατανομή και στις τιμές.



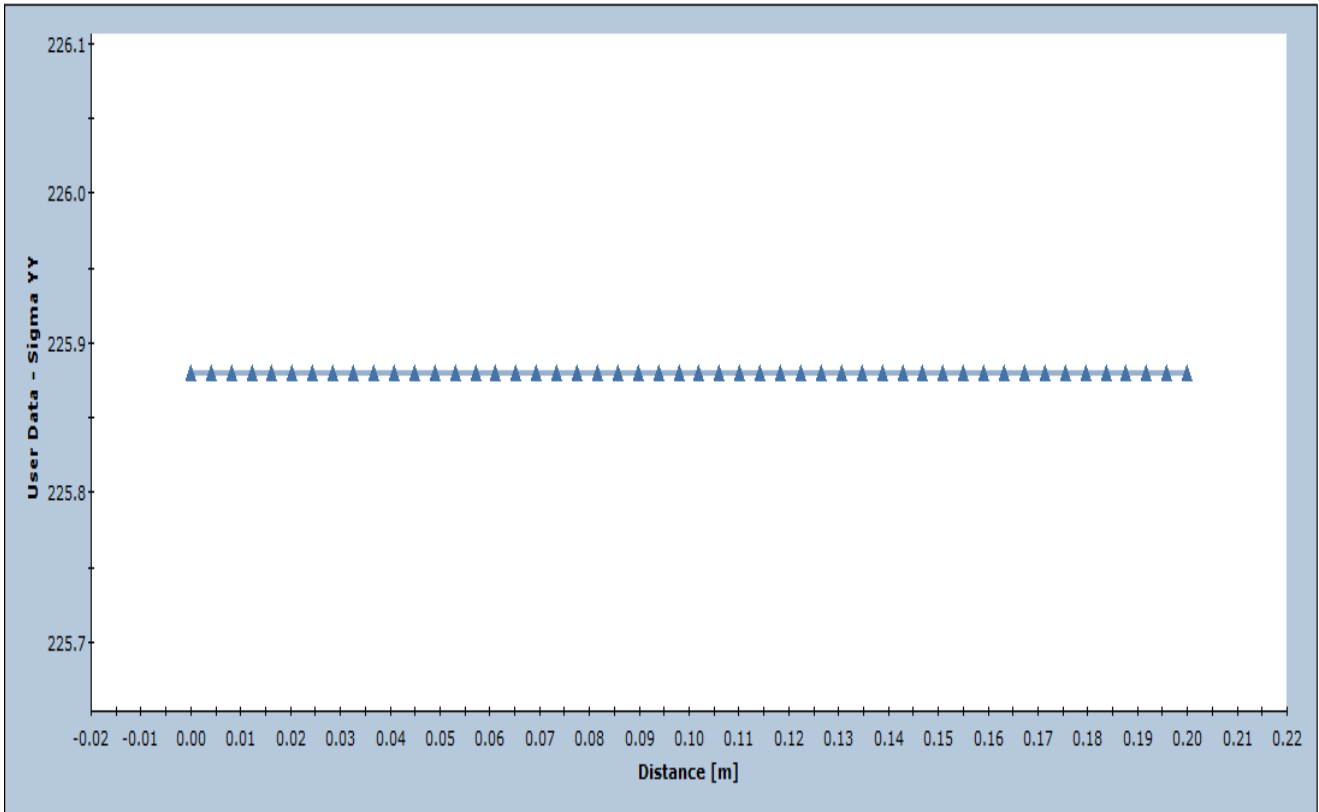
Stage 1-τάση σ_{yy}

Στα πρώτα 7 στάδια πέρα από την αύξηση των τιμών των τάσεων και των μετατοπίσεων δεν συντελούνται περαιτέρω φαινόμενα. Στο 8^ο στάδιο το μοντέλο υπόκειται σε θραύση που οφείλεται σε διατμητική αστοχία.



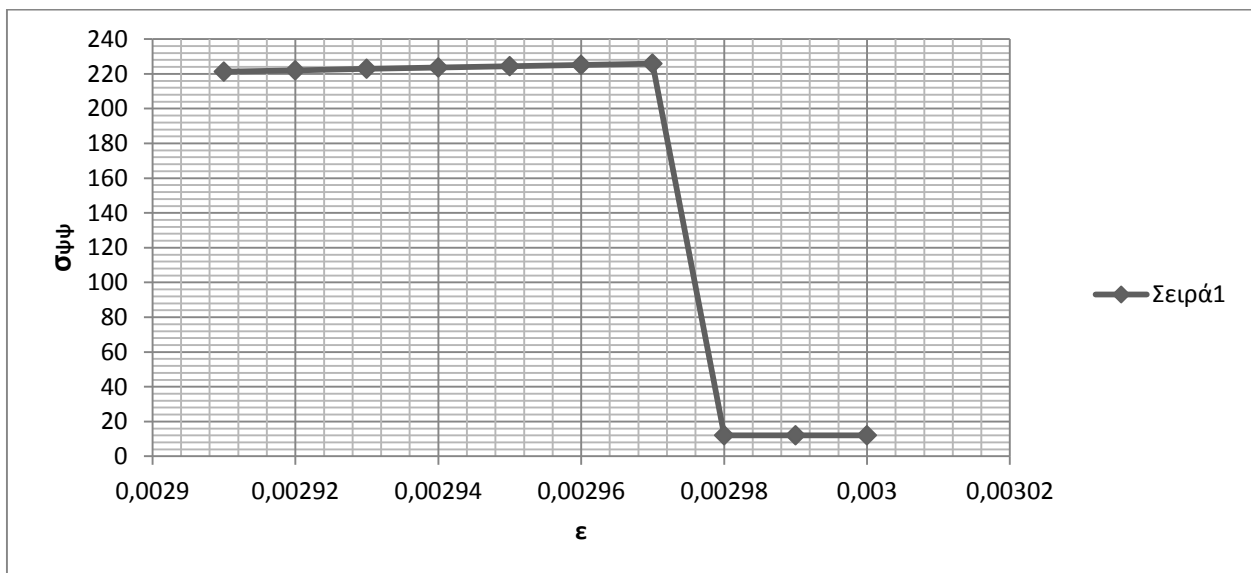
Stage 8: Εφελκυστικές αστοχίες και θραύση

User Data - Sigma YY



Διάγραμμα 17. Κατακόρυφη τάση – Απόσταση από το κέντρο της οπής

Από το διάγραμμα τάσης ως προς την απόσταση φαίνεται ότι η μέγιστη μονοαξονική αντοχή του μοντέλου $\sigma_c = 255,88 \text{ MPa}$, η οποία σχεδόν ταυτίζεται με την τιμή που έδωσε ο Carter (226 MPa).



Διάγραμμα 18. Τάση - Τροπή

Από το παραπάνω διάγραμμα επιβεβαιώνεται και η ψαθυρότητα του υλικού. Η κατακόρυφη τάση αυξάνεται γραμμικά έως τα 256 MPa και για μετακίνηση 0,00297 m πέφτει απότομα στα 12,11 MPa.

4.2. Προσομοίωση μοντέλου με σπή

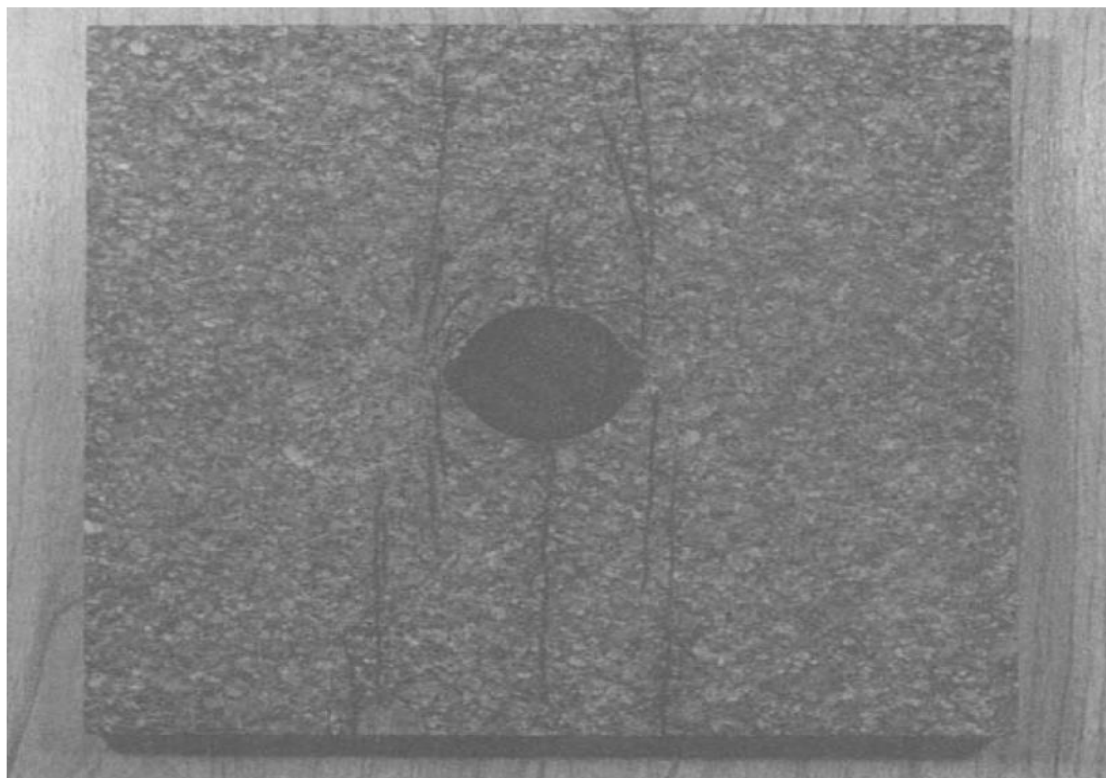
Το υπό μονοαξονική θλίψη μοντέλο προσομοιώνει γρανίτη της λίμνης Bonnet διαστάσεων 200*200*60 mm με διάμετρο κυκλικού ανοίγματος 36 mm στο κέντρο, ενώ η μηχανή φόρτισης έχει τα μηχανικά χαρακτηριστικά που παρουσιάζει ο χάλυβας. Τα μηχανικά χαρακτηριστικά του μοντέλου είναι τα ίδια με αυτά που επιβεβαιώθηκαν από την παραπάνω δοκιμή μονοαξονικής θλίψης.

Σκοπός της προσομοίωσης είναι η παρατήρηση της σχέσης των φαινομένων που θα εξάγει το πρόγραμμα με τα πραγματικά φαινόμενα που παρατηρήθηκαν από τον Carter και η σχέση των τιμών ανά συμβάν.

Συνοπτικά τα αποτελέσματα της δοκιμής του Carter είναι τα παρακάτω:

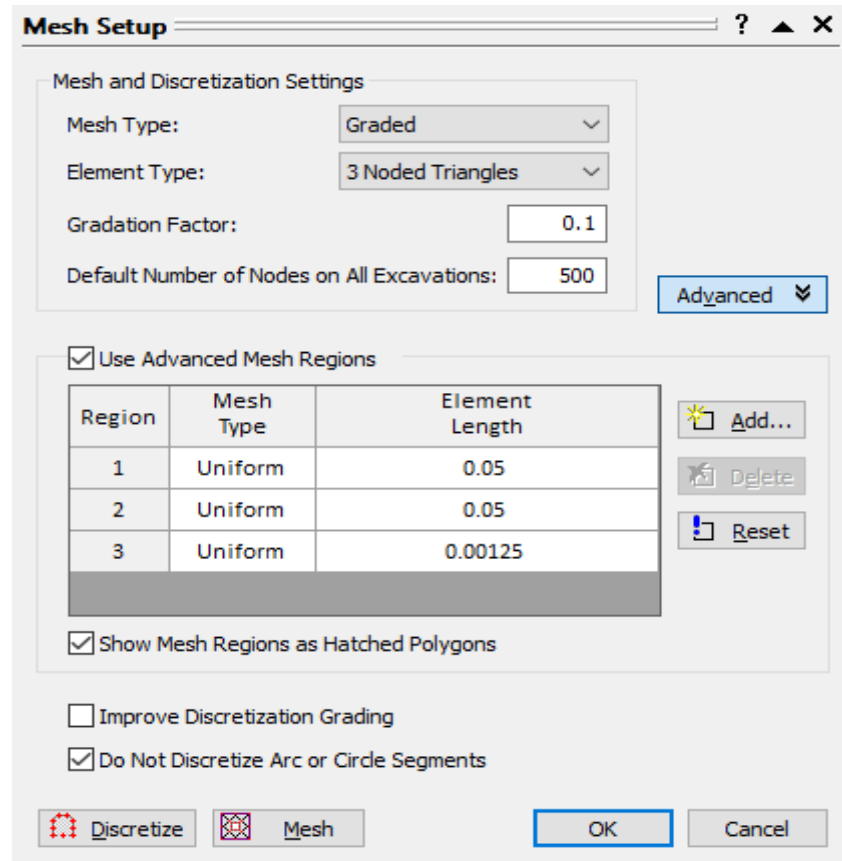
- Εμφάνιση εφελκυστικών ρωγμών στα 16 MPa.
- Εμφάνιση απομονωμένων ρωγμών στα 119 MPa.
- Πρώτη αποφλοίωση στα 126 MPa.
- Ένωση ρωγμών από τα 140 MPa,
- Δεν αναφέρεται μέγιστη αντοχή

ενώ η δημιουργία των ρωγμών στο πείραμα εξελίχθηκε όπως στην παρακάτω εικόνα



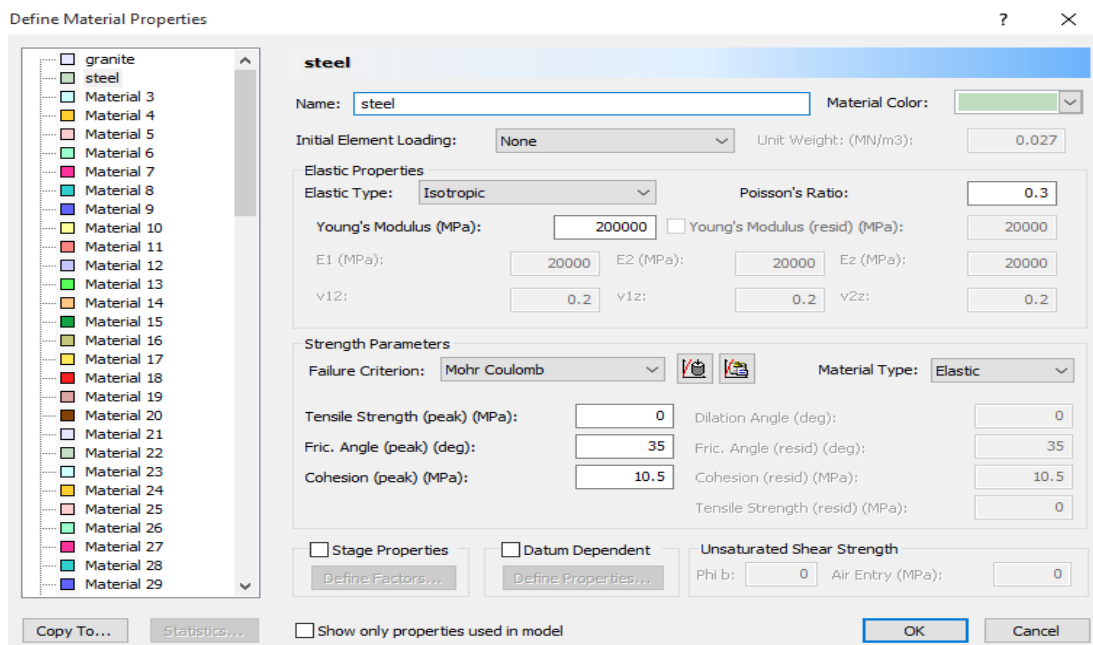
Εικόνα 27

- Γεωμετρία μοντέλου: Το μοντέλο αποτελείται από 2 υπομοντέλα, το πλαίσιο φόρτισης και το μοντέλο γρανίτη. Όσον αφορά το πλαίσιο φόρτισης είναι μήκους 0,250m και ύψους 0,05 m. Το μοντέλο του γρανίτη είναι μήκους 0,2 m και ύψους 0,2 m, ενώ η κυκλική σπή έχει διάμετρο 36 mm. Με πορτοκαλί χρώμα είναι η διεπιφάνεια μεταξύ των πλακών και του δοκιμίου η οποία προσομοιάζεται με joint.
- Πλέγμα και διακριτοποίηση: Το πλέγμα του μοντέλου έχει χωριστεί σε 2 υποπλέγματα με το μοντέλο του γρανίτη να παρουσιάζει περισσότερη λεπτομέρεια.



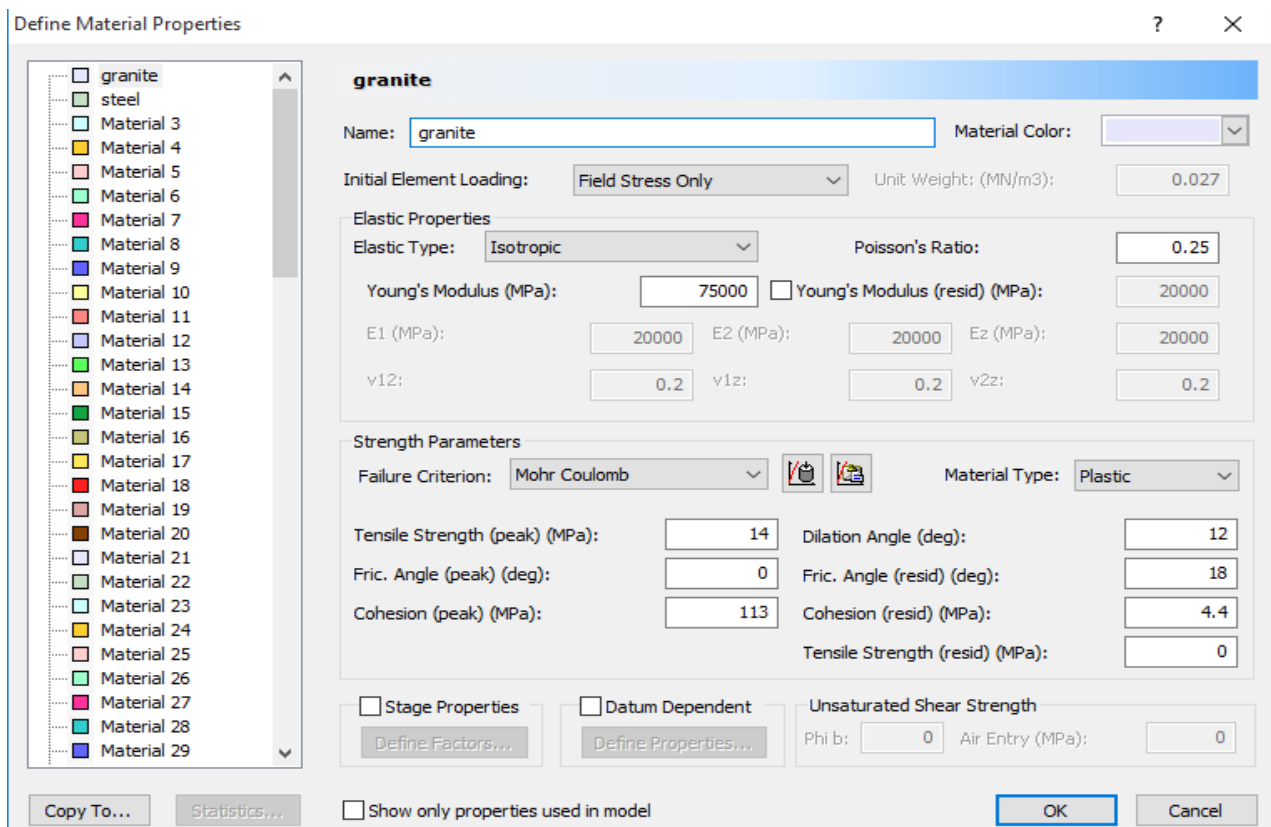
Εικόνα 28.

- Ιδιότητες υλικού Το υλικό του πλασίου προσομοιώνει τα χαρακτηριστικά χάλυβα.



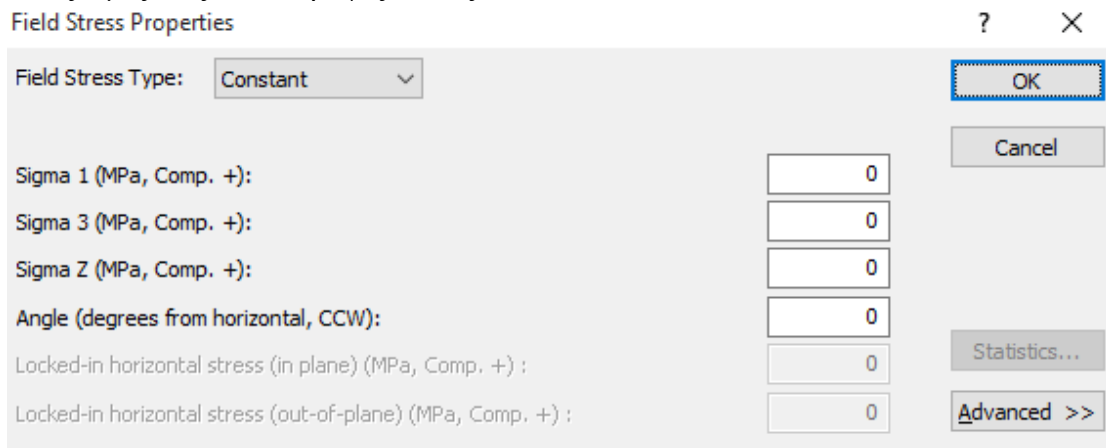
Εικόνα 29. Μηχανικές ιδιότητες του χάλυβα

Όσον αφορά το μοντέλο γρανίτη:



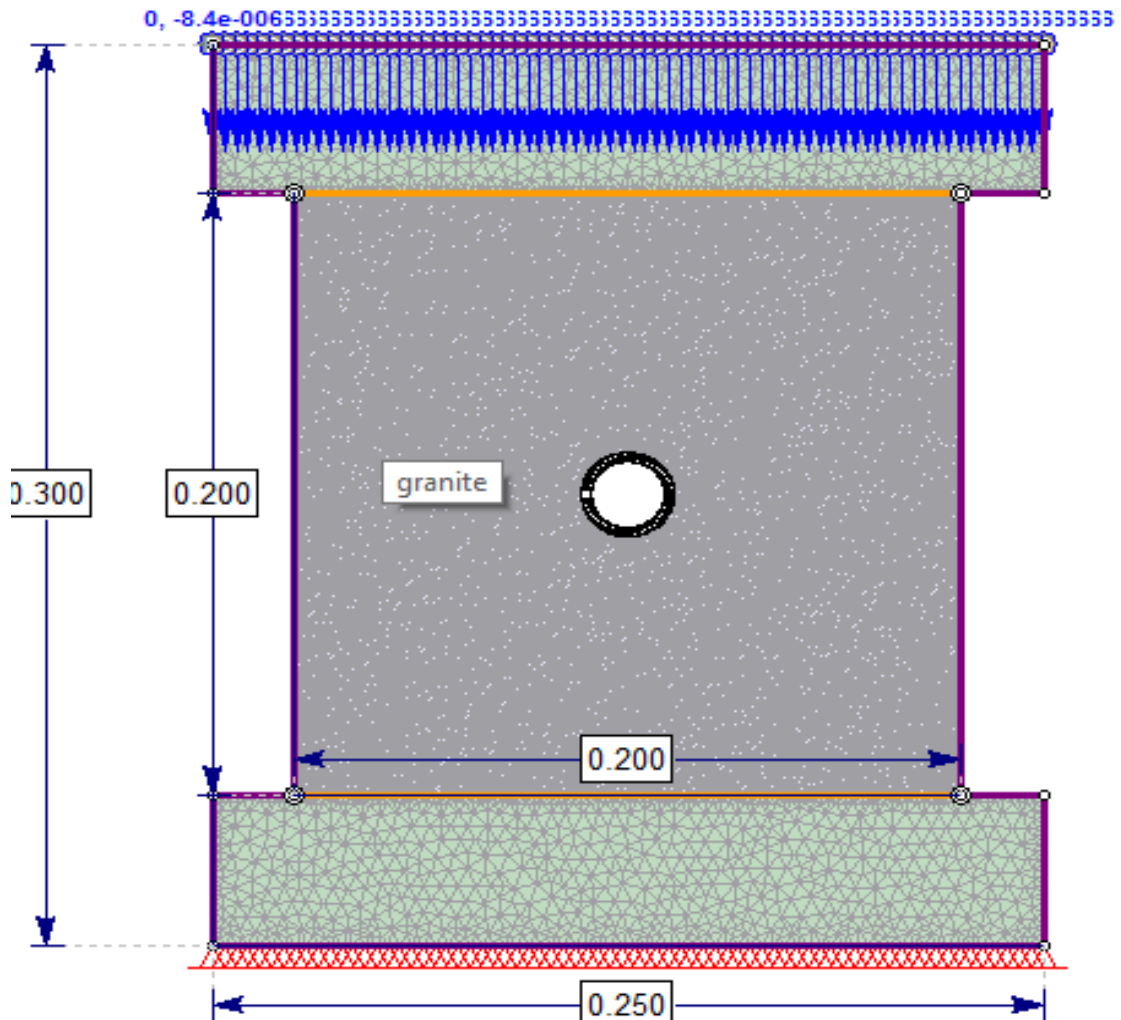
Εικόνα 30: Μηχανικές ιδιότητες του γρανίτη

- Τύπος στήριξης μοντέλου: Η στήριξη της πλάκας στο κάτω μέρος του δοκιμίου είναι σταθερή με άρθρωση.
- Καθορισμός φόρτισης: Επιλέχθηκε φυσικό πεδίο τάσεων (fieldstressonly) με constantfieldstressype με μηδενικές τιμές στις κατακόρυφες τάσεις.



Εικόνα 31

- Στάδια Δοκιμής: Η δοκιμή θα χωριστεί σε 100 στάδια με σκοπό την καλύτερη παρατήρηση των γεγονότων που θα συντελεστούν και γίνεται με αρχική μετακίνηση $8,6 \cdot 10^{-6} \text{m}$ προστιθέμενη σε κάθε επόμενο στάδιο, έως η τελική μετακίνηση να φτάσει στα 0.0086 mm.



Εικόνα 32

Μέσω της επιλογής infoviewer παρουσιάζονται τα αναλυτικά στοιχεία του σχεδιασμού.

Phase2 Analysis Information

Project1

Project Summary

FileName: ΔΟΚΙΜΗ
 ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ
 ΓΡΑΝΙΤΗ ΜΕ ΚΥΚΛΙΚΗ ΟΠΗ
 Last saved with Phase2 version:
 8.014
 Project Title: ΔοκιμήCarter

Number of Stages: 100
 Analysis Type: Plane Strain
 Solver Type: Gaussian Elimination
 Units: Metric, stress as MPa

Analysis Options

General Settings

Maximum Number of Iterations: 500
 Tolerance: 0.001

- Number of Load Steps: Automatic
- Convergence Type: Absolute Energy
- Tensile Failure: Does Not Reduce Shear Strength
- Joint tension reduces joint stiffness by a factor of 0.01

Groundwater Analysis

-
- Method: Piezometric Lines
 - Pore Fluid Unit Weight: 0.00981 MN/m³
 - Probability: None

Mesh

-
- Mesh type: graded

Element type:
3 noded
triangles

Number of
elements on
Stage 1: 61462

Number of
nodes on Stage
1: 31236

Number of
elements on
Stage 2: 61462

Number of
nodes on Stage
2: 31236

Number of
elements on
Stage 3: 61462

Number of
nodes on Stage
3: 31236

Number of
elements on
Stage 4: 61462

Number of
nodes on Stage
4: 31236

Number of
elements on
Stage 5: 61462

Number of
nodes on Stage
5: 31236

Number of
elements on
Stage 6: 61462

Number of
nodes on Stage
6: 31236

Number of
elements on
Stage 7: 61462

Number of
nodes on Stage
7: 31236

Number of
elements on
Stage 8: 61462

Number of
nodes on Stage
8: 31236

Number of
elements on
Stage 9: 61462

Number of
nodes on Stage
9: 31236

Number of
elements on
Stage 10:
61462

Field Stress

Field stress: constant

Sigma one: 0 MPa (compression
positive)

Sigma three: 0 MPa (compression
positive)

Sigma Z: 0 MPa (compression
positive)

Angle from the horizontal to sigma
1: 0 degrees (counter-clockwise)

Number of
nodes on Stage
10: 31236

Number of
elements on
Stage 11:
61462

Number of
nodes on Stage
11: 31236

Number of
elements on
Stage 12:
61462

Number of
nodes on Stage
12: 31236

Number of
elements on
Stage 13:
61462

Number of
nodes on Stage
13: 31236

Number of
elements on
Stage 14:
61462

Number of
nodes on Stage
14: 31236

Number of
elements on
Stage 15:
61462

Number of
nodes on Stage
15: 31236

Number of
elements on
Stage 16:
61462

Number of
nodes on Stage
16: 31236

Number of
elements on
Stage 17:
61462

Number of
nodes on Stage
17: 31236

Number of
elements on
Stage 18:
61462

Number of
nodes on Stage
18: 31236

Number of
elements on
Stage 19:
61462

Number of
nodes on Stage
19: 31236

Stage 19:
61462
Number of nodes on Stage 19: 31236
Number of elements on Stage 20: 61462
Number of nodes on Stage 20: 31236
Number of elements on Stage 21: 61462
Number of nodes on Stage 21: 31236
Number of elements on Stage 22: 61462
Number of nodes on Stage 22: 31236
Number of elements on Stage 23: 61462
Number of nodes on Stage 23: 31236
Number of elements on Stage 24: 61462
Number of nodes on Stage 24: 31236
Number of elements on Stage 25: 61462
Number of nodes on Stage 25: 31236
Number of elements on

Stage 26:
61462
Number of nodes on Stage 26: 31236
Number of elements on Stage 27: 61462
Number of nodes on Stage 27: 31236
Number of elements on Stage 28: 61462
Number of nodes on Stage 28: 31236
Number of elements on Stage 29: 61462
Number of nodes on Stage 29: 31236
Number of elements on Stage 30: 61462
Number of nodes on Stage 30: 31236
Number of elements on Stage 31: 61462
Number of nodes on Stage 31: 31236
Number of elements on Stage 32: 61462
Number of nodes on Stage 32: 31236
Number of elements on

Stage 33:
61462
Number of nodes on Stage 33: 31236
Number of elements on Stage 34: 61462
Number of nodes on Stage 34: 31236
Number of elements on Stage 35: 61462
Number of nodes on Stage 35: 31236
Number of elements on Stage 36: 61462
Number of nodes on Stage 36: 31236
Number of elements on Stage 37: 61462
Number of nodes on Stage 37: 31236
Number of elements on Stage 38: 61462
Number of nodes on Stage 38: 31236
Number of elements on Stage 39: 61462
Number of nodes on Stage 39: 31236
Number of elements on

Stage 40:
61462
Number of nodes on Stage 40: 31236
Number of elements on Stage 41: 61462
Number of nodes on Stage 41: 31236
Number of elements on Stage 42: 61462
Number of nodes on Stage 42: 31236
Number of elements on Stage 43: 61462
Number of nodes on Stage 43: 31236
Number of elements on Stage 44: 61462
Number of nodes on Stage 44: 31236
Number of elements on Stage 45: 61462
Number of nodes on Stage 45: 31236
Number of elements on Stage 46: 61462
Number of nodes on Stage 46: 31236
Number of elements on

Stage 47:
61462
Number of nodes on Stage 47: 31236
Number of elements on Stage 48: 61462
Number of nodes on Stage 48: 31236
Number of elements on Stage 49: 61462
Number of nodes on Stage 49: 31236
Number of elements on Stage 50: 61462
Number of nodes on Stage 50: 31236
Number of elements on Stage 51: 61462
Number of nodes on Stage 51: 31236
Number of elements on Stage 52: 61462
Number of nodes on Stage 52: 31236
Number of elements on Stage 53: 61462
Number of nodes on Stage 53: 31236
Number of elements on

Stage 54:
61462
Number of nodes on Stage 54: 31236
Number of elements on Stage 55: 61462
Number of nodes on Stage 55: 31236
Number of elements on Stage 56: 61462
Number of nodes on Stage 56: 31236
Number of elements on Stage 57: 61462
Number of nodes on Stage 57: 31236
Number of elements on Stage 58: 61462
Number of nodes on Stage 58: 31236
Number of elements on Stage 59: 61462
Number of nodes on Stage 59: 31236
Number of elements on Stage 60: 61462
Number of nodes on Stage 60: 31236
Number of elements on

Stage 61:
61462
Number of nodes on Stage 61: 31236
Number of elements on Stage 62: 61462
Number of nodes on Stage 62: 31236
Number of elements on Stage 63: 61462
Number of nodes on Stage 63: 31236
Number of elements on Stage 64: 61462
Number of nodes on Stage 64: 31236
Number of elements on Stage 65: 61462
Number of nodes on Stage 65: 31236
Number of elements on Stage 66: 61462
Number of nodes on Stage 66: 31236
Number of elements on Stage 67: 61462
Number of nodes on Stage 67: 31236
Number of elements on

Stage 68:
61462
Number of nodes on Stage 68: 31236
Number of elements on Stage 69: 61462
Number of nodes on Stage 69: 31236
Number of elements on Stage 70: 61462
Number of nodes on Stage 70: 31236
Number of elements on Stage 71: 61462
Number of nodes on Stage 71: 31236
Number of elements on Stage 72: 61462
Number of nodes on Stage 72: 31236
Number of elements on Stage 73: 61462
Number of nodes on Stage 73: 31236
Number of elements on Stage 74: 61462
Number of nodes on Stage 74: 31236
Number of elements on

- Stage 75: 61462
- Number of nodes on Stage 75: 31236
- Number of elements on Stage 76: 61462
- Number of nodes on Stage 76: 31236
- Number of elements on Stage 77: 61462
- Number of nodes on Stage 77: 31236
- Number of elements on Stage 78: 61462
- Number of nodes on Stage 78: 31236
- Number of elements on Stage 79: 61462
- Number of nodes on Stage 79: 31236
- Number of elements on Stage 80: 61462
- Number of nodes on Stage 80: 31236
- Number of elements on Stage 81: 61462
- Number of nodes on Stage 81: 31236
- Number of elements on Stage 82: 61462
- Number of nodes on Stage 82: 31236
- Number of elements on Stage 83: 61462
- Number of nodes on Stage 83: 31236
- Number of elements on Stage 84: 61462
- Number of nodes on Stage 84: 31236
- Number of elements on Stage 85: 61462
- Number of nodes on Stage 85: 31236
- Number of elements on Stage 86: 61462
- Number of nodes on Stage 86: 31236
- Number of elements on Stage 87: 61462
- Number of nodes on Stage 87: 31236
- Number of elements on Stage 88: 61462
- Number of nodes on Stage 88: 31236
- Number of elements on Stage 89: 61462
- Number of nodes on Stage 89: 31236
- Number of elements on Stage 90: 61462
- Number of nodes on Stage 90: 31236
- Number of elements on Stage 91: 61462
- Number of nodes on Stage 91: 31236
- Number of elements on Stage 92: 61462
- Number of nodes on Stage 92: 31236
- Number of elements on Stage 93: 61462
- Number of nodes on Stage 93: 31236
- Number of elements on Stage 94: 61462
- Number of nodes on Stage 94: 31236
- Number of elements on Stage 95: 61462
- Number of nodes on Stage 95: 31236
- Number of elements on Stage 96: 61462
- Number of nodes on Stage 96: 31236
- Number of elements on Stage 97: 61462
- Number of nodes on Stage 97: 31236
- Number of elements on Stage 98: 61462
- Number of nodes on Stage 98: 31236
- Number of elements on Stage 99: 61462
- Number of nodes on Stage 99: 31236
- Number of elements on Stage 100: 61462
- Number of nodes on Stage 100: 31236

Mesh Quality


All elements are of good quality

Poor quality elements defined as:


- Side length ratio (maximum / minimum) > 30.00
- Minimum interior angle < 2.0 degrees
- Maximum interior angle > 175.0 degrees

Material Properties

Material: granite


| | |
|---------------------------|---|
| Color |  |
| Initial element loading | field stress only |
| Elastic type | isotropic |
| Young's modulus | 75000 MPa |
| Poisson's ratio | 0.25 |
| Failure criterion | Mohr-Coulomb |
| Peak tensile strength | 14 MPa |
| Residual tensile strength | 0 MPa |
| Peak friction angle | 0 degrees |
| Peak cohesion | 113 MPa |
| Material type | Plastic |
| Dilation Angle | 12 degrees |
| Residual Friction Angle | 18 degrees |
| Residual Cohesion | 4.4 MPa |
| Piezo to use | None |
| Ru value | 0 |

Material: steel

| | |
|---------------------------|---|
| Color |  |
| Initial element loading | No initial element loading |
| Elastic type | isotropic |
| Young's modulus | 200000 MPa |
| Poisson's ratio | 0.3 |
| Failure criterion | Mohr-Coulomb |
| Peak tensile strength | 0 MPa |
| Residual tensile strength | 0 MPa |
| Peak friction angle | 35 degrees |
| Peak cohesion | 10.5 MPa |
| Material type | Elastic |
| Piezo to use | None |
| Ru value | 0 |

Joint Properties

Joint: Joint 1

| | |
|------------------------------------|---|
| Color |  |
| Normal stiffness | 1e+006 MPa/m |
| Shear stiffness | 100000 MPa/m |
| Initial joint deformation | allowed |
| Pressure from Groundwater Analysis | Not Included |
| Additional Pressure Inside Joint | Not Included |
| Slip Criterion | Mohr-Coulomb |

| | |
|------------------|-----------------------------|
| Tensile strength | 0 MPa (tension positive) |
| Cohesion | 0 MPa |
| Friction angle | 25 degrees |

List of All Coordinates

Excavation boundary

| X | Y |
|----------|----------|
| 0.112525 | 0.149215 |
| 0.112599 | 0.148433 |
| 0.112721 | 0.147658 |
| 0.112893 | 0.146891 |
| 0.113112 | 0.146137 |
| 0.113378 | 0.145398 |
| 0.11369 | 0.144678 |
| 0.114046 | 0.143978 |
| 0.114446 | 0.143302 |
| 0.114887 | 0.142653 |
| 0.115369 | 0.142032 |
| 0.115888 | 0.141443 |
| 0.116443 | 0.140888 |
| 0.117032 | 0.140369 |
| 0.117653 | 0.139887 |
| 0.118302 | 0.139446 |
| 0.118978 | 0.139046 |
| 0.119678 | 0.13869 |
| 0.120398 | 0.138378 |
| 0.121137 | 0.138112 |
| 0.121891 | 0.137893 |
| 0.122658 | 0.137721 |
| 0.123433 | 0.137599 |
| 0.124215 | 0.137525 |
| 0.125 | 0.1375 |
| 0.125785 | 0.137525 |
| 0.126567 | 0.137599 |
| 0.127342 | 0.137721 |
| 0.128109 | 0.137893 |
| 0.128863 | 0.138112 |
| 0.129602 | 0.138378 |
| 0.130322 | 0.13869 |
| 0.131022 | 0.139046 |

| | |
|----------|----------|
| 0.131698 | 0.139446 |
| 0.132347 | 0.139887 |
| 0.132968 | 0.140369 |
| 0.133557 | 0.140888 |
| 0.134112 | 0.141443 |
| 0.134631 | 0.142032 |
| 0.135113 | 0.142653 |
| 0.135554 | 0.143302 |
| 0.135954 | 0.143978 |
| 0.13631 | 0.144678 |
| 0.136622 | 0.145398 |
| 0.136888 | 0.146137 |
| 0.137107 | 0.146891 |
| 0.137279 | 0.147658 |
| 0.137401 | 0.148433 |
| 0.137475 | 0.149215 |
| 0.1375 | 0.15 |
| 0.137475 | 0.150785 |
| 0.137401 | 0.151567 |
| 0.137279 | 0.152342 |
| 0.137107 | 0.153109 |
| 0.136888 | 0.153863 |
| 0.136622 | 0.154602 |
| 0.13631 | 0.155322 |
| 0.135954 | 0.156022 |
| 0.135554 | 0.156698 |
| 0.135113 | 0.157347 |
| 0.134631 | 0.157968 |
| 0.134112 | 0.158557 |
| 0.133557 | 0.159112 |
| 0.132968 | 0.159631 |
| 0.132347 | 0.160113 |
| 0.131698 | 0.160554 |
| 0.131022 | 0.160954 |
| 0.130322 | 0.16131 |
| 0.129602 | 0.161622 |

| | |
|----------|----------|
| 0.128863 | 0.161888 |
| 0.128109 | 0.162107 |
| 0.127342 | 0.162279 |
| 0.126567 | 0.162401 |
| 0.125785 | 0.162475 |
| 0.125 | 0.1625 |
| 0.124215 | 0.162475 |
| 0.123433 | 0.162401 |
| 0.122658 | 0.162279 |
| 0.121891 | 0.162107 |
| 0.121137 | 0.161888 |
| 0.120398 | 0.161622 |
| 0.119678 | 0.16131 |
| 0.118978 | 0.160954 |
| 0.118302 | 0.160554 |
| 0.117653 | 0.160113 |

| | |
|----------|----------|
| 0.117032 | 0.159631 |
| 0.116443 | 0.159112 |
| 0.115888 | 0.158557 |
| 0.115369 | 0.157968 |
| 0.114887 | 0.157347 |
| 0.114446 | 0.156698 |
| 0.114046 | 0.156022 |
| 0.11369 | 0.155322 |
| 0.113378 | 0.154602 |
| 0.113112 | 0.153863 |
| 0.112893 | 0.153109 |
| 0.112721 | 0.152342 |
| 0.112599 | 0.151567 |
| 0.112525 | 0.150785 |
| 0.1125 | 0.15 |

External boundary

| X | Y |
|-------|------|
| 0 | 0 |
| 0.25 | 0 |
| 0.25 | 0.05 |
| 0.225 | 0.05 |
| 0.225 | 0.25 |
| 0.25 | 0.25 |
| 0.25 | 0.3 |
| 0 | 0.3 |
| 0 | 0.25 |
| 0.025 | 0.25 |
| 0.025 | 0.05 |
| 0 | 0.05 |

| X | Y |
|-------|------|
| 0.025 | 0.05 |
| 0.225 | 0.05 |

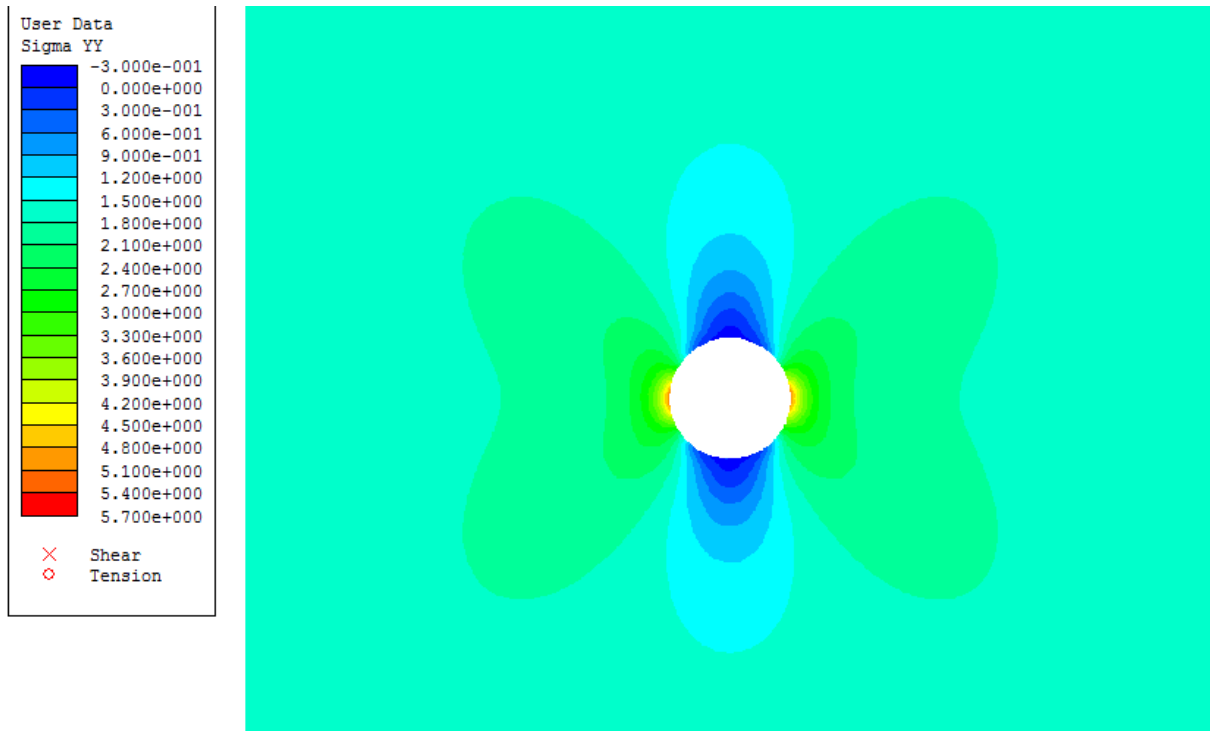
Joint boundary

| X | Y |
|-------|------|
| 0.025 | 0.25 |
| 0.225 | 0.25 |

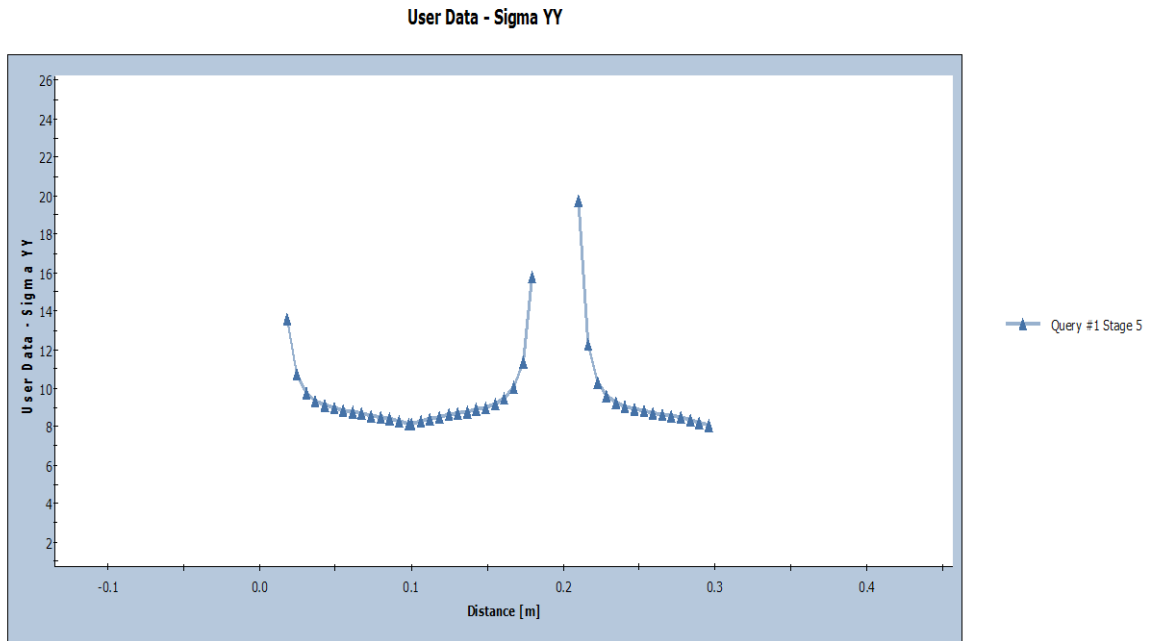
Joint boundary

4.2.1 Ανάλυση

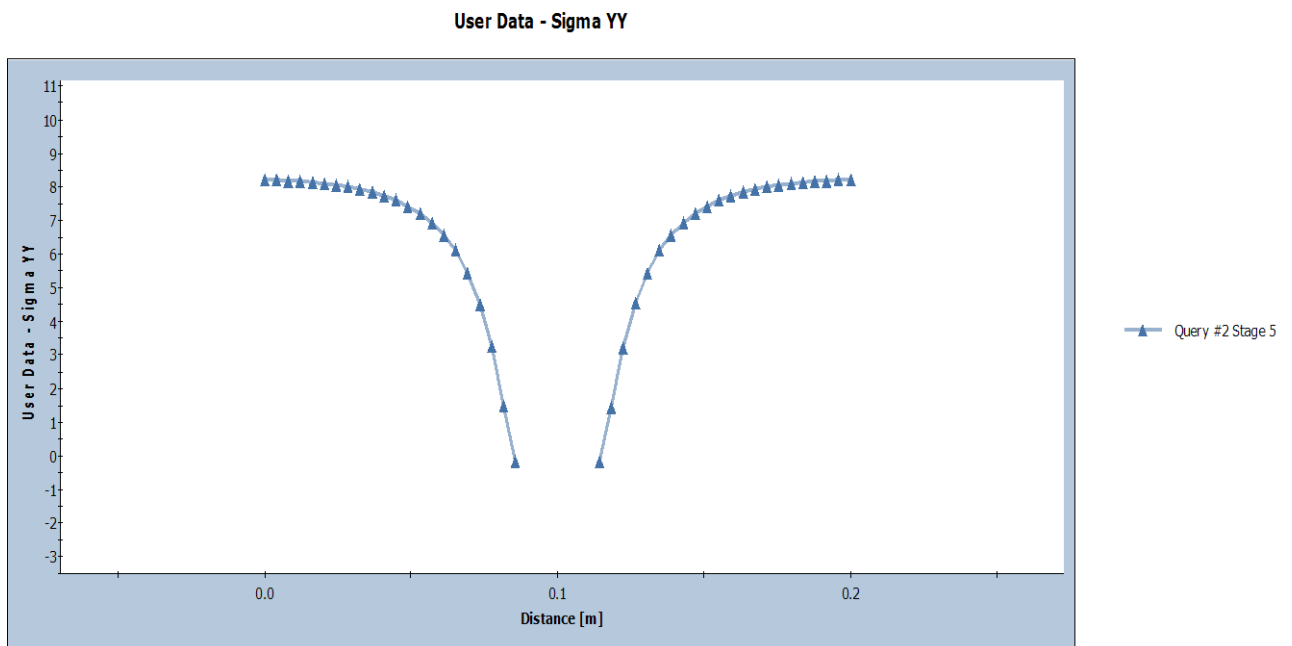
Με την εφαρμογή της πρώτης μετατόπισης παρατηρείται αρνητική κατακόρυφη τάση, δηλαδή εφελκυσμός, πάνω από την κυκλική οπή και συγκέντρωση θλιπτικών στις παρειές του ανοίγματος. Η μέση κατακόρυφη τάση σ_{yy} είναι 1,9 MPa, η οποία υπολογίζεται οριζόντια του κέντρου της διατομής, ενώ η οριζόντια τάση σ_{xx} είναι 0,029MPa, η οποία υπολογίζεται κατακόρυφα του κέντρου της διατομής.



Stage1: Κατακόρυφη τάση σ_{yy} για μετακίνηση $8,4 \cdot 10^{-6}$ m.

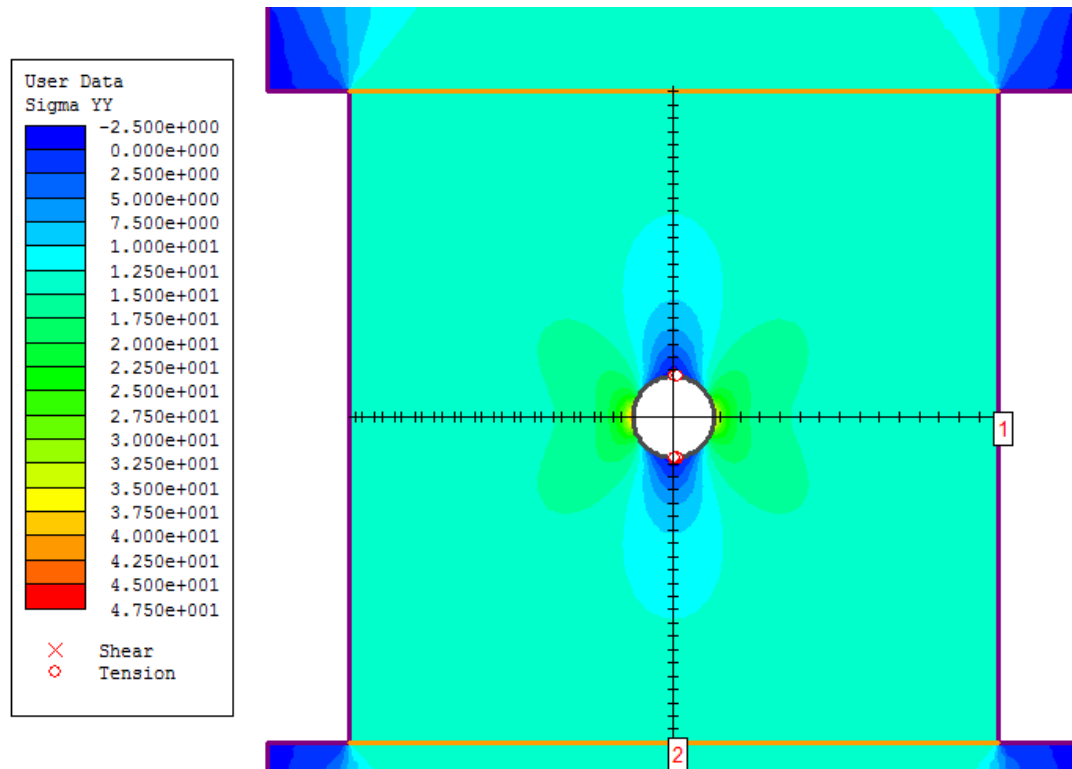


Διάγραμμα 19. Τάση σ_{yy} σε σχέση με την απόσταση (οριζόντια της διατομής)



Διάγραμμα 20. Τάση σ_{yy} σε σχέση με την απόσταση (κατακόρυφα της διατομής)

Η πρώτη αστοχία του μοντέλου, η οποία είναι εφελκυστική συμβαίνει στο 8^ο στάδιο για μετακίνηση $6,72 \cdot 10^{-5}$ m, κατακόρυφα της οπής.



Stage 8: Εμφάνιση της πρώτης εφελκυστικής ρωγμής

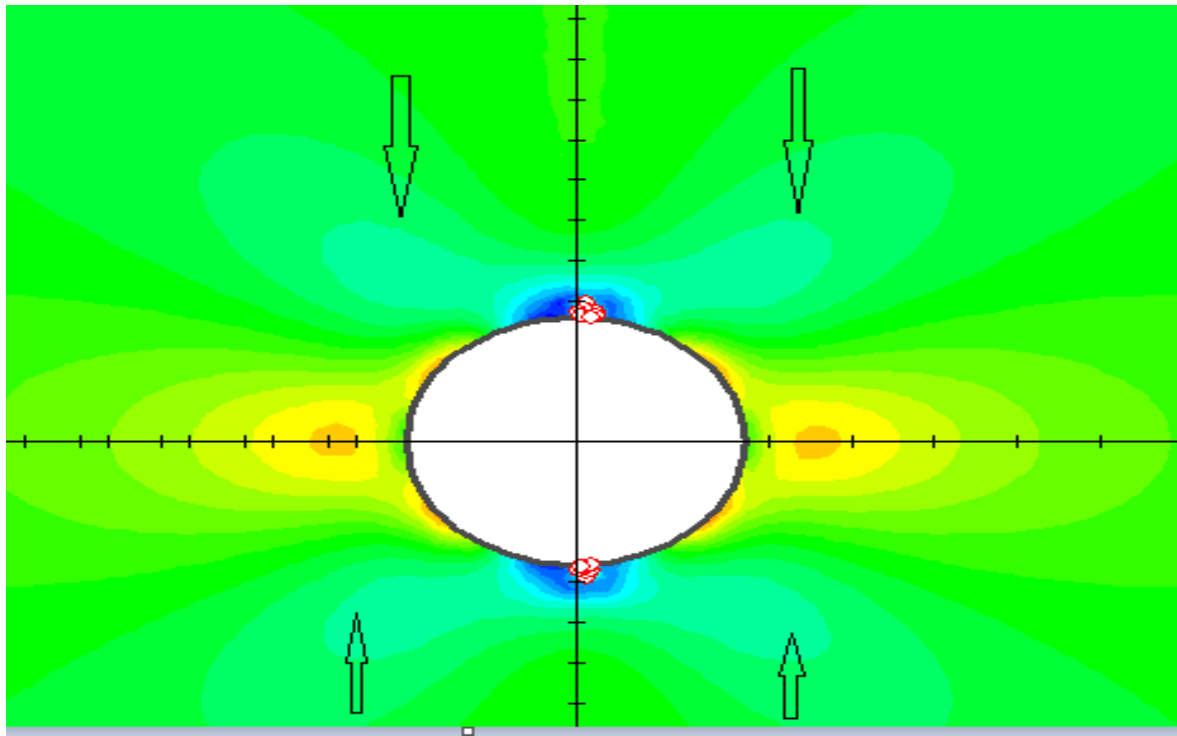
Η αντίστοιχη κατακόρυφη τάση κατά την οποία επήλθε η εφελκυστική αστοχία θεωρείται προσεγγιστικά ο μέσος όρος των τάσεων στο 7^ο (13,35MPa) και 8^ο στάδιο (15,25 MPa). Οπότε για τάση $\sigma_{\psi\psi}=14,3$ MPa συντελείται η πρώτη αστοχία. Η αντίστοιχη οριζόντια τάση $\sigma_{\chi\chi}=0,22$ MPa.

| Query #2 Stage 7 | | | Query #2 Stage 8 | | | | |
|---------------------|------|--------------|----------------------|-----------|------|--------------|----------------------|
| X | Y | Distance [m] | User Data - Sigma YY | X | Y | Distance [m] | User Data - Sigma YY |
| 0,125 | 0,15 | 0 | | 0,125 | 0,15 | 0 | |
| 0,1188776 | 0,15 | 0,00612245 | | 0,1188776 | 0,15 | 0,00612245 | |
| 0,1127551 | 0,15 | 0,0122449 | | 0,1127551 | 0,15 | 0,0122449 | |
| 0,1066327 | 0,15 | 0,01836735 | 19,03695 | 0,1066327 | 0,15 | 0,01836735 | 21,7622741 |
| 0,1005102 | 0,15 | 0,0244898 | 15,0515117 | 0,1005102 | 0,15 | 0,0244898 | 17,2045789 |
| 0,0943878 | 0,15 | 0,03061224 | 13,6956258 | 0,0943878 | 0,15 | 0,03061224 | 15,6526625 |
| 0,0882653 | 0,15 | 0,03673469 | 13,0962405 | 0,0882653 | 0,15 | 0,03673469 | 14,9672672 |
| 0,0821429 | 0,15 | 0,04285714 | 12,7637246 | 0,0821429 | 0,15 | 0,04285714 | 14,5863945 |
| 0,0760204 | 0,15 | 0,04897959 | 12,5459403 | 0,0760204 | 0,15 | 0,04897959 | 14,3369492 |
| 0,069898 | 0,15 | 0,05510204 | 12,3904548 | 0,069898 | 0,15 | 0,05510204 | 14,1594808 |
| 0,0637755 | 0,15 | 0,06122449 | 12,2609824 | 0,0637755 | 0,15 | 0,06122449 | 14,0112002 |
| 0,0576531 | 0,15 | 0,06734694 | 12,1414276 | 0,0576531 | 0,15 | 0,06734694 | 13,8741655 |
| 0,0515306 | 0,15 | 0,07346939 | 12,0228707 | 0,0515306 | 0,15 | 0,07346939 | 13,7387515 |
| 0,0454082 | 0,15 | 0,07959184 | 11,8957548 | 0,0454082 | 0,15 | 0,07959184 | 13,5930576 |
| 0,0392857 | 0,15 | 0,08571429 | 11,7512815 | 0,0392857 | 0,15 | 0,08571429 | 13,4273887 |
| 0,0331633 | 0,15 | 0,09183673 | 11,5760503 | 0,0331633 | 0,15 | 0,09183673 | 13,2266706 |
| 0,0270408 | 0,15 | 0,09795918 | 11,356484 | 0,0270408 | 0,15 | 0,09795918 | 12,9746716 |

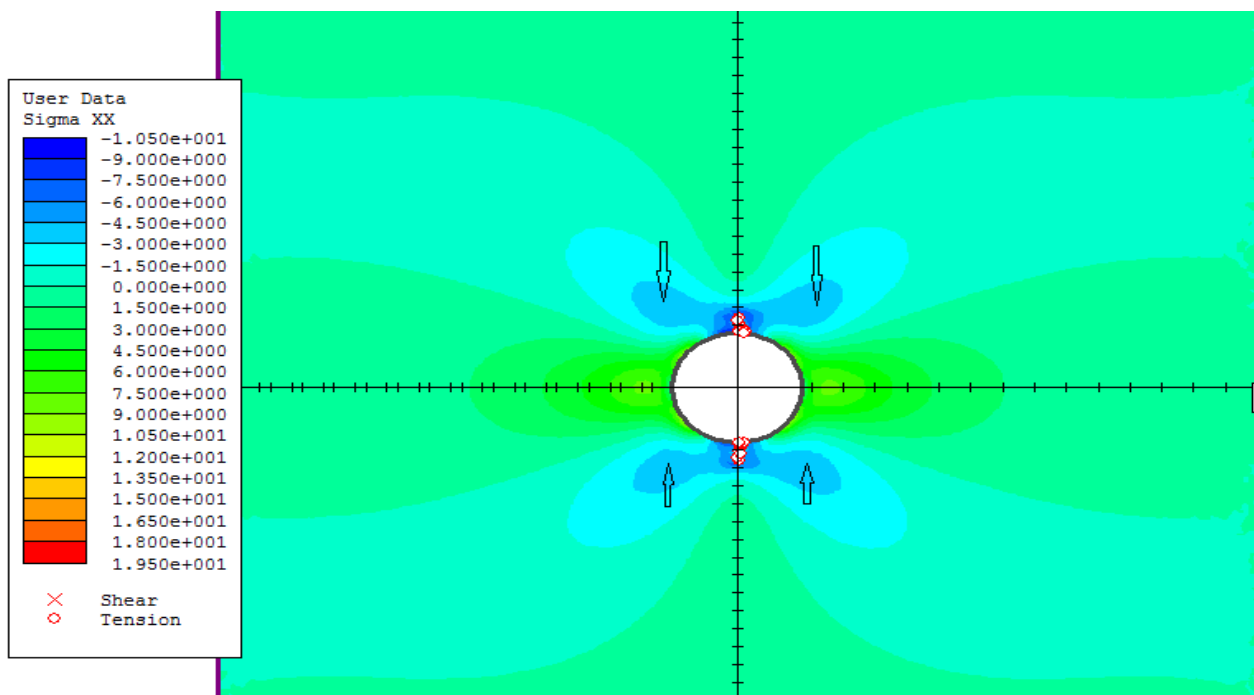
| | | | | | | | |
|-----------|------|----------------|---------------------------|-----------|------|----------------|------------|
| 0,0290816 | 0,15 | 0,1 | 11,4365848 | 0,0290816 | 0,15 | 0,1 | 13,0664612 |
| 0,0352041 | 0,15 | 0,10612245 | 11,6385136 | 0,0352041 | 0,15 | 0,10612245 | 13,2980719 |
| 0,0413265 | 0,15 | 0,1122449 | 11,8014839 | 0,0413265 | 0,15 | 0,1122449 | 13,4850381 |
| 0,047449 | 0,15 | 0,11836735 | 11,9395415 | 0,047449 | 0,15 | 0,11836735 | 13,6430647 |
| 0,0535714 | 0,15 | 0,1244898 | 12,0628178 | 0,0535714 | 0,15 | 0,1244898 | 13,7845795 |
| 0,0596939 | 0,15 | 0,13061224 | 12,1809998 | 0,0596939 | 0,15 | 0,13061224 | 13,9196585 |
| 0,0658163 | 0,15 | 0,13673469 | 12,30237 | 0,0658163 | 0,15 | 0,13673469 | 14,058675 |
| 0,0719388 | 0,15 | 0,14285714 | 12,4394001 | 0,0719388 | 0,15 | 0,14285714 | 14,2155493 |
| 0,0780612 | 0,15 | 0,14897959 | 12,6129853 | 0,0780612 | 0,15 | 0,14897959 | 14,4140272 |
| 0,0841837 | 0,15 | 0,15510204 | 12,8588274 | 0,0841837 | 0,15 | 0,15510204 | 14,6951371 |
| 0,0903061 | 0,15 | 0,16122449 | 13,2537542 | 0,0903061 | 0,15 | 0,16122449 | 15,146993 |
| 0,0964286 | 0,15 | 0,16734694 | 14,0304733 | 0,0964286 | 0,15 | 0,16734694 | 16,0360879 |
| 0,102551 | 0,15 | 0,17346939 | 15,8936998 | 0,102551 | 0,15 | 0,17346939 | 18,1681491 |
| 0,1086735 | 0,15 | 0,17959184 | 22,1496695 | 0,1086735 | 0,15 | 0,17959184 | 25,3199944 |
| 0,1147959 | 0,15 | 0,18571429 | | 0,1147959 | 0,15 | 0,18571429 | |
| 0,1209184 | 0,15 | 0,19183673 | | 0,1209184 | 0,15 | 0,19183673 | |
| 0,1270408 | 0,15 | 0,19795918 | | 0,1270408 | 0,15 | 0,19795918 | |
| 0,1331633 | 0,15 | 0,20408163 | | 0,1331633 | 0,15 | 0,20408163 | |
| 0,1392857 | 0,15 | 0,21020408 | 27,7389369 | 0,1392857 | 0,15 | 0,21020408 | 31,7113891 |
| 0,1454082 | 0,15 | 0,21632653 | 17,1460687 | 0,1454082 | 0,15 | 0,21632653 | 19,6022826 |
| 0,1515306 | 0,15 | 0,22244898 | 14,4535326 | 0,1515306 | 0,15 | 0,22244898 | 16,520989 |
| 0,1576531 | 0,15 | 0,22857143 | 13,4500326 | 0,1576531 | 0,15 | 0,22857143 | 15,3720005 |
| 0,1637755 | 0,15 | 0,23469388 | 12,9658472 | 0,1637755 | 0,15 | 0,23469388 | 14,8175155 |
| 0,169898 | 0,15 | 0,24081633 | 12,6823031 | 0,169898 | 0,15 | 0,24081633 | 14,4931206 |
| 0,1760204 | 0,15 | 0,24693878 | 12,4915061 | 0,1760204 | 0,15 | 0,24693878 | 14,2749591 |
| 0,1821429 | 0,15 | 0,25306122 | 12,3457007 | 0,1821429 | 0,15 | 0,25306122 | 14,1080581 |
| 0,1882653 | 0,15 | 0,25918367 | 12,2213264 | 0,1882653 | 0,15 | 0,25918367 | 13,9657479 |
| 0,1943878 | 0,15 | 0,26530612 | 12,1022061 | 0,1943878 | 0,15 | 0,26530612 | 13,8293531 |
| 0,2005102 | 0,15 | 0,27142857 | 11,9818472 | 0,2005102 | 0,15 | 0,27142857 | 13,6916653 |
| 0,2066327 | 0,15 | 0,27755102 | 11,8499194 | 0,2066327 | 0,15 | 0,27755102 | 13,5403416 |
| 0,2127551 | 0,15 | 0,28367347 | 11,6967779 | 0,2127551 | 0,15 | 0,28367347 | 13,3645342 |
| 0,2188776 | 0,15 | 0,28979592 | 11,5086871 | 0,2188776 | 0,15 | 0,28979592 | 13,1487792 |
| 0,225 | 0,15 | 0,29591837 | 11,301 | 0,225 | 0,15 | 0,29591837 | 12,9105 |
| | | average σψψ | 13,351677 | | | average σψψ | 15,2585636 |
| | | | average σψψst7,8=14,3 MPa | | | | |

Πίνακας 16.

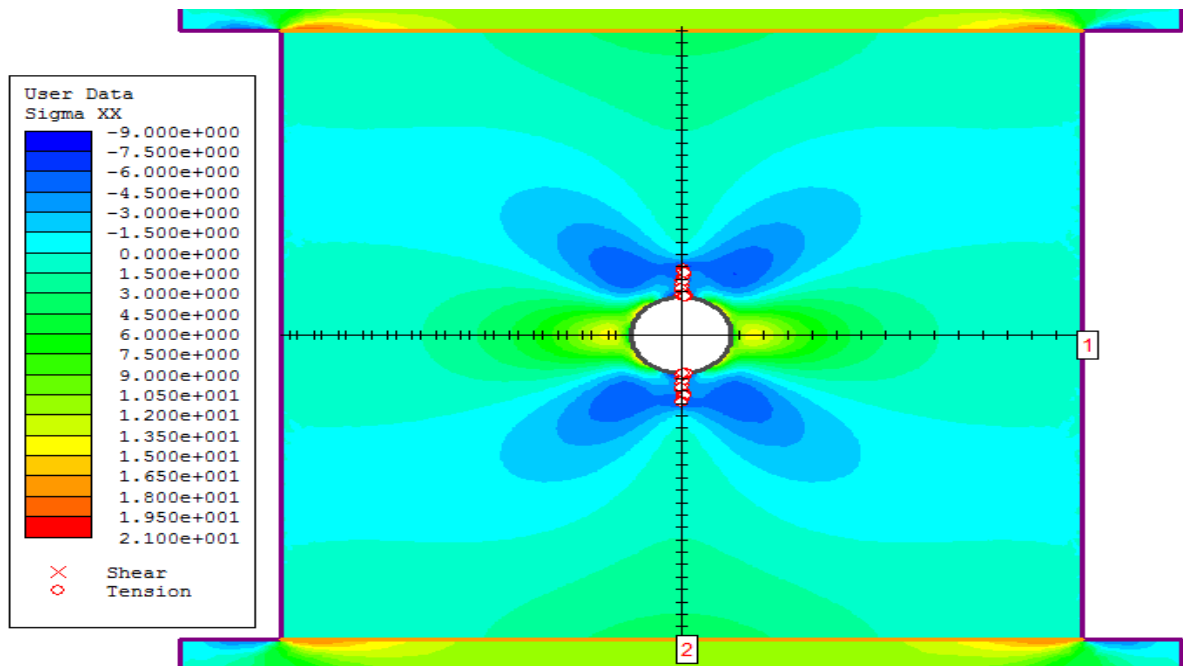
Με περαιτέρω μετακίνηση του πλαισίου οι ρωγμές επεκτείνονται κατακόρυφα, ενώ όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα το εντατικό πεδίο μεταβάλλεται από θλιπτικό σε εφελκυστικό μακριά από το άνοιγμα με το ίδιο μοτίβο κατοπτρικά της οπής.



Stage 9



Stage 12

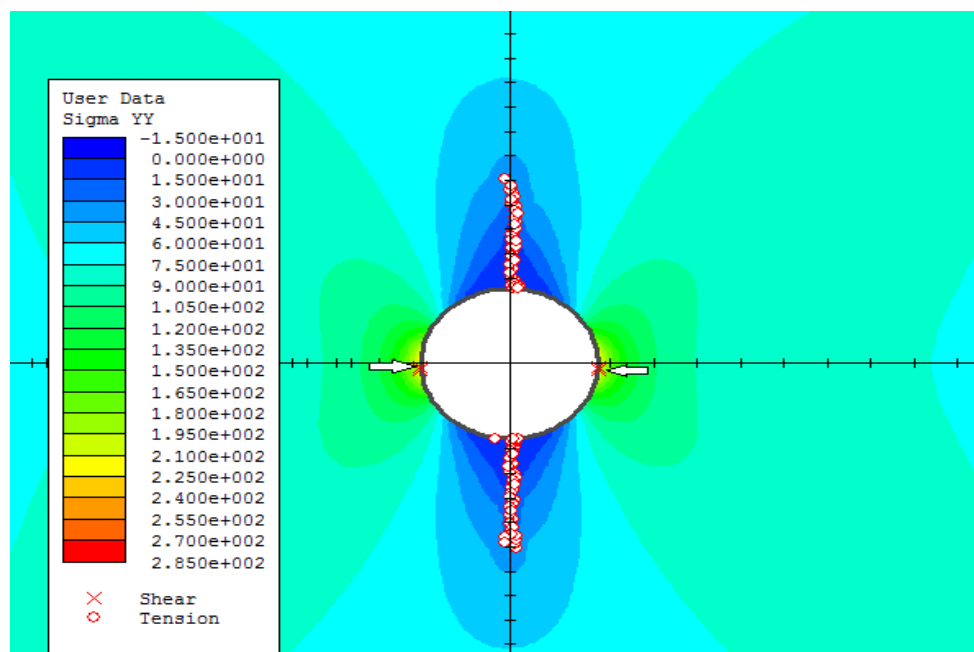


Stage 21

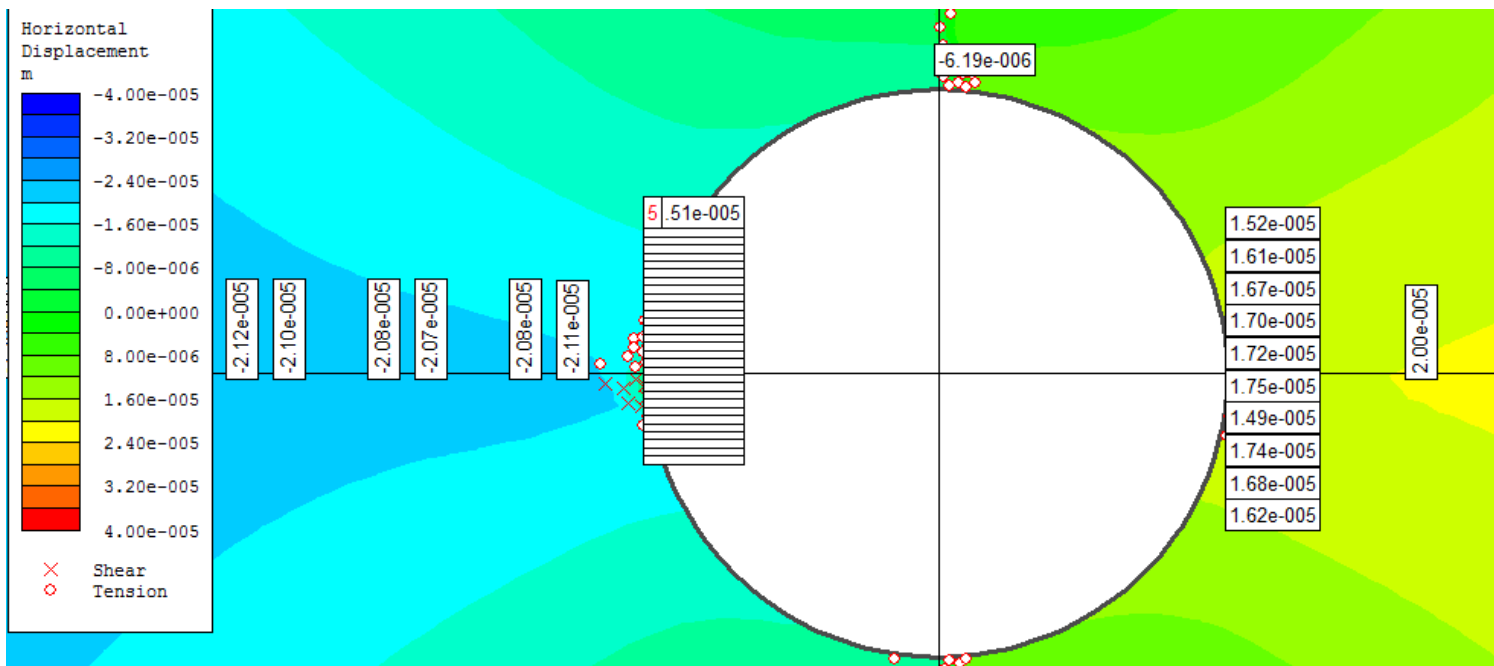
Στα επόμενα στάδια τα παραπάνω φαινόμενα επεκτείνονται χωρίς να συντελείται κάποια άλλη μορφή αστοχίας.

Έως και το 42^ο στάδιο τα παραπάνω φαινόμενα επεκτείνονται, χωρίς το μοντέλο να παρουσιάσει κάποια άλλη μορφή αστοχίας.

Στο 43^ο στάδιο συμβαίνει η πρώτη αστοχία λόγω διάτμησης στην οριζόντια της κυκλικής οπής, με κατακόρυφη τάση $\sigma_{\psi\psi} = 80,92 \text{ MPa}$ και στα επόμενα στάδια αυτού του είδους οι αστοχίες αυξάνουν. Για να καθορισθεί εάν αυτές οι αστοχίες αποτελούν το slabbing εξετάζονται οι οριζόντιες μετακινήσεις, μέσω της επιλογής materialquery οριακά στην οπή. Το θετικό πρόσημο στην τιμή της μετακίνησης αφορά κίνηση προς τα δεξιά. Άρα για να θεωρηθεί η ύπαρξη αυτού του φαινομένου αριστερά της οπής, οι μετακινήσεις θα πρέπει να έχουν θετικό πρόσημο, ενώ δεξιά από την οπή θα πρέπει να έχουν αρνητικό πρόσημο.



Stage 43: Έναρξη διατμητικής αστοχίας για μετακίνηση $3,612 \cdot 10^{-4}$



Stage 46: Queries αριστερά και δεξιά της οπής για εύρεση οριζόντιων μετακινήσεων

Μετακινήσεις αριστερά της οπής:

| Query #5 Stage 51 | Query #5 Stage 52 | Query #5 Stage 53 | Query #5 Stage 54 |
|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| Horizontal Displacement [m] | Horizontal Displacement [m] | Horizontal Displacement [m] | Horizontal Displacement [m] |
| -2,45193E-05 | -2,59523E-05 | -2,69489E-05 | -2,82833E-05 |
| -2,38909E-05 | -2,48659E-05 | -2,55143E-05 | -2,66239E-05 |
| -2,27993E-05 | -2,32166E-05 | -2,34875E-05 | -2,43479E-05 |
| -1,75435E-05 | -1,72111E-05 | -1,70213E-05 | -1,74124E-05 |
| -1,29001E-05 | -1,21118E-05 | -1,15343E-05 | -1,15269E-05 |
| -6,61735E-06 | -5,46244E-06 | -4,46209E-06 | -4,03933E-06 |
| -2,46597E-06 | -1,02658E-06 | 3,21611E-07 | 1,08284E-06 |
| -1,81235E-06 | -2,17993E-07 | 1,35552E-06 | 2,33121E-06 |
| -8,84112E-07 | 7,27085E-07 | 2,37373E-06 | 3,44206E-06 |
| -4,45063E-06 | -3,57117E-06 | -2,56435E-06 | -2,02339E-06 |
| -8,34772E-06 | -8,24747E-06 | -7,91871E-06 | -7,9385E-06 |
| -1,03494E-05 | -1,06032E-05 | -1,06562E-05 | -1,09757E-05 |
| -1,2258E-05 | -1,28315E-05 | -1,32469E-05 | -1,38449E-05 |
| -1,53383E-05 | -1,61838E-05 | -1,69813E-05 | -1,7901E-05 |
| -1,89104E-05 | -2,00929E-05 | -2,13394E-05 | -2,26456E-05 |
| -1,9724E-05 | -2,09963E-05 | -2,23475E-05 | -2,36863E-05 |
| -2,0889E-05 | -2,22453E-05 | -2,36877E-05 | -2,50005E-05 |
| -2,15456E-05 | -2,30061E-05 | -2,45559E-05 | -2,5904E-05 |
| -2,23587E-05 | -2,39345E-05 | -2,55499E-05 | -2,68908E-05 |

| | | | |
|--------------|--------------|--------------|--------------|
| -2,25143E-05 | -2,4196E-05 | -2,5931E-05 | -2,75508E-05 |
| -2,267E-05 | -2,44576E-05 | -2,63121E-05 | -2,82109E-05 |
| -2,28348E-05 | -2,47197E-05 | -2,67045E-05 | -2,87707E-05 |
| -2,27732E-05 | -2,47589E-05 | -2,68504E-05 | -2,90962E-05 |
| -2,2659E-05 | -2,4702E-05 | -2,68403E-05 | -2,90636E-05 |
| -2,25448E-05 | -2,46451E-05 | -2,68302E-05 | -2,9031E-05 |
| -2,23634E-05 | -2,44184E-05 | -2,65304E-05 | -2,88019E-05 |
| -2,20913E-05 | -2,40916E-05 | -2,61244E-05 | -2,83422E-05 |
| -2,17904E-05 | -2,37396E-05 | -2,56992E-05 | -2,78108E-05 |
| -2,14745E-05 | -2,33666E-05 | -2,52362E-05 | -2,71932E-05 |
| -2,1101E-05 | -2,29273E-05 | -2,47037E-05 | -2,65393E-05 |

Πίνακας 17.

Άρα το slabbing αριστερά της οπής ξεκινά απο το στάδιο 52 για μετακίνηση πλαισίου $4,368 \cdot 10^{-4}$ m και για κατακόρυφη τάση $\sigma_{\psi\psi}=99,4$ MPa.

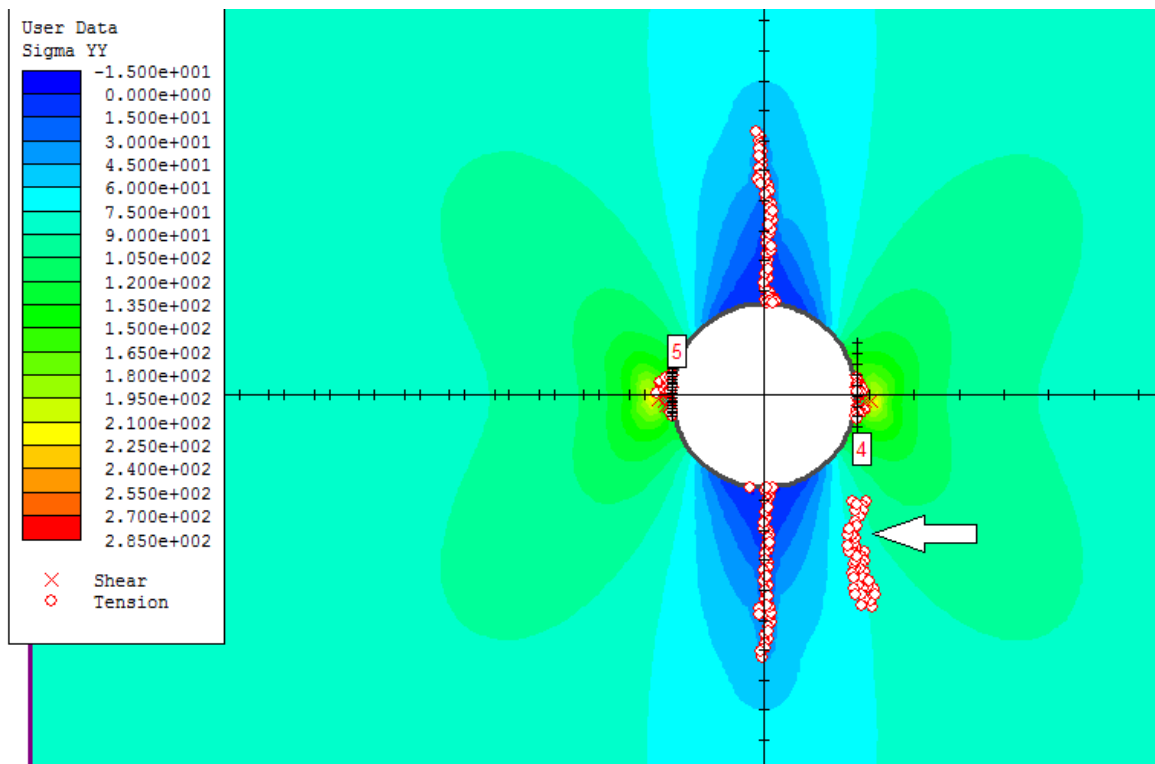
Μετακινήσεις δεξιά της οπής:

| Query #4 Stage 48 | Query #4 Stage 49 | Query #4 Stage 50 | Query #4 Stage 51 | Query #4 Stage 52 | Query #4 Stage 53 |
|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| Horizontal Displacement [m] | Horizontal Displacement [m] | Horizontal Displacement [m] | Horizontal Displacement [m] | Horizontal Displacement [m] | Horizontal Displacement [m] |
| 1,625E-05 | 1,72E-05 | 1,9E-05 | 2,078E-05 | 2,243E-05 | 2,396E-05 |
| 1,716E-05 | 1,816E-05 | 2,002E-05 | 2,187E-05 | 2,359E-05 | 2,52E-05 |
| 1,783E-05 | 1,887E-05 | 2,073E-05 | 2,259E-05 | 2,434E-05 | 2,596E-05 |
| 1,828E-05 | 1,933E-05 | 2,106E-05 | 2,285E-05 | 2,456E-05 | 2,615E-05 |
| 1,725E-05 | 1,636E-05 | 1,659E-05 | 1,764E-05 | 1,874E-05 | 1,968E-05 |
| 1,251E-05 | 1,148E-05 | 1,111E-05 | 1,13E-05 | 1,177E-05 | 1,125E-05 |
| 1,234E-05 | 1,278E-05 | 1,427E-05 | 1,577E-05 | 1,714E-05 | 1,694E-05 |
| 1,846E-05 | 1,937E-05 | 2,087E-05 | 2,258E-05 | 2,431E-05 | 2,55E-05 |
| 1,809E-05 | 1,913E-05 | 2,081E-05 | 2,26E-05 | 2,44E-05 | 2,613E-05 |
| 1,735E-05 | 1,836E-05 | 1,997E-05 | 2,166E-05 | 2,332E-05 | 2,489E-05 |

Πίνακας 18.

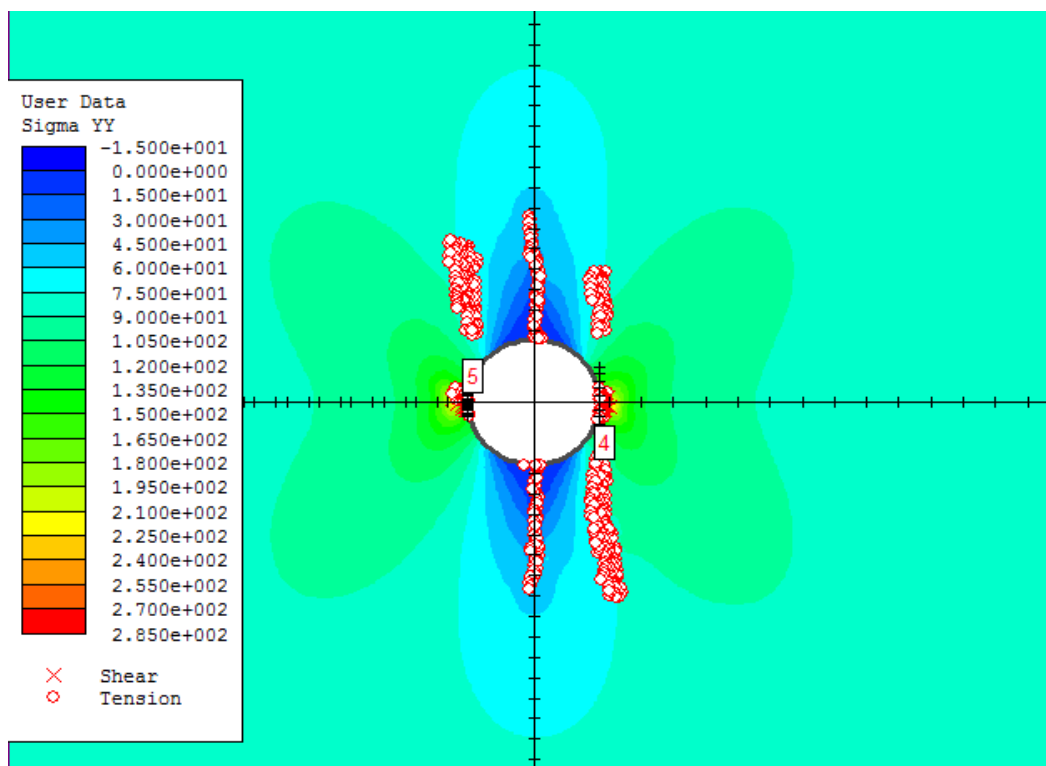
Όλες οι μετακινήσεις δεξιά της οπής έχουν θετικό πρόσημο, οπότε δε συντελείται slabbing τουλάχιστον έως το στάδιο 53.

Από το στάδιο 48 εμφανίζονται οι απομονωμένες ρωγμές (remotefractures), λόγω αστοχίας σε εφελκυσμό, αρχικά κάτω από την οπή για κατακόρυφη τάση $\sigma_{\psi\psi}=91,37$ MPa.

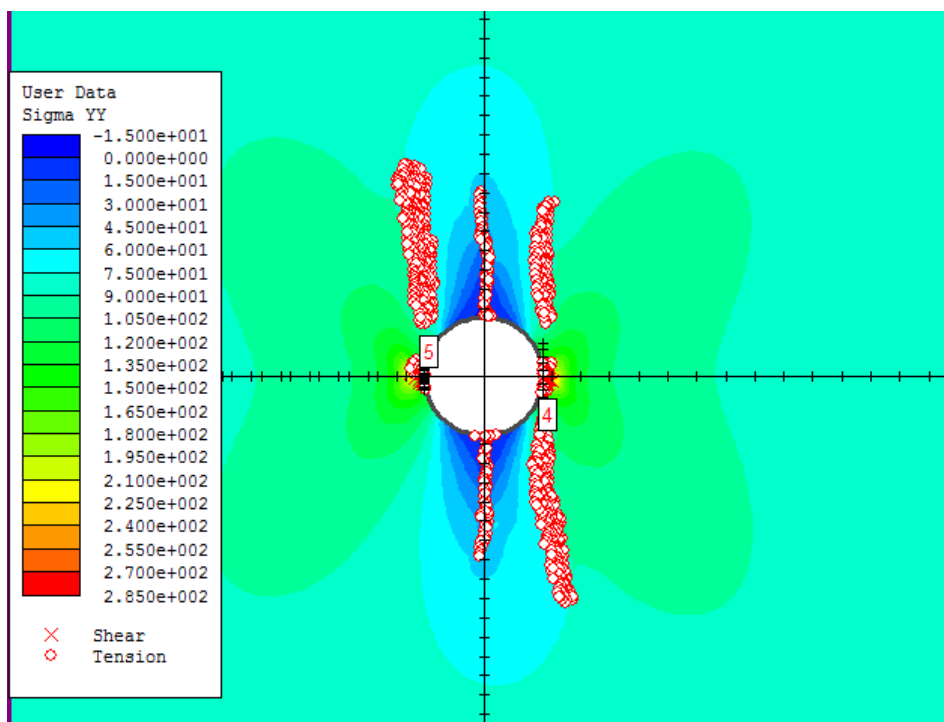


Stage 48: Απομονωμένες ρωγματώσεις

Αμέσως μετά στο 49^ο στάδιο εμφανίζονται και απομονωμένες ρωγματώσεις και σε άλλα σημεία του μοντέλου οι οποίες επεκτείνονται με αύξηση της μετακίνησης του πλαισίου.

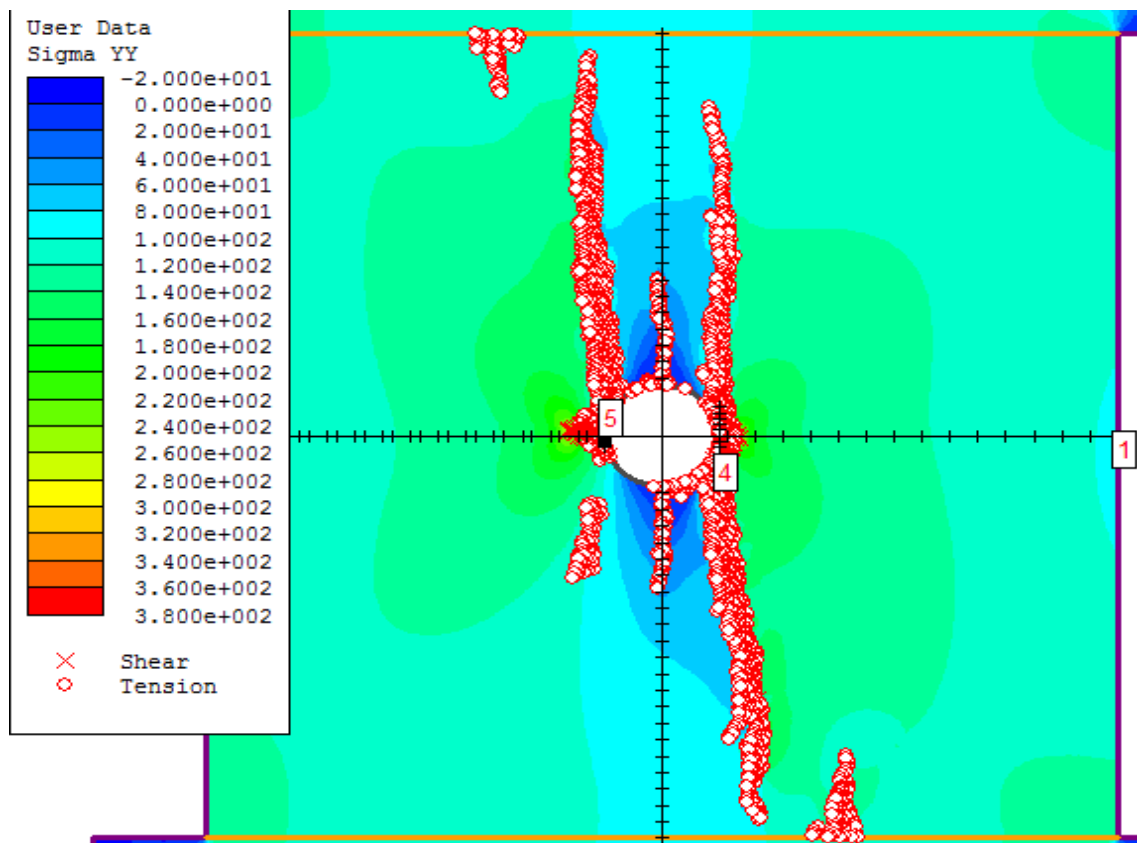


Stage 49: Εμφάνιση νέων απομονωμένων ρωγματώσεων

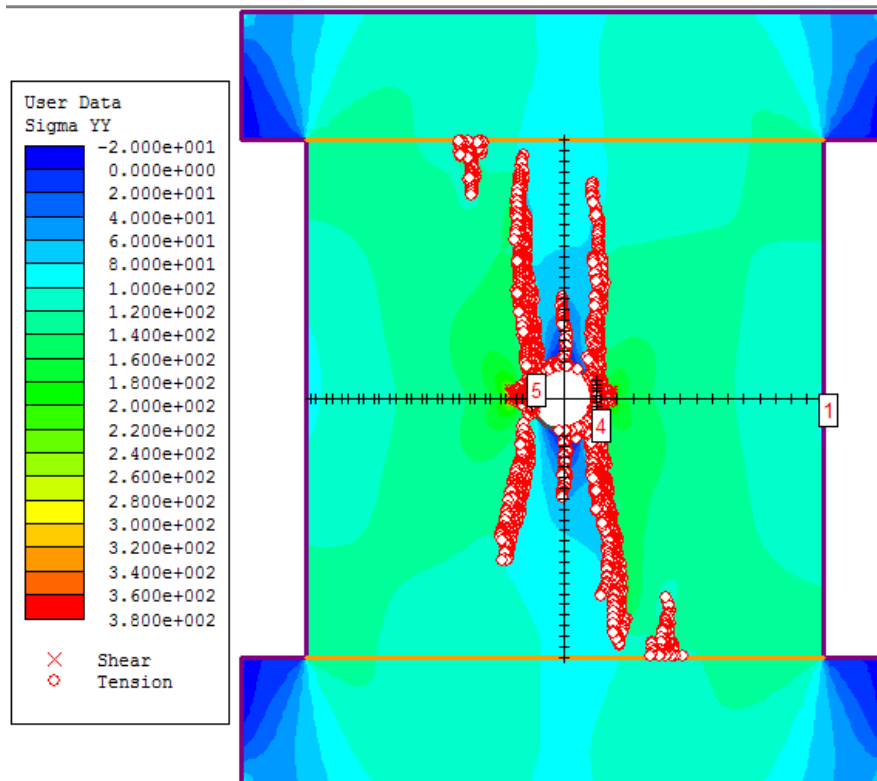


Stage 50: Επέκταση των απομονωμένων ρωγματώσεων

Η τελευταία αξιόλογη απομονωμένη ρωγή που εμφανίζεται συμβαίνει στο στάδιο 68. Πλέον σε αυτό το στάδιο το στάδιο οι απομονωμένες ρωγμές έχουν επεκταθεί σε μεγάλη επιφάνεια, ενώ γύρω από το κυκλικό άνοιγμα έχουν πολλαπλασιαστεί οι διατμητικές και εφελκυστικές αστοχίες. Η αρχικά απομονωμένη ρωγή στη δεξιά πλευρά της οπής έχει ενωθεί με την μετέπειτα απομονωμένη ρωγή και έχει καλύψει όλη τη δεξιά πλευρά του μοντέλου. Στα επόμενα στάδια αναμένεται η τελική θραύση του μοντέλου.



Stage 68: Εμφάνιση νέων απομονωμένων ρωγματώσεων και ένωση απομονωμένων ρωγμών

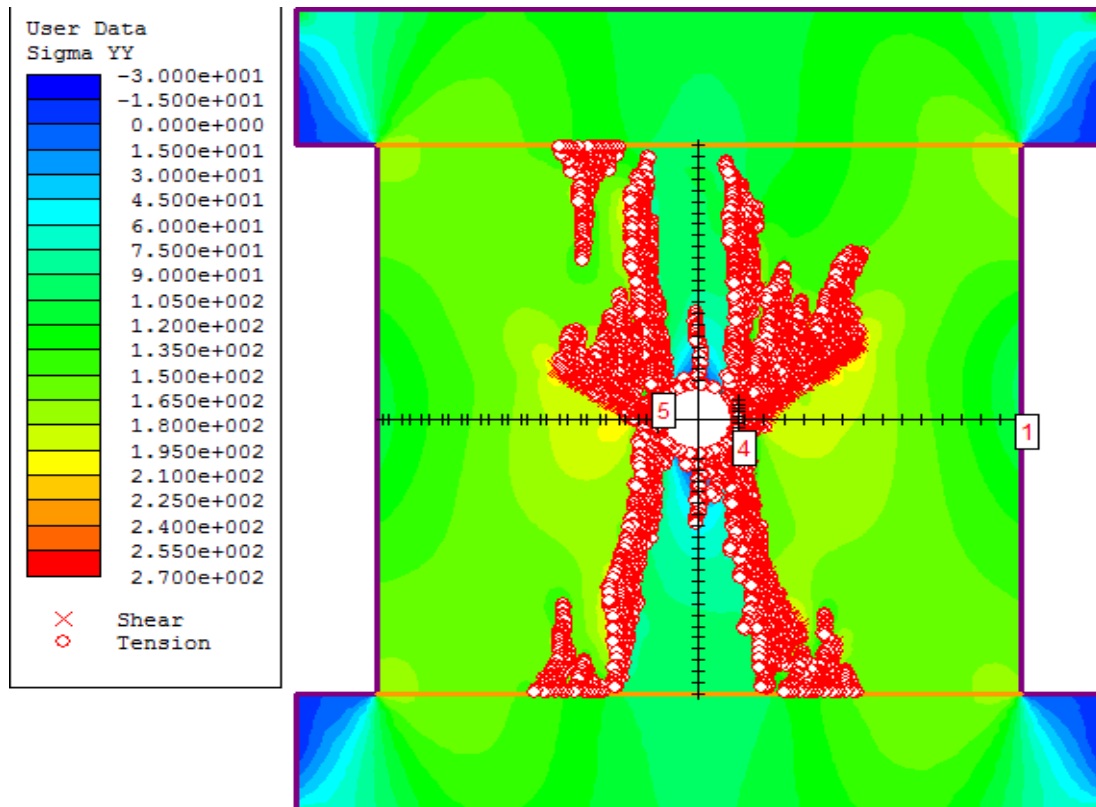


Stage 70: Τελική ένωση των ρωγμών

Από το στάδιο 71 αρχίζει το slabbing δεξιά της οπής:

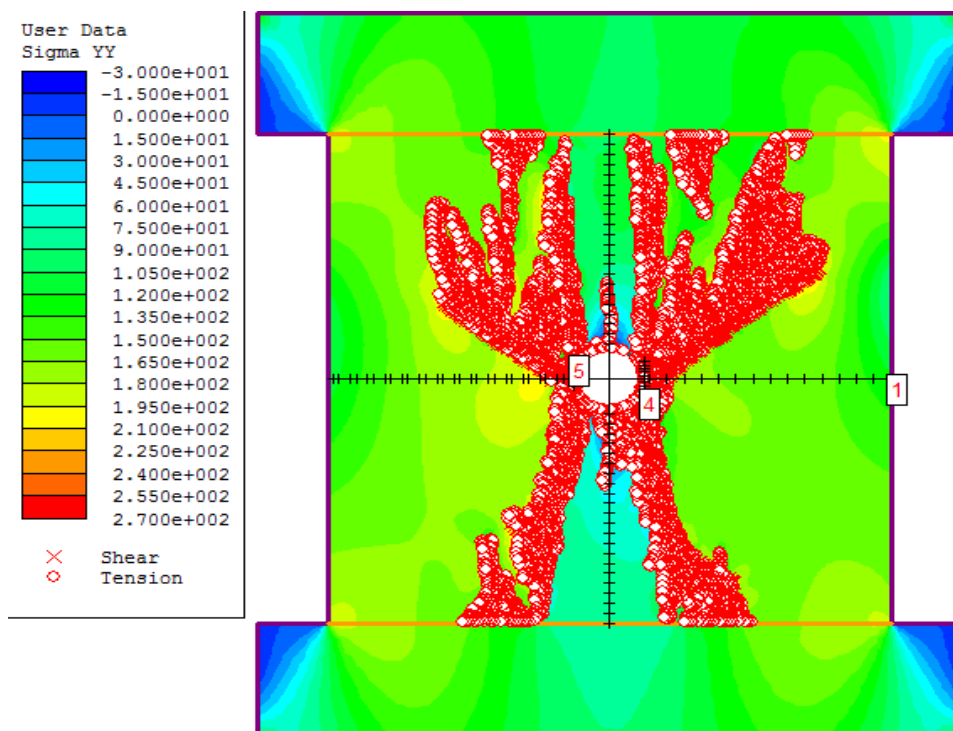
| Query #4 Stage 70 | Query #4 Stage 71 | Query #4 Stage 72 |
|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| Horizontal Displacement [m] | Horizontal Displacement [m] | Horizontal Displacement [m] |
| 4,17777E-05 | 4,35577E-05 | 4,54953E-05 |
| 4,17925E-05 | 4,27338E-05 | 4,40493E-05 |
| 3,76383E-05 | 3,68717E-05 | 3,66634E-05 |
| 3,30248E-05 | 3,11841E-05 | 2,97214E-05 |
| 1,37488E-05 | 1,06035E-05 | 7,02573E-06 |
| 2,43746E-06 | -1,30692E-06 | -4,83391E-06 |
| 1,51868E-05 | 1,24485E-05 | 1,00556E-05 |
| 3,31085E-05 | 3,31416E-05 | 3,26865E-05 |
| 4,45248E-05 | 4,60324E-05 | 4,72618E-05 |
| 4,79642E-05 | 5,00228E-05 | 5,20671E-05 |

Πίνακας 19.

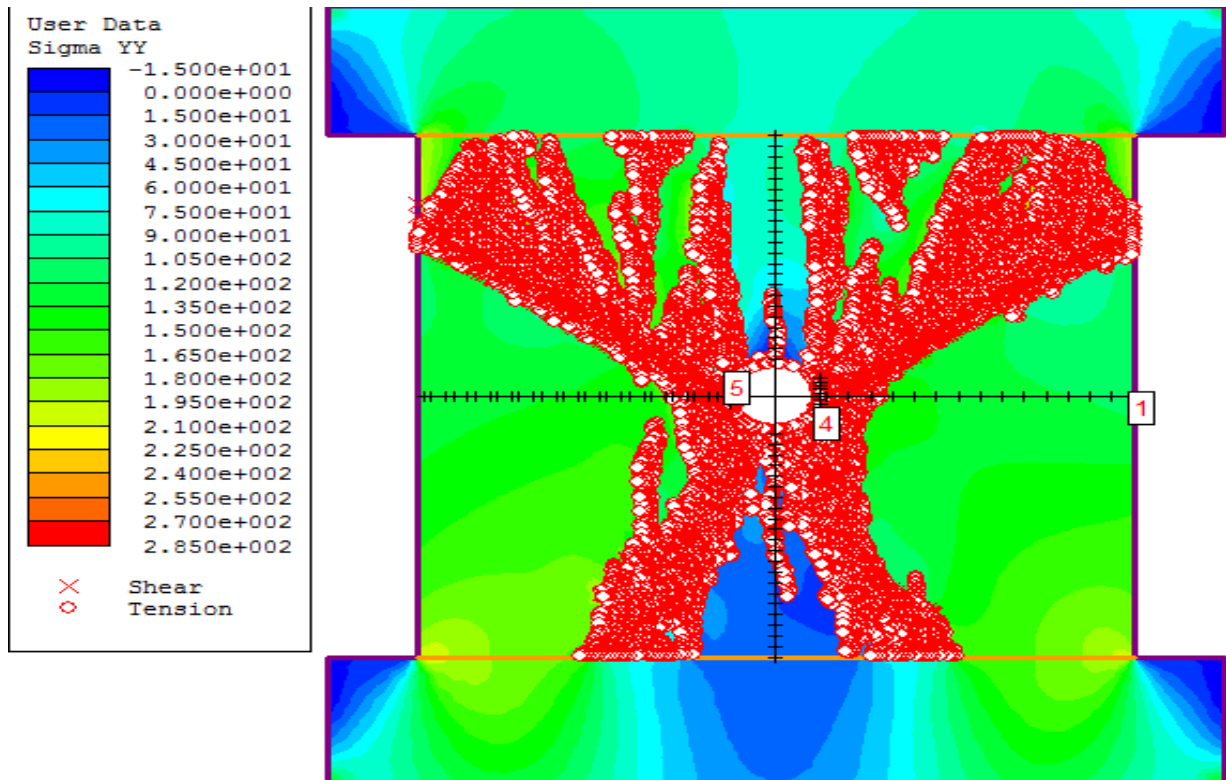


Stage 90: Πριν την τελική θράυση

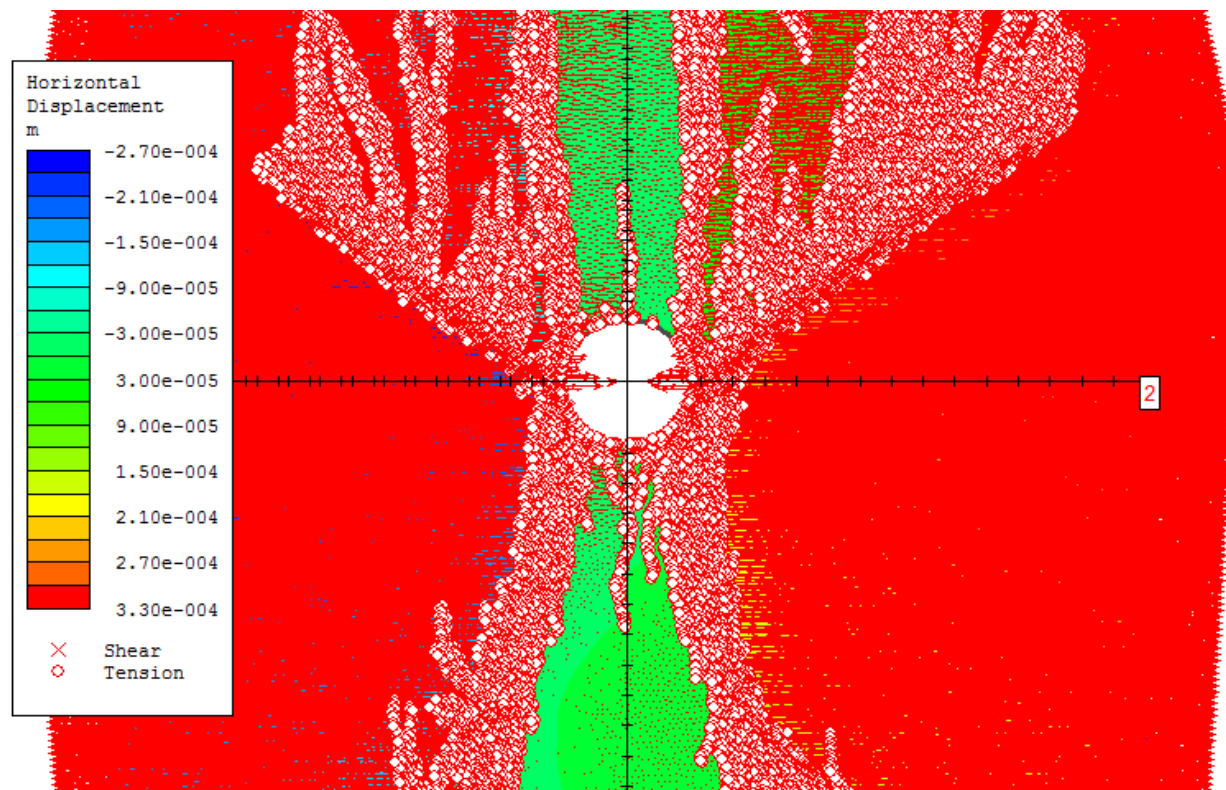
Η τελική θράυση του μοντέλου συντελείται στο στάδιο 95 για κατακόρυφη τάση $\sigma_{\psi\psi}=160,5$ MPa. Στο 100^ο στάδιο η αντοχή του μοντέλου έχει πέσει στα 128 MPa.



Stage 95: Τελική θράυση

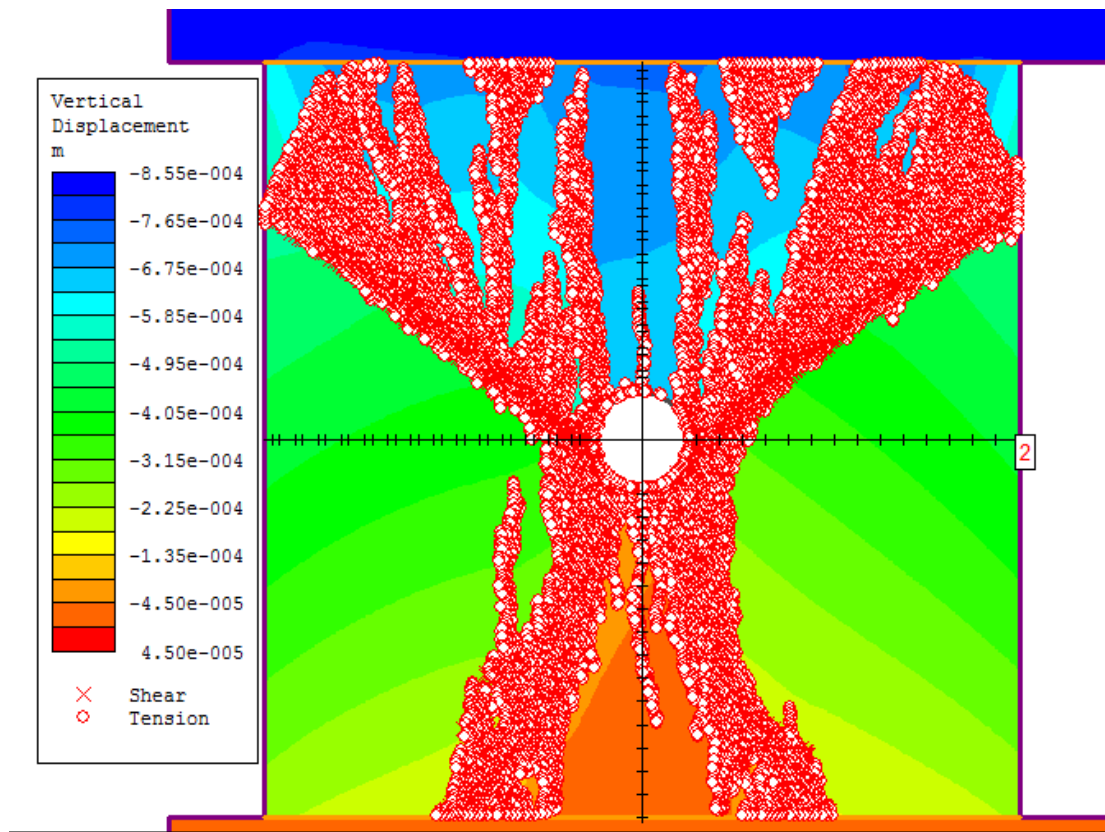


Stage 100: Μετά τη θραύση



Stage 97: Οριζόντιες μετακινήσεις σε συνδυασμό με τα διανύσματα των μετακινήσεων

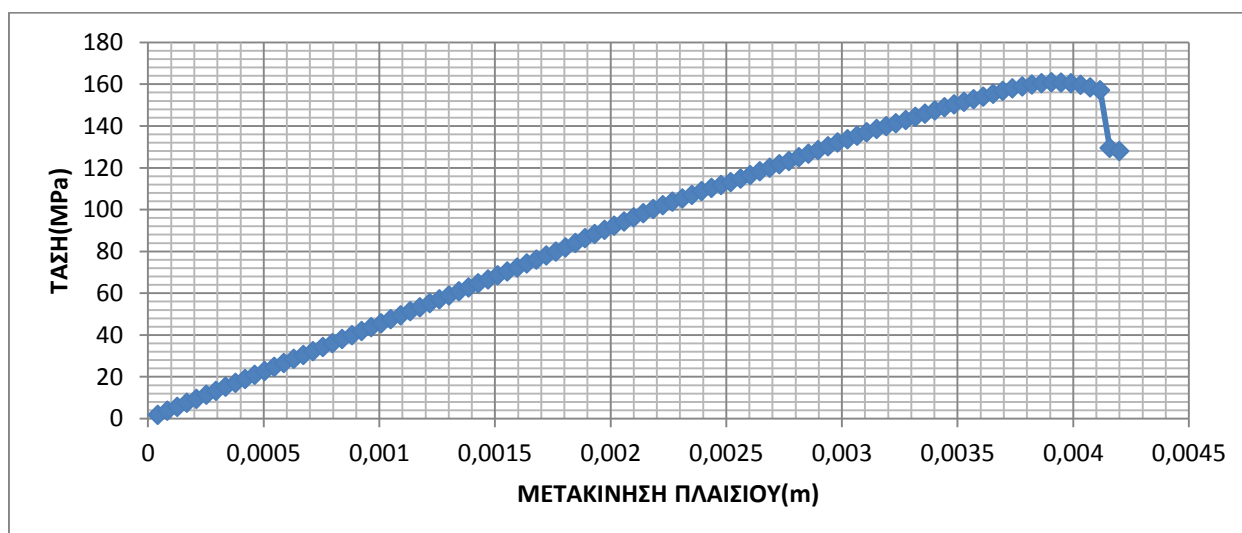
Από τα διανύσματα των μετακινήσεων παρατηρείται ότι καταρχάς η οριζόντια μετακίνηση είναι κατοπτρική στον κατακόρυφο άξονα της διαμέτρου από το κέντρο της οπής, με κατεύθυνση προς την κοντινότερη «έξοδο».



Stage 99: Κατακόρυφες μετακινήσεις

Από την εικόνα των κατακόρυφων μετακινήσεων φαίνεται ότι οι μέγιστες καθιζήσεις συντελούνται στην περιοχή ένωση των διατμητικών αστοχιών με την άνω περιοχή της οπής. Η μέγιστη καθίζηση έχει τιμή 0,675 mm.

Όπως φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα το μοντέλο παρουσιάζει ψαθυρή συμπεριφορά με μέγιστη αντοχή τα 160,5 MPa.

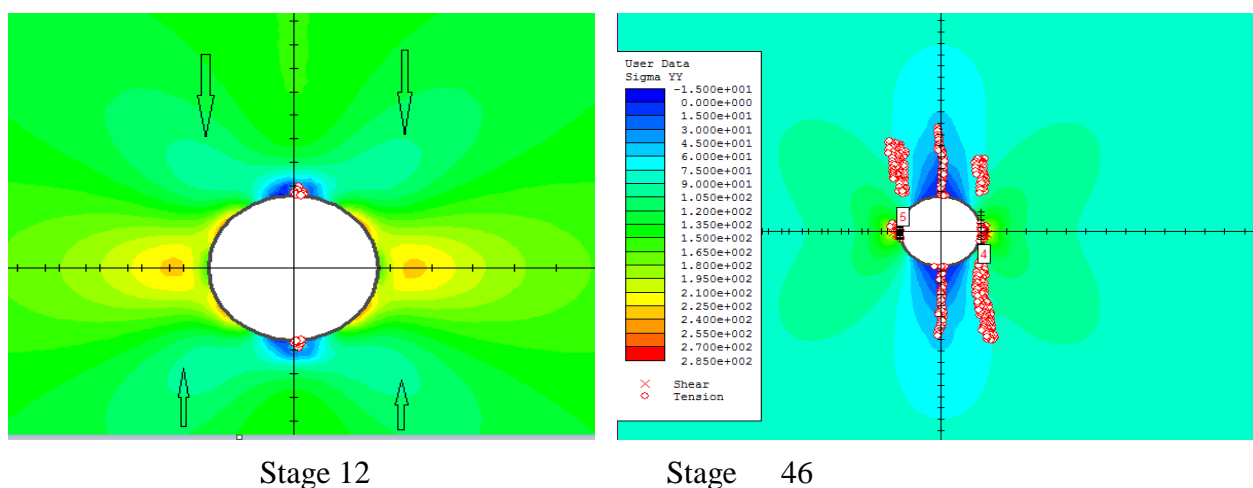


Διάγραμμα 21. Τάση – Μετακίνηση πλαισίου

Το μοντέλο παρουσίασε την αναμενόμενη συμπεριφορά ενός ψαθυρού δοκιμίου υπο μονοαξονική φόρτιση, δηλαδή ακολούθησε την εξής διαδρομή:

- i. Εμφάνιση εφελκυστικών ρωγμών στο πάνω και κάτω μέρος οπής.
- ii. Απομονωμένες ρωγμές
- iii. Αποφλοιώσεις εσωτερικά του ανοίγματος (slabbing)
- iv. Ένωση των απομονωμένων ρωγμών
- v. Τελική θραύση του φυσικού μοντέλου

Πρέπει να σημειωθεί και η σχέση των απομονωμένων ρωγματώσεων με το τασικό πεδίο. Όπως φαίνεται και στις παρακάτω εικόνες στις περιοχές που η τάση σχχ γίνεται εφελκυστική συνέβη και η δημιουργία των remotefractures.



Εικόνα 33. Σχέση τασικού πεδίου με την εμφάνιση των απομονωμένων ρωγματώσεων

4.3 Σύγκριση τιμών Carter – Μοντέλου

Η σύγκριση των αποτελεσμάτων της παραπάνω μοντελοποίησης με τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τη δοκιμή του Carter παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

| Τύπος Θραύσης | Τάση (Carter) | Τάση (Μοντέλου) |
|---------------------|---------------|-----------------|
| Αρχικές ρωγμές | 16 | 14,3 |
| Απομονωμένες ρωγμές | 119 | 91,37 |
| Slabbing | 126 | 99,4 |

Πίνακας 20.

Από τον παραπάνω πίνακα παρατηρείται ότι η εμφάνιση των αρχικών εφελκυστικών ρωγμών στο μοντέλο πραγματοποιείται σε μικρότερη αντίστοιχη τάση, της οποίας η διαφορά είναι μικρή (1,7 MPa). Η μεγάλη διαφορά εντοπίζεται στην τάση εμφάνισης των απομονωμένων ρωγματώσεων (27,63 MPa). Όσον αφορά την εμφάνιση του slabbing η διαφορά είναι και σε αυτή την περίπτωση μεγάλη, όμως σαν συμβάν

ξεχωριστό ακολουθεί την ίδια πορεία με αυτή του δοκιμίου του Carter. Στην πραγματική δοκιμή το slabbing εμφανίζεται 7 MPa ύστερα από την εμφάνιση των απομονωμένων ρωγμών, ενώ στο υπολογιστικό μοντέλο εμφανίζεται 8 MPa ύστερα από την εμφάνιση των απομονωμένων ρωγμών.

Συμπερασματικά

Σε όλα τα μοντέλα η διαδικασία καταστροφής ακολούθησε την πραγματικότητα. Η σειρά της εξέλιξης των φαινομένων ρωγμάτωσης που συντελέστηκαν κατά την φόρτιση σε μονοαξονική θλίψη ήταν η εξής:

- i. Εμφάνιση εφελκυστικών ρωγμών από το κέντρο της οπής
- ii. Απομονωμένες ρωγμές
- iii. Αποφλοιώσεις στο κέντρο της οπής (slabbing)
- iv. Τελική θραύση

Ανάλογα με το μέγεθος της οπής επηρεάζεται και η τελική αντοχή του μοντέλου. Σε μεγαλύτερες διατομές οι αντοχές μειώνονται. Όσον αφορά τη σύγκριση διατομής και δημιουργίας της πρώτης εφελκυστικής ρωγμής τα αποτελέσματα των αναλύσεων δεν συμπίπτουν με τα πειραματικά δεδομένα. Σχετικά με τις απομονωμένες ρωγματώσεις καθώς και το slabbing δεν μπορούν να εξαχθούν ασφαλή συμπεράσματα.

Όσον αφορά την προσομοίωση του πειράματος του Carter η διαδικασία καταστροφής ως εικόνα σχεδόν ταυτίζεται με την πραγματικότητα. Όμως, εκτός από την τιμή της τάσης έναρξης της πρώτης εφελκυστικής ρωγμής, οι τιμές αντιστήριξης τάσης – γεγονότων διαφέρουν σημαντικά.

Οι κυριότεροι παράγοντες που συντελούν στην μεταβολή των αποτελεσμάτων σχετίζονται κατά κύριο λόγο με τις τιμές που δίνονται στη συνοχή και στη γωνία τριβής. Με διαφορετικό συνδυασμό αυτών των τιμών μεταβάλλονται και τα αποτελέσματα.

Επίσης σε αντίστοιχες δοκιμές που συντελέστηκαν με αλλαγή της διακριτοποίησης (discretize and mesh) μεταβλήθηκαν και πάλι τα αποτελέσματα.

Τέλος άλλος ένας καθοριστικός παράγοντας επιροής είναι η μετακίνηση του πλαισίου, για παράδειγμα με μικρότερη τιμή στη μετακίνηση της πλάκας τα αποτελέσματα στην αντοχή αυξάνουν, με την έννοια ότι αυξανόμενων των σταδίων επιτυγχάνεται μεγαλύτερη ακρίβεια στον εντοπισμό των τάσεων.

Αν και η διαδικασία καταστροφής των μοντέλων είναι συνεπής με την πραγματικότητα, η απόκλιση των αποτελεσμάτων είναι σημαντική, οπότε η ανάλυση απαιτεί βελτιώσεις.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Carter B.J., Lajtai E.Z., Petukhov A., 1991, «Primary and remote fracture around underground cavities», International journal for numerical and analytical methods in Geomechanics Vol.15, 21-40
- Carter B.J., 1992, «Size and Stress Gradient Effects on Fracture Around Cavities», Rock Mechanics and Rock Engineering, Springer-Verlag
- Lajtai, E. Z., Carter B. J., Ayari, M. L. (1990): Criteria for brittle fracture in compression. Engng. Fracture Mech. 37, 59--74.
- Lajtai E. Z., Lajtai V. N., 1975, «The collapse of cavities», Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. Vol. 12, pp. 81-86. Pergamon Press
- Sih G.C., 1973, «Some basic problems in fracture mechanics and new concepts»
- Dzik E.J. and Lajtai E.Z., 1996, «Primary fracture propagation from circular cavities loaded in compression», International Journal of Fracture 79: 49-64, Kluwer Academic Publishers
- Α.Ι. Σοφιανός & Π.Π. Νομικός, 2008, Σημειώσεις μαθήματος «Προχωρημένη Μηχανική Πετρωμάτων», ΔΠΜΣ «Σχεδιασμός και Κατασκευή Υπογείων έργων»
- Paterson M.S, Wong T, 2005, “Experimental Rock Deformation-The Brittle Field”, Second Edition, Springer Berlin Heidelberg New York
- Μηχανική Συμπεριφορά των υλικών, Τμήμα μηχανικών παραγωγής και διοίκησης, Πολυτεχνείο Κρήτης
- Hochgraf F., 2004, Ductile and brittle fracture, New Hampshire Materials Laboratory
- Madhukar Vable, «Intermediate Mechanics of Materials», Chapter 7, Michigan Department of Mechanical Engineering
- Eberhardt E. et.al 1998, Identifying crack initiation and propagation thresholds in brittle rock
- Eberhardt E. et.al 1998, Identifying crack initiation and propagation thresholds in brittle rock
- Παπαδόπουλος Β., 2007, Σημειώσεις του μαθήματος «Βραχομηχανική-Σήραγγες», Σχολή Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ, Αθήνα
- <https://www.rocscience.com/rocscience/products/rs2>
- Bieniawski Z.T., 1968, «Mechanism of brittle fracture of rock», Part I. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 4, 395-406
- Baecher G.B., Einstein H.H., 1981, «Size effect in rock testing», Geophysical Research Letters
- Cai M, Kaiser P.K., Tasaka Y., Maejima T., Morioka H., Minami M., 2004, «Generalized crack initiation and crack damage stress thresholds of brittle rock masses near underground excavations», Int.J.RockMech.Min.Sci 2004;41:833–47