

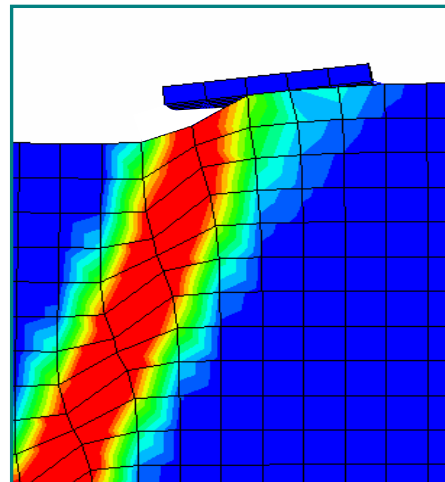
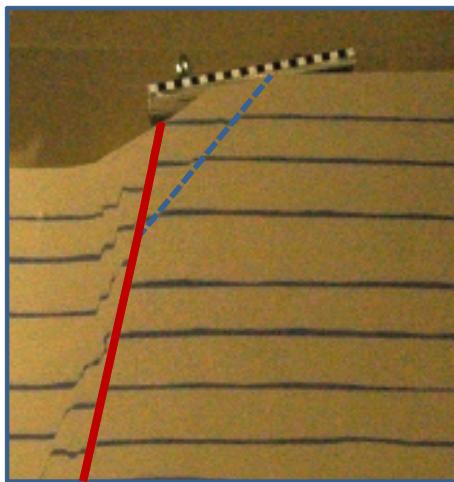
Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο  
Σχολή Πολιτικών Μηχανικών  
Τομέας Γεωτεχνικής

National Tech. University of Athens  
School of Civil Engineering  
Geotechnical Division

Διπλωματική Εργασία  
**Μαργαρίτας Παλαιολόγου**

Επιβλέποντες:  
ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Γ. ΓΚΑΖΕΤΑΣ  
ΔΡ. Ι. ΑΝΑΣΤΑΣΟΠΟΥΛΟΣ

ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗ  
ΤΕΚΤΟΝΙΚΗΣ ΔΙΑΡΡΗΞΗΣ – ΕΔΑΦΟΥΣ – ΘΕΜΕΛΙΟΥ :  
ΠΕΙΡΑΜΑ και ΑΝΑΛΥΣΗ



FAULT RUPTURE–SOIL–FOUNDATION INTERACTION :  
EXPERIMENT and ANALYSIS

Diploma thesis by  
**Margarita Palaiologou**

Supervised by  
PROFESSOR G. GAZETAS  
DR. I. ANASTASOPOULOS

Μάρτιος 2009

*Μαργαρίτα Παλαιολόγου, Διπλωματική Εργασία, ΕΜΠ 2009*

## Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά όλα τα άτομα που με βοήθησαν στην εκπόνηση και ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας. Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου, κύριο **Γιώργο Γκαζέτα** Καθηγητή της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ, τόσο για την ανάθεση του θέματος της διπλωματικής εργασίας όσο και για τη σημαντική καθοδήγηση και τη βοήθεια που μου προσέφερε σε όλη τη διάρκεια της μελέτης. Επίσης, ιδιαίτερα σημαντική ήταν η συμβολή του Δρ. **Ιωάννη Αναστασόπουλου**, ο οποίος με εμπιστεύτηκε και ήταν πάντα πρόθυμος να βοηθήσει και τον ευχαριστώ πολύ για τη συνεργασία μας. Τέλος, πολλές ευχαριστίες αξίζουν στην αδερφή μου καθώς και στους φίλους μου για την ηθική συμπαράσταση και υποστήριξη που μου προσέφεραν όλο αυτό το χρονικό διάστημα.

*Μαργαρίτα Παλαιολόγου, Διπλωματική Εργασία, ΕΜΠ 2009*

## ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

<b>ΕΙΣΑΓΩΓΗ</b>	Εισαγωγή Οργάνωση
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1</b>	<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ</b>
1.0	Εισαγωγή
1.1	Πειράματα Μικρής Κλίμακας
1.2	Πειράματα με Φυγοκεντρική
1.3	Πειράματα Μεγάλης Κλίμακας
1.4	Σύνοψη και Συμπεράσματα
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2</b>	<b>ΔΙΕΞΑΓΩΓΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ ΣΤΗ ΣΥΣΚΕΥΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΔΙΑΡΡΗΞΗΣ</b>
2.0	Εισαγωγή
2.1	Προετοιμασία του Πειράματος
2.2	Εκτέλεση του Πειράματος
2.2.1	Διάδοση Κανονικής Διάρρηξης στο Ελεύθερο Πεδίο
2.2.2	Αλληλεπίδραση Διαρρήξεως με Άκαμπτο Τετραγωνικό Θεμέλιο
2.2.3	Ανάστροφη Διάρρηξη
2.3	Αποτελέσματα
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3</b>	<b>ΔΙΑΔΟΣΗ ΚΑΝΟΝΙΚΗΣ ΤΕΚΤΟΝΙΚΗΣ ΔΙΑΡΡΗΞΗΣ ΣΤΟ ΕΛΕΥΘΕΡΟ ΠΕΔΙΟ</b>
3.0	Εισαγωγή
3.1	Αριθμητικό Προσομοίωμα
3.1.1	Επαλήθευση του καταστατικού μοντέλου και Ανάλυση ευαισθησίας.
3.2	Αποτελέσματα
3.3	Σύνοψη και Συμπεράσματα
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4</b>	<b>ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗ ΚΑΝΟΝΙΚΗΣ ΤΕΚΤΟΝΙΚΗΣ ΔΙΑΡΡΗΞΗΣ-ΕΔΑΦΟΥΣ-ΘΕΜΕΛΙΟΥ</b>
4.1	Αριθμητικό προσομοίωμα

- 4.2** Αποτελέσματα
  - 4.2.1 Σεισμική διάρρηξη σε σχετική απόσταση  $d / B' = 1.2$
  - 4.2.2 Σεισμική διάρρηξη σε σχετική απόσταση  $d / B' = 1.0$
  - 4.2.3 Σεισμική διάρρηξη σε σχετική απόσταση  $d / B' = 0.8$
  - 4.2.4 Σεισμική διάρρηξη σε σχετική απόσταση  $d / B' = 0.6$
  - 4.2.5 Σεισμική διάρρηξη σε σχετική απόσταση  $d / B' = 0.4$
  - 4.2.6 Σεισμική διάρρηξη σε σχετική απόσταση  $d / B' = 0.2$
  - 4.2.7 Σεισμική διάρρηξη σε σχετική απόσταση  $d / B' = 0.0$
  - 4.2.8 Σεισμική διάρρηξη σε σχετική απόσταση  $d / B' = - 0.2$
- 4.3** Σύνοψη και Συμπεράσματα

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

### ΣΥΓΚΡΙΣΗ 3-D Ανάλυσης με πείραμα, με 3-D ανάλυση με διαφορετικές συνθήκες δέσμησης θεμελίου και με 2-D Ανάλυση

- 5.1** Σύγκριση Ανάλυσης με Πείραμα
  - 5.1.1 Ελεύθερο Πεδίο
  - 5.1.2 Αλληλεπίδραση με το θεμέλιο
- 5.2** Σύγκριση ανάλυσης με 3-Δ ανάλυση με διαφορετικές  
συνθήκες δέσμησης θεμελίου
  - 5.2.1 Εισαγωγή
  - 5.2.2 Αποτελέσματα
- 5.3** Σύγκριση με τη 2-Δ Ανάλυση 2-ώροφου κτιρίου με  $B' / H = 0.5$   
(I.Anastasopoulos 2005)
  - 5.3.1 Σεισμική διάρρηξη σε σχετική απόσταση  $d / B' = 0.2$
  - 5.3.2 Σεισμική διάρρηξη σε σχετική απόσταση  $d / B' = 0.6$
  - 5.3.3 Σεισμική διάρρηξη σε σχετική απόσταση  $d / B' = 0.8$
- 5.4** Συμπεράσματα

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

### ΣΥΣΚΕΥΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΔΙΑΡΡΗΞΗΣ

- Π.0** Εισαγωγή – Γενική Περιγραφή
- Π.1** Λεπτομέρειες Σχεδιασμού
  - Π.1.1 Κιβώτιο
    - Π.1.1.1: Μόνωση του κιβωτίου
  - Π.1.2 Γωνία Διάρρηξης
  - Π.1.3 Ηλεκτρικό Έμβολο
  - Π.1.4 Stoppers

- Π.2** Χειρισμός της συσκευής
- Π.3** Χρήση της συσκευής Διάρρηξης
- Π.4** Περιοδικός Έλεγχος και Συντήρηση

## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ**

*Μαργαρίτα Παλαιολόγου, Διπλωματική Εργασία, ΕΜΠ 2009*



## Εισαγωγή

Η διάρρηξη ενός σεισμικού ρήγματος προκαλεί δύο είδη εδαφικής μετακίνησης: μόνιμη οιονεί στατική μετατόπιση στο ρήγμα, και παροδικές δυναμικές ταλαντώσεις μακριά από αυτό (Ambraseys and Jackson 1984; Jackson 2001). Η ταλάντωση είναι αποτέλεσμα κυμάτων, τα οποία δημιουργούνται διαδοχικά από κάθε σημείο του ρήγματος (κατά την εξέλιξη της ολίσθησης), και διαδίδονται σε μεγάλες αποστάσεις στη γη. Τα κύματα αυτά επηρεάζουν πάντα την επιφάνεια του εδάφους και για αυτό το λόγο είναι πρωτεύουσας σημασίας για την ασφάλεια των κατασκευών. Αντίθετα, η μόνιμη τεκτονική μετακίνηση του ρήγματος επηρεάζει την επιφάνεια του εδάφους μόνο σε μερικές περιπτώσεις-όταν η διάρρηξη φτάνει μέχρι την επιφάνεια.

Όπως είναι φυσικό, λοιπόν, η σεισμική μηχανική έδωσε έμφαση (τις τελευταίες τέσσερις δεκαετίες) στη δυναμική απόκριση του εδάφους και των κατασκευών στην εδαφική ταλάντωση. Ο τρόπος με τον οποίο επηρεάζει ένα ρήγμα στο βραχώδες υπόβαθρο το υπερκείμενο έδαφος και τις επί αυτού κατασκευές δεν είχε καταφέρει να κερδίσει το ενδιαφέρον της επιστημονικής κοινότητας. Οι 3 μεγάλοι, και πλέον πασίγνωστοι, σεισμοί στην Τουρκία και στην Ταιβάν (Kocaeli,Düzce,Chi-Chi),καθώς και οι πιο πρόσφατοι σεισμοί στην Κεντρική Αλάσκα (2002) και στην Ιαπωνία (Mid Niigata 2004) ανέδειξαν τις δραματικές επιπτώσεις και τους κινδύνους που μπορεί να επιφέρουν επιφανειακές διαρρήξεις μεγάλης κλίμακας σε ανθρώπινες ζωές, κτίρια και υποδομές.

Δυστυχώς, ελάχιστοι σεισμικοί κώδικες ανά την υφήλιο περιέχουν οδηγίες, έτσι ώστε να μετριάζονται οι επιπτώσεις επιφανειακών σεισμικών διαρρήξεων σε κατασκευές στην άμεση γειτονία τους. Αυτό μπορεί να οφείλεται στη μη συχνή εμφάνιση των ρηγμάτων στην επιφάνεια του εδάφους, στη μεγάλη δυσκολία να προστατευθούν οι υποδομές και κατασκευές από τις επιφανειακές διαρρήξεις και στη δυσχέρεια να εκτιμηθεί η θέση και έκταση της σχετικής μόνιμης μετακίνησης, εξαιτίας πολλών άγνωστων παραγόντων, όπως η ακριβής θέση του ρήγματος, η γεωμετρία και κίνησή του, οι μηχανικές ιδιότητες του εδαφικού στρώματος, όπως και η αλληλεπίδραση της διάρρηξης με την ανωδομή.

Στην California (USA) ,στη Νέα Ζηλανδία και στην Ταιβάν, μετά το σεισμό του Chi-Chi (1999) καθιερώθηκαν οι λεγόμενες ενεργές ζώνες ρήγματος. Σε αυτές τις ζώνες η κατασκευαστική δραστηριότητα είναι περιορισμένη ή ακόμα και αδύνατη, περιορίζοντας έτσι τους κινδύνους στις νέες κατασκευές και υποδομές. Για τις ήδη υπάρχουσες κατασκευές στη γειτονία ρηγμάτων , δεν προβλέπεται ασπίδα προστασίας, ενώ δεν αναφέρεται τίποτα σχετικό με το εύρος των πιθανών μετατοπίσεων εντός των ζωνών ρήγματος και/ ή την πιθανότητα εμφάνισης των μετακινήσεων αυτών.

Σε πυκνοκατοικημένες περιοχές, είναι πολύ δύσκολο να προωθηθεί το μέτρο των ζωνών ενεργού ρήγματος, εξαιτίας έλλειψης χώρου. Επιπρόσθετα, οι βλάβες στους σεισμούς της Ιαπωνίας προκλήθηκαν από άγνωστα μέχρι στιγμής ρήγματα, παρόλο που η καταγραφή των ρηγμάτων είναι εκτενής. Επίσης, δεν πρέπει να αγνοηθεί το γεγονός ότι υποδομές, όπως οι αγωγοί ύδρευσης, πετρελαίου και σήραγγες, είναι εξαιρετικά δύσκολο να σχεδιαστούν ,έτσι ώστε να αποφεύγεται συνάντησή τους με ενεργά

ρήγματα, εξαιτίας της ευρείας έκτασης τους. Κατά συνέπεια, αυτό που είναι αναγκαίο είναι να υιοθετηθούν νέοι τρόποι σχεδιασμού, οι οποίοι να επιτρέπουν την ασφαλή και οικονομική κατασκευή στην άμεση γειτονία του ρήγματος

Ένα ζήτημα που δεν πρέπει να αγνοηθεί είναι η διαφορά ανάμεσα στα οριζόντια διάτμησης και dip-slip ρήγματα. Οι μετατοπίσεις κατά μήκος ενός ρήγματος οριζόντιας διατμήσεως είναι συγκεντρωμένες σε μία στενότερη ζώνη γύρω από την επιφανειακή διάρρηξη, ενώ οι παραμορφώσεις στα dip-slip μπορεί να επηρεάζουν ευρύτερες περιοχές.

Με την διερεύνηση του θέματος, πιο συγκεκριμένα με τη διάδοση της σεισμικής διάρρηξης στο έδαφος και στη συνέχεια με την αλληλεπίδρασή της με την ανωδομή, έχουν ασχοληθεί πολλοί ερευνητές. Η διερεύνηση του φαινομένου έγινε α) είτε με αξιολόγηση πραγματικών γεγονότων, β) με διεξαγωγή πειραμάτων μικρής κλίμακας, γ) με διεξαγωγή πειραμάτων μεγάλης ή κανονικού μεγέθους (large or full-scale) κλίμακας, δ) με πειράματα σε φυγοκεντρική, ε) με αριθμητικές και αναλυτικές ή ημιαναλυτικές προσεγγίσεις. Είναι προφανές ότι η αξιολόγηση των πραγματικών γεγονότων αποτελεί την πιο αξιόπιστη μέθοδο για την κατανόηση της διάδοσης της σεισμικής διάρρηξης μέσω του εδάφους. Ωστόσο, τα ορθώς καταγεγραμμένα ιστορικά περιστατικά είναι περιορισμένα, οι εδαφικές συνθήκες είναι δύσκολο να προσδιοριστούν (ιδιαίτερα στα βαθύτερα στρώματα), ενώ υπάρχει πάντα πιθανότητα να προϋπάρχουν στη περιοχή ρωγμές, ζώνες διάτμησης ή ζώνες εφίπλευσης. Η διεξαγωγή πειραμάτων μικρής κλίμακας αναμφίβολα προσφέρει αρκετά πλεονεκτήματα: οι παράμετροι του προβλήματος είναι σαφώς ορισμένες και σχετικά ελεγχόμενες. Παρ' όλα αυτά, εφόσον

η συμπεριφορά του εδάφους εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις γεωστατικές τάσεις, μία ρεαλιστική προσομοίωση της κατάστασης απαιτεί τη διεξαγωγή πειραμάτων με φυγοκεντρική, γεγονός που καθιστά τη διαδικασία δαπανηρή και χρονοβόρα. Η αριθμητική προσομοίωση του προβλήματος συνδέεται με της σειρά της και αυτή με πλήθος πλεονεκτημάτων. Πολλές σειρές παραμετρικών προσομοιώσεων μπορούν να πραγματοποιηθούν σε λιγότερο χρόνο και με λιγότερο κόστος, συγκριτικά με τα πειράματα μικρής κλίμακας. Επιπλέον, τόσο οι εδαφικές παράμετροι, όσο και τα επιβαλλόμενα φορτία είναι πλήρως ελεγχόμενα και δεν τίθεται ζήτημα επαναληψιμότητας. Δεν πρέπει να αγνοηθεί το γεγονός, όμως, ότι η αριθμητική προσομοίωση εξαρτάται από το υιοθετούμενο κάθε φορά καταστατικό μοντέλο, το οποίο αναπόφευκτα οδηγεί σε ανακρίβειες. Μόνο πρόσφατα, άρχισαν οι ερευνητές να στρέφονται προς τα πειράματα μεγάλης κλίμακας, τα οποία παρ' ότι απαιτούν αρκετό χρόνο προετοιμασίας συγκριτικά με τα πειράματα μικρής κλίμακας (μόνο και μόνο λόγω διαφοράς μεγεθών), αναπαριστούν καλύτερα την πραγματικότητα, χωρίς καν να απαιτούν φυγοκεντρική

Δεδομένων των παραπάνω ,λοιπόν, ξεκίνησε η προσπάθεια πειραματικής διερεύνησης της διάδοσης της σεισμικής διάρρηξης διαμέσου του εδάφους και της αλληλεπίδρασης της με την θεμελίωση και την ανωδομή στη Συσκευή Σεισμικής Διάρρηξης του Εργαστηρίου Εδαφομηχανικής ΕΜΠ. Στα πλαίσια εκπόνησης αυτής της διπλωματικής παρουσιάζεται η «πρόβλεψη» του πειράματος με χρήση τρισδιάστατου αριθμητικού προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων, η διεξαγωγή του πειράματος και τα αποτελέσματα και τέλος η σύγκριση των πειραματικών αποτελεσμάτων με την

ανάλυση. Αποδεικνύεται ότι τα αποτελέσματα της ανάλυσης συγκρίνονται ικανοποιητικά με τα πειραματικά δεδομένα.

## **Οργάνωση**

Η διπλωματική εργασία αποτελείται από 4 κεφάλαια και το Παράρτημα. Στο πρώτο κεφάλαιο πραγματοποιείται εκτενής βιβλιογραφική ανασκόπηση πειραμάτων μικρής και μεγάλης κλίμακας, όπως και πειραμάτων σε φυγοκεντριστή σχετικών με τη διάδοση της διάρρηξης διαμέσου του εδάφους και την αλληλεπίδρασή τους με τη θεμελίωση και την ανωδομή.

Στο δεύτερο κεφάλαιο πραγματοποιείται περιγραφή και παρουσίαση του πειράματος που διεξήχθη στο Εργαστήριο Εδαφομηχανικής ΕΜΠ. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι ανάλογη δυνατότητα διεξαγωγής παρόμοιων πειραμάτων έχει μόνο το Waseda University στην Ιαπωνία. Εκεί όμως τα χρησιμοποιούμενα δοκίμια έχουν μικρότερες διαστάσεις. Στο ίδιο κεφάλαιο παρουσιάζεται και η σύγκριση του πειράματος με την προηγηθείσα αριθμητική προσομοίωση του.

Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η τρισδιάστατη αριθμητική προσομοίωση της διάδοσης της διάρρηξης στο ελεύθερο πεδίο, ενώ στο τέταρτο κεφάλαιο εξετάζεται η αλληλεπίδρασή της με άκαμπτο θεμέλιο. Η αλληλεπίδραση εξετάστηκε για διάφορες σχετικές θέσεις θεμελίου – διάρρηξης. Η παραπάνω ανάλυση αποτελεί και την «πρόβλεψη» του πειράματος.

Τέλος, στο Παράρτημα παρουσιάζεται η Συσκευή Προσομοίωσης Σεισμικής Διάρρηξης του Εργαστηρίου.

# Κεφάλαιο 1

## Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

### 1.0 Εισαγωγή

Η διάρρηξη ενός σεισμικού ρήγματος προκαλεί δύο είδη εδαφικής μετακίνησης: μόνιμη οιονεί στατική μετατόπιση στο ρήγμα, και παροδικές δυναμικές ταλαντώσεις μακριά από αυτό (Ambraseys and Jackson 1984; Jackson 2001). Η ταλάντωση είναι αποτέλεσμα κυμάτων, τα οποία δημιουργούνται διαδοχικά από κάθε σημείο του ρήγματος (κατά την εξέλιξη της ολίσθησης), και διαδίδονται σε μεγάλες αποστάσεις στη γη. Τα κύματα αυτά επηρεάζουν πάντα την επιφάνεια του εδάφους και για αυτό το λόγο είναι πρωτεύουσας σημασίας για την ασφάλεια των κατασκευών. Αντίθετα, η μόνιμη τεκτονική μετακίνηση του ρήγματος επηρεάζει την επιφάνεια του εδάφους μόνο σε μερικές περιπτώσεις-όταν η διάρρηξη φτάνει μέχρι την επιφάνεια.

Όπως είναι φυσικό, λοιπόν, η σεισμική μηχανική έδωσε έμφαση (τις τελευταίες τέσσερις δεκαετίες) στη δυναμική απόκριση του εδάφους και των κατασκευών στην εδαφική ταλάντωση. Ο τρόπος με τον οποίο επηρεάζει ένα ρήγμα στο βραχώδες υπόβαθρο το υπερκείμενο έδαφος και τις επί αυτού κατασκευές δεν είχε καταφέρει να κερδίσει το ενδιαφέρον της επιστημονικής κοινότητας. Οι 3 μεγάλοι, και πλέον πασίγνωστοι, σεισμοί στην Τουρκία και στην Ταιβάν (Kocaeli,Düzce,Chi-Chi),καθώς και οι πιο πρόσφατοι σεισμοί στην Κεντρική Αλάσκα (2002) και στην Ιαπωνία (Mid Niigata

2004) ανέδειξαν τις δραματικές επιπτώσεις και τους κινδύνους που μπορεί να επιφέρουν επιφανειακές διαρρήξεις μεγάλης κλίμακας σε ανθρώπινες ζωές, κτίρια και υποδομές.

Με την διερεύνηση του θέματος, πιο συγκεκριμένα με τη διάδοση της σεισμικής διάρρηξης στο έδαφος και στη συνέχεια με την αλληλεπίδρασή της με την ανωδομή, έχουν ασχοληθεί πολλοί ερευνητές. Η διερεύνηση του φαινομένου έγινε α) είτε με αξιολόγηση πραγματικών γεγονότων, β) με διεξαγωγή πειραμάτων μικρής κλίμακας, γ) με διεξαγωγή πειραμάτων μεγάλης ή κανονικού μεγέθους (large or full-scale) κλίμακας, δ) με πειράματα σε φυγοκεντριστή, ε) με αριθμητικές και αναλυτικές ή ημιαναλυτικές προσεγγίσεις. Είναι προφανές ότι η αξιολόγηση των πραγματικών γεγονότων αποτελεί την πιο αξιόπιστη μέθοδο για την κατανόηση της διάδοσης της σεισμικής διάρρηξης μέσω του εδάφους. Ωστόσο, τα ορθώς καταγεγραμμένα ιστορικά περιστατικά είναι περιορισμένα, οι εδαφικές συνθήκες είναι δύσκολο να προσδιοριστούν (ιδιαίτερα στα βαθύτερα στρώματα), ενώ υπάρχει πάντα πιθανότητα να προϋπάρχουν στη περιοχή ρωγμές, ζώνες διάτμησης ή ζώνες εφίπλευσης. Η διεξαγωγή πειραμάτων μικρής κλίμακας αναμφίβολα προσφέρει αρκετά πλεονεκτήματα: οι παράμετροι του προβλήματος είναι σαφώς ορισμένες και σχετικά ελεγχόμενες. Παρ' όλα αυτά, εφόσον η συμπεριφορά του εδάφους εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις γεωστατικές τάσεις, μία ρεαλιστική προσομοίωση της κατάστασης απαιτεί τη διεξαγωγή πειραμάτων με φυγοκεντριστή, γεγονός που καθιστά τη διαδικασία δαπανηρή και χρονοβόρα. Η αριθμητική προσομοίωση του προβλήματος συνδέεται με της σειρά της και αυτή με πλήθος πλεονεκτημάτων. Πολλές σειρές παραμετρικών προσομοιώσεων μπορούν να



πραγματοποιηθούν σε λιγότερο χρόνο και με λιγότερο κόστος, συγκριτικά με τα πειράματα μικρής κλίμακας. Επιπλέον, τόσο οι εδαφικές παράμετροι, όσο και τα επιβαλλόμενα φορτία είναι πλήρως ελεγχόμενα και δεν τίθεται ζήτημα επαναληψιμότητας. Δεν πρέπει να αγνοηθεί το γεγονός, όμως, ότι η αριθμητική προσομοίωση εξαρτάται από το υιοθετούμενο κάθε φορά καταστατικό μοντέλο, το οποίο αναπόφευκτα οδηγεί σε ανακρίβειες. Μόνο πρόσφατα, άρχισαν οι ερευνητές να στρέφονται προς τα πειράματα μεγάλης κλίμακας, τα οποία παρ' ότι απαιτούν αρκετό χρόνο προετοιμασίας συγκριτικά με τα πειράματα μικρής κλίμακας (μόνο και μόνο λόγω διαφοράς μεγεθών), αναπαριστούν καλύτερα την πραγματικότητα, χωρίς καν να απαιτούν φυγοκεντρική

Στο κεφάλαιο αυτό, γίνεται εκτενής βιβλιογραφική ανασκόπηση των μέχρι στιγμής σχετικών με το παραπάνω φαινόμενο πειραματικών ερευνών.

## 1.1 Πειράματα μικρής κλίμακας

Οι ερευνητές χρησιμοποιούν τα πειράματα τις τελευταίες δεκαετίες ως μέσο διερεύνησης των βασικών αρχών και μηχανισμών που εμπλέκονται στο φαινόμενο της τεκτονικής διάρρηξης και της διάδοσης της μέσα από το έδαφος. Πλήθος τέτοιων πειραμάτων παρουσιάζεται στον **Πίνακα 1**.

Ο **Sanford** (1959) ακολούθησε τη λεγόμενη sandbox method, για να προσομοιώσει τη διάδοση της σεισμικής διάρρηξης μέσω ενός υποθετικού ιζηματογενούς σχηματισμού. Το ιζηματογενές στρώμα προσομοιώθηκε με τέσσερα διαφορετικά εδαφικά υλικά: α) άμμο θαλάσσης, β) μίγμα από 85% άμμο και 15%

άργιλο, γ) χονδρόκοκκη άμμο και δ) λεπτόκοκκη άμμο. Το πάχος του εδαφικού στρώματος κυμαινόταν από 2.5 cm έως 10 cm , ενώ οι παράμετροι αντοχής εκτιμήθηκαν πειραματικά:  $c < 0.15$  kPa και  $\phi=45^\circ- 58^\circ$  . Όπως φαίνεται και στο **Σχήμα 1.1.1**, η προσομοιούμενη κατακόρυφη ανάστροφη διάρρηξη μείωνε την κλίση της κατά τη διάδοσή της προς την επιφάνεια. Η παραμόρφωση κατανέμετο όλο και πιο ομοιόμορφα, όσο η διάρρηξη πλησίαζε την επιφάνεια του κουτιού, ενώ οι οριζόντιες μετατοπίσεις αυξάνονταν (ανάλογα με τη μείωση της κλίσης). Μειώνοντας το πάχος του εδαφικού στρώματος, η κλίση της διάρρηξης που έφτανε στην επιφάνεια επίσης παρουσίαζε μείωση. Εφελκυστικές ρωγμές στην επιφάνεια παρατηρήθηκαν αμέσως μετά την επιβολή της ρηγματικής μετατόπισης και πολύ πριν την εμφάνιση της διάρρηξης στην επιφάνεια. Τα μη συνεκτικά εδάφη δεν παρουσίασαν εφελκυστικές ρωγμές, ενώ στην χονδρόκοκκη άμμο η διάρρηξη δεν βγήκε καν στην επιφάνεια.

Την ίδια μέθοδο ακολούθησε ο **Belousov** το 1961, για να προσομοιώσει τη διάδοση της διάρρηξης διαμέσω αργίλου. Η μετατόπιση επεβλήθη με χρήση εμβόλου, ενώ ο βράχος προσομοιώθηκε με υγρή άργιλο. Επεβλήθη τόσο κανονική, όσο και ανάστροφη μετατόπιση. Στο **Σχήμα 1.1.2** παρουσιάζονται 2 χαρακτηριστικά πειραματικά αποτελέσματα. Παρόλο που τα διαθέσιμα στοιχεία για τις ακριβείς ιδιότητες της χρησιμοποιηθείσης αργίλου είναι ανεπαρκή, η μελέτη του Belousov είναι η πρώτη που παρέχει κάποιες πληροφορίες για τη διάδοση κανονικής διάρρηξης διαμέσω αργίλου.

Το 1969 ήταν η σειρά του **Emmons**, κάνοντας χρήση της ίδιας πειραματικής διαδικασίας, να προσομοιώσει τη διάρρηξη λόγω ρήγματος οριζόντιας διάτμησης. Το

εδαφικό δείγμα είχε πάχος 36 cm, αλλά οι εδαφικές του ιδιότητες δεν είναι γνωστές σε ικανοποιητικό βαθμό. Αρχικά, η διατμητική ρωγμή διαδίδετο προς την επιφάνεια κατακόρυφα. Αυξάνοντας την επιβαλλόμενη μετατόπιση, η κύρια ρωγμή διακλαδιζόταν κοντά στην επιφάνεια σε περισσότερες (“flowering” effect). Η παραμόρφωση συγκεντρωνόταν κυρίως κατά μήκος των επιφανειών ολίσθησης, ενώ τα υπόλοιπα τμήματα του εδαφικού δείγματος μετατοπίζονταν πρακτικά ως στερεά σώματα. Παρά το γεγονός ότι η επιβαλλόμενη μετατόπιση ήταν μόνο οριζόντια, παρατηρήθηκαν και κατακόρυφες μετακινήσεις. Κατά συνέπεια, η επιφάνεια του εδαφικού δείγματος παρουσίαζε τοπικές καθιζήσεις και ανασηκώσεις. Όταν η επιβαλλόμενη μετατόπιση αυξήθηκε στο  $1/8$  με  $1/2$  του ύψους του δείγματος, άρχισαν να παρουσιάζονται διάφορες αποκλίσεις από την κύρια ρωγμή. Παρ’ όλα αυτά, ο Emmons επεσήμανε ότι τα αποτελέσματα πρέπει να προσεγγιστούν με επιφύλαξη, καθώς τα πειράματα ήταν μικρής κλίμακας και οι εφαρμοζόμενες γεωστατικές τάσεις απέχουν από την πραγματικότητα.

Ο **Tchalenko** (1970) συνέκρινε τη δοκιμή απευθείας διάτμησης με τη δοκιμή Riedel και με τη διάρρηξη λόγω ρήγματος οριζόντιας διάτμησης. Όπως φαίνεται στο **Σχήμα 1.1.3**, η συσκευή της απευθείας διάτμησης είναι της τάξης μεγέθους του 1 cm, η δοκιμή Riedel της τάξης των 10 cm, και η διάρρηξη λόγω ρήγματος οριζόντιας διάτμησης της τάξης του 1 m. Στο πείραμα Riedel το υψηλής πλαστιμότητας αργιλικό δείγμα έχει πάχος 1- 10 cm. Οι «διατμήσεις Riedel» (Riedel shears) είναι ποιοτικά παρόμοιες με τις διαγώνιες στην κύρια ρωγμή, en echelon ρηγματώσεις που παρατηρούνται στην πραγματικότητα. Ο Tchalenko παρατήρησε ότι οι Riedel shears

σχηματίζονται λίγο πριν το έδαφος φτάσει την κορυφαία αντοχή του. Αυξάνοντας τη διατμητική παραμόρφωση, οι Riedel shears άλλαζαν προσανατολισμό και εμφανίζονταν παράλληλα προς την κύρια ρωγμή. Αυξάνοντας περαιτέρω την εδαφική μετατόπιση, το έδαφος έφτανε στην κορυφαία αντοχή του και η παραμόρφωση συγκεντρωνόταν κατά μήκος της επιφάνειας ολίσθησης. Τέλος, ο Tchalenko παρατήρησε ότι το κριτήριο αστοχίας Mohr-coulomb περιγράφει επαρκώς την εδαφική συμπεριφορά μέχρι την κορυφαία αντοχή του. Προβλέπει Riedel διάτμηση σε μία γωνία  $45^\circ - \phi/2$  με την κύρια ρωγμή, αποτέλεσμα που συμβαδίζει με το παρατηρηθέν  $\phi=23^\circ$ .

Οι **Duncan & Lefebvre** (1973) στάθηκαν οι πρώτοι που ασχολήθηκαν με την αλληλεπίδραση επιφανειακής διάρρηξης– εδάφους– κατασκευής. Διεξήγαγαν μία σειρά πειραμάτων μικρής κλίμακας, για να διερευνήσουν το μηχανισμό αλληλεπίδρασης των ρηγμάτων οριζόντιας διάτμησης με άκαμπτα εγκιβωτισμένα θεμέλια. Η πειραματική διάταξη ήταν παρόμοια με αυτή του Riedel, μόνο που τώρα υπήρχε και ένα εγκιβωτισμένο άκαμπτο θεμέλιο. Όπως φαίνεται στο **Σχήμα 1.1.4**, η διάρρηξη παρέκκλινε καθώς πλησίαζε το θεμέλιο, αναζητώντας το «ευκολότερο» μονοπάτι προς την επιφάνεια. Οι αναπτυσσόμενες ενεργές και παθητικές ζώνες ώθησης εμφανίζονται με γωνία  $45^\circ$  σχετικά με τη διάρρηξη. Η παθητική ζώνη ήταν εύκολα αναγνωρίσιμη, λόγω του ανασηκώματος του εδάφους γύρω από το θεμέλιο, ενώ η ενεργητική λόγω των παρατηρηθεισών καθιζήσεων. Οι Duncan & Lefebvre κατέληξαν ότι αν μία κατασκευή έχει σχεδιαστεί να αντέχει αυτές τις πιέσεις δεν είναι ευάλωτη στην επιφανειακή διάρρηξη.

Οι **Friedman et al.** (1976) διεξήγαγαν αρκετά πειράματα μικρής κλίμακας, για να προσομοιώσουν τη διάδοση της ανάστροφης σεισμικής διάρρηξης μέσω αμμόλιθου και ασβεστολιθικών σχηματισμών. Για να εξαλείψουν τις ατέλειες των πειραμάτων μικρής κλίμακας, επέβαλλαν τεχνητά γεωστατικές τάσεις έως 200 MPa. Το εδαφικό δείγμα δεν ξεπερνούσε το 1 cm, και η κλίση του ανάστροφου ρήγματος κυμαινόταν από 30° έως 90°. Στο **Σχήμα 1.1.5** παρουσιάζονται οι παραμορφώσεις του δείγματος για τις διάφορες τιμές της επιβαλλόμενης μετατόπισης. Σε όλες τις περιπτώσεις, η κλίση της ρωγμής μειωνόταν, καθώς πλησίαζε στην επιφάνεια, στρεφόμενη προς το σταθερό τέμαχος. Για να «βγει» η ρωγμή στην επιφάνεια απαιτείτο επιβαλλόμενη μετατόπιση 15%-20% του ύψους του δείγματος. Για μεγαλύτερες μετατοπίσεις, εμφανιζόταν δευτερεύουσα κανονική ρωγμή στη ζώνη εφελκυσμού του κινητού τεμάχους. Επιπλέον, οι ερευνητές παρατήρησαν την ανάπτυξη εφελκυστικών μικρορωγμών κάθετα στην κύρια (μακροσκοπικά) επιφάνεια ολίσθησης. Αυτές οι μικρορωγμές σχηματίζονταν πολύ πριν την κύρια ρωγμή, υποδηλώνοντας ότι το υλικό αρχικά αστοχεί σε εφελκυσμό.

Ο **Horsfield** (1977) επίσης χρησιμοποίησε το κουτί άμμου για τη διεξαγωγή πειραμάτων κατά την προσπάθεια του να κατανοήσει την τεκτονική της Βόρειας Θάλασσας. Πεποίθηση του ήταν, ότι ο σχηματισμός, γεωμετρία και θέση των επιφανειακών ρηγμάτων συσχετιζόταν με τις μετατοπίσεις βαθύτερων ρηγμάτων. Τα θαλάσσια ιζήματα προσομοιώθηκαν με άμμο μέσης πυκνότητας ( $e = 0.67$ ). Βασιζόμενος στην εξίσωση του Hubbert, ο Horsfield κατέληξε ότι η συνοχή του πραγματικού υλικού πρέπει να πολλαπλασιαστεί με το συντελεστή κλίμακας της

πειραματικής συσκευής, δηλαδή με  $10^{-4}$  έως  $10^{-5}$ . Για αυτό το λόγο, για την προσομοίωση του βραχώδους υποβάθρου (συνοχής περί τα 5 MPa), χρησιμοποίησε εδαφικό υλικό συνοχής 0.25 MPa. Όπως φαίνεται στο **Σχήμα 1.1.6**, σε χαμηλά επίπεδα παραμόρφωσης σχηματίζονταν αρκετές αλληλοκαλυπτόμενες διαρρήξεις, οι οποίες διαδίδονταν μέσα στο έδαφος με αυξανόμενη κλίση προς την επιφάνεια. Σε μερικές περιπτώσεις εμφανίζονταν στην επιφάνεια ως φαινομενικά ανάστροφες διαρρήξεις. Σε υψηλότερα επίπεδα παραμόρφωσης η επιφάνεια ολίσθησης της διάρρηξης διακρίνεται καθαρότερα. Σε πειράματα με μικρότερες γωνίες κλίσης ( $30^{\circ}$  –  $60^{\circ}$ ) σχηματίζονταν επιπρόσθετα δευτερεύουσες ρωγμές και κατακρημνίσματα.

Οι **Walters & Thomas** (1982) προσπάθησαν με μικρής κλίμακας δοκιμές να προσομοιώσουν τη διάδοση ανάστροφης διάρρηξης διαμέσω μη συνεκτικών εδαφικών υλικών. Χρησιμοποίησαν ένα στρώμα άμμου πάχους 24 cm (ομοιόμορφα διαβαθμισμένη άμμος με κόκκους 0.3 – 0.6 mm). Αρχικά, για σχετικά μικρές επιβαλλόμενες μετατοπίσεις γινόταν εμφανής η έναρξη της διατμητικής αστοχίας, αλλά η διάρρηξη δεν έφτανε στην επιφάνεια. Αυξάνοντας τη μετατόπιση, η διάρρηξη διαδιδόταν μέχρι την επιφάνεια καμπτόμενη προς το σταθερό τέμαχος και μειώνοντας αισθητά την κλίση της. Σε μεγαλύτερα επίπεδα παραμόρφωσης δημιουργείτο μία δευτερεύουσα σχεδόν κατακόρυφη ρωγμή. Περαιτέρω αύξηση των επιβαλλομένων μετατοπίσεων οδηγούσε σε συγκέντρωση των επιπλέον παραμορφώσεων κατά μήκος του κατακόρυφου επιπέδου ολίσθησης. Ενδεικτικά αποτελέσματα παρουσιάζονται στο **Σχήμα 1.1.7**.

Οι **Cole & Lade** (1984) ασχολήθηκαν με τη διάδοση της διάρρηξης λόγω κανονικής ή ανάστροφης τεκτονικής μετατόπισης και το πλάτος της ζώνης επιρροής της σε αλλούβια υπό διαφορετικές συνοριακές συνθήκες. Οι ερευνητές πραγματοποίησαν μία εκτενή πειραματική μελέτη με δοκίμια άμμου πάχους 45 cm, στα οποία επέβαλλαν κανονική ή ανάστροφη διάρρηξη. Σύμφωνα με αυτή τη μελέτη, η ογκομετρική συμπεριφορά της άμμου συνδέεται περισσότερο με τη γωνία διαστολικότητας της απ' ό,τι με τη γωνία τριβής.

Η πειραματική συσκευή αποτελείτο από ένα κουτί με τοιχώματα από γυαλί και βάση με κινητό και σταθερό τέμαχος. Η γωνία της επιβαλλόμενης μετατόπισης πήρε τις εξής τιμές:  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $75^\circ$  και  $90^\circ$ . Για τη διερεύνηση της επιρροής της αντοχής (κορυφαία γωνία τριβής) και της ογκομετρικής παραμόρφωσης (γωνία διαστολικότητας) στο σχήμα της ρωγμής, χρησιμοποίησαν πυκνή πυριτική άμμο και ένα χαλαρό μίγμα άμμου και Styrofoam κόκκων διαμέτρου 1.0 mm (αναλογία κατ' όγκο 2 προς 1). Η πυκνή άμμος χαρακτηριζόταν από κορυφαία γωνία τριβής  $\phi = 58^\circ$  και γωνία διαστολικότητας  $\psi = 30^\circ$ . Το σχετικά μικρό μέγεθος των πειραματικών διατάξεων δεν μπορούσε να επιβάλλει μεγάλους περιορισμούς στην τάση της χαλαρής άμμου για διαστολικότητα, για αυτό και η προσθήκη Styrofoam κόκκων ήταν αναγκαία. Το μίγμα είχε κορυφαία τιμή γωνία τριβής  $\phi = 30^\circ$  και γωνία διαστολικότητας  $\psi = 0^\circ$ .

Οι Cole & Lade παρατήρησαν ότι η απαιτούμενη μετατόπιση της βάσης για πλήρη μόρφωση επιφάνειας αστοχίας κυμαινόταν από 1% έως 3% του ύψους του εδαφικού δείγματος για κανονικά ρήγματα με επιβαλλόμενη γωνία μικρότερη των  $85^\circ$ , και από 2% έως 4% του ύψους του δείγματος για ανάστροφα και μεγάλης κλίσης κανονικά

ρήγματα. Παρατήρησαν, επίσης, ότι το χαλαρό μίγμα άμμου Styrofoam απαιτούσε μεγαλύτερες επιβαλλόμενες μετατοπίσεις, για να διαδοθεί η διάρρηξη μέχρι την επιφάνεια. Το μεγάλο εύρος γωνίας διαστολικότητας και γωνίας τριβής των χρησιμοποιούμενων υλικών προσέφερε τη δυνατότητα να επαληθευτεί, εάν η παράμετρος αντοχής (γωνία τριβής  $\phi$ ) ή η παράμετρος ογκομετρικής συμπεριφοράς (γωνία διαστολικότητας  $\psi$ ) ελέγχουν το σχήμα της ρωγμής.

Οι συμβατικές αναλύσεις αντοχής ότι για προέβλεπαν ότι στα ανάστροφα ρήγματα, τα οποία μπορεί να συνδεθούν με παθητική εντατική κατάσταση, η διάρρηξη θα διαδιδόταν μέχρι την επιφάνεια με κλίση  $45^\circ - \phi/2$ . Στην περίπτωση των κανονικών ρηγμάτων, η γωνία αυτή θα ήταν  $45^\circ + \phi/2$ . Αντίθετα, οι παρατηρήσεις των Cole & Lade έδειξαν ότι οι διαρρήξεις αναδύονταν στην επιφάνεια με κλίση πλησιέστερη στις γωνίες  $45^\circ - \psi/2$  και  $45^\circ + \psi/2$  για ανάστροφα και κανονικά ρήγματα αντίστοιχα. Η διαστολικότητα επηρέασε επίσης τη θέση εμφάνισης της διάρρηξης στην επιφάνεια. Για παράδειγμα, στην περίπτωση ανάστροφων και υπό μεγάλη κλίση κανονικών ρηγμάτων, η διάρρηξη σε διαστολική άμμο συνέβαινε σε μεγαλύτερες αποστάσεις από την προβολή της αρχικά επιβαλλόμενης μετατόπισης στην επιφάνεια. Από την άλλη, για κανονικά ρήγματα, η γωνία διαστολικότητας δεν επηρέαζε σημαντικά τη θέση της διάρρηξης. Βασισμένοι στις πειραματικές παρατηρήσεις τους και άλλες θεωρητικές παραδοχές, οι Cole & Lade ανέπτυξαν ένα σύνολο μεθόδων πρόβλεψης του προσανατολισμού των ρωγμών για κανονικά και ανάστροφα ρήγματα. Μόνη απαιτούμενη παράμετρος υλικού ήταν η γωνία διαστολικότητας. Οι ερευνητές κατέληξαν ότι τα αποτελέσματά τους βρίσκουν εφαρμογή στην πραγματικότητα.



Προειδοποίησαν, ωστόσο, ότι αν το εδαφικό στρώμα είναι λεπτό και συνεκτικό, μπορεί να συμπεριφερθεί ως δοκός και να αστοχήσει λόγω εφελκυσμού. Ενδεικτικά αποτελέσματα παρουσιάζονται στο **Σχήμα 1.1.8** και στο **Σχήμα 1.1.9**.

Το 1993 ο **Bray** και οι συνεργάτες διεξήγαγαν πειράματα κανονικής και ανάστροφης διάρρηξης σε αργιλικά δοκίμια. Η επιβαλλόμενη γωνία διάρρηξης κυμαινόταν από  $60^\circ$  έως  $90^\circ$ . Τα εδαφικό υλικό ήταν μίγμα καολινίτη και μπετονίτη με γνωστά μηχανικά χαρακτηριστικά. Ο Bray παρατήρησε, ότι για ανάστροφα κατακόρυφα ρήγματα η κύρια διατμητική ρωγή διαδιδόταν δια μέσου του εδάφους καμπτόμενη προς το σταθερό τέμαχος με μειούμενη κλίση. Η κλίση αυτή κοντά στην επιφάνεια προσέγγιζε τις  $40^\circ$  (**Σχήμα 1.1.10 α**). Για κανονικά κατακόρυφα ρήγματα η διάρρηξη αύξανε την κλίση της και κοντά στην επιφάνεια η κλίση της προσέγγιζε τις  $80^\circ$  (**Σχήμα 1.1.10 b**). Για κανονικά ρήγματα κλίσης  $60^\circ$ , η κύρια ρωγή (**Σχήμα 1.1.10 η** διάρρηξη με τον αριθμό 1) διαδιδόταν στο κινούμενο τέμαχος και έφτανε στην επιφάνεια με μία γωνία κλίσης περίπου  $90^\circ$ . Στα κανονικά ρήγματα, η κύρια διάρρηξη συνοδευόταν και από άλλες ρηγματώσεις που διαδίδονταν από τη βάση προς την επιφάνεια (**Σχήμα 1.1.10 η** διάρρηξη με τον αριθμό 2), με αποτέλεσμα τη μόρφωση κατακρημνίσματος. Για ανάστροφα ρήγματα κλίσης  $60^\circ$ , η διάρρηξη κάμπτετο προς το σταθερό τέμαχος με προοδευτικά μειούμενη κλίση. Εφελκυστικές ρωγμές συνήθως σχηματίζονταν στην επιφάνεια εξαιτίας μεγάλων παραμορφώσεων, και στη βάση εξαιτίας του drag effect.

Ο Bray εκτίμησε την επιρροή της πλαστιμότητας του υλικού στην απαιτούμενη επιβαλλόμενη μετατόπιση για διάδοση της διάρρηξης μέχρι την επιφάνεια. Ξεκαθάρισε ότι όσο πιο πλαστικό το υλικό, τόσο μεγαλύτερο είναι το μέγεθος της μετατόπισης που

απαιτείται, για να φτάσει η διάρρηξη ως την επιφάνεια. Αυτό ισχύει για κανονικά και ανάστροφα ρήγματα (**Σχήμα 1.1.11**). Τυπικά, ένα στρώμα αργίλου όχι μεγάλης πλαστιμότητας (αξονική παραμόρφωση αστοχίας περίπου 5%) θα απαιτούσε επιβαλλόμενη μετατόπιση 5% του ύψους του στρώματος για διάρρηξη μέχρι την επιφάνεια, ενώ μία πλάστιμη άργιλος (αξονική παραμόρφωση αστοχίας 15%) θα απαιτούσε επιβαλλόμενη μετατόπιση της τάξης του 12% του ύψους του μοντέλου. Επιπρόσθετα, επεσήμαναν ότι το εύρος της ζώνης διάτμησης αυξάνεται με αύξηση της πλαστιμότητας. Ενδεικτικά πειραματικά αποτελέσματα παρουσιάζονται επίσης στα **Σχήματα 1.1.12, 1.1.13, 1.1.14, 1.1.15**.

Οι **Tani et al.** (1994, 1996, 1999, 2001) διεξήγαγαν πειράματα κανονικής και ανάστροφης διάρρηξης σε ξηρή Τογουρα άμμο (σχετικής πυκνότητας  $D_r = 88\%$  και ειδικού βάρους  $\gamma = 15.8 \text{ kN/m}^3$ ). Στην πρώτη σειρά πειραμάτων το ύψος του δοκιμίου ήταν 40 cm και η γωνία της αρχικής μετατόπισης κυμαινόταν από  $15^\circ$  ως  $90^\circ$ . Τα πειράματα κατέδειξαν ότι η απαραίτητη επιβαλλόμενη μετατόπιση στη βάση για τη διάδοση της διάρρηξης μέχρι την επιφάνεια μεταβαλλόταν ανάλογα με τον προσανατολισμό του ρήγματος. Αυτές οι παρατηρήσεις βρίσκονταν σε συμφωνία με τις παρατηρήσεις των Cole & Lade (1984). Τυπικά, η κανονικοποιημένη μετατόπιση βάσης για ανάστροφα και μεγάλης κλίσης κανονικά ρήγματα κυμαινόταν από 2% ως 3.5% του ύψους του δοκιμίου. Για κανονικά ρήγματα ηπιότερης κλίσης η τιμή αυτή μεταβαλλόταν από 0.5 % ως 1 % . Τα μεγέθη αυτά είναι ελαφρώς μικρότερα από τις παρατηρήσεις των Cole & Lade. Ο Tani και οι συνεργάτες του παρατήρησαν ότι η

μέγιστη απαιτούμενη μετατόπιση βάσης απαιτείτο για αρχική γωνία διάρρηξης ίση με  $60^\circ$ .

Οι ερευνητές επίσης κατέγραψαν μία χαρακτηριστική διατμητική ρωγμή για κάθε περίπτωση. Για ανάστροφα και μεγάλης κλίσης κανονικά ρήγματα, η διατμητική ρωγμή διαδιδόταν από τη βάση καμπτόμενη προς το κατερχόμενο τέμαχος με γωνία μικρότερη των  $45^\circ$ . Για ηπιότερης κλίσης κανονικά ρήγματα, η διάρρηξη αύξανε την κλίση της κατά τη διάδοση της προς την επιφάνεια και συναντούσε την επιφάνεια με κλίση μεγαλύτερη των  $45^\circ$ . Οι παρατηρήσεις αυτές βρίσκονται πάλι σε συμφωνία με προγενέστερες μελέτες (Cole&Lade, 1984 με άμμο, και Bray et al., 1990 με άργιλο). Αιτιολόγησαν επιπρόσθετα, ότι για ανάστροφα και μεγάλης κλίσης κανονικά ρήγματα γύρω από τη ζώνη διάτμησης η εντατική κατάσταση είναι παθητική, ενώ για τα ρήγματα ήπιας κλίσης κυριαρχεί η ενεργητική κατάσταση.

Στη δεύτερη σειρά πειραμάτων τους, όπου ρήγμα κλίσης  $90^\circ$  διαδιδόταν σε μοντέλα ύψους 5 – 200 cm, ο Tanii και οι συνεργάτες του παρατήρησαν, ότι το σχήμα της διάρρηξης, καθώς και η απαιτούμενη κανονικοποιημένη επιβαλλόμενη μετατόπιση βάσης για διάδοση της διάρρηξης μέχρι την επιφάνεια, επηρεάζεται από το μέγεθος του δοκιμίου. Δοκίμια με ύψος μεγαλύτερο από 40 cm απαιτούσαν μικρότερη μετατόπιση βάσης, περίπου 2 – 3 % του ύψους του δοκιμίου (**Σχήμα 1.1.16**). Μικρότερα δοκίμια απαιτούσαν έως και 7 % κανονικοποιημένη επιβαλλόμενη μετατόπιση για διάδοση της διάρρηξης μέχρι την επιφάνεια.

Το μέγεθος του δοκιμίου επηρέαζε επίσης και το εύρος της ζώνης διάτμησης. Στα μεγαλύτερα μοντέλα, η ζώνη διάτμησης, η οποία οριοθετείτο από 2 ομάδες

διατμητικών ρωγμών ( group I και group II) είχε εύρος της τάξης του 50% του ύψους του δοκιμίου. Σε μικρότερα μοντέλα, το εύρος αυτό έφτανε το 75% (**Σχήμα 1.1.16**). Για όλα τα παραπάνω μοντέλα, οι ρωγμές του group I έφταναν στην επιφάνεια για μικρότερες επιβαλλόμενες μετατοπίσεις απ' ό,τι οι ρωγμές του group II. Το μέγεθος του δοκιμίου επηρέαζε και με άλλους τρόπους τη μορφή της διάρρηξης. Για παράδειγμα, σε δοκίμια μικρότερα από 20 cm παρατηρούνταν λιγότερες ρωγμές. Επίσης, σε μεγάλα δοκίμια η μορφή της διάτμησης ήταν πιο πολύπλοκη, όπως φαίνεται και στο **Σχήμα 1.1.17**.

## 1.2 Πειράματα με φυγοκεντριστή

Όπως είναι γνωστό, τα εδάφη και ο βράχος διακρίνονται από μη γραμμικές μηχανικές ιδιότητες, οι οποίες είναι άρρηκτα συνδεδεμένες με την ενεργή τάση εγκιβωτισμού (effective confining stress) και την προϊστορία της φόρτισης τους. Ο φυγοκεντριστής εφαρμόζει αυξημένη επιτάχυνση βαρύτητας σε φυσικά προσομοιώματα, έτσι ώστε να δημιουργήσει πανομοιότυπες συνθήκες ιδίου βάρους στο προσομοίωμα με την κατάσταση στη φύση. Ο φυγοκεντριστής μπορεί να είναι χρήσιμος για προσομοίωση υπό κλίμακα σε μη γραμμικά προβλήματα μεγάλης κλίμακας, όπου η βαρύτητα παίζει καθοριστικό ρόλο.

Για καλύτερη κατανόηση της λειτουργίας του φυγοκεντριστή, παρουσιάζεται το παρακάτω παράδειγμα. Εάν ένα εδαφικό δοκίμιο πάχους 1 m υποστεί επιτάχυνση από τον φυγοκεντριστή 50 g, οι τάσεις αυξάνονται με συντελεστή 50. Έτσι, η κατακόρυφη τάση στη βάση του μοντέλου είναι ισοδύναμη με την κατακόρυφη τάση σε φυσικό

βάθος  $1.0 \text{ m} \times 50 = 50 \text{ m}$  , δηλαδή το 1 m πάχους δοκίμιο αντιστοιχεί σε φυσικό εδαφικό στρώμα πάχους 50 m.

Οι **Roth, Scott, Austin** (1981) ήταν οι πρώτοι που προσομοίωσαν τη διάδοση της διάρρηξης με χρήση φυγοκεντριστή. Η προσομοίωση αφορούσε την ανάστροφη διάδοση σεισμικής διάρρηξης διαμέσου αλλουβιακών αποθέσεων για να επιβεβαιώσουν την ισχύ του αριθμητικού τους μοντέλου. Η έρευνα τους αποτελούσε τμήμα της γεωσεισμικής διερεύνησης για το σχεδιασμό και κατασκευή ενός Liquefied Natural Gas (LNG) Terminal στην California (USA). Ο φυγοκεντριστής που χρησιμοποιήθηκε μπορούσε να αναπτύξει επιταχύνσεις μεγέθους 150 g (Dames & Moore, 1980). Ανάλογα με την επιβαλλόμενη κάθε φορά φυγόκεντρη επιτάχυνση, η επιρροή της συνοχής  $c$  και της γωνίας τριβής  $\phi$  μεταβάλλεται. Στις μεγαλύτερες επιταχύνσεις, η συμπεριφορά το εδάφους εξαρτάται κυρίως από τη γωνία τριβής, ενώ στο 1 g η συνοχή παίζει τον καθοριστικό ρόλο. Ένα εδαφικό στρώμα που αντιστοιχεί σε πραγματικό πάχος 9 m υπεβλήθη σε κατακόρυφη μετατόπιση 1.2 m. Τα πειράματα διεξήχθησαν υπό επιτάχυνση 50 g , με μόνο μία εξαίρεση (10g). Χρησιμοποιήθηκαν τρία διαφορετικά εδαφικά υλικά: α) χαλαρή άμμος ( $\gamma = 14.1 \text{ kN/m}^3$  ), β) πυκνή άμμος ( $\gamma = 17.3 \text{ kN/m}^3$  ) και γ) ιλυώδης άμμος από τη θέση κατασκευής του σταθμού ( $c = 50 \text{ kPa}$ ,  $\phi = 32^\circ$  ). Για την εκτίμηση της επίδρασης των αδρανειακών φαινομένων στη διάδοση της διάρρηξης, η μετατόπιση επεβλήθη τόσο δυναμικά (σε 0.01 sec) όσο και στατικά (σε 5 sec). Το βάρος του δείγματος στα 50g ήταν τόσο μεγάλο που η διαφορική μετατόπιση δεν μπορούσε να επιβληθεί με ανασήκωμα του κινητού τεμάχους, κι έτσι η ανάστροφη διάρρηξη πραγματοποιήθηκε κατεβάζοντας το footwall.

Χαρακτηριστικά πειραματικά αποτελέσματα παρουσιάζονται στο **Σχήμα 1.2.1**. Σε όλες τις περιπτώσεις, η διάρρηξη διαδιδόταν προς την επιφάνεια καμπτόμενη προς το σταθερό τέμαχος με μειούμενη κλίση. Η επιφάνεια ολίσθησης διακρινόταν καθαρότερα στην πυκνή άμμο απ' ότι στην χαλαρή. Η γωνία κλίσης με την οποία η διάρρηξη έβγαινε στην επιφάνεια ήταν πιο απότομη στην χαλαρή άμμο από ότι στην πυκνή, ενώ η «δυναμικά» επιβαλλόμενη μετατόπιση προκαλούσε ομαλότερες scarps και πιο απότομες κλίσεις κοντά στην επιφάνεια.. Ενώ στα 50 g η διάρρηξη καμπτόταν πολύ πριν φτάσει την επιφάνεια με έντονη μείωση της κλίσης της, στα 10 g η κατάσταση ήταν πολύ διαφορετική: ο σχηματισμός δύο διακριτών επιφανειών ολίσθησης ήταν διακριτός, η μία σχεδόν κατακόρυφη και η άλλη με πολύ μικρή κλίση. Μία τέτοια συμπεριφορά απέχει πολύ από τα περισσότερα ιστορικά περιστατικά, αλλά έρχεται σε συμφωνία με το σεισμό της Alaska, όπως και με τη θεωρία των Prucha, Graham & Nickelsen.

Ο Stone (1988) ασχολήθηκε με την απόκριση δοκιμών άμμου και αργίλου σε κανονική διάρρηξη. Οι περισσότερες δοκιμές διεξήχθησαν με γεωτεχνικό φυγοκεντρική, με μέγιστη αναπτυσσόμενη επιτάχυνση 100g, για να επιτευχθεί προσομοίωση ομοιόμορφου στρώματος άμμου ή αργίλου πάχους 40 m. Μία άλλη σειρά πειραμάτων πραγματοποιήθηκε με μοντέλα άμμου υπό 1g. Σε μερικά αργιλικά δοκίμια (με ποσοστό υγρασίας πριν την στερεοποίηση 120 %) το κεντρικό τμήμα στη βάση του τοποθετήθηκε πιο χαμηλά, έτσι ώστε να προσομοιωθεί υπόβαθρο με κλίση. Τα περισσότερα δοκίμια στερεοποιήθηκαν κανονικά σε όλο τους το ύψος,, ενώ σε μία δοκιμή το άνω 1/3 του δοκιμίου υπερστερεοποιήθηκε. Ο Stone ανέλυσε τις

μετατοπίσεις και τις διαρρήξεις με ραδιογραφική τεχνική. Γενικά, η μορφή της ρωγμής (**Σχήμα 1.2.2**) δεν μπορούσε να συγκριθεί με αυτές που είχαν παρατηρηθεί σε προγενέστερες έρευνες (πχ. Parker & McDowell, 1955; Walters & Thomas, 1982). Οι ερευνητές αυτοί είχαν καταλήξει ότι η διάρρηξη κάμπτεται προς το τέμαχος που βρίσκεται στην χαμηλότερη θέση, όχι προς αυτό που βρίσκεται ψηλότερα, όπως παρατήρησε ο Stone. Ο κυριότερος λόγος για αυτό, ήταν, ότι οι συνοριακές συνθήκες που επέβαλλε ο Stone στα δοκίμια του διέφεραν από αυτές προηγούμενων μελετών.

Στις δοκιμές του Stone υπό επιτάχυνση 30 g , η κατανομή της μετατόπισης της βάσης δεν παρουσίαζε ασυνέχειες, καταλήγοντας έτσι σε πιο σταδιακή μεταφορά της μετατόπισης στην άργιλο. Για αυτό, οι κινηματικές συνοριακές συνθήκες σε αυτές τις δοκιμές είναι συγκρίσιμες με το πρόβλημα της καθίζησης λόγω διάνοιξης σήραγγας ορυχείου. Επιπρόσθετα, η τελική διάρρηξη πιθανόν να έμοιαζε περισσότερο με αυτές των προηγούμενων μελετών, εάν η επιβαλλόμενη μετατόπιση ήταν μεγαλύτερη. Η μορφή της διάρρηξης παρουσίασε και άλλες ανωμαλίες. Η πιο εντυπωσιακή αναφέρεται στην εκκίνηση των ρωγμών από την επιφάνεια, αντίθετα από τις προγενέστερες παρατηρήσεις. Επιπλέον, μία άλλη ομάδα ρωγμών που ξεκινούσε από την επιφάνεια διαδιδόταν σχεδόν παράλληλα σε αυτή (**Σχήμα 1.2.2 c,d**). Ο Stone καταλόγισε αυτές τις ρωγμές στην χαμηλή αντοχή των ανώτερων στρώσεων του μοντέλου πριν την στερεοποίηση. Τελικά, η προπαρασκευή των αργλικών δοκιμίων αποδείχτηκε ανεπαρκής.

Ο Stone πραγματοποίησε επίσης δοκιμές με φυγόκεντρη επιτάχυνση 100 g σε δοκίμια ξηρής άμμου με 3 διαφορετικές διαμέτρους κόκκων. Τα δοκίμια υπεβλήθησαν

σε μετατόπιση κεκλιμένης βάσης και σε κανονική κατακόρυφη διάρρηξη. Το υλικό που χρησιμοποιήθηκε ήταν Leighton Buzzard άμμος με διαμέτρους  $D_{50} = 0.4, 0.85, 1.50$  mm και δείκτη πόρων που κυμαινόταν από 1.0 έως 0.45. Σε όλες τις δοκιμές η άμμος ήταν είτε πυκνή είτε πολύ πυκνή, με αρχικό δείκτη πόρων από 0.49 έως 0.56 ( $D_r = 80$  έως 93 %). Στις δοκιμές υπό 1 g, η άμμος παρουσίαζε μέγιστη ενεργή γωνία τριβής από  $44^\circ$  έως  $57^\circ$  και γωνίες κρίσιμης κατάστασης από  $30^\circ$  έως  $37^\circ$ . Η μετρηθείσα γωνία διαστολικότητας κυμαινόταν από  $13^\circ$  έως  $20^\circ$ .

Η μορφή της διάρρηξης στις δοκιμές άμμου είναι συγκρίσιμη με τις διαρρήξεις προηγούμενων μελετών (**Σχήμα 1.2.3**). Εξέχον χαρακτηριστικό είναι η κάμψη της διάρρηξης προς το πιο χαμηλό τέμαχος με μειούμενη κλίση (**Σχήμα 1.2.3, a**). Η θέση της διάρρηξης, η οποία αποτυπώνεται με τη μορφή ισοστασικών καμπυλών της μέγιστης διατμητικής τάσης στο **Σχήμα 1.2.3(d)**, είναι σε συμφωνία με την αντίστοιχη διάρρηξη του **Σχήματος 1.2.3 c**. Δεν αναφέρεται πουθενά η απαιτούμενη μετατόπιση της βάσης για διάδοση της διάρρηξης μέχρι την επιφάνεια.

Όπως ήδη προαναφέρθηκε, για καλύτερη κατανόηση του πεδίου των μετατοπίσεων και παραμορφώσεων ο Stone υπέβαλλε δοκίμια άμμου σε κατακόρυφη κανονική διάρρηξη. Τα δοκίμια, τα οποία περιείχαν και κόκκους μολύβδου αναλύθηκαν με ραδιογραφικές τεχνικές μετά τη διάνοιξη του ρήγματος. Το παραπάνω πείραμα, που πραγματοποιήθηκε υπό επιτάχυνση 1 g, χρησιμοποιήθηκε για σύγκριση με το πείραμα υπό 100 g. Οι μορφές των ρωγμών υπό 1 και υπό 100g ήταν παρόμοια. Αυτή η παρατήρηση υποδηλώνει ότι το επίπεδο εγκιβωτισμού ίσως να μην αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για το σχήμα της ρωγμής.



Η αυξανόμενη επιβαλλόμενη μετατόπιση των συνόρων συσσωρευόταν κατά μήκος ζωνών διάτμησης, ενώ ο ρυθμός παραμόρφωσης στο υπόλοιπο δοκίμιο προοδευτικά μειωνόταν. Ο Stone αναγνώρισε ότι η διαστολικότητα των άμμων επηρέαζε τη μόρφωση τέτοιων ζωνών διάτμησης, και κατά συνέπεια έπαιζε σημαντικό ρόλο στη συνολική κινηματική των δοκιμίων. Οι ζώνες διάτμησης διαστέλλονταν πιο γρήγορα από ότι το περιβάλλον υλικό (πυκνή άμμος) και έφταναν πρώτες στην κρίσιμη κατάσταση. Ο Stone τόνισε ότι αυτή η συγκέντρωση των παραμορφώσεων επέβαλε εσωτερικούς κινηματικούς περιορισμούς, οι οποίοι με τη σειρά τους επηρέαζαν όλο το σύστημα. Για παράδειγμα, καθώς η γωνία διαστολικότητας πέφτει στο 0 κατά μήκος της περιοχής συγκέντρωσης των παραμορφώσεων, η προϋπάρχουσα διεύθυνση της ολίσθησης μπορεί πλέον να μην μπορεί να ακολουθηθεί. Κατά συνέπεια, δημιουργούνται νέες περιοχές συγκέντρωσης παραμορφώσεων. Παρ' όλο που το σχήμα της διάρρηξης στα δύο διαφορετικά επίπεδα επιτάχυνσης ήταν κατά κάποιο τρόπο συγκρίσιμο, ο αριθμός των ρωγμών στο πείραμα του 1 g οι παρατηρηθείσες ρωγμές ήταν σαφώς περισσότερες. Αυτήν η παρατήρηση οδηγεί στο συμπέρασμα, ότι η ογκομετρική συμπεριφορά της άμμου, η οποία επηρεάζεται από την σχετική πυκνότητα και τις συνθήκες εγκιβωτισμού, παίζει ρόλο στον αριθμό των ρωγμών.

Ο Stone επίσης παρατήρησε ότι ο λόγος (επιβαλλόμενη μετατόπιση/μέγεθος κόκκου) καθορίζει το σχήμα της ρωγμής. Το πάχος των ζωνών διάτμησης, το οποίο τελικά διαμορφώνει το σχήμα της διάρρηξης, είναι ανάλογο του μεγέθους κόκκου. Για ομοιόμορφη άμμο, ο λόγος του πάχους της ζώνης διάτμησης προς το μέγεθος κόκκου κυμαίνεται από 10 έως 20 (Roscoe, 1970; Mulhaus & Vardoulakis, 1987; Vermeer,

1990). Επιπλέον, αυτός ο λόγος αποτελεί καθοριστικό συντελεστή κλίμακας για το πρόβλημα. Στην περίπτωση δοκιμίων με σταθερό ύψος, συγκρίσιμες μορφές διάρρηξης μπορούν να επιτευχθούν όταν το μέσο μέγεθος κόκκου και το μέγεθος του δοκιμίου επιλέγονται με τον ίδιο γεωμετρικό συντελεστή.

Το **Σχήμα 1.2.4** αναδεικνύει το παραπάνω φαινόμενο κλίμακας της επιβαλλόμενης μετατόπισης προς το μέγεθος κόκκου και παρουσιάζει τα διαφορετικά στάδια μόρφωσης της διάρρηξης για διαφορετικά μεγέθη κόκκων. Σύμφωνα με τον Stone, η διάρρηξη σε διαφορετικά υλικά θα έχει το ίδιο σχήμα, εφόσον ο λόγος της επιβαλλόμενης μετατόπισης προς το μέγεθος κόκκου του υλικού είναι ίδιος.

Ο Lee (2005) προχώρησε στη διεξαγωγή πειραμάτων, για τη διερεύνηση της διάδοσης της ανάστροφης διάρρηξης διαμέσω αμμώδους στρώματος. Τα πειράματα διεξήχθησαν στον φυγοκεντριστή της σύμπραξης Obayashi, έναν από τους μεγαλύτερους στον κόσμο. Καθώς ένας από τους στόχους ήταν η διερεύνηση της επιρροής της τάσης εγκιβωτισμού στο σχήμα της διάρρηξης λόγω ανάστροφης τεκτονικής μετατόπισης, διεξήχθησαν μόνο πειράματα με αρχική γωνία επιβαλλόμενης μετατόπισης  $45^\circ$ . Συνδυάζοντας διαφορετικές τιμές φυγόκεντρης επιτάχυνσης (G) και φυσικού ύψους μοντέλου (H) παρήχθη ποικιλία πάχους αμμωδών στρωμάτων από 400 cm έως 900 cm. Οι δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν παρουσιάζονται συνοπτικά στον

**Πίνακα 2.**

**Πίνακας 2: Πειραματικές δοκιμές**

Γωνία επιβαλλόμενης μετατόπισης ( deg)	H μοντέλου (cm)	σχετική πυκνότητα Dr (%)	Φυγόκεντρη επιτάχυνση (g)	H στο πρωτότυπο (cm)	Παρατηρήσεις
45	20	80	20	400	–
45	30	80	20	600	–
45	30	80	30	900	–
45	15	70	50	750	–
45	20	80	30	600	με αγωγό
45	25	80	30	750	με αγωγό

Ο Lee παρατήρησε, ότι ,όσον αφορά τη θέση της εμφάνισης της διάρρηξης στην επιφάνεια σχετικά με την αρχική θέση διάνοιξης της, W, ο δείκτης  $W / H$  ( όπου H το ύψος του δοκιμίου) σε όλες τις δοκιμές παρουσίαζε μία ομοιογένεια. Αυτό υποδηλώνει ότι η θέση εμφάνισης της διάρρηξης στην επιφάνεια είναι ανεξάρτητη του πάχους του στρώματος. Η ελάχιστη απαιτούμενη επιβαλλόμενη μετατόπιση για διάδοση της διάρρηξης μέχρι την επιφάνεια, ομοίως, φαίνεται ότι δεν επηρεάζεται από το πάχος του δοκιμίου. Ωστόσο, εδάφη χαμηλής πλαστιμότητας απαιτούσαν μεγαλύτερη μετατόπιση για πλήρη διάδοση της διάρρηξης.

Ο Lee προχώρησε και σε συγκρίσεις με εκτελεσθέντα πειράματα υπό επιτάχυνση  $1\text{ g}$ . Από τις συγκρίσεις αυτές συμπέρανε ότι η τάση εγκιβωτισμού ενός αμμώδους στρώματος μπορεί να επηρεάσει το σχήμα της διάρρηξης.

### 1.3 Πειράματα μεγάλης κλίμακας

Ο Lee (2005) διεξήγαγε δοκιμές μεγάλης κλίμακας, με στόχο να διερευνήσει την απόκριση αμμωδών στρωμάτων σε κανονικά και ανάστροφα ρήγματα με διαφορετικές αρχικές γωνίες διάρρηξης, την επίδραση της πλαστιμότητας (σχετική πυκνότητα της αμμώδους στρώσης) στην κινηματική απόκριση, τη μορφή της διάρρηξης και το σημείο εμφάνισης της στην επιφάνεια σχετικά με το μέγεθος του δοκιμίου και την παραμόρφωση της επιφάνειας του εδάφους στην γειτονία της διάρρηξης.

Για τη διεξαγωγή των πειραμάτων χρησιμοποιήθηκαν δύο συσκευές. Η συσκευή I, διαστάσεων  $2.0\text{ m} \times 0.5\text{ m} \times 1.0\text{ m}$ , αποτελείται από δύο ίσα τμήματα: ένα σταθερό τμήμα και ένα κινητό, το οποίο επιβάλλει την κανονική ή ανάστροφη διάρρηξη υπό  $30^\circ$  ή  $45^\circ$ . Η συσκευή II αποτελεί βελτιωμένη έκδοση της I και έχει διαστάσεις  $3.0\text{ m} \times 1.0\text{ m} \times 1.0\text{ m}$ . Τα  $2/3$  του κουτιού είναι σταθερά, ενώ το  $1/3$  κινείται προς τα πάνω ή προς τα κάτω, επιβάλλοντας διάρρηξη υπό  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$ . Ο ερευνητής παρατήρησε ότι αλλαγή της επιβαλλόμενης γωνίας διάρρηξης επηρεάζει καθοριστικά τη θέση εμφάνισης της διάρρηξης στην επιφάνεια. Επίσης, τονίζει ότι η θέση εμφάνισης της διάρρηξης στην επιφάνεια πιθανόν να επηρεάζεται και από το πάχος του δοκιμίου. Αυτό ίσως οφείλεται στην έντονη μεταβολή όγκου της διαρρηγνυόμενης αμμώδους στρώσης και για επαλήθευση του συνίσταται η ανάγκη διεξαγωγής

πειραμάτων υπό μεγάλη τάση εγκιβωτισμού. Επιπλέον, από την εξέταση των διαμορφωμένων κατακρημνισμάτων και καμπυλοτήτων στην επιφάνεια, προκύπτει ότι η διατάραξη της επιφάνειας σχετίζεται περισσότερο με την αρχική γωνία επιβολής της διάρρηξης και την πλαστιμότητα του εδάφους παρά με το πάχος του δοκιμίου.

Οι **Johansson & Konagai** (2003, 2006, 2007) ,έχοντας ως στόχο την εκτίμηση των πιθανών παραμορφώσεων λόγω τεκτονικής μετατόπισης αμμώδους στρώματος λαμβάνοντας υπόψη πιέσεις πόρων, διεξήγαγαν μία σειρά πειραμάτων. Η πειραματική διάταξη αποτελείτο από ένα τετράγωνο κουτί πλάτους 1.2 m και βάθους 0.6 m , με ένα έμβολο στο κέντρο, το οποίο επιτρέπει μόνο αξονοσυμμετρική διάρρηξη ρήγματος, αλλά είναι εύκολο στην κατασκευή και αποφεύγονται παρασιτικές επιδράσεις συνόρων (**Σχήμα 1.2.5, Σχήμα 1.2.6**). Το δοκίμιο είχε πάχος 40 cm και χρησιμοποιήθηκε Τογουρα άμμος μέσης διαμέτρου 0.2 mm. Η δημιουργηθείσα εδαφική στρώση ήταν υψηλής πυκνότητας, γωνίας τριβής 30<sup>ο</sup> και στα κορεσμένα δοκίμια ο βαθμός κορεσμού προσέγγιζε περίπου το 80 % . Οι ερευνητές παρατήρησαν ότι απαιτείται 5 φορές μεγαλύτερη δύναμη για να προκληθεί η διάρρηξη σε κορεσμένο έδαφος από ότι σε ξηρό, ενώ το εύρος επιρροής της διάρρηξης σε υγρή άμμο είναι αισθητά μεγαλύτερο (**Σχήμα 1.2.7**). Επίσης, οι παραμορφώσεις αρχίζουν να παρουσιάζουν συσσώρευση σε συγκεκριμένη περιοχή για μεγαλύτερη μετατόπιση του εμβόλου στα κορεσμένα δοκίμια, γεγονός που υποδηλώνει ότι η ζώνη επιρροής της διάρρηξης είναι ευρύτερη όταν υπάρχει παρουσία νερού. Αυτό συμβαίνει διότι η παρουσία νερού περιορίζει την οριζόντια συμπίεση με αποτέλεσμα μεγαλύτερες διατμητικές παραμορφώσεις.

Στο εργαστήριο σεισμικής προσομοίωσης του Nevada University, χρησιμοποιείται αφρός πολυουρεθάνης για τη μελέτη προβλημάτων σχετικά με σεισμό, όπως ο μηχανισμός σεισμικής διάρρηξης ρήγματος και αλληλεπίδραση εδάφους - κατασκευής (Σχήμα 1.2.8). Τα φυσικά προσομοιώματα κλίμακας της τεκτονικής μετατόπισης υπακούουν σε στατικούς και δυναμικούς νόμους. Ο αφρός είναι πολύ εύκαμπτος, επιτρέποντας έτσι μεγάλες παραμορφώσεις. Λόγω του μικρού βάρους του μπορούν να κατασκευαστούν πολύ μεγάλα μοντέλα.

Μέχρι στιγμής, η μέθοδος έχει εφαρμοστεί για διερεύνηση του μηχανισμού της ολίσθησης των διεπιφανειών κατά τη δημιουργία του ρήγματος στο βραχώδες υπόβαθρο και για τη διερεύνηση της ενίσχυσης των σεισμικών κυμάτων κατά τη διάδοσή τους στο έδαφος.

Η απόκριση ενός αγωγού ή καλύτερα ενός γωνιακού τεμάχους αγωγού σε επιβαλλόμενη τεκτονική μετατόπιση και φαινόμενα συμπίεσης από το περιβάλλον έδαφος είναι ένα σύνθετο πρόβλημα αλληλεπίδρασης. Για τη διεξοδική και αξιόπιστη επίλυση του προβλήματος είναι απαραίτητες εργαστηριακές δοκιμές, για την παρακολούθηση της τρισδιάστατης απόκρισής του σε αξονική και καμπτική καταπόνηση, ένα αναλυτικό μοντέλο που να συνδυάζει αυτή την απόκριση με την αλληλεπίδραση του αγωγού με το έδαφος, καθώς και πειράματα full- scale για βαθμονόμηση και επαλήθευση του αναλυτικού μοντέλου.

Για την επίτευξη των παραπάνω στόχων συστήθηκε μία διεθνής ομάδα με κύριους συμμετέχοντες τους: Tokyo Gas Company, Cornell University και Waseda University. Στην έρευνα επίσης συμμετείχαν το πανεπιστήμιο του Cambridge, το

Rensselaer Polytechnic Institute και το University of Southern California. Η έρευνα έγινε στα πλαίσια του προγράμματος I του MCEER ( Seismic retrofit and Rehabilitation of lifelines) και του προγράμματος NSF για την αμερικανοϊαπωνική έρευνα στο Urban Earthquake Disaster mitigation.

Στο **Σχήμα 1.2.9** παρουσιάζεται ένας αγωγός με γωνιακό υπό επιβαλλόμενη μετατόπιση. Στο **Σχήμα 1.2.9 β** παρουσιάζεται το σκεπτικό ενός πειράματος μεγάλης κλίμακας. Ένας χαλύβδινος αγωγός τοποθετείται εσωτερικά του εδάφους και μετά του επιβάλλεται μετατόπιση. Η αλληλεπίδραση εδάφους – αγωγού χαρακτηρίζεται από καμπύλες  $p - \gamma$  και  $t - z$ , οι οποίες συνδέουν τις εδαφικές τάσεις που ασκούνται στον σωλήνα με τις σχετικές μεταξύ τους μετατοπίσεις. Η εγκάρσια αλληλεπίδραση εδάφους – αγωγού διερευνήθηκε πειραματικά στο Cornell university (Trautmann & O'Rourke, 1985) και στις εγκαταστάσεις της Tokyo Gas Company. Η μελέτη αλληλεπίδρασης εδάφους – αγωγού υπό καμπτική καταπόνηση διεξήχθη από την Tokyo Gas Company (Yoshizaki et al., 1999 and 2001) με full-scale πειράματα σε χαλύβδινους αγωγούς. Στο **Σχήμα 1.2.10** παρουσιάζεται η κάτοψη της πειραματικής συσκευής. Στο **Σχήμα 1.2.11** παρουσιάζεται η επιφάνεια του εδάφους πριν και μετά τη δοκιμή.

Ένα από τα πιο σημαντικά ζητήματα στο οποίο προσπάθησε να δώσει απάντηση η έρευνα, ήταν η επίδραση του βαθμού κορεσμού στις πιέσεις που αναπτύσσονται κατά την αλληλεπίδραση εδάφους –αγωγού υπό επιβαλλόμενη μετατόπιση. Τα πειράματα μεγάλης κλίμακας που διεξήχθησαν έδειξαν ότι οι επιφάνειες αστοχίας όπως και η παραμόρφωση του εδάφους δίπλα στον αγωγό είναι πολύ διαφορετικά για ξηρό και κορεσμένο ή μερικώς κορεσμένο έδαφος.

## 1.4 Σύνοψη

Με την παραπάνω ανασκόπηση καταγράφηκαν οι πιο σημαντικές πλευρές του προβλήματος, δηλαδή της διάδοσης της διάρρηξης λόγω τεκτονικής μετατόπισης στο έδαφος και στην περίπτωση των πειραμάτων με αγωγούς την αλληλεπίδρασή της με αυτούς. Οι κινηματικές συνθήκες, δηλαδή η γεωμετρία του προσομοιωμένου και οι επιβαλλόμενες συνοριακές συνθήκες, φαίνεται ότι παίζουν καθοριστικό ρόλο στην απόκριση του συστήματος.

Ειδικότερα, οι Cole & Lade έδωσαν έμφαση στο ρόλο της διαστολικότητας για τον προσδιορισμό της θέσης εμφάνισης της διάρρηξης στην επιφάνεια αμμώδους στρώσης. Οι Ueta και Tani προσπάθησαν να εμβαθύνουν στις κινηματικές συνθήκες του προβλήματος και να εξηγήσουν την επιρροή του μεγέθους του κόκκου στη μορφή της διάρρηξης. Οι Konagai, Johansson, O'Rourke τόνισαν τη σημασία της ύπαρξης νερού στο έδαφος και την επίδραση του στη μορφή της διάρρηξης, ενώ τα ερευνητικά προγράμματα που βρίσκονται σε εξέλιξη έχουν ήδη αποδείξει ότι υποδομές όπως αγωγοί, μπορούν να αντιμετωπίσουν επιβαλλόμενες τεκτονικές μετατοπίσεις.

Παρ' όλα αυτά, τα φυσικά αυτά προσομοιώματα γενικά επηρεάζονται από τη γεωμετρία της συσκευής, ενώ τα δοκίμια άμμου υπό 1 g δεν μπορούν να προσομοιώσουν σε κάθε περίπτωση τις γεωστατικές τάσεις που επικρατούν στη φύση.



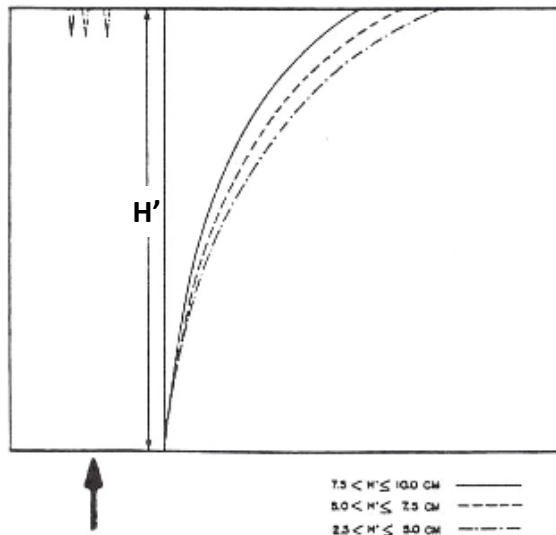
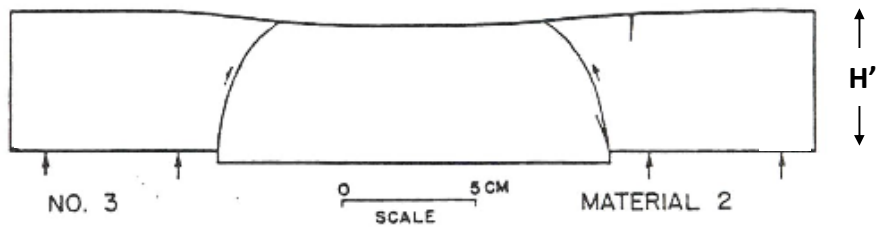
**Πίνακας 1.** Σύνοψη βιβλιογραφίας πειραμάτων μικρής κλίμακας

No	Συγγραφέας	Έτος	προσανατολισμός ρήγματος	Υλικό μοντέλου	Ύψος Μοντέλου (cm)	Παρατηρήσεις
1	Parker and McDowell	1955	60ο uplift	Asphalt Sand Barium Sulphate	6 15	Πρώτα πειράματα για προσομοίωση του φαινομένου του θόλου κατά την σεισμική διάρρηξη. Επιπτώσεις τεκτονικής μετατόπισης σε μαλακό στρώμα
2	Sanford	1959	uplift	sand clay	11	Ρηγμάτωση εξαιτίας υποκείμενης πτύχωσης (ανασήκωμα). Το αναπτυσσόμενο πεδίο τάσεων πάνω από το βραχώδες υπόβαθρο που ανασηκώνεται, προκαλεί κανονικά ρήγματα.
3	Gzovsky	1959	uplift and downthrown	gelatin	N/A	Μελέτη του φαινομένου της αναδίπλωσης. Κατανομή κύριων και διατμητικών τάσεων γύρω από τη μετατοπιζόμενη περιοχή του υποβάθρου.
4	Belousov	1961	uplift and downthrown	clay syrup	N/A	Παραμόρφωση υποβάθρου αργιλικού προσομοιώματος. Προσανατολισμός διάρρηξης διαφορετικός από αυτόν που παρατηρείται σε άλλες μελέτες ανάστροφων ρηγμάτων
5	Emmons	1969		sand	36	Προσομοίωση ρηγμάτων οριζόντιας διάτμησης. Διακλάδωση της ρωγμής με αύξηση της επιβαλλόμενης μετατόπισης κοντά στην επιφάνεια, σχηματισμός ζωνών διάτμησης.

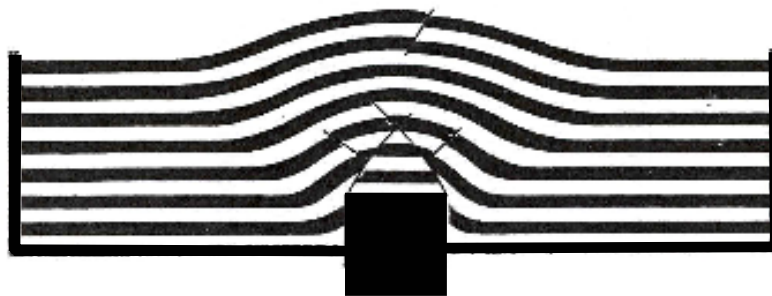
6	Tchalenko	1970				Σύγκριση των πειραμάτων απευθείας διάτμησης και διάτμησης Riedel με το ρήγμα οριζόντιας διάτμησης
7	duncan & Lefebvre	1973				Αλληλεπίδραση ρήγματος οριζόντιας διάτμησης με άκαμπτες κατασκευές
8	Friedman et al.	1976	30o-90o	limestone sandstone rocksalt	1	Βράχος υπό υψηλές τάσεις εγκιβωτισμού. Η μικροσκοπική μελέτη αποκάλυψε εκτός από μακροδιατμησεις και μικρορωγμές. Η διάρρηξη κάμπτεται προς το κατερχόμενο τέμαχος
9	Horsfield	1977	30o-90o downthrown	sand	18	Σε πρώτη φάση έχουμε μικρομετατοπίσεις σε ένα επίπεδο ρήγματος. Επειτα, σχηματίζονται περισσότερα επίπεδα ρήγματος. Η τελική ρωγμή άλλαξε κλίση σε σχέση με την γωνία της αρχικά επιβαλλόμενης διάρρηξης
10	Walter & Thomas	1982	uplift	sand	20	Παρόμοια πειραματική διάταξη με τον Horsfield (1977). Η διάρρηξη κατά τη διάδοσή της κάμπτεται προς το σταθερό τέμαχος. Εμφάνιση περισσότερων επιπέδων αστοχίας κατά την αύξηση της επιβαλλόμενης μετατόπισης.
11	Cole and Lade Lade et al. Lade and Cole	1984 1984 1984	30o -90o	sand mixture of sand and styrofoam	45-56	Μελέτη του προσανατολισμού διάδοσης της διάρρηξης. Η γωνία διάρρηξης κοντά στην επιφάνεια είναι συνάρτηση της αρχικής γωνίας επιβολής της διάρρηξης και της γωνίας διαστολικότητας του υλικού του προσομοιώματος.

12	Bray Bray et al	1989 1993	60o-90o	clay	16-27	Διάδοση της διάρρηξης και κινηματική σε αργλικά δοκίμια. Αλλαγή γωνίας διάρρηξης κατά τη διάρρηξη. Εκτίμηση της επίδρασης της πλαστιμότητας στην απαιτούμενη επιβαλλόμενη μετατόπιση για διάδοση της διάρρηξης μέχρι την επιφάνεια.
13	Ueta et al. Tani et al.	1994 1996	15o-90o	sand sand	40 5-200	Επαλήθευση της επιρροής του μεγέθους του προσομοιώματος στην απαραίτητη επιβαλλόμενη μετατόπιση για διάδοση της διάρρηξης μέχρι την επιφάνεια. Εκτίμηση της επίδρασης του μεγέθους το κόκκου στο σχήμα της διάρρηξης. Πειράματα με δοκίμια διάφορων μεγεθών. Καθορισμένες ακολουθίες και εντοπισμός της διάρρηξης.
14	Taniyama and Watanabe	2002	45o	sand	20	Απαιτούμενη μετατόπιση βάσης για διάδοση της διάρρηξης μέχρι την επιφάνεια 4 - 5% του συθολικού ύψους του δοκιμίου.
16	Lee	2005	30o-60o	sand	10_60	Μεταβολή όγκου αμμώδους δοκιμίου υπο διατμητική ρωγμή ανάλογα με την πίεση εγκιβωτισμού. Εκτίμηση της επίδρασης της διαστολικότητας στην απαιτούμενη επιβαλλόμενη μετατόπιση για διάδοση της διάρρηξης μέχρι την επιφάνεια.. Πειράματα με προσομοιώματα διάφορων μεγεθών.





Σχήμα 1.1.1 Πειραματικά αποτελέσματα του Sanford [1959].

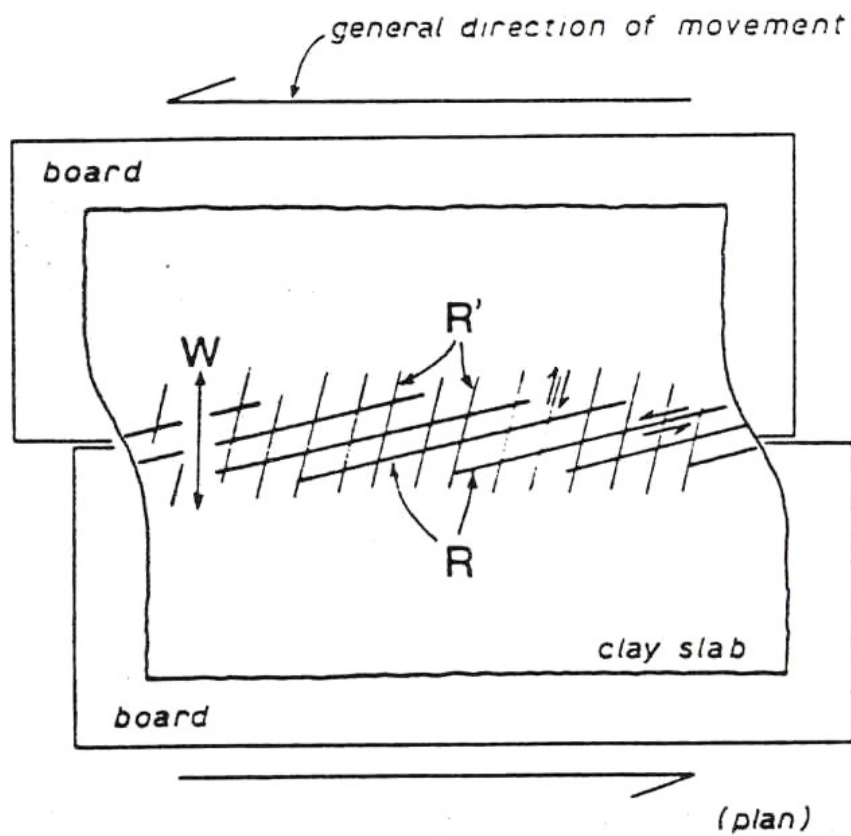
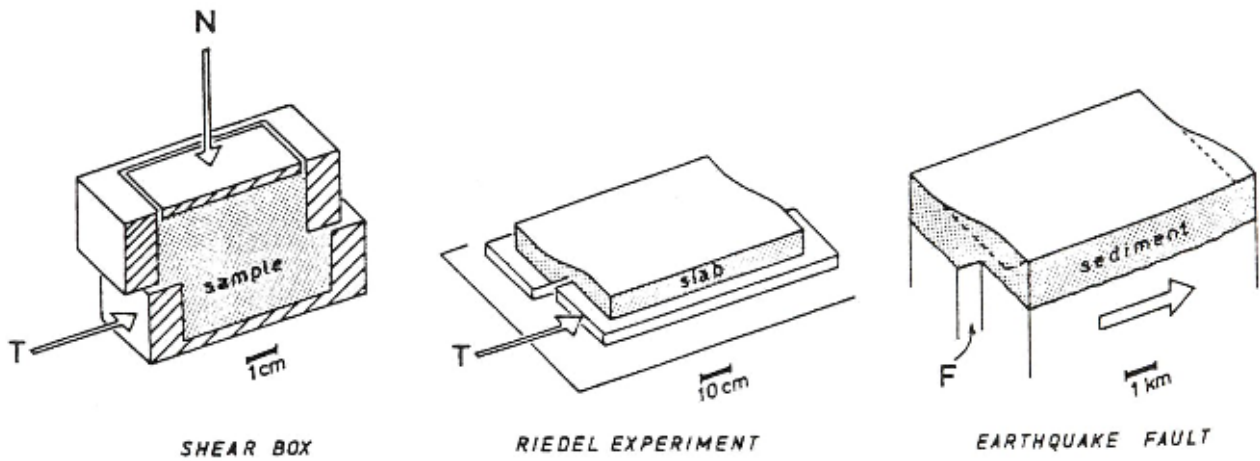


(a) Ανάστροφη διάρρηξη



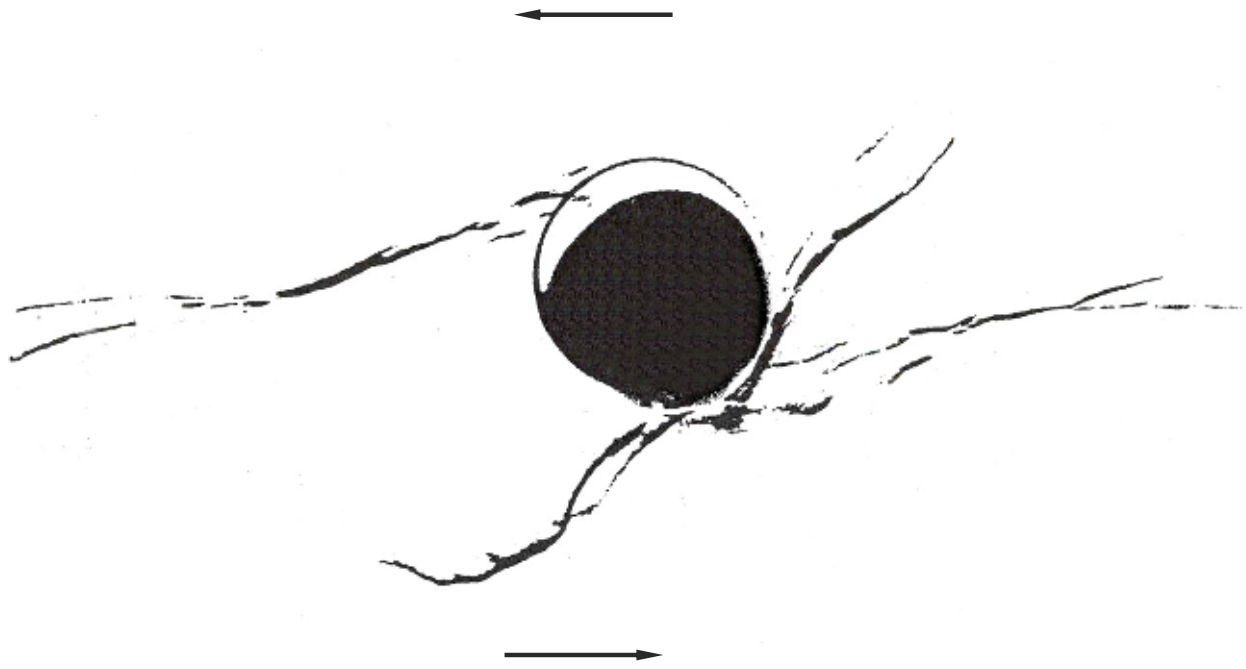
(b) Κανονική διάρρηξη

Σχήμα 1.1.2 Πειραματικά αποτελέσματα του Belousov [1961].

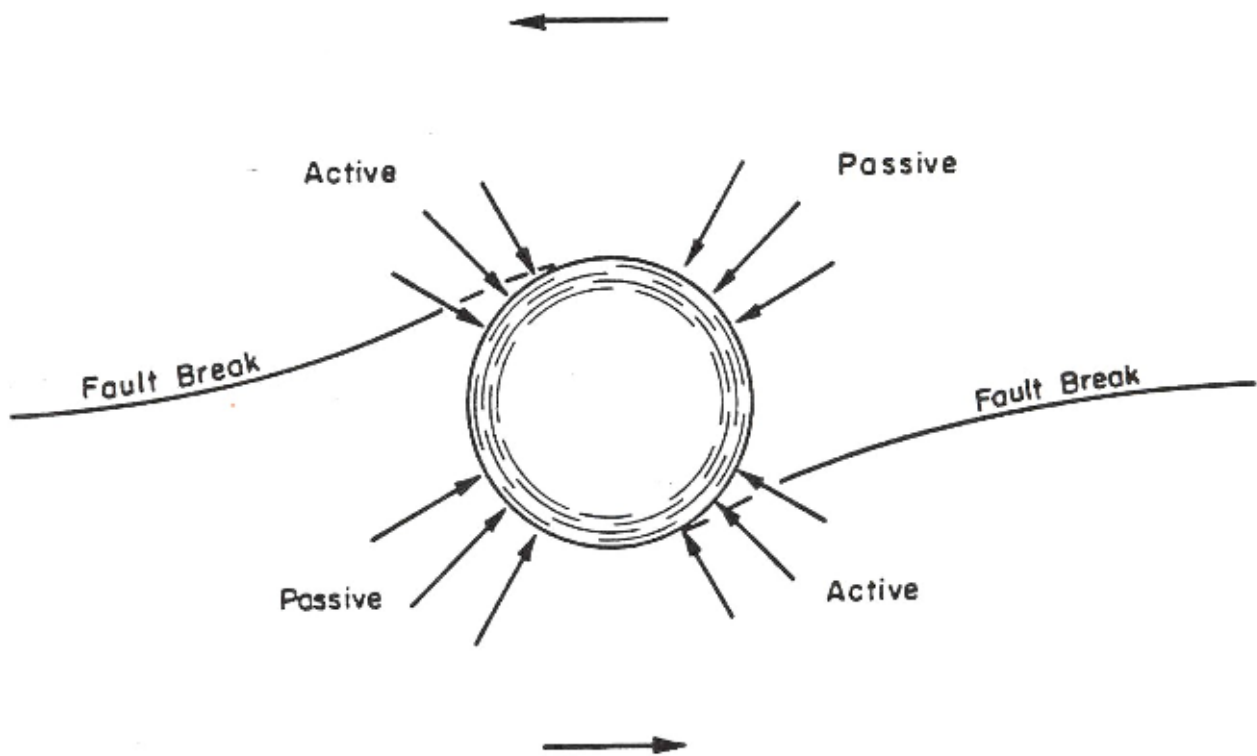


*R* : Riedel Shear, *R'* : conjugate Riedel Shear,  
*W* : shear zone width

**Σχήμα 1.1.3** Ομοιότητες μεταξύ διαφορετικών μηχανισμών διάρρηξης [Tchalenko,1970].

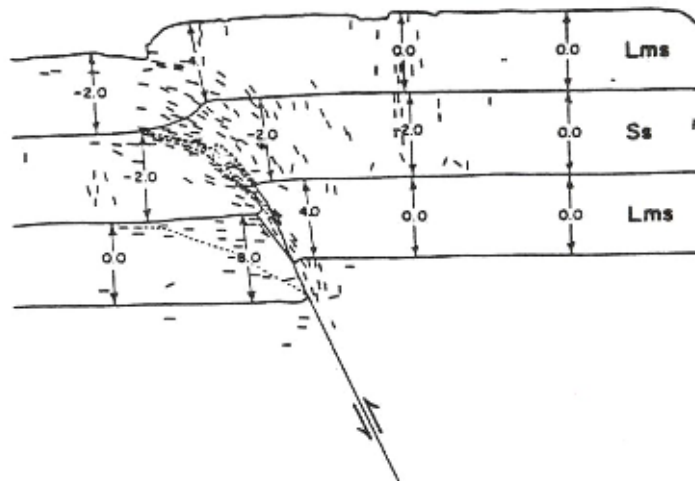


(a) Φωτογραφία του πειράματος

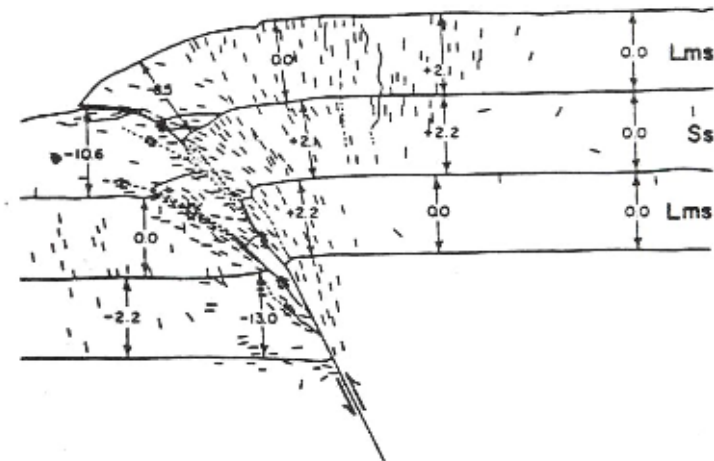


(b) Αλληλεπίδραση εδάφους – θεμελίωσης και αναπτυσσόμενες εδαφικές πιέσεις

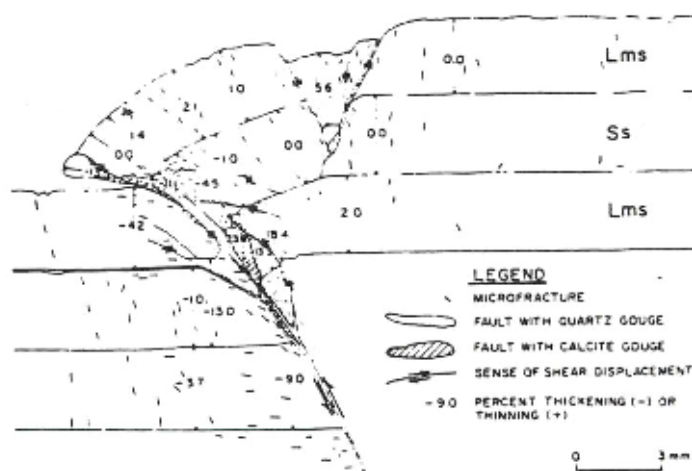
**Σχήμα 1.1.4** Πειραματικά αποτελέσματα αλληλεπίδρασης διάρρηξης οριζόντιας διάτμησης με άκαμπτη εγκιβωτισμένη θεμελίωση [Duncan & Lefebvre, 1973 ].



Μετατόπιση = 0.18 cm



Μετατόπιση = 0.3 cm



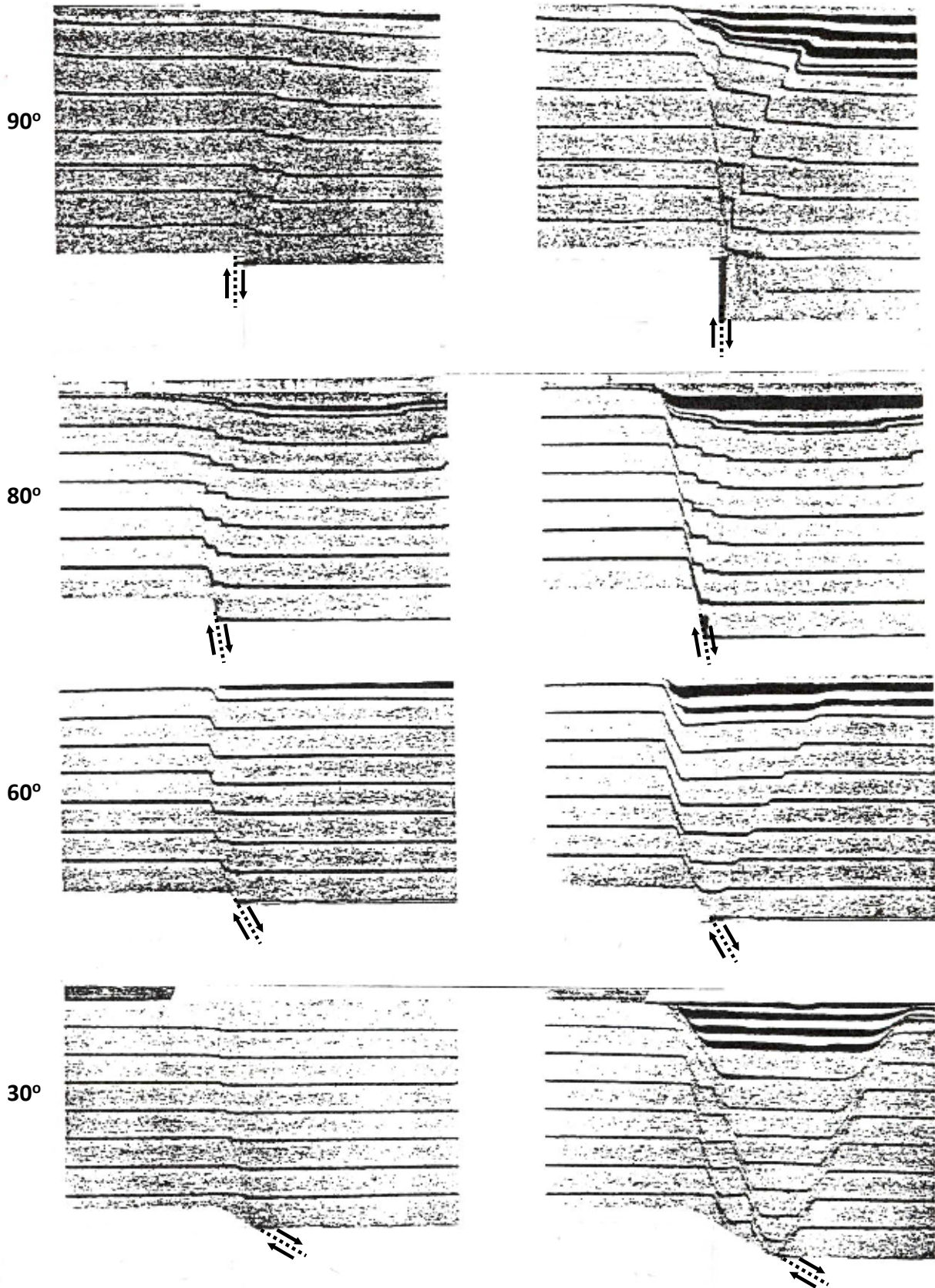
Μετατόπιση = 0.63 cm

Σχήμα 1.1.5 Πειραματικά αποτελέσματα διάδοσης ανάστροφης διάρρηξης από τους Friedman et al. [1976].

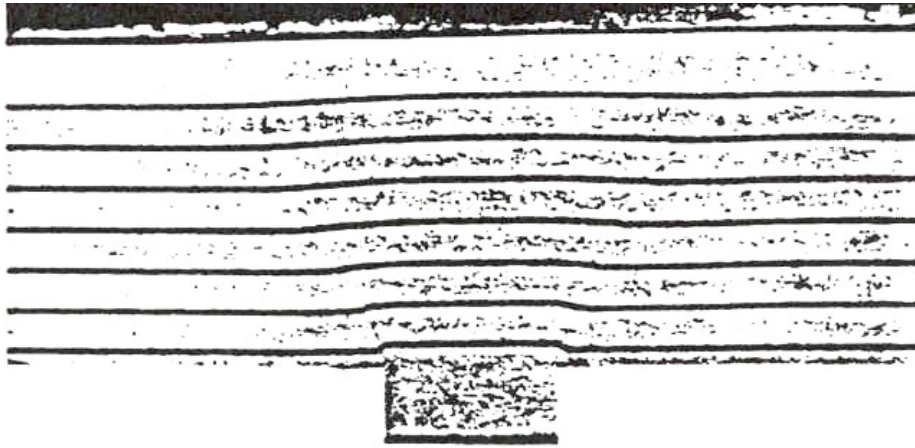


*Small Imposed displacement*

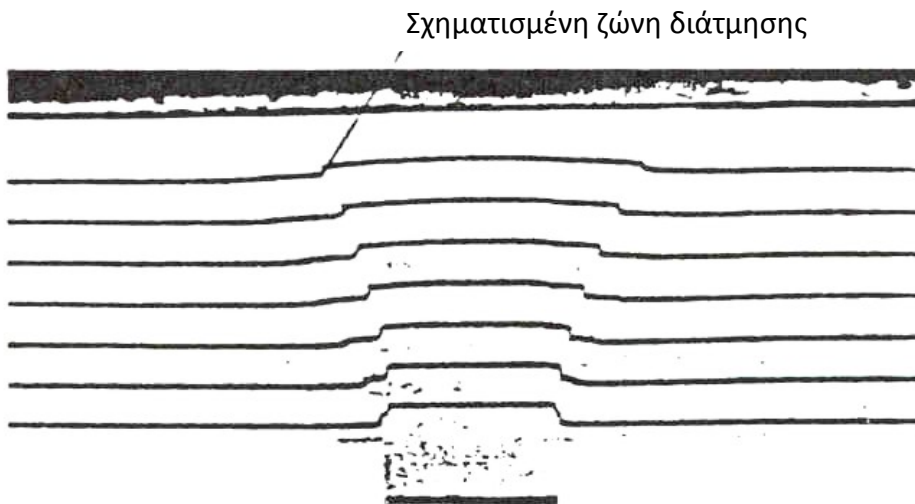
*Large Imposed Displacement*



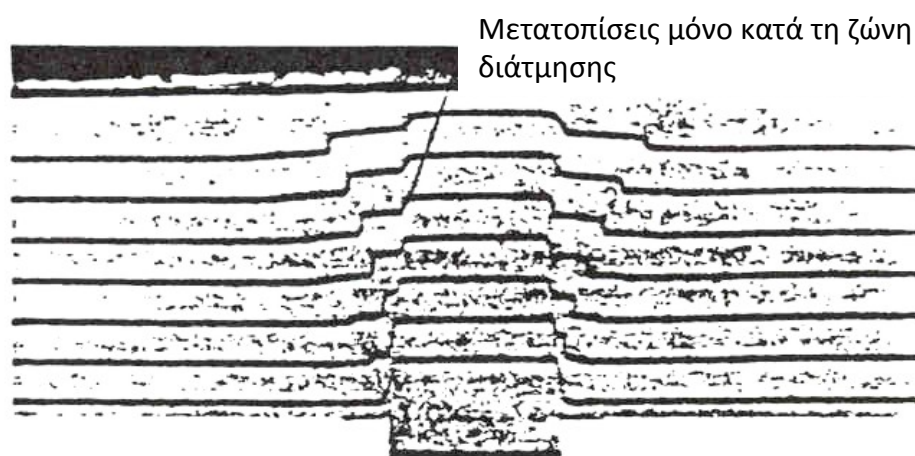
Σχημα 1.1.6 Πειραματικά αποτελέσματα διάδοσης κανονικής διάρρηξης από τον Horsfield [1977].



(a) Έναρξη διάδοσης της διάρρηξης

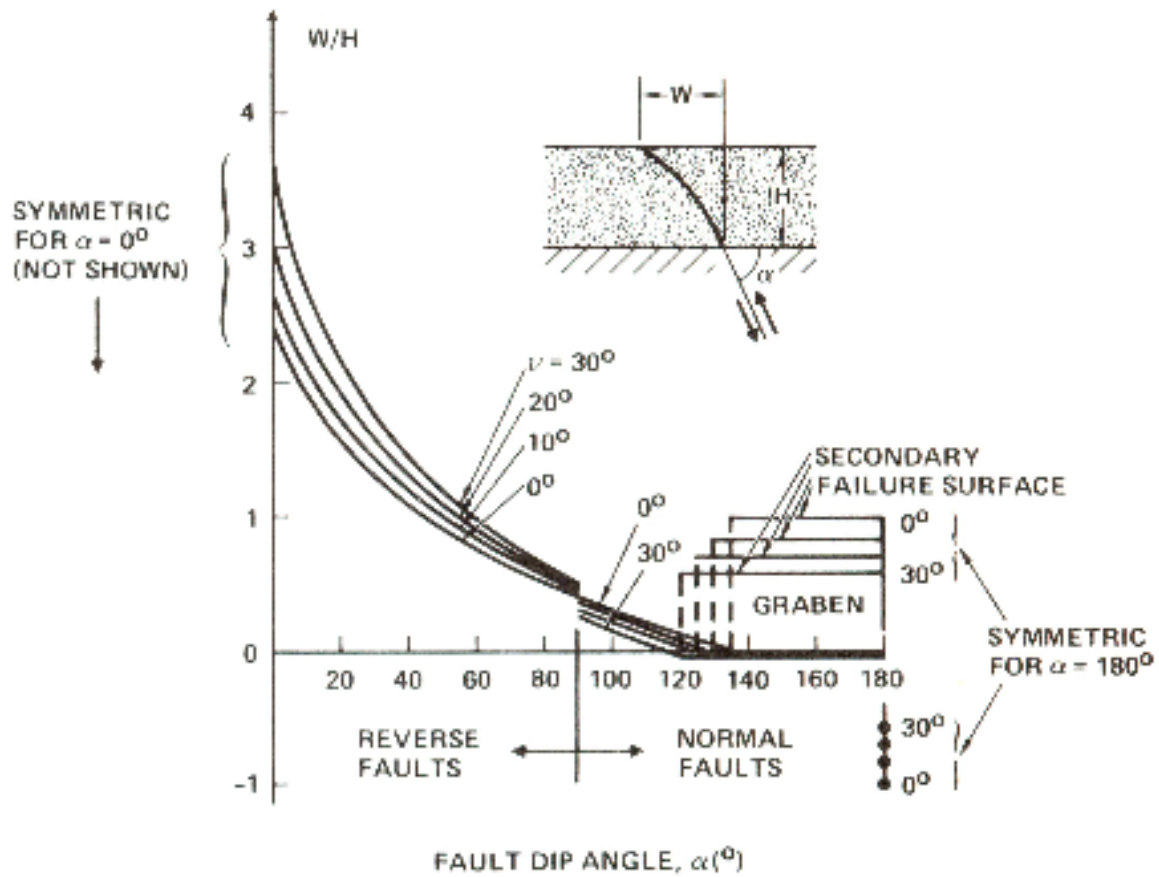


(b) Κάμψη της διάρρηξης καθώς πλησιάζει την επιφάνεια

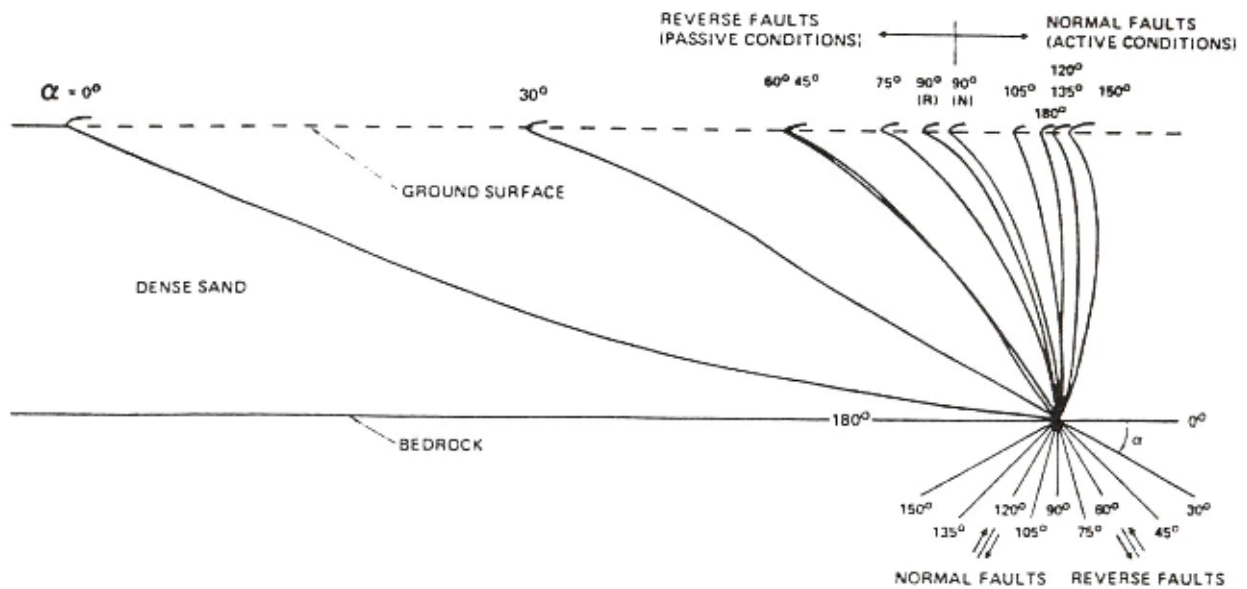


(c) Έναρξη της δευτερεύουσας διάρρηξης

Σχήμα 1.1.7 Πειραματικά αποτελέσματα από τους Walters & Thomas [1982].

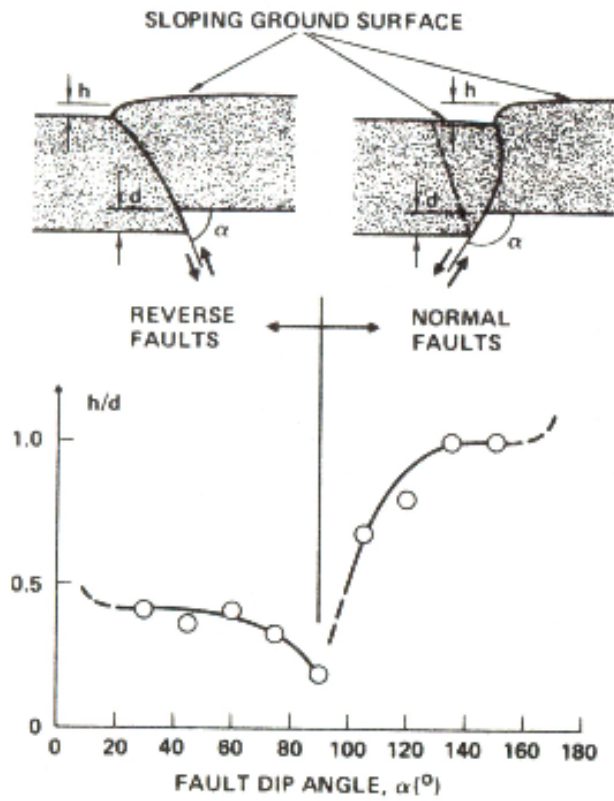


(a) Θέση εμφάνισης της διάρρηξης στην επιφάνεια

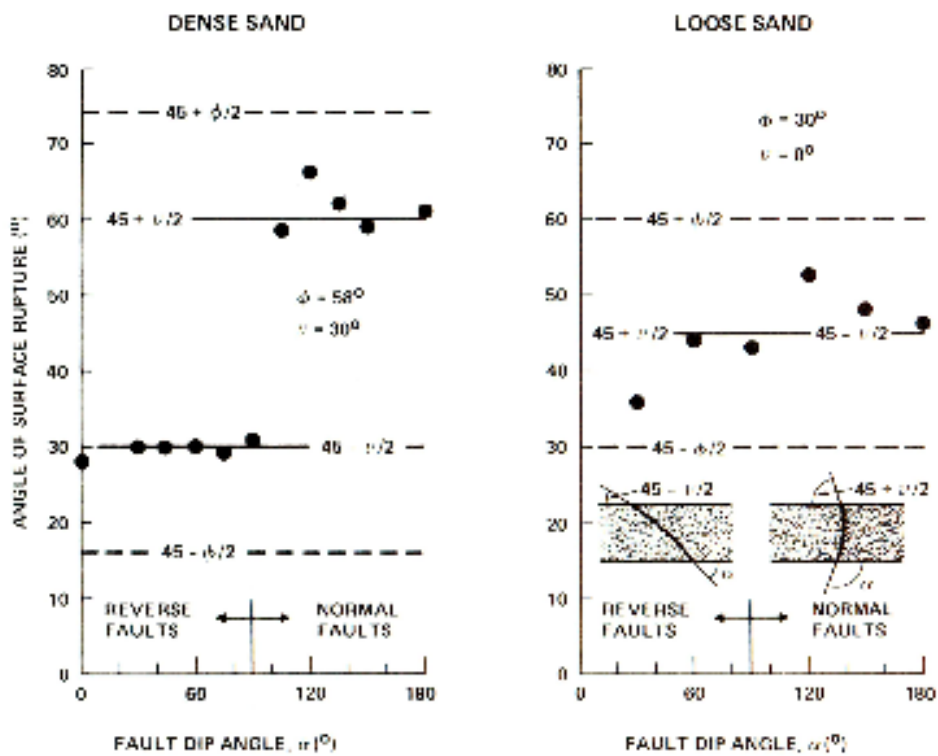


(b) Παρατηρηθείσες διαδρομές της διάρρηξης

Σχήμα 1.1.8 Πειραματικά αποτελέσματα από τους Lade & Cole [1984].

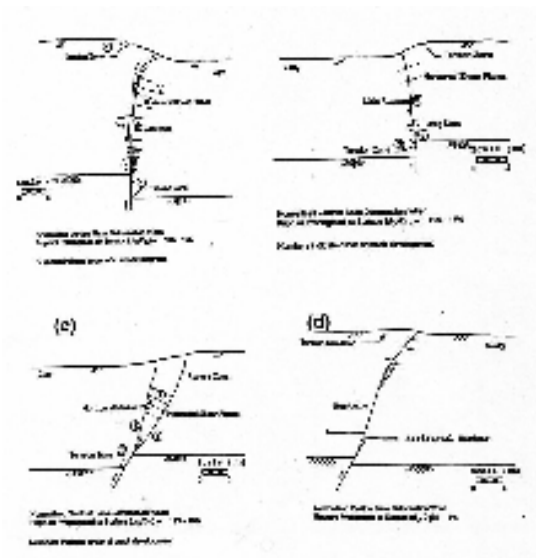


(a) Παρατηρηθείς λόγος  $h/d$  ( $h$ : faults scarp height,  $d$ : imposed displacement)

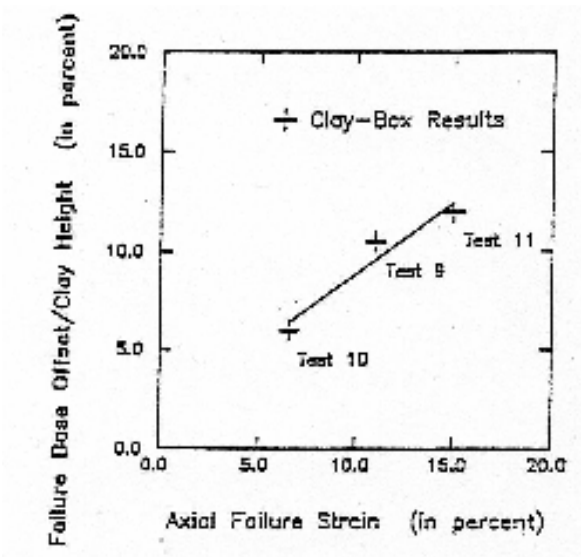


(b) Παρατηρηθείσες κλίσεις εμφάνισης της διάρρηξης

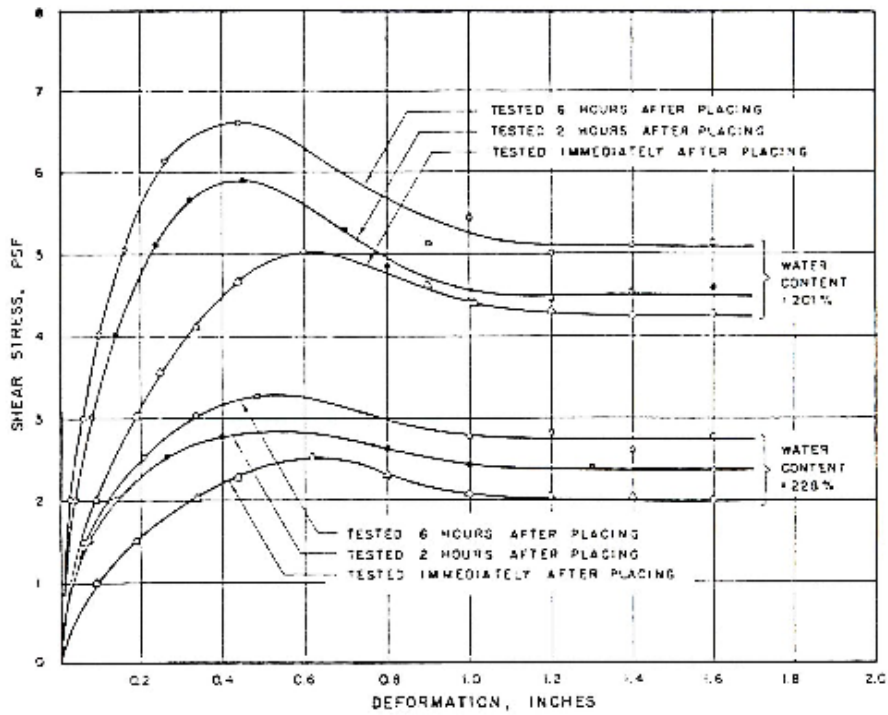
Σχήμα 1.1.9 Πειραματικά αποτελέσματα από τους Lade & Cole [1984].



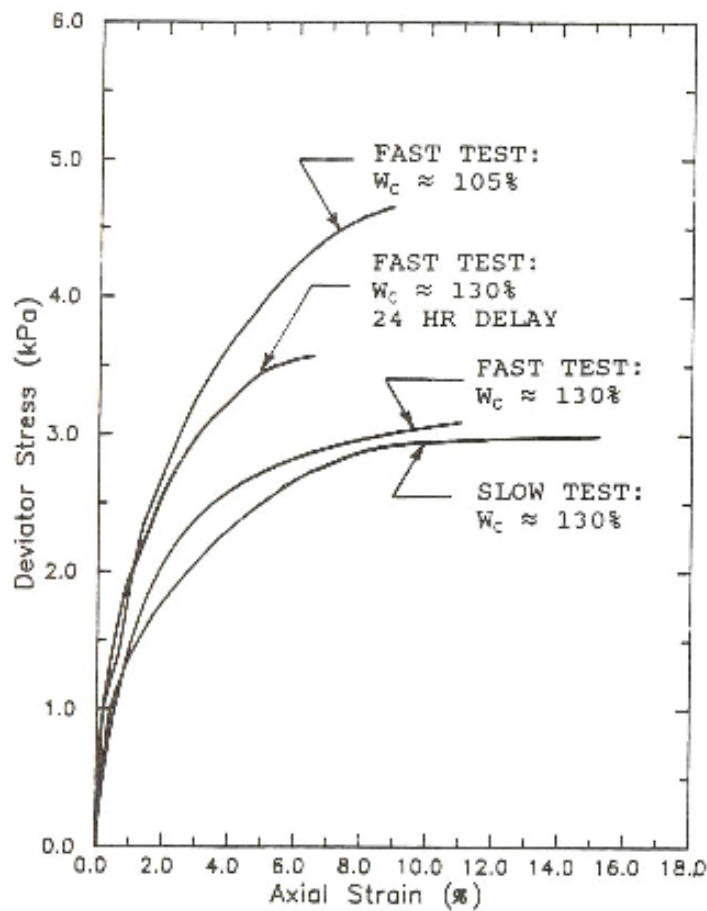
**Σχήμα 1.1.10** Παραμορφώσεις και σχήμα ρωγμής σε αργιλικά δοκίμια υπό κανονική και ανάστροφη μετατόπιση  
 (a) 90ο ανάστροφο ρήγμα(παραμόρφωση αστοχίας 10 -12 %)  
 (b) 90ο κανονικό ρήγμα (παραμόρφωση αστοχίας 10 – 12 %)  
 (c) 60ο κανονικό ρήγμα (παραμόρφωση αστοχίας 10 – 12 %)  
 (d) 60ο ανάστροφο ρήγμα(παραμόρφωση αστοχίας 6 -7 %)



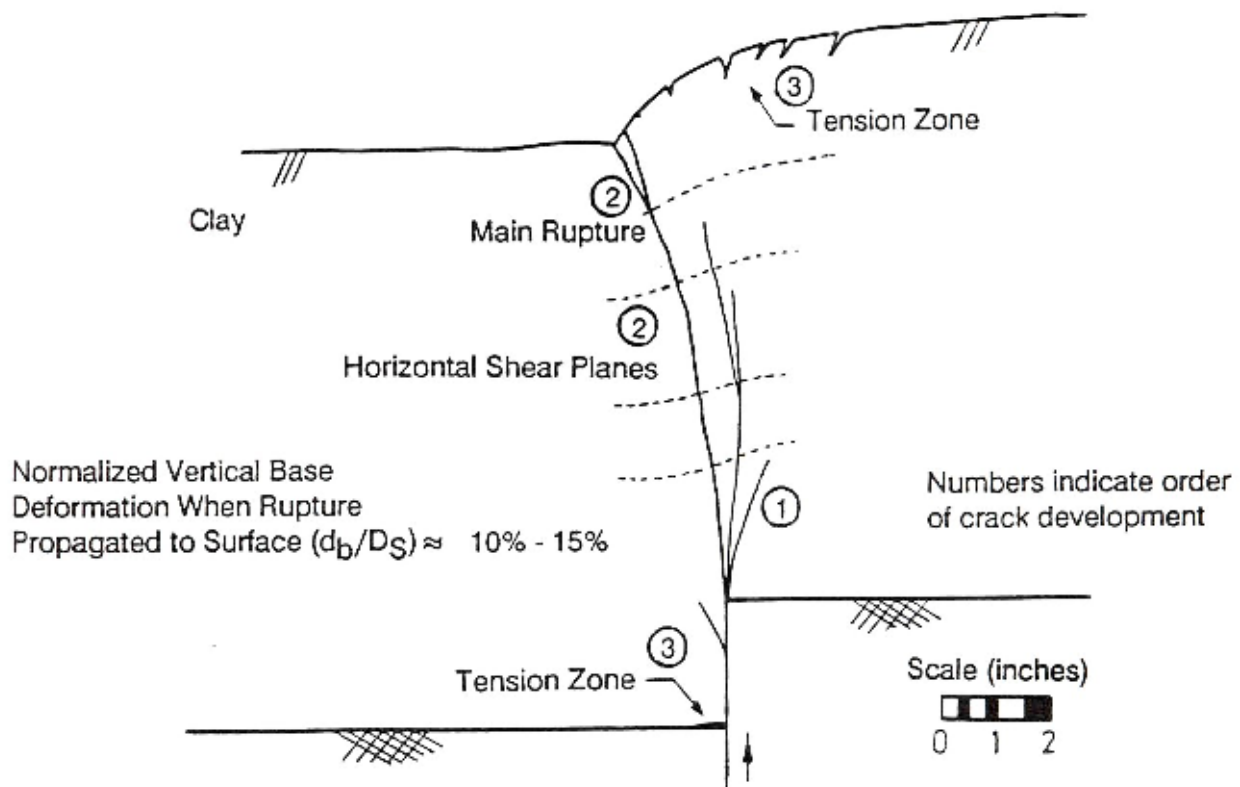
**Σχήμα 1.1.11** Απαιτούμενες κανονικοποιημένες μετατοπίσεις βάσης για διάδοση της διάρρηξης μέχρι την επιφάνεια αργιλικών δοκιμίων ως συνάρτηση της παραμόρφωσης αστοχίας για αργιλικά δοκίμια υπό κανονική και ανάστροφη επιβολή διάρρηξης (Bray et al., 1993)



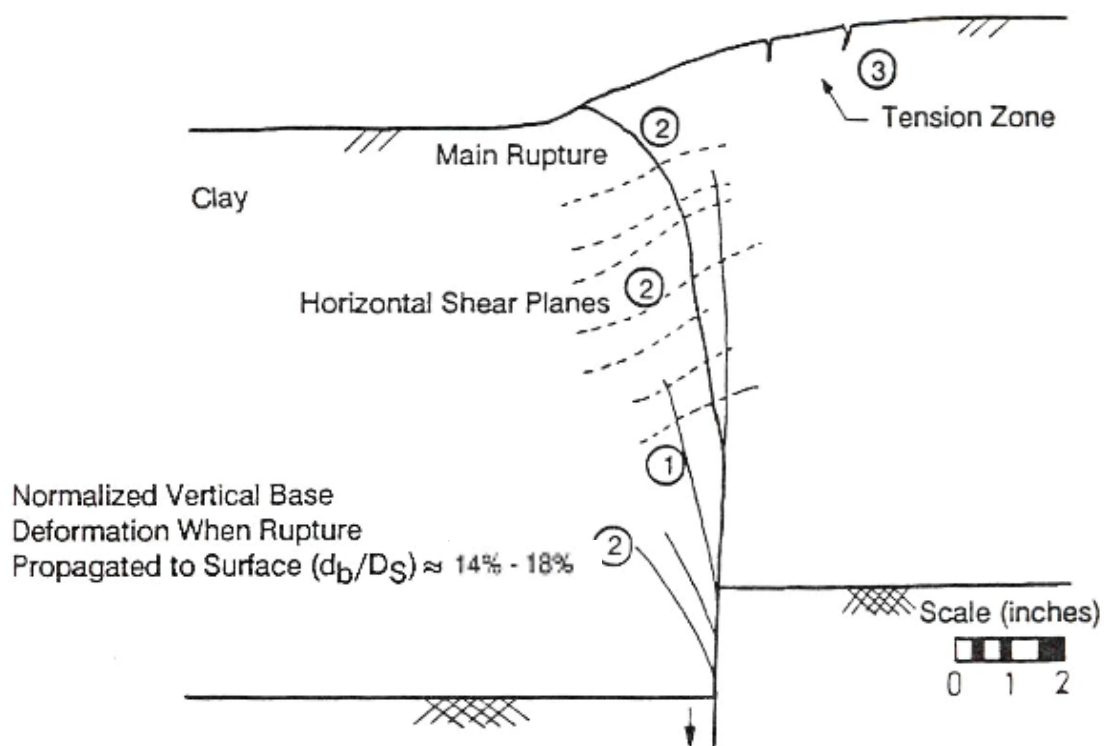
Σχήμα 1.1.12 Πειραματικά αποτελέσματα από τον Bray [Bray, 1990 ; Bray et al, 1994] : Διάγραμμα τάσεων-μετατοπίσεων για τα αργιλικά δοκίμια πειραμάτων άμεσης διάτμησης



Σχήμα 1.1.13 Πειραματικά αποτελέσματα από τον Bray [Bray, 1990 ; Bray et al, 1994] : Διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων για αργιλικά δοκίμια υπό μονοαξονική θλίψη

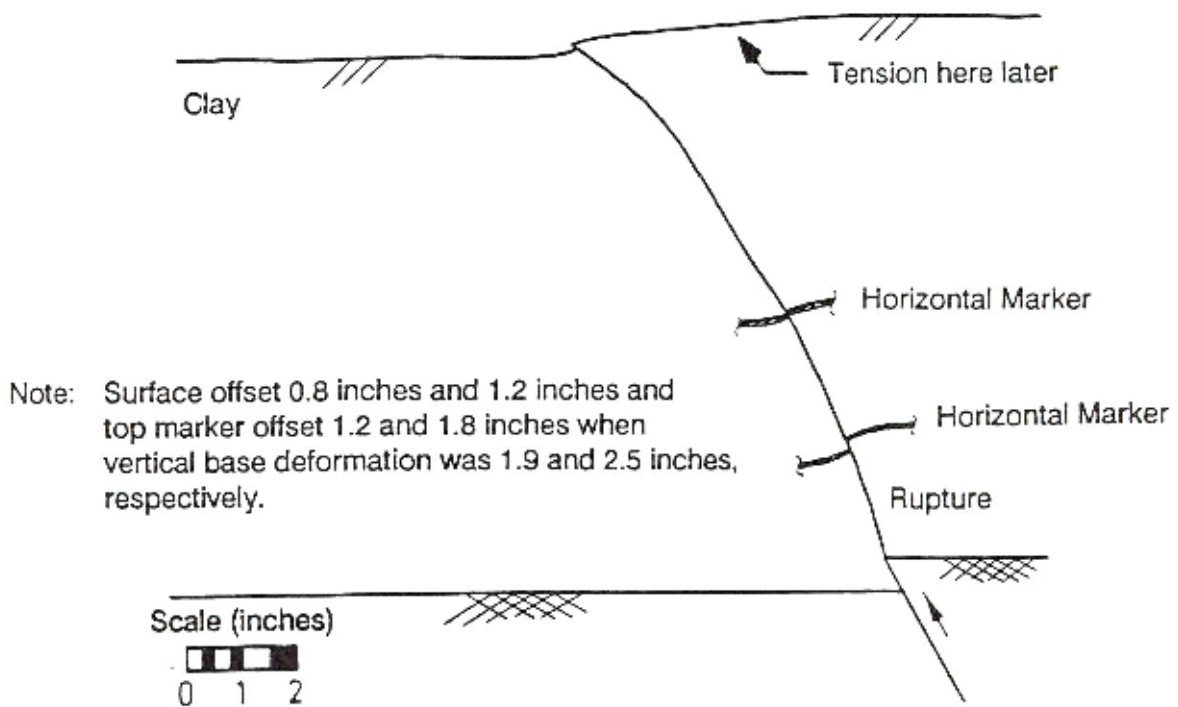


(a) Ανάστροφη διάρρηξη υπό κλίση 90°

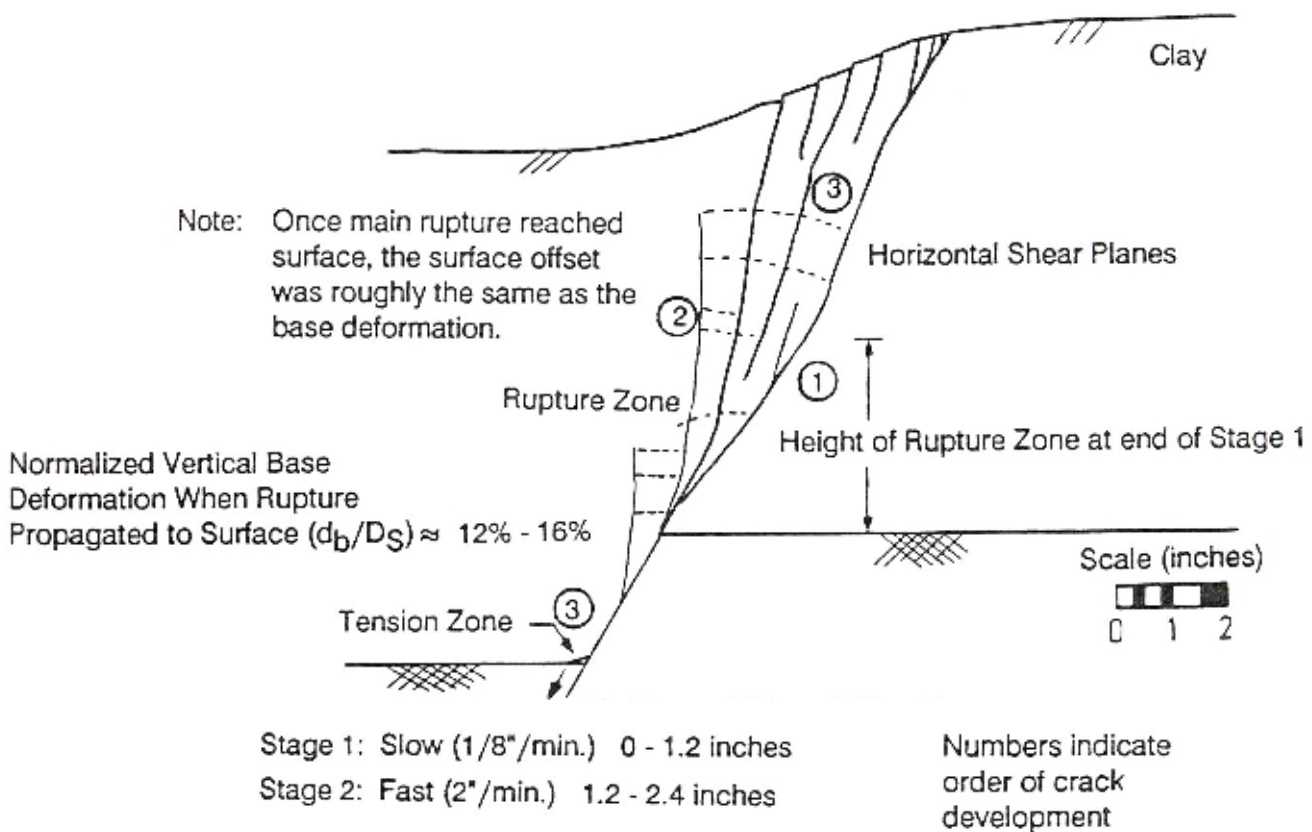


(b) Ανάστροφη διάρρηξη υπό κλίση 90°

**Σχήμα 1.1.14** Πειραματικά αποτελέσματα από τον Bray [Bray, 1990; Bray et al, 1994] : Ανάστροφη και κανονική διάρρηξη υπό κλίση 90°.



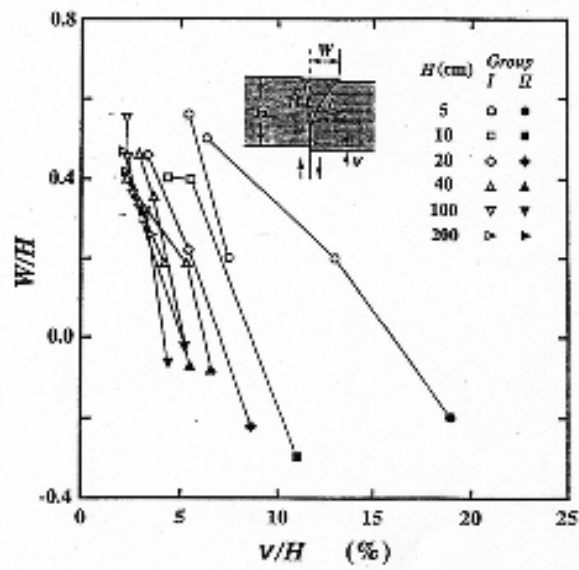
(a) Ανάστροφη διάρρηξη υπό κλίση 60°



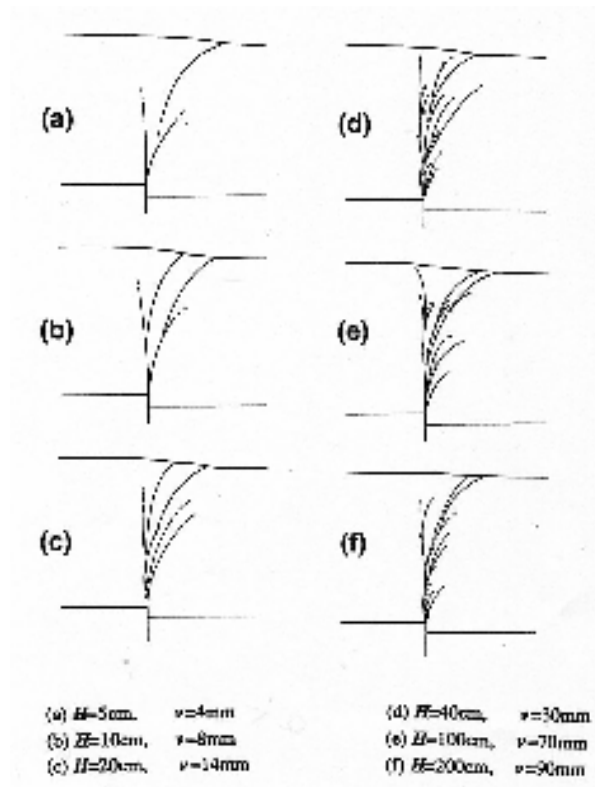
(b) Κανονική διάρρηξη υπό κλίση 60°

**Σχήμα 1.1.15** Πειραματικά αποτελέσματα από τον Bray [Bray, 1990; Bray et al, 1994] : Ανάστροφη και κανονική διάρρηξη υπό κλίση 60°.

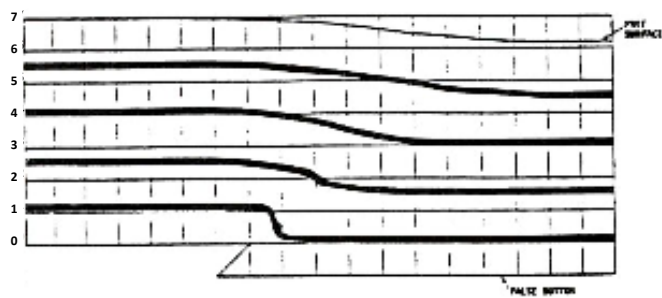




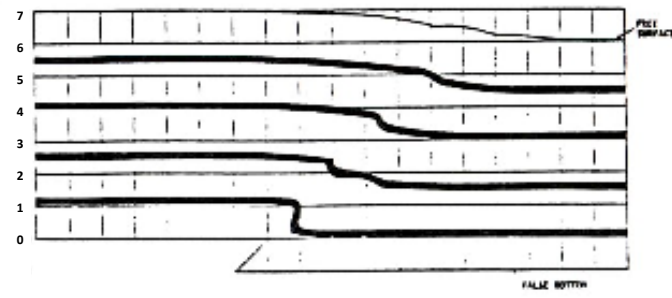
**Σχήμα 1.1.16** Κανονικοποιημένη απαιτούμενη μετατόπιση βάσης για διάδοση της διάρρηξης μέχρι την επιφάνεια συναρτήσε του σημείου εμφάνισης της διάρρηξης στην επιφάνεια για διάφορα μεγέθη δοκιμίων. (Tani et al., 1996)



**Σχήμα 1.1.17** Μορφές διάρρηξης για διάφορα μεγέθη δοκιμίων (Tani et al., 1996)

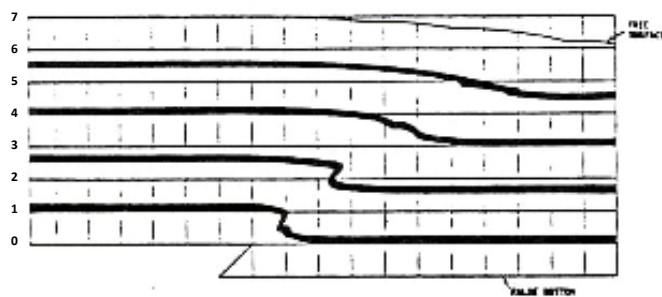


**Fast rate (50 g)**

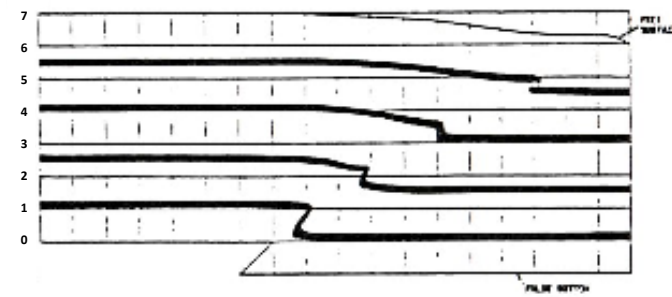


**Slow rate (50 g)**

**(a)** Χαλαρή άμμος ( $\gamma_d = 14.1 \text{ kN/m}^3$ )

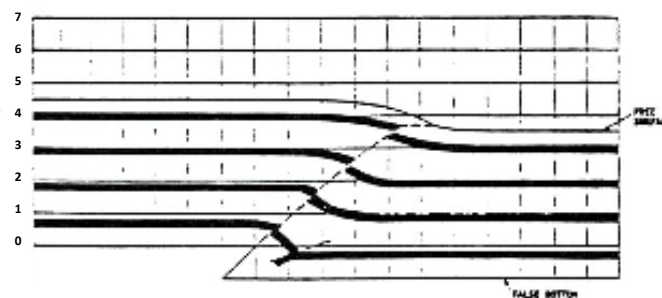


**Fast rate (50 g)**

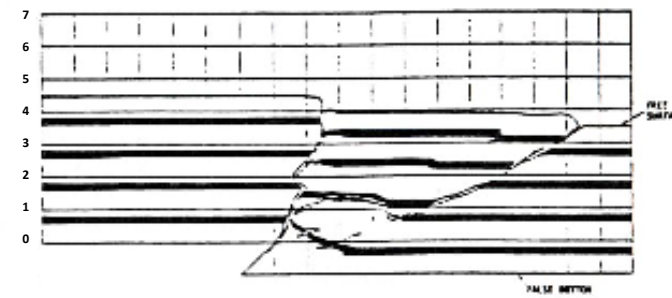


**Slow rate (50 g)**

**(b)** Πυκνή άμμος ( $\gamma_d = 17.3 \text{ kN/m}^3$ )



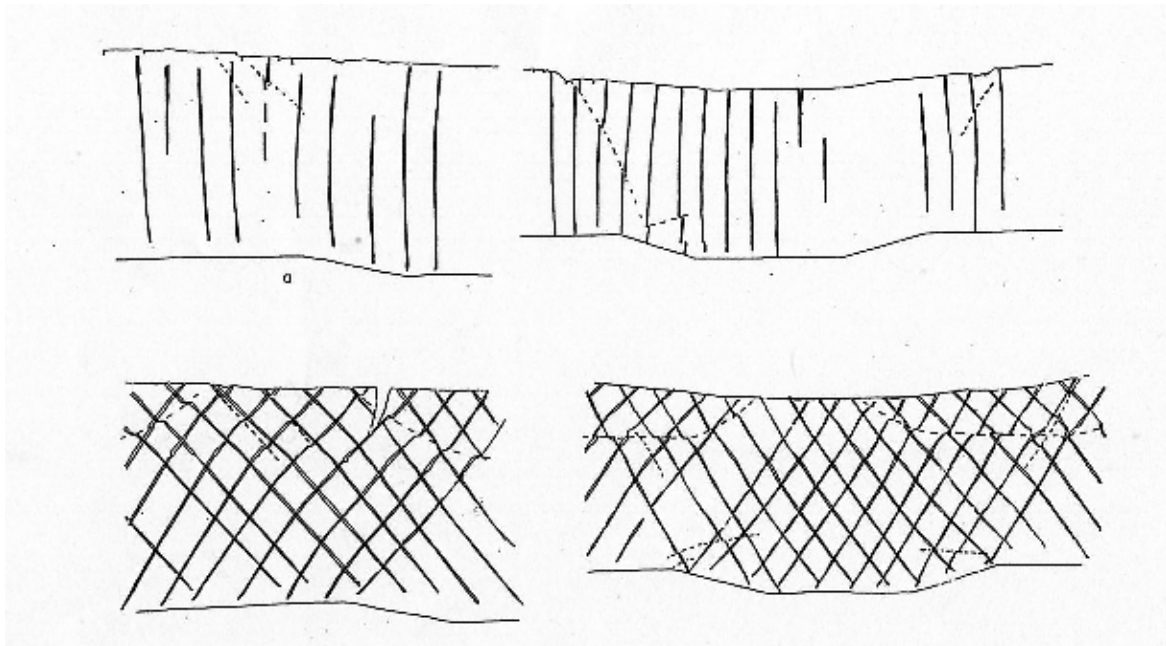
**Fast rate (50 g)**



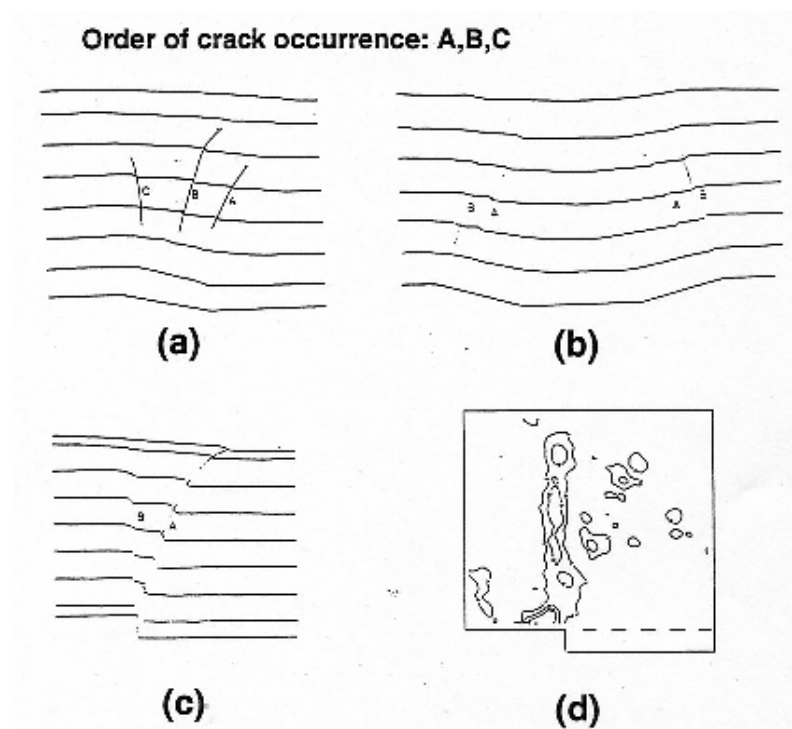
**Slow rate (50 g)**

**(c)** Ιλυώδης άμμος ( $c = 50 \text{ kPa}$ ,  $\phi = 32^\circ$ )

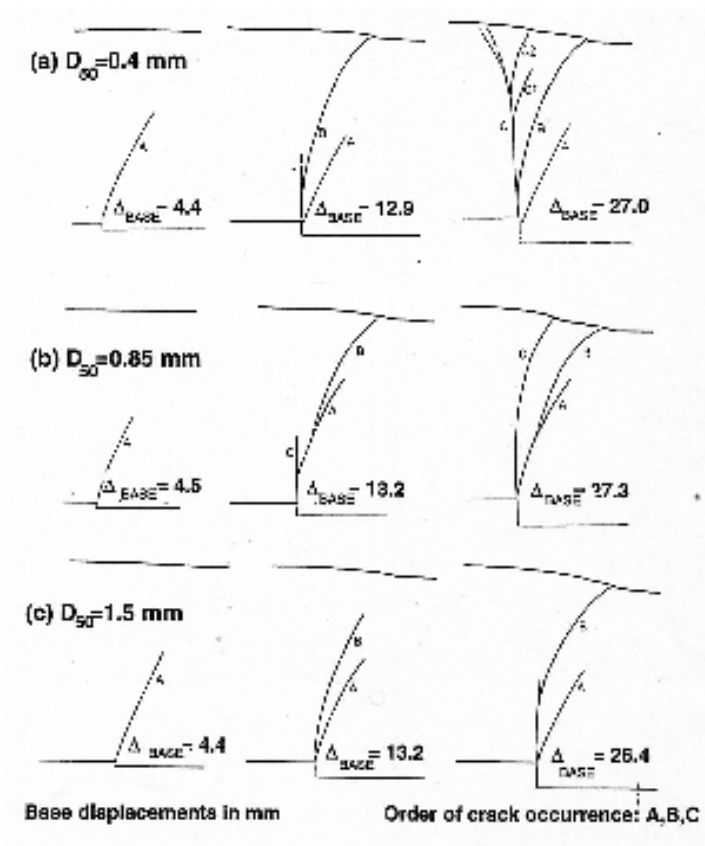
**Σχήμα 1.2.1** Πειραματικά αποτελέσματα σε φυγοκεντρική διάδοση ανάστροφης διάρρηξης από τον Roth, Scott, and Austin [Roth, Scott, and Austin, 1981 ; Dames & Moore, 1980]



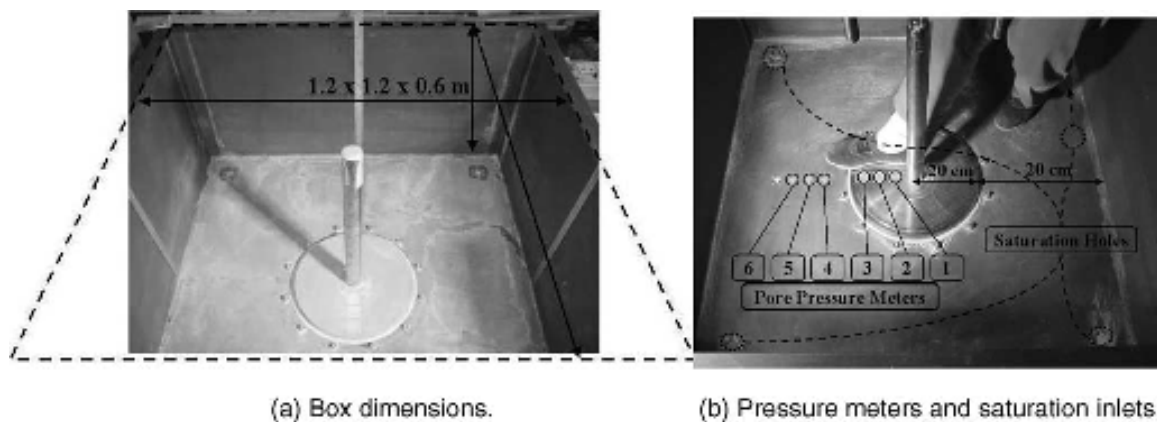
**Σχήμα 1.2.2** Μορφές διάρρηξης σε 4 αργιλικά μοντέλα φυγοκεντριστή υπό μετατόπιση κεκλιμένης βάσης υπό παρόμοιες πειραματικές διαδικασίες (Stone, 1988).



**Σχήμα 1.2.3** Διάρρηξη σε προσομιώματα άμμου: (a) μετατόπιση κεκλιμένης βάσης,  $D_{50} = 0.4$  mm,  
 (b) μετατόπιση κεκλιμένης βάσης,  $D_{50} = 1.50$  mm,  
 (c) κατακόρυφη κανονική διάρρηξη  
 (d) contours of maximum shear strain corresponding to (c) (Stone, 1988)



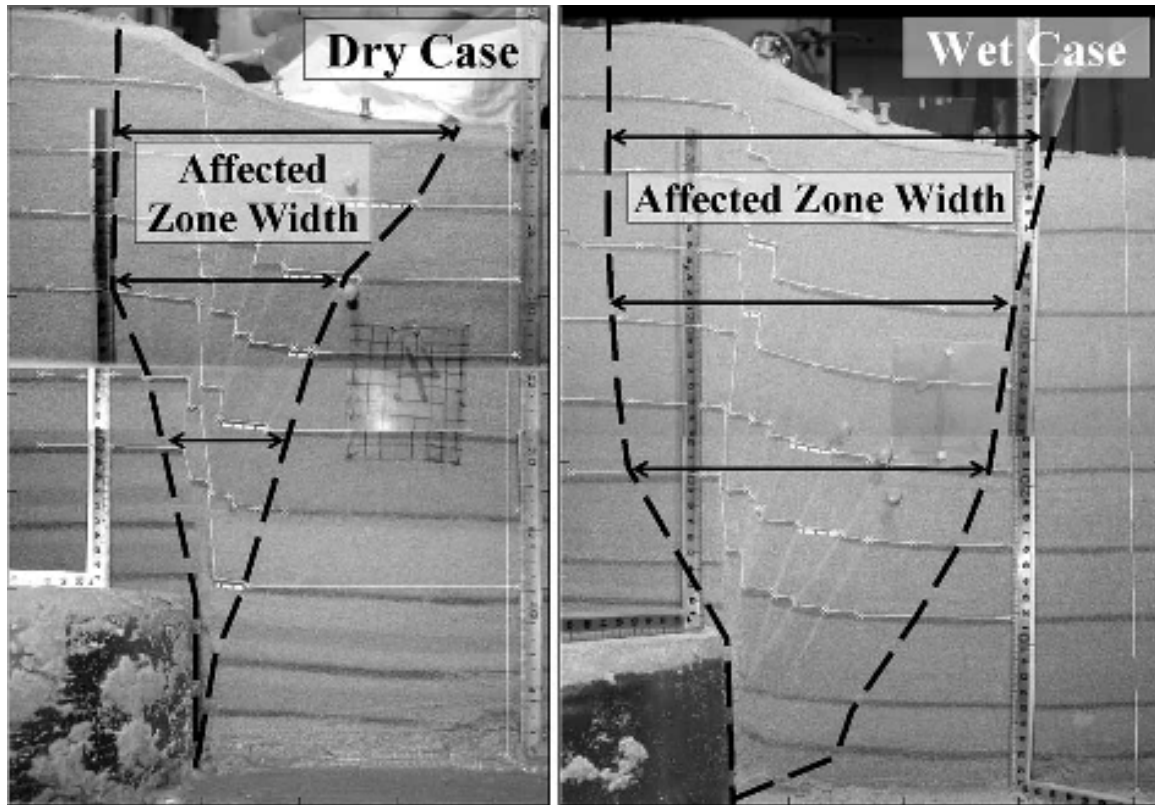
**Σχήμα 1.2.4** Διάδοση της διάρρηξης σε δοκίμια άμμου υπό κατακόρυφη επιβολή αρχικής διάρρηξης:  
 (a)  $D_{50} = 0.4 \text{ mm}$ ,  
 (b)  $D_{50} = 0.85 \text{ mm}$ ,  
 (c)  $D_{50} = 1.5 \text{ mm}$  (Stone, 1988)



**Σχήμα 1.2.5** Φωτογραφίες της πειραματικής συσκευής (Johansson & Konagai, 2006)



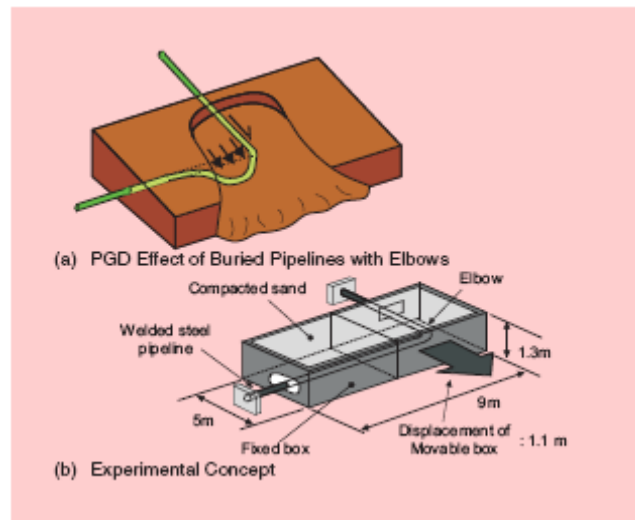
**Σχήμα 1.2.6** Προετοιμασία του πειράματος (Johansson & Konagai, 2006)



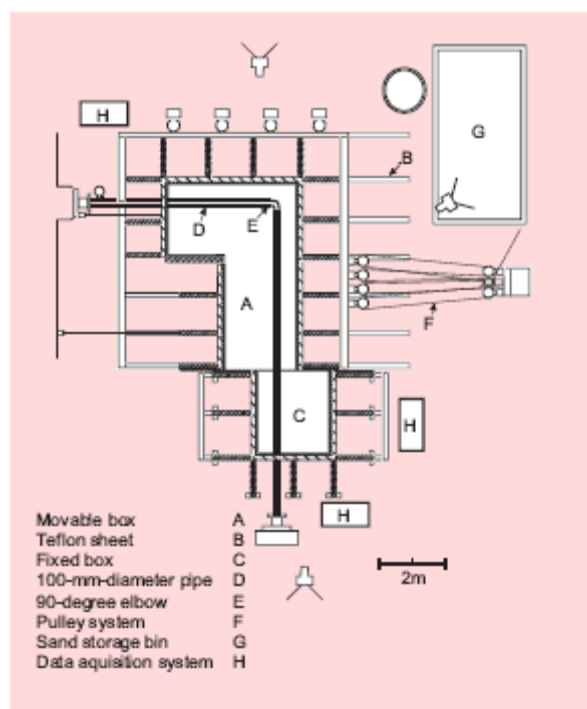
**Σχήμα 1.2.7** Εύρος επιρροής διάρρηξης σε ξηρό και υγρό μοντέλο (Johansson & Konagai, 2006)



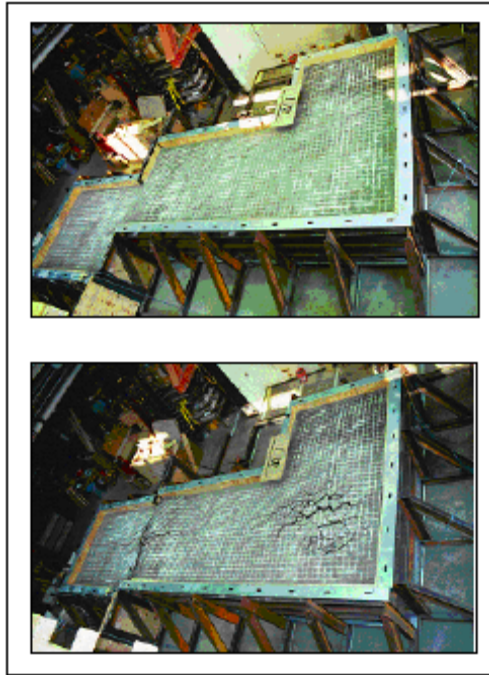
**Σχήμα 1.2.8** Stick-slip fault rupture modeling apparatus of two large foam- rubber blocks



Σχήμα 1.2.9 Προσομοίωση της επιβολής μόνιμης μετατόπισης σε αγωγό με γωνιακό



Σχήμα 1.2.10 Κάτοψη της πειραματικής διάταξης



**Σχήμα 1.2.11** Πανοραμική άποψη της πειραματικής διάταξης πριν (πάνω) και μετά (κάτω) τη δοκιμή



## Κεφάλαιο 2

# Διεξαγωγή Πειράματος στη Συσκευή Προσομοίωσης Σεισμικής Διάρρηξης Ρήγματος

### 2.0 Εισαγωγή

Στο τμήμα Πειραματικής Προσομοίωσης Συστημάτων Εδάφους – Κατασκευής του Εργαστηρίου Εδαφομηχανικής αρχικά διεξήχθη πείραμα ελέγχου της Συσκευής Προσομοίωσης Σεισμικής Διάρρηξης Ρήγματος.

### 2.1 Προετοιμασία του πειράματος

Το εδαφικό δείγμα διαστρώθηκε με το Σύστημα Διάστρωσης Άμμου, που διαθέτει το Εργαστήριο. Το σύστημα αυτό, το οποίο είναι τοποθετημένο στην Αίθουσα Προετοιμασίας Δοκιμών, είναι απαραίτητο για την δημιουργία δοκιμών άμμου με ελεγχόμενες ιδιότητες και άρα εξασφάλιση της επιθυμητής πυκνότητας και επαναληψιμότητας. Η πυκνότητα της παραγόμενης άμμου εξαρτάται αφενός μεν από το ύψος ρήψης, αφετέρου δε από την ταχύτητα κίνησης του κάδου και το άνοιγμα του κλείστρου. Για κάθε τύπο άμμου είναι δυνατή η βαθμονόμηση του συστήματος και η εξασφάλιση ελεγχόμενων ιδιοτήτων. Χρησιμοποιήθηκε λεπτόκοκκη χαλαζιακή άμμος (*Longstone M34*), η κοκκομετρική καμπύλη της οποίας δείχνεται στο **Σχήμα 2.1**. Οι

μηχανικές ιδιότητες μετρήθηκαν στο εργαστήριο Εδαφομηχανικής και παρουσιάζονται στον **Πίνακα 1**.

**Πίνακας 1.** Ιδιότητες Longstone Sand.

		Μέγεθος	$D_r < 60\%$	$D_r > 60\%$		
High Conditions	Confining	Effective Diameter $d_{50}$	0.16 mm			
		Uniformity coefficient $C_u$	1.42			
		Specific Gravity $G_s$	2.63 gr/cm <sup>3</sup>			
		Maximum void ratio $e_{max}$	0.954			
		Minimum void ratio $e_{min}$	0.513			
	Peak angle of internal friction $\phi_{peak}$			31°	38°	
		Residual angle of internal friction $\phi_{res}$		30°	30°	
		Dilation angle $\psi$		3°	13°	
		Low Conditions	Confining	Peak angle of internal friction $\phi_{peak}$	38°	46°
				Residual angle of internal friction $\phi_{res}$	36°	36°
Dilation angle $\psi$	3°			13°		

Η διάστρωση της άμμου εντός του κιβωτίου έγινε σε στρώσεις των 7 cm περίπου, όπως φαίνεται και στον **Πινάκα 2**, ενώ η συσκευή ελεγχόμενης διάστρωσης άμμου ρυθμίστηκε, έτσι ώστε να επιτευχθεί δοκίμιο σχετικής πυκνότητας  $D_r = 80\%$ . Η άνω επιφάνεια κάθε στρώσης διακρίνεται με χρωματιστή άμμο, έτσι ώστε να παρακολουθείται ευκρινέστερα η παραμόρφωση κατά τη διάρκεια του πειράματος. Μετά την ολοκλήρωση της προετοιμασίας του εδαφικού δοκιμίου, τοποθετήθηκε το

ομοίωμα της επιφανειακής θεμελίωσης στην προκαθορισμένη θέση. Το ολοκληρωμένο πειραματικό ομοίωμα παρουσιάζεται στο **Σχήμα 2.4**.

**Πίνακας 2**

<b>Στρώση</b>	<b>Πάχος</b>	<b>Συνολικό ύψος</b>
<b>1</b>	6	6
<b>2</b>	6	12
<b>3</b>	7	19
<b>4</b>	6.5	25.5
<b>5</b>	7	32.5
<b>6</b>	7	39.5
<b>7</b>	7	46.5
<b>8</b>	9	55.5
<b>9</b>	6	61.5
<b>10</b>	7	66.5
<b>11</b>	6.5	75

Στο πρώτο στάδιο του πειράματος, προκλήθηκε κανονική διάρρηξη ρήγματος υπό γωνία 45° στη βάση του πυκνού αμμώδους στρώματος. Η αντιστοιχία του μοντέλου σε πραγματική κλίμακα είναι 1 / 40 (δηλαδή διάνοιξη σεισμικής διάρρηξης στη βάση εδαφικής στρώσης πάχους 30 μέτρων περίπου) .

Εξετάστηκε τόσο η συμπεριφορά του συστήματος στο ελεύθερο πεδίο, όσο και η αλληλεπίδραση διάρρηξης – εδάφους – θεμελίωσης. Για την περίπτωση της αλληλεπίδρασης χρησιμοποιήθηκε άκαμπτο τετραγωνικό θεμέλιο  $25 \times 25 \text{ cm}^2$ , το οποίο προσομοιώνει θεμέλιο πλάτους 10 m και φορτίο ανωδομής  $q = 20 \text{ kPa}$  (θεμελίωση μίας 5-ωροφης πολυκατοικίας). η δε επιλογή υλικών και διαστάσεων έγινε με γνώμονα την τήρηση των κανόνων ομοιότητας [Gibson, 1997], έτσι ώστε η προσομοίωση να είναι αντιπροσωπευτική του φυσικού προτύπου (βλ. **Πίνακα 3**). Στο **Σχήμα 2.3** παρουσιάζεται το εξεταζόμενο πραγματικό πρόβλημα, ενώ στο **Σχήμα 2.4** η διάταξη του πειραματικού ομοιώματος.

**Πίνακας 3**

Φυσικό Μέγεθος	Συντελεστής Αναγωγής	Επικλιμάκιας
	Λόγος Πρωτοτύπου/Ομοίωμα	
Μήκος	N	
Μετακίνηση	N	
Πυκνότητα	1	
Χρόνος	$N^{0.5}$	
Ταχύτητα	$N^{0.5}$	
Επιτάχυνση	1	
Δύναμη	$N^3$	
Τάση	N	
Ροπή Αδρανείας	$N^5$	
Συχνότητα	$N^{-0.5}$	

Στο δεύτερο στάδιο, προκλήθηκε ανάστροφη διάρρηξη υπό την ίδια γωνία.

## 2.2 Εκτέλεση του πειράματος

### 2.2.1 Διάδοση της κανονικής διάρρηξης στο ελεύθερο πεδίο

Η μετακίνηση του ρήγματος εφαρμόστηκε σταδιακά σε 8 βήματα και με πολύ μικρή ταχύτητα — οιονεί στατικά. Στο τέλος κάθε βήματος το έμβολο επιβολής της μετακίνησης ακινητοποιούνταν και λαμβάνονταν μετρήσεις και φωτογραφίες του πειραματικού ομοιώματος.

Μέχρι την επιβαλλόμενη τιμή μετατόπισης  $h = 0.5 \text{ cm}$  ( $h / H = 0.7 \%$ ), η διάρρηξη δε διακρίνεται. Αυξάνοντας την επιβαλλόμενη μετατόπιση σε  $h = 0.9 \text{ cm}$  ( $h / H = 1.2 \%$ ), η διάρρηξη έχει σχηματιστεί και έχει φτάσει στην επιφάνεια. Η κλίση της φαίνεται να αυξάνει κατά τη διάδοση της ρωγμής προς την επιφάνεια (γίνεται πιο απότομη), παρατηρείται δηλαδή, όπως αναμενόταν, το φαινόμενο της “διάθλασης”.

Δυστυχώς, παρατηρήθηκε ότι η μονωτική μεμβράνη της βάσης επηρεάζει τη διάρρηξη στο σημείο εκκίνησης της, φαινόμενο προφανώς ανεπιθύμητο.

Όταν το μέγεθος της μετατόπισης φτάσει τα  $h = 1.4 \text{ cm}$  ( $h / H = 1.9 \%$ ), η ρωγμή διακλαδίζεται, ενώ οι μετατοπίσεις στην επιφάνεια του κινητού τμήματος (hanging wall) είναι πλέον φανερές.

Όταν η τιμή της επιβαλλομένης μετατόπισης φτάσει τα  $h = 2.0 \text{ cm}$  (**Σχήμα 2.5**) ( $h / H = 2.7 \%$ ), διακρίνονται ξεκάθαρα 3 ρωγμές, η μία δίπλα στην άλλη. Το φαινόμενο αυτό βρίσκεται σε πλήρη συμφωνία με προγενέστερες αριθμητικές προσεγγίσεις (Anastasopoulos et al. 2007). Η γωνία διάδοσης της διάρρηξης μετρήθηκε στο ελεύθερο πεδίο ίση με  $75^\circ$ . Επιπρόσθετα, σε αυτό το στάδιο αρχίζει η μόρφωση του

κατακρημνίσματος, ενώ οι μετατοπίσεις της επιφάνειας του εδαφικού δείγματος είναι πλέον έντονες.

Περαιτέρω αύξηση της επιβαλλομένης μετατόπισης (**Σχήμα 2.6**) δεν επέφερε κάποια ποιοτική διαφορά. Όσο μεγαλύτερη ήταν η επιβαλλόμενη μετατόπιση, τόσο μεγαλύτερες ήταν οι μετατοπίσεις της επιφάνειας του εδάφους, αλλά καμία διαφοροποίηση του σχήματος της ρωγμής ή της ζώνης διάρρηξης δεν παρατηρήθηκε.

Άξια αναφοράς είναι η σύμπτωση των παρατηρήσεων της παραπάνω δοκιμής με τα αποτελέσματα ανάλυσης παρόμοιου προβλήματος με πεπερασμένα στοιχεία (Anastasopoulos et al. 2007)

Αν εξαιρεθεί το γεγονός ότι στο συγκεκριμένο πείραμα απαιτήθηκαν μεγαλύτερα ποσοστά επιβαλλόμενης μετατόπισης στο βραχύδες υπόβαθρο  $h/H$ , για να φτάσει η ρωγμή στην επιφάνεια και να ξεκινήσει η μόρφωση του κατακρημνίσματος, διαπιστώθηκε ότι τόσο στο πείραμα όσο και στην ανάλυση:

- από κάποιο ποσοστό  $h/H$  και μετά οι παραμορφώσεις συγκεντρώνονται κατά μήκος των 2 ρωγμών χωρίς περαιτέρω αλλαγές στη συμπεριφορά
- η διάρρηξη βγήκε στην επιφάνεια σε απόσταση  $d/H \approx 0.3$
- η γωνία με την οποία η διάρρηξη κινήθηκε μες στο έδαφος ήταν περίπου  $75^\circ$
- Το πλάτος του κατακρημνίσματος ήταν περίπου  $0.65H$

Χαρακτηριστικά στάδια του διάδοσης της διάρρηξης στο ελεύθερο πεδίο παρουσιάζονται στο **Σχήμα 2.5** και στο **Σχήμα 2.6**.

## 2.2.2 Αλληλεπίδραση της κανονικής διάρρηξης με άκαμπτο τετραγωνικό θεμέλιο (25 x 25 cm<sup>2</sup>)

Το θεμέλιο τοποθετήθηκε με τέτοιο τρόπο, ώστε το κέντρο του να συμπίπτει με το αναμενόμενο σημείο εμφάνισης της ρωγμής ελεύθερου πεδίου στην επιφάνεια.

Κατά την σταδιακή επιβολή της μετατόπισης παρατηρήθηκαν τα εξής :

- $h = 0.5 \text{ cm}$  ( $h / H = 0.7 \%$ , **Σχήμα 2.7 β**): Όπως και στο ελεύθερο πεδίο, η ρωγμή δεν έχει ακόμη σχηματιστεί.

- $h = 0.9 \text{ cm}$  ( $h / H = 1.2 \%$ , **Σχήμα 2.8 α**): Η ρωγμή έχει πλέον μορφοποιηθεί και εμφανιστεί στην επιφάνεια ακριβώς δίπλα στο θεμέλιο. Η αύξηση της κλίσης της διάρρηξης κατά τη διάδοσή της δια μέσου του εδάφους γίνεται και εδώ φανερή.

- $h = 1.4 \text{ cm}$  ( $h / H = 1.9 \%$ , **Σχήμα 2.8 β**): Σε αυτό το στάδιο ξεκινά η μόρφωση του κατακρημνίσματος. Παρατηρείται επίσης μία ήπια διακλάδωση της ρωγμής και κάποιες μετατοπίσεις της επιφάνειας του εδάφους.

- $h = 2.0 \text{ cm}$  ( $h / H = 2.7 \%$ , **Σχήμα 2.9 α**): Το κατακρημνισμα έχει σχηματιστεί πλήρως, ενώ το αριστερό άκρο του θεμελίου αποκολλάται από το υποκείμενο έδαφος. Οι επιφανειακές μετατοπίσεις του εδάφους διακρίνονται έντονα, αλλά το θεμέλιο συμπεριφέρεται πολύ καλά: Η αποκόλληση του αριστερού άκρου από το υποκείμενο έδαφος, όπως και η στροφή του θεμελίου, είναι ακόμα πολύ μικρές, σχεδόν ανεπαίσθητες.

- $h = 3.0 \text{ cm}$  ( $h / H = 4.0 \%$ , **Σχήμα 2.9 β**): Το αποκολληθούν τμήμα του θεμελίου είναι πλέον μεγαλύτερο, ενώ η ρωγμή φαίνεται ότι εκτρέπει.

•  $h \geq 5.4 \text{ cm}$  ( $h / H \geq 4.0 \%$ , **Σχήμα 2.10 α**, **Σχήμα 2.10 β**): το  $\frac{1}{4}$  του θεμελίου στην αριστερή πλευρά έχει αποκολληθεί. Το δεξί άκρο του αρχίζει να χάνει και αυτό επαφή από το υποκείμενο έδαφος και καταλήγει να αποκολλάται σε μήκος περίπου ίσο με το  $\frac{1}{4}$  του θεμελίου. Η στροφή του θεμελίου είναι πλέον έντονη. Από τις πανοραμικές φωτογραφίες φαίνεται η ολίσθηση του θεμελίου.

Στον **πίνακα 4** παρουσιάζονται οι παραπάνω παρατηρήσεις:

**Πίνακας 4**

ΘΕΣΗ	h(mm)	h/H (%)	Παρατηρήσεις ελεύθερου πεδίου	Παρατηρήσεις αλληλεπίδρασης
0	0	0		
1	5	0.7	Η διάρρηξη δεν είναι ακόμη ορατή	η διάρρηξη δεν είναι ακόμη ορατή
2	9	1.3	Η διάρρηξη έχει φτάσει στην επιφάνεια. Φαινόμενο διάθλασης	Η διάρρηξη έχει φτάσει στην επιφάνεια. Φαινόμενο διάθλασης και εκτροπή ρωγμής
3	14	2.0	Διακλάδωση ρωγμής	Ήπια διακλάδωση ρωγμής και μόρφωση κατακρημνίσματος.
4	20	2.8	Σχηματισμός <sup>3</sup> ρωγμών, μόρφωση κατακρημνίσματος	Μικρή αποκόλληση θεμελίου
5	30	5.0	Καμία περαιτέρω ποιοτική διαφορά	Εκτενέστερη αποκόλληση, προσπάθεια ρωγμής για εκτροπή με διακλάδωση κοντά στην επιφάνεια
6	54	5.6		Το μισό θεμέλιο έχει αποκολληθεί. Έντονη στροφή. Ολίσθηση θεμελίου
7	64	9.0		



Συνοπτικά, παρατηρείται μικρή εκτροπή της διάρρηξης προς τη μεριά του κατερχόμενου τεμάχους. Η αύξηση της επιβαλλόμενης μετατόπισης οδηγεί σε απώλεια στήριξης στην αριστερή άκρη του θεμελίου. Για πολύ μεγάλες μετακινήσεις ( $\Delta h > 5.4 \text{ cm}$ ) παρατηρείται αποκόλληση και στο δεξιό άκρο του θεμελίου.

Η ανάλυση των φωτογραφιών με το λογισμικό GeoPIV image analysis θα μπορούσε να οδηγήσει σε καλύτερα συμπεράσματα αναφορικά με το προφίλ των μετακινήσεων. Δυστυχώς, όμως, ο φωτισμός του χώρου και ο τρόπος λήψης των φωτογραφιών δεν επέτρεψαν την εξαγωγή αξιοποιήσιμων αποτελεσμάτων.

### **2.2.3 Ανάστροφη διάρρηξη**

Μετά την ολοκλήρωση αυτής της δοκιμής, ανεστράφη η κίνηση του κινητού τμήματος της συσκευής, έτσι ώστε να ελεγχθεί η συμπεριφορά του κουτιού. Σύμφωνα με τις αναλύσεις με πεπερασμένα στοιχεία που είχαν πραγματοποιηθεί κατά τον σχεδιασμό του κουτιού, αναμενόταν μία διαστολή των παραπλευρών τοιχωμάτων κατά 9 mm, καθώς κατά την ανάστροφη διάρρηξη, οι συνθήκες στις οποίες υποβάλλονται τα τοιχώματα του κιβωτίου μετατρέπονται από ουδέτερες σε παθητικές.

Κατά τις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν σε συγκεκριμένα σημεία του κιβωτίου κατά τη διαδικασία της διάστρωσης, μετά τη κανονική και μετά την ανάστροφη διάρρηξη, παρατηρήθηκε ότι οι ουδέτερες ωθήσεις προκάλεσαν αρχικά μία πολύ μικρή διαστολή των παράπλευρων τοιχωμάτων, ενώ, στη συνέχεια, κατά την κανονική διάρρηξη, οι ενεργητικές ωθήσεις άφηναν το κουτί ανεπηρέαστο. Η

ανάστροφη διάρρηξη όμως, με την παθητική κατάσταση την οποία προκάλεσε, ώθησε τα τοιχώματα προς τα έξω κατά 1 cm περίπου.

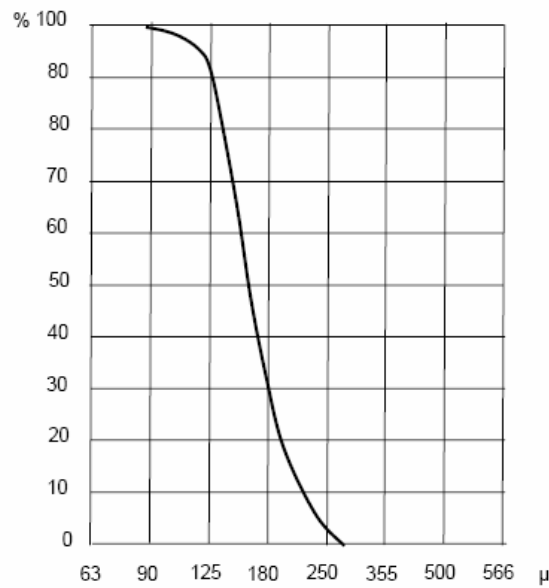
Η παρατηρηθείσα συμπεριφορά του κιβωτίου συμπίπτει απόλυτα με την αριθμητική προσομοίωση της συμπεριφοράς του, όπως φαίνεται και στις εικόνες (**Σχήμα 2.12**). Η ανάλυση έγινε με το λογισμικό ABAQUS, και προέβλεπε οριζόντια μετατόπιση του κάθε τοιχώματος 9 mm περίπου, όσο δηλαδή παρατηρήθηκε και στο πείραμα.

## 2.3 Αποτελέσματα

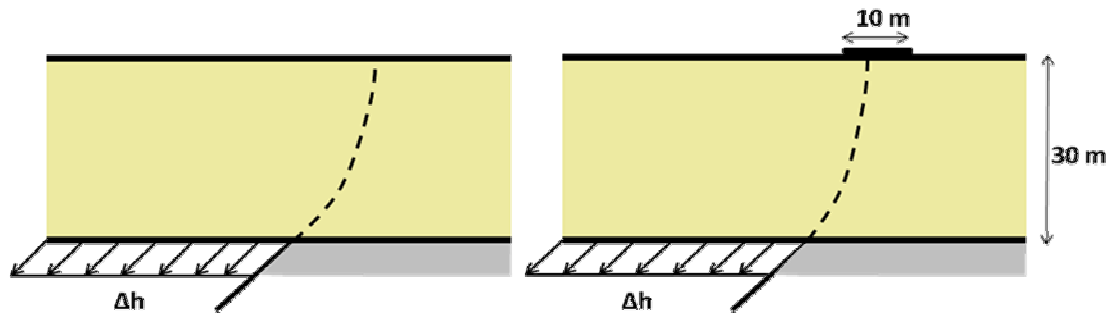
Στο **Σχήμα 2.13** δείχνεται η εξέλιξη της οριζόντιας  $\Delta x$  και κατακόρυφης μετακίνησης  $\Delta y$  και της στροφή  $\theta$  του θεμελίου, συναρτήσει της επιβαλλόμενης μετακίνησης  $\Delta h$  — όλα τα μεγέθη αναφέρονται σε κλίμακα πρωτοτύπου. Αύξηση της μετακίνησης του ρήγματος έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση τόσο της μετακίνησης όσο και της στροφής του θεμελίου. Η αύξηση αυτή είναι ομαλή για τιμές της  $\Delta h$  μικρότερες ή ίσες των 5.4 cm, παρατηρείται όμως απότομο άλμα των παραπάνω τιμών για  $\Delta h > 5.4$  cm. Αυτό οφείλεται στην δημιουργία νέας επιφάνειας αστοχίας, όχι λόγω της διάδοσης της διάρρηξης, αλλά λόγω αστοχίας του πρανούς στην άκρη του οποίου εδράζεται η πλάκα θεμελίωσης. Λόγω της στροφής του θεμελίου και της απώλειας στήριξης και στην δεξιά άκρη του, το ενεργό πλάτος του θεμελίου μειώνεται στο 1/3 του συνολικού, και συνεπώς η αυξημένη τάση έδρασης του θεμελίου στην άκρη του πρανούς είναι αυτή που προκαλεί την αστοχία.

Στο **Σχήμα 2.14** εστιάζουμε στην περιοχή έδρασης της πλάκας θεμελίωσης, για  $\Delta h = 6.4$  cm. Η κόκκινη γραμμή αντιστοιχεί στην ζώνη διάρρηξης του ρήγματος και η γαλάζια στην αστοχία του (διαμορφωμένου από την διάρρηξη) πρανούς λόγω του συγκεντρωμένου φορτίου του θεμελίου στην κορυφή του. Τέλος, στο **Σχήμα 2.15** δείχνεται η στροφή της πλάκας θεμελίωσης για  $\Delta h = 6.4$  cm, καθώς και τα πρνή που δημιουργήθηκαν κατά την διάδοση της μετακίνησης του ρήγματος στην επιφάνεια του εδαφικού ομοιώματος

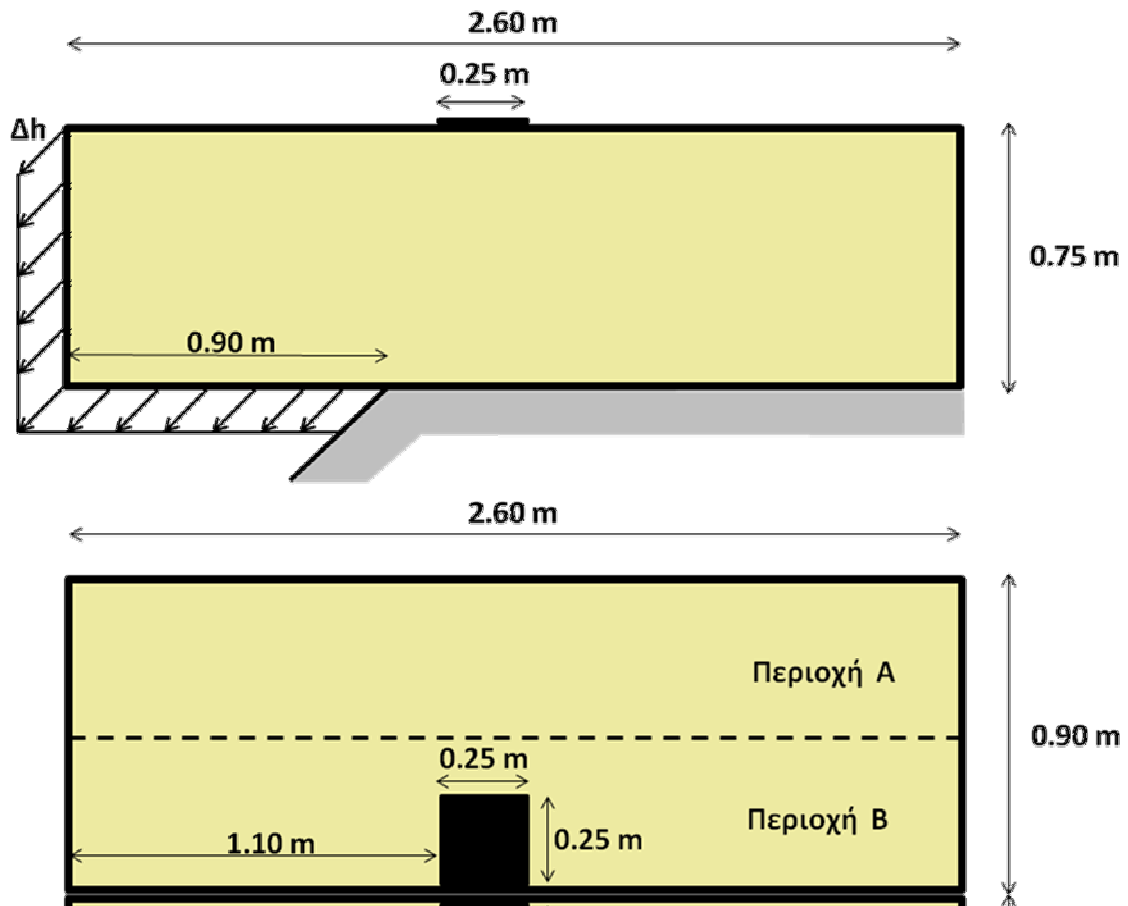




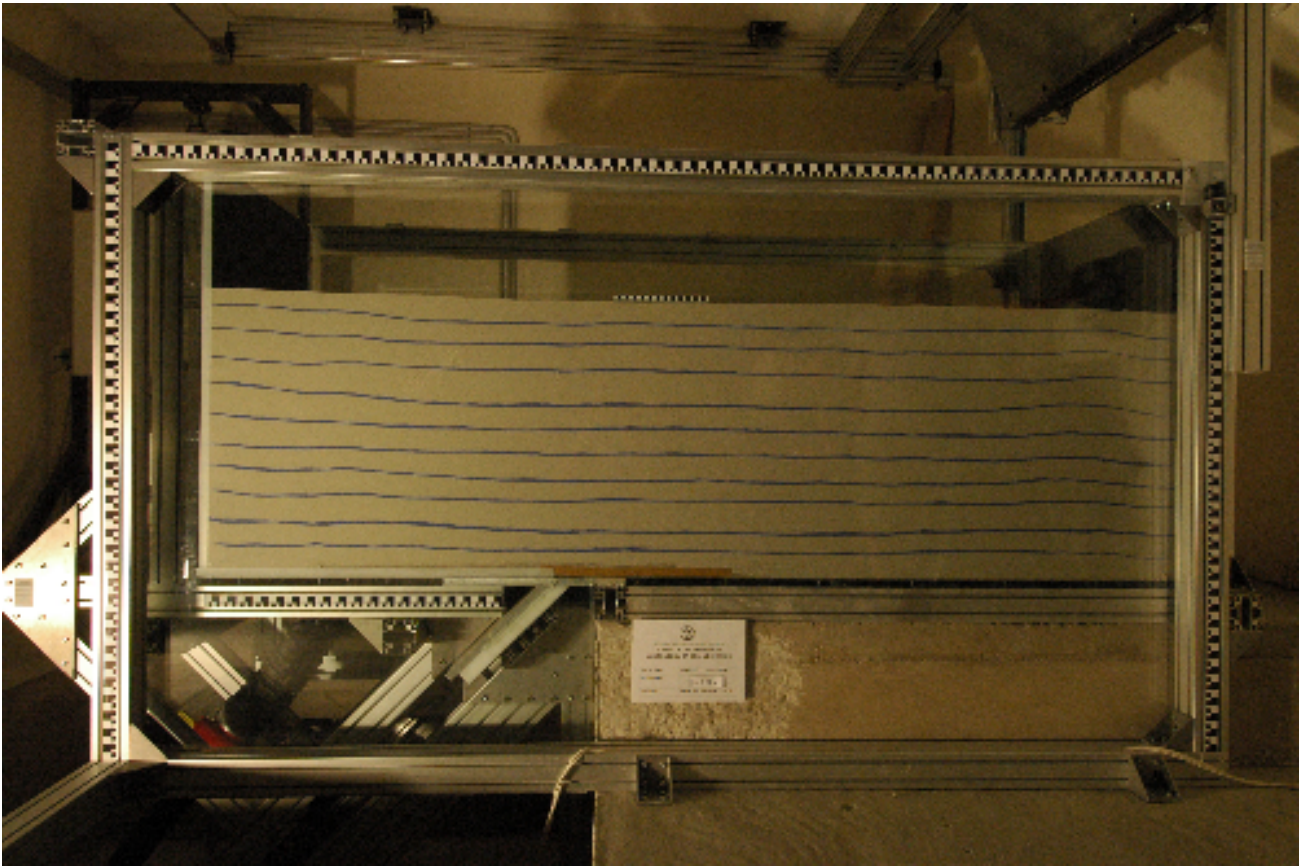
**Σχήμα 2.1** Η κοκκομετρική καμπύλη της άμμου Longstone Sand, η οποία χρησιμοποιήθηκε στο πείραμα.



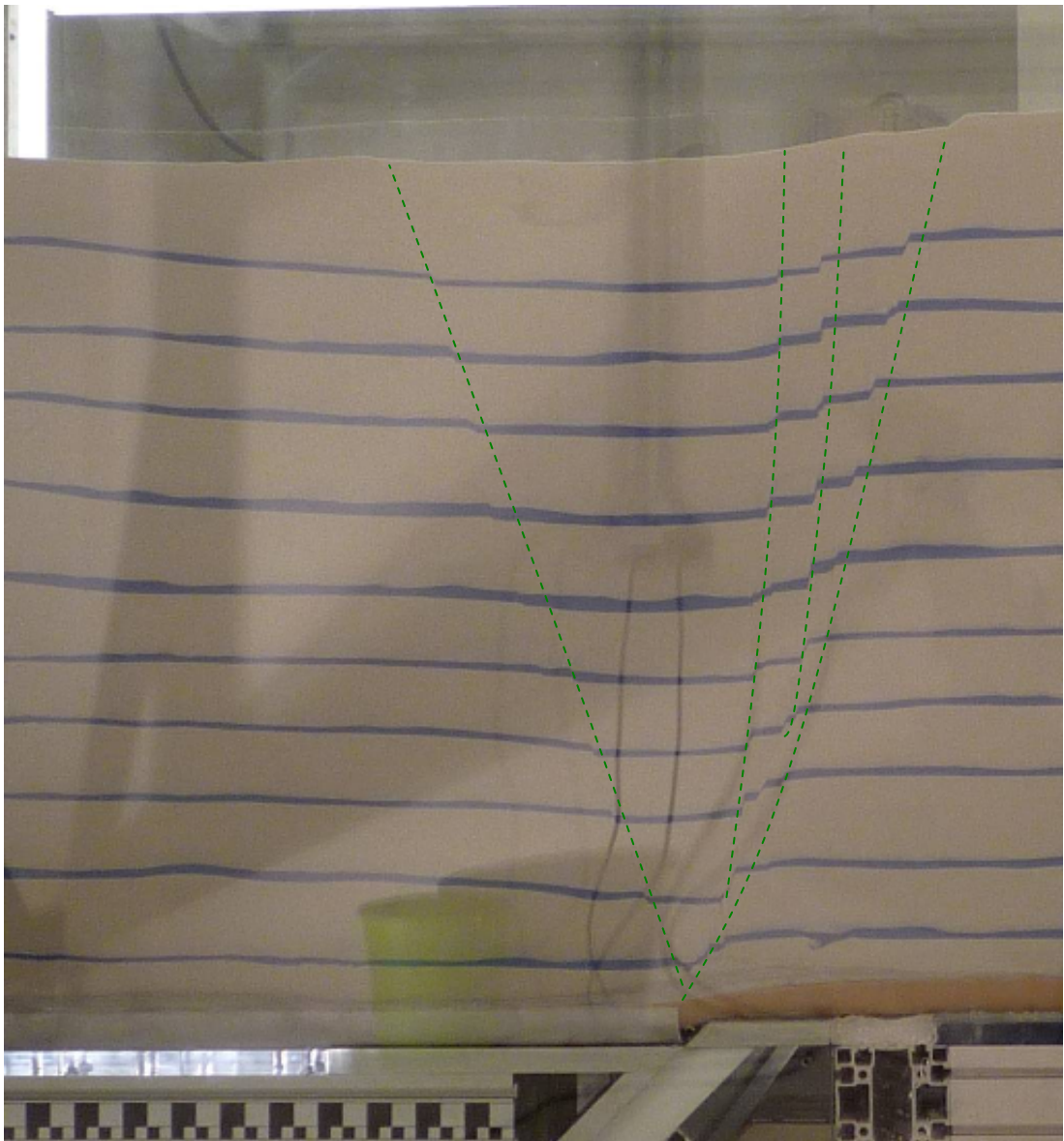
**Σχήμα 2.2** Τα δύο προβλήματα που εξετάζονται στο πείραμα: (α) διάδοση διάρρηξης κανονικού ρήγματος κλίσης  $45^\circ$  διαμέσου πυκνού αμμώδους εδαφικού σχηματισμού βάθους 30 m, και (β) αλληλεπίδραση της διάρρηξης κανονικού ρήγματος με τετραγωνική επιφανειακή θεμελίωση πλάτους 10 m [με  $\Delta h$  συμβολίζεται η μετακίνηση του ρήγματος].



**Σχήμα 2.3** Όψη (α) και κάτοψη (β) του πειραματικού ομοιώματος. Οι περιοχές Α και Β αντιστοιχούν στις δύο προσομοιώσεις. Περιοχή Α: διάδοση διάρρηξης ρήγματος περίπου σε συνθήκες ελεύθερου πεδίου. Περιοχή Β : αλληλεπίδραση της διάρρηξης με τετραγωνική επιφανειακή θεμελίωση.

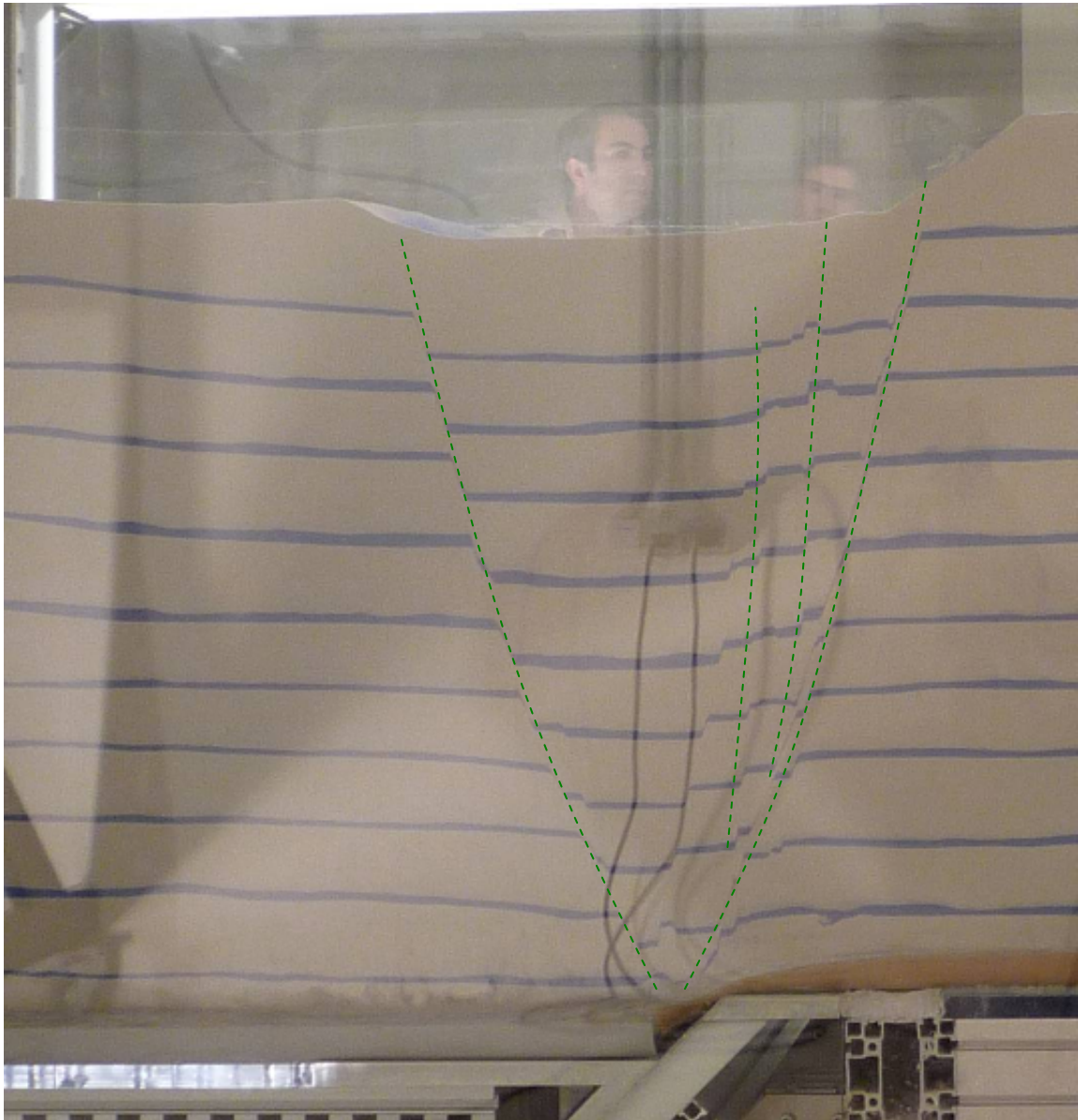


**Σχήμα 2.4** Το ολοκληρωμένο εδαφικό ομοίωμα με την άκαμπτη πλάκα θεμελίωσης στην επιφάνεια.



**Σχήμα 2.5** Διάδοση της ελεύθερης διάρρηξης για  $h = 2.0$  cm

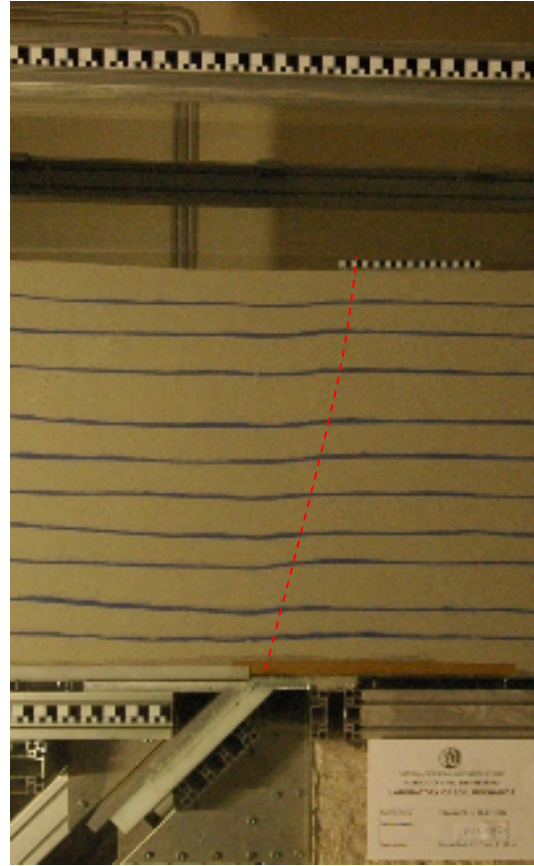




**Σχήμα 2.6** Διάδοση της ελεύθερης διάρρηξης για  $h = 6.4$  cm



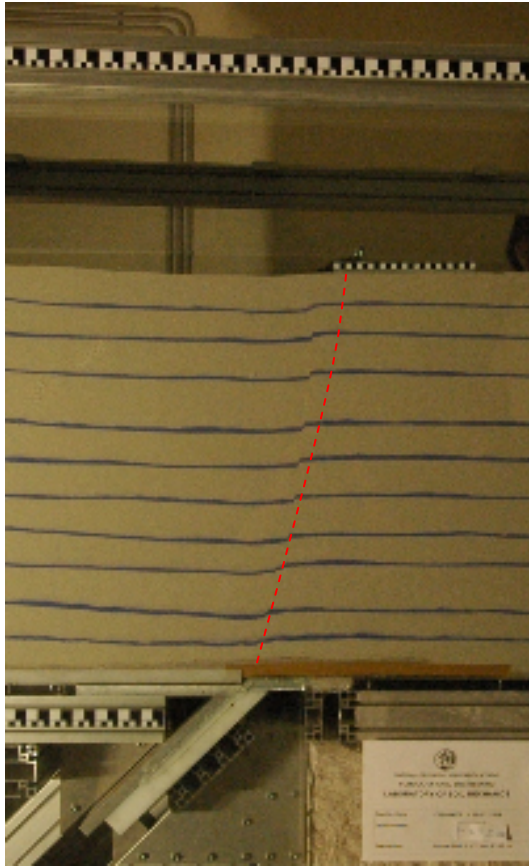
(α) Μετακίνηση Ρήγματος  $\Delta h = 0 \text{ cm}$



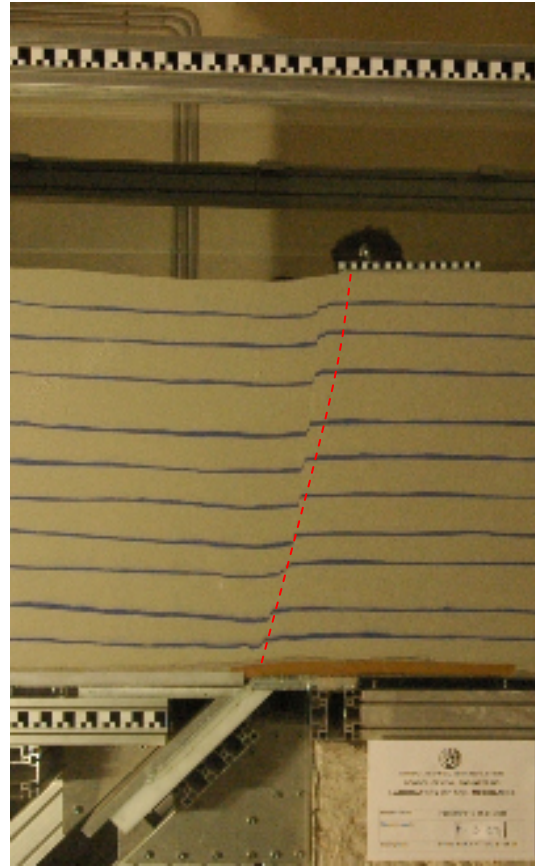
(β) Μετακίνηση Ρήγματος  $\Delta h = 0.5 \text{ cm}$

**Σχήμα 2.7** Στιγμιότυπα του πειραματικού ομοιώματος για μετακίνηση ρήγματος :

(α)  $\Delta h = 0 \text{ cm}$  (δηλαδή πριν από την έναρξη του πειράματος), και (β)  $\Delta h = 0.5 \text{ cm}$ .

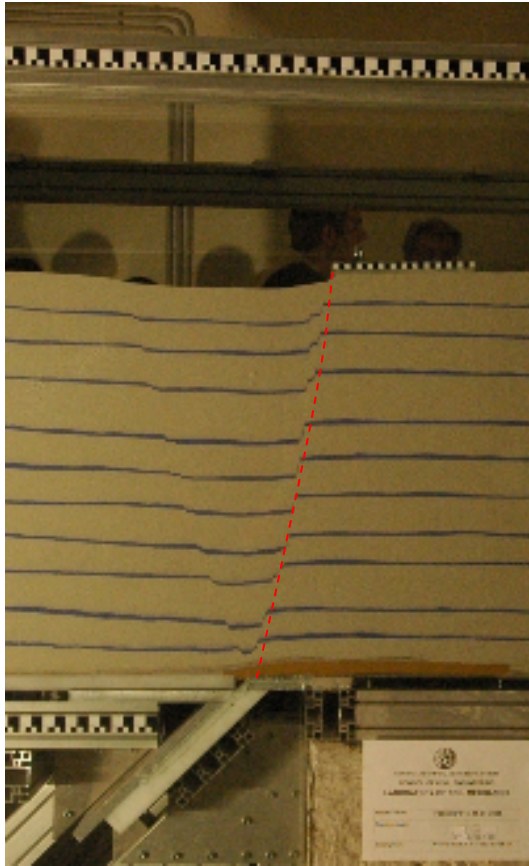


(α) Μετακίνηση Ρήγματος  $\Delta h = 0.9 \text{ cm}$

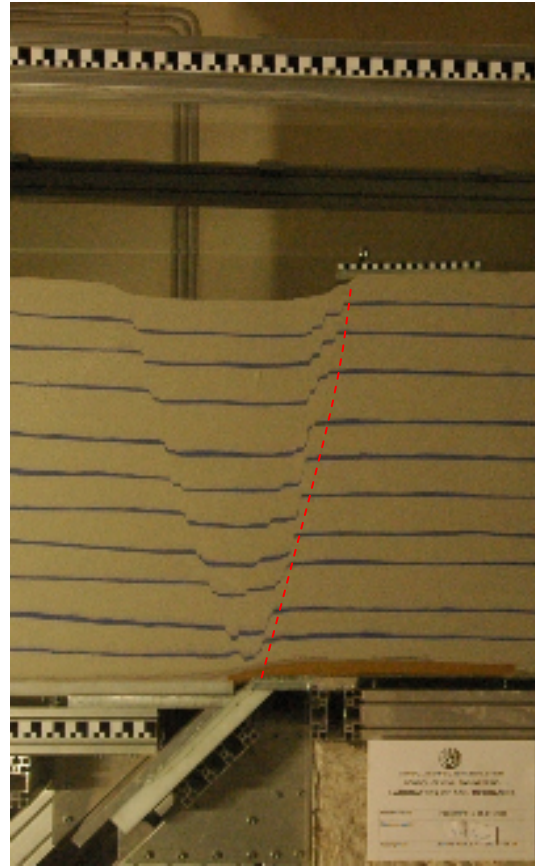


(β) Μετακίνηση Ρήγματος  $\Delta h = 1.4 \text{ cm}$

**Σχήμα 2.8** Στιγμιότυπα του πειραματικού ομοιώματος για μετακίνηση ρήγματος :  
(α)  $\Delta h = 0.9 \text{ cm}$ , και (β)  $\Delta h = 1.4 \text{ cm}$ .

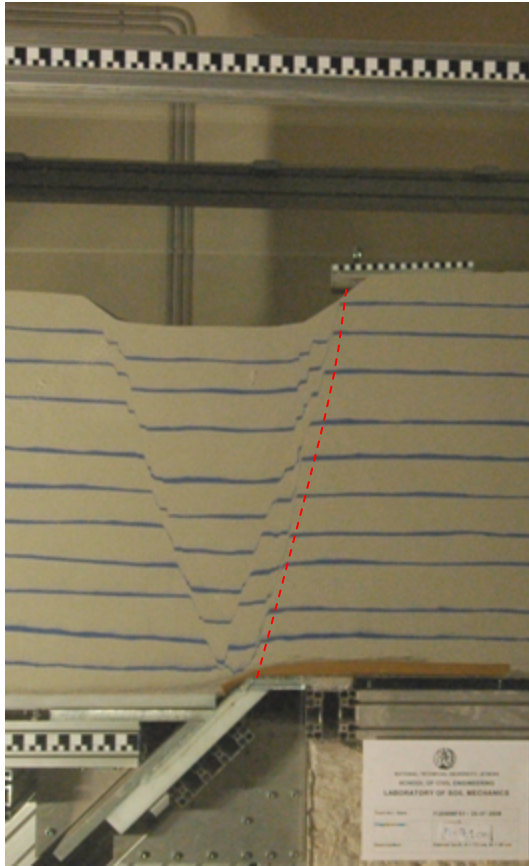


(α) Μετακίνηση Ρήγματος  $\Delta h = 2.0 \text{ cm}$

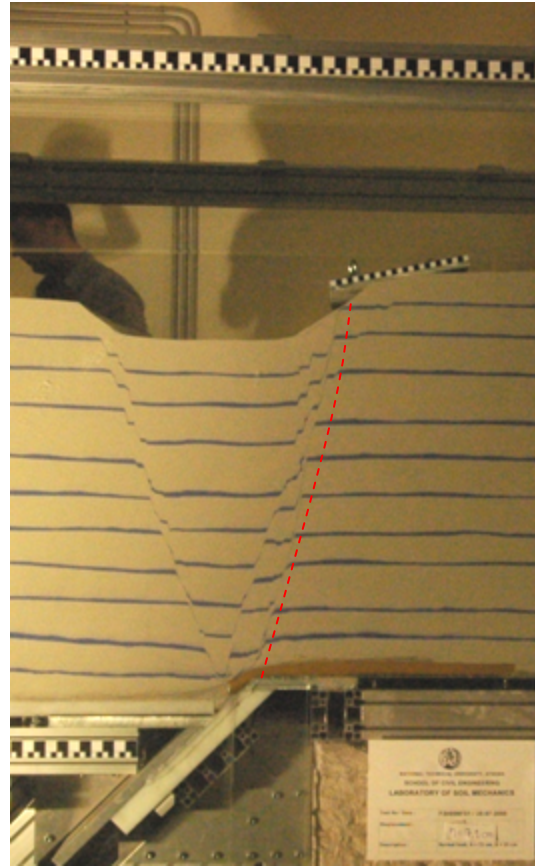


(β) Μετακίνηση Ρήγματος  $\Delta h = 3.0 \text{ cm}$

**Σχήμα 2.9** Στιγμιότυπα του πειραματικού ομοιώματος για μετακίνηση ρήγματος :  
(α)  $\Delta h = 2.0 \text{ cm}$  και (β)  $\Delta h = 3.0 \text{ cm}$ .

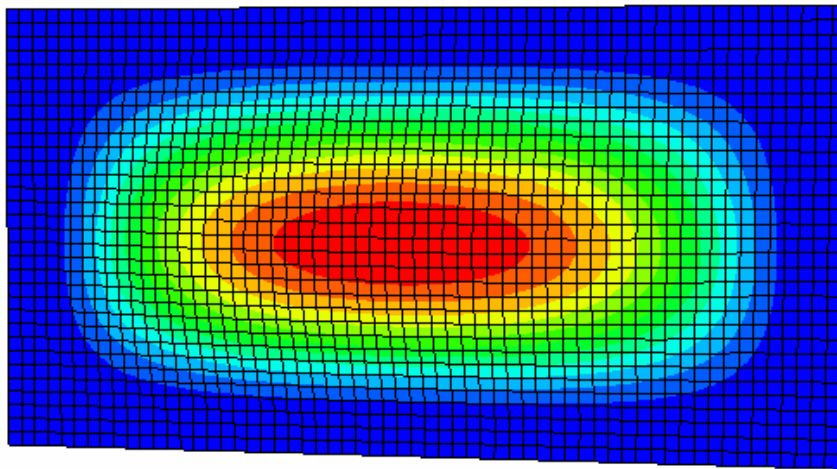
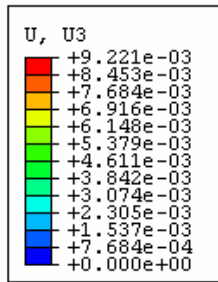


(α) Μετακίνηση Ρήγματος  $\Delta h = 5.4 \text{ cm}$

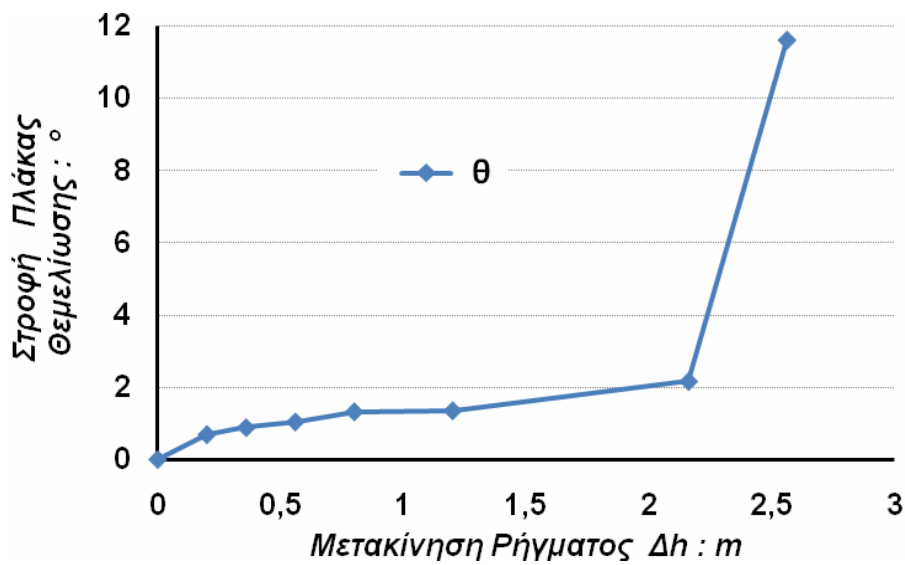
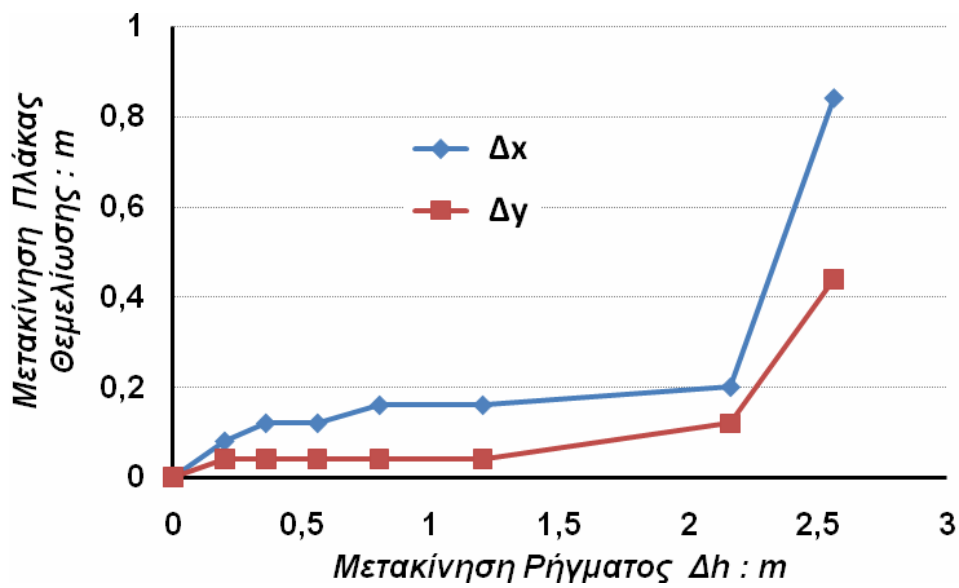


(β) Μετακίνηση Ρήγματος  $\Delta h = 6.4 \text{ cm}$

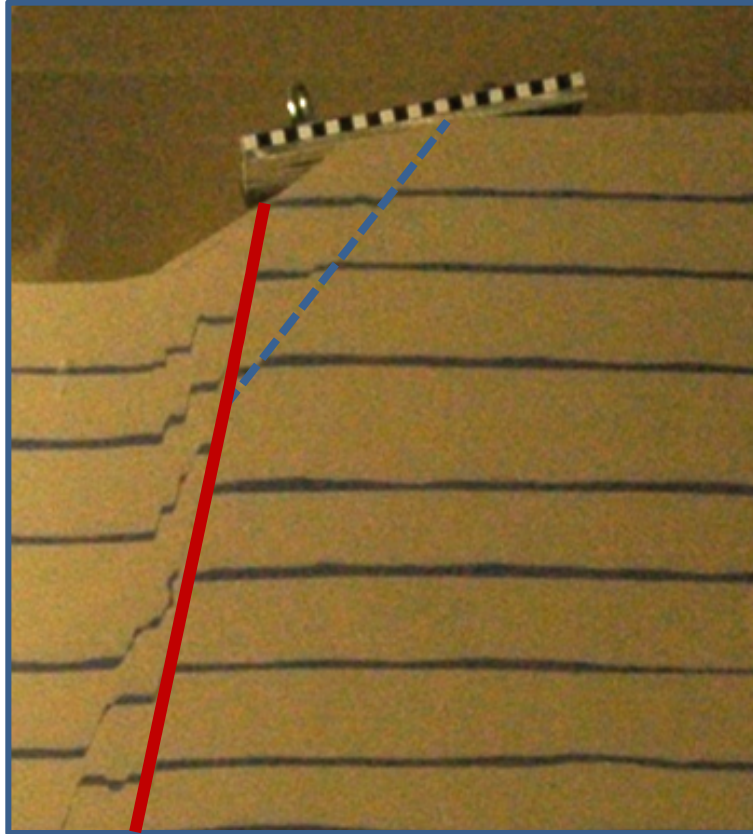
**Σχήμα 10.** Στιγμιότυπα του πειραματικού ομοιώματος για μετακίνηση ρήγματος :  
(α)  $\Delta h = 5.4 \text{ cm}$ , και (β)  $\Delta h = 6.4 \text{ cm}$ .



**Σχήμα 2.12** Αριθμητική προσομοίωση της παραμόρφωση τοιχώματος κιβωτίου

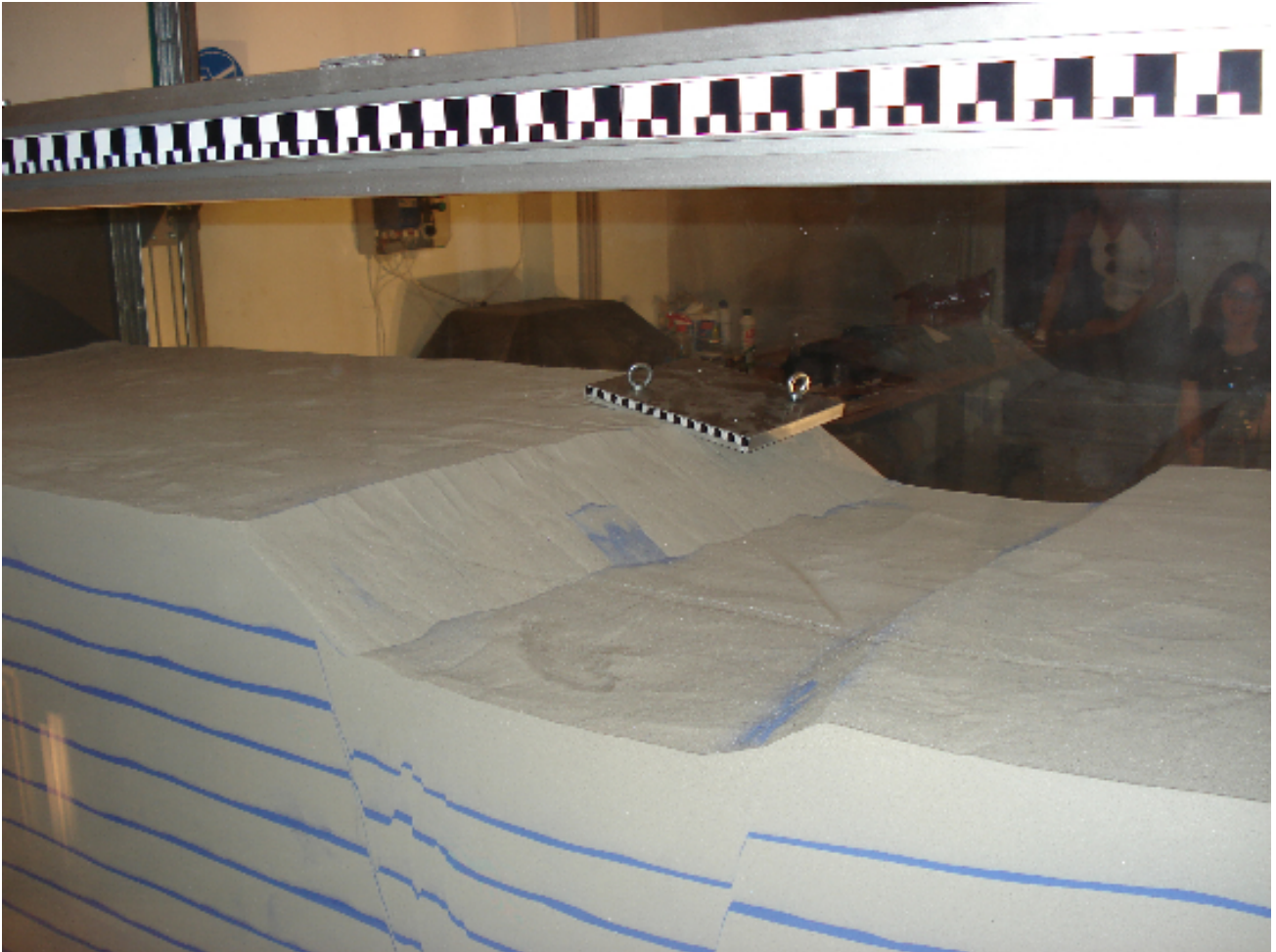


**Σχήμα 2.13** Οριζόντια  $\Delta x$  και κατακόρυφη μετατόπιση  $\Delta y$  και στροφή  $\theta$  της πλάκας θεμελίωσης συναρτήσει της επιβαλλόμενης τεκτονικής μετατόπισης  $\Delta h$ .



**Σχήμα 2.14** Λεπτομέρεια της περιοχής έδρασης της πλάκας θεμελίωσης για  $\Delta h = 2.56$  m. Παρατηρούμε απώλεια στήριξης στο αριστερό άκρο της πλάκας και το ανασήκωμα στο δεξιό του άκρο. Με κόκκινη γραμμή απεικονίζεται η διάδοση της διάρρηξης του ρήγματος και με γαλάζιο η δευτερογενής αστοχία λόγω αυξημένης τάσης στο άκρο του διαμορφωμένου πρανούς.





**Σχήμα 2.15** Η στροφή της πλάκας θεμελίωσης για  $\Delta h = 6.4$  cm, και τα πρηνή που διαμορφώθηκαν στην επιφάνεια του εδαφικού ομοιώματος. Η μόρφωση του κατακρημνίσματος είναι εμφανής.



## Κεφάλαιο 3

# Διάδοση κανονικής τεκτονικής διάρρηξης στο ελεύθερο πεδίο

### 3.0 Εισαγωγή

Για τη διερεύνηση του προβλήματος της διάδοσης της σεισμικής διάρρηξης στο ελεύθερο πεδίο εφαρμόστηκε ανάλυση με το πρόγραμμα ABAQUS σε 3 διαστάσεις.

### 3.1 Αριθμητικό προσομοίωμα

Το αριθμητικό προσομοίωμα παρουσιάζεται στο **Σχήμα 3.1**. Αναπαριστά ένα εδαφικό στρώμα πάχους  $H = 28 \text{ m}$ , στη βάση του οποίου προκαλείται κανονική διάρρηξη λόγω τεκτονικής μετατόπισης. Η γωνία κλίσης της διάρρηξης είναι  $\alpha = 45^\circ$  και το μέγεθος της επιβαλλόμενης μετατόπισης είναι  $h$ . Το συνολικό μήκος του προσομοιώματος είναι  $B = 104 \text{ m}$  και το πλάτος του είναι  $T = 36 \text{ m}$ . Ο λόγος  $B/H = 3.7$  προσεγγίζει ικανοποιητικά τις συστάσεις του Bray (1990), σύμφωνα με τις οποίες ένας λόγος  $B/H = 4$  είναι επαρκής για τη μη εμφάνιση παρασιτικών φαινομένων λόγω της επίδρασης των συνοριακών συνθηκών. Ο κάνναβος παραμένει σε όλο το προσομοίωμα ίδιος, με διαστάσεις στοιχείων  $2 \text{ m} \times 2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$  (μήκος  $\times$  πλάτος  $\times$  ύψος). Η επιβαλλόμενη μετατόπιση επιβάλλεται στο αριστερό τμήμα του προσομοιώματος με μικρά, διαδοχικά βήματα.

Κατά την ανάλυση, υιοθετήθηκε το εξής ελαστοπλαστικό καταστατικό μοντέλο: Κριτήριο αστοχίας Mohr – Coulomb με ισότροπη χαλάρωση. Η χαλάρωση εφαρμόζεται στη συνοχή του εδαφικού δοκιμίου,  $c$ , στη γωνία τριβής,  $\varphi$ , και στη γωνία διαστολικότητας,  $\psi$ . Αν  $\gamma_f$  η πλαστική παραμόρφωση κατά την οποία το έδαφος φτάνει την απομένουσα αντοχή του, γίνεται η παραδοχή ότι τα  $c$ ,  $\varphi$ ,  $\psi$ , μειώνονται γραμμικά με την αύξηση της συνολικής πλαστικής παραμόρφωσης μέχρι τις απομένουσες τιμές τους  $c_{res}$ ,  $\varphi_{res}$ ,  $\psi_{res}$ . Οι τιμές αυτές εξαρτώνται από το είδος του εδάφους: Στην περίπτωση εδαφών που δεν παρουσιάζουν σημαντική χαλάρωση, όπως η Ottawa άμμος που χρησιμοποιήθηκε στα πειράματα των Roth et al [1982] και στις σχετικές αναλύσεις [Roth et al 1981,1982], η απομένουσα γωνία διαστολικότητας παραμένει περίπου ίση με την αρχική,  $\psi_{res} \approx \psi$ . Αντιθέτως, στα περισσότερα εδάφη που παρουσιάζουν χαλάρωση, η απομένουσα γωνία διαστολικότητας σχεδόν μηδενίζεται,  $\psi_{res} \approx 0$ . Οι τυπικές τιμές της απομένουσας παραμόρφωσης κυμαίνονται από 5 % έως 15 %, ( $\gamma_f = 5 \% \div 15 \%$ ). Εξίσου σημαντική είναι η παραμόρφωση διαρροής,  $\gamma_y$ , η οποία εξαρτάται από τις παραμέτρους αντοχής και της διατμητικής δυσκαμψίας. Τόσο η παραμόρφωση διαρροής,  $\gamma_y$ , όσο και η απομένουσα παραμόρφωση,  $\gamma_f$ , βαθμονομούνται μέσω αριθμητικής προσομοίωσης του πειράματος απευθείας διάτμησης.

### 3.1.1 Επαλήθευση του καταστατικού μοντέλου και Ανάλυση ευαισθησίας.

Η ικανότητα του καταστατικού μοντέλου να προσομοιώσει την πραγματική εδαφική συμπεριφορά επαληθεύτηκε μέσω μιας σειράς αναλύσεων ιδεατών εδαφικών δειγμάτων υπό απευθείας διάτμηση. Από τις αναλύσεις εξήχθη το συμπέρασμα, ότι το καταστατικό μοντέλο μπορεί να προσομοιώσει επαρκώς τον κύριο τρόπο παραμόρφωσης του υπό μελέτη προβλήματος και να θεωρηθεί μία πολύ λογική απλοποίηση της πολύπλοκης εδαφικής συμπεριφοράς [Anastasopoulos 2005].

Όσον αφορά στην ανάλυση ευαισθησίας, κατ' αρχάς ελέγχθηκε η επιρροή του λόγου  $B / H$ . Ο λόγος αυτός μεταβλήθηκε από  $5 : 1$  μέχρι  $2 : 1$ . Η επιρροή των συνόρων στο μοντέλο έγινε έντονα αισθητή, μόνο όταν ο λόγος πήρε την τιμή  $2 : 1$ . Τα αποτελέσματα αυτά είναι σε συμφωνία με τα συμπεράσματα του Bray [1990] και κατά συνέπεια, η επιλογή λόγου  $B / H \approx 4 : 1$  ( $104 / 28$ ) κρίνεται επαρκής.

Επιπρόσθετα ελέγχθηκε και η επίδραση της πυκνότητας του κάνναβου μέσω σύγκρισης πέντε προσομοιωμάτων με το μέγεθος των στοιχείων του κάνναβου να κυμαίνεται από  $0.5 \text{ m} \times 0.5 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$  μέχρι  $5 \text{ m} \times 5 \text{ m} \times 5 \text{ m}$ . Όπως ήταν αναμενόμενο, πυκνότερος κάνναβος οδηγούσε σε καλύτερο εντοπισμό της ζώνης παραμόρφωσης, ενώ ο αραιός κάνναβος παρουσίαζε την παραμόρφωση εξαπλωμένη σε μεγαλύτερη έκταση, φαινόμενο λογικό, καθώς η ζώνη διάρρηξης μπορεί να εμφανιστεί τόσο λεπτή, όσο η διάσταση του στοιχείου. Η διαφορά ανάμεσα στον κάνναβο  $0.5 \text{ m}$  και  $1 \text{ m}$  δεν ήταν σημαντική. Αραιότερος κάνναβος παρουσίαζε τη ζώνη επιρροή της διάρρηξης πιο εξαπλωμένη.

Παρόλα αυτά, στις αναλύσεις που θα παρουσιαστούν, ο κάνναβος που υιοθετήθηκε είναι σχετικά αραιός  $2 \text{ m} \times 2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$ , καθώς το μέγεθος του προσομοιώματος είναι πολύ μεγάλο.

### 3.2 Αποτελέσματα

Σε αυτό το υποκεφάλαιο θα παρουσιαστούν τα κυριότερα αποτελέσματα της ανάλυσης της διάδοσης κανονικής διάρρηξης λόγω τεκτονικής μετατόπισης υπό γωνία  $45^\circ$  και κατακόρυφης κανονικοποιημένης μετατόπισης  $h/H$  από 0.35 % μέχρι 9.3 %. (Δηλαδή, σε δοκίμιο πάχους  $H = 28 \text{ m}$  επιβάλλεται κατακόρυφη μετατόπιση  $h$  από 0.1 έως 2.6 m).

Για τις παραμέτρους αντοχής ( $\varphi$ ) και διαστολικότητας ( $\psi$ ) του εδάφους, έγιναν οι εξής παραδοχές:

- $\varphi = 54^\circ$ ,  $\varphi_{res} = 35^\circ$ ,  $\psi = 22^\circ$ ,  $\psi_{res} = 3^\circ$  και  $\gamma_f = 5\%$

Η συνοχή είναι ίση με το 0,  $c = 0$ , το μέτρο διάτμησης  $G$  αυξάνεται γραμμικά με το βάθος και η παραμόρφωση διαρροής  $\gamma_y$  διατηρείται σταθερή και ίση με 1.5 %

Χαρακτηριστικές εικόνες της διάδοσης της διάρρηξης παρουσιάζονται στο **Σχήμα 3.2** και στο **Σχήμα 3.3**. Παρατίθενται τα στιγμιότυπα του παραμορφωμένου καννάβου και η συσσωρευμένη πλαστική παραμόρφωση στα διαδοχικά στάδια της επιβολής της μετατόπισης. Παρατηρείται ότι η διάρρηξη καταφέρνει να φτάσει την επιφάνεια, όταν η κανονικοποιημένη επιβαλλόμενη μετατόπιση  $h/H$  έχει πάρει την τιμή 1.8 %, όταν δηλαδή το βραχώδες υπόβαθρο έχει μετατοπιστεί προς τα κάτω κατά 0.5 m. Η ανάπτυξη της δευτερεύουσας διάρρηξης ξεκινά, όταν ο λόγος  $h/H$  έχει πάρει

την τιμή 2.1 % ,ενώ η διάδοση της μέχρι την επιφάνεια ολοκληρώνεται, αφού ο λόγος  $h / H$  έχει γίνει ίσος με 5.0 %. Από αυτή τη τιμή του λόγου  $h / H$  και μετά οι παραμορφώσεις συσσωρεύονται κατά μήκος των ήδη σχηματισμένων ζωνών διατμήσεως, χωρίς περαιτέρω διαφορές. Ανάμεσα στην πρωτεύουσα και στη δευτερεύουσα διάρρηξη παρατηρείται η μόρφωση του κατακρημνίσματος (graben).

Στο **Σχήμα 3.4** παρουσιάζονται τα προφίλ των οριζοντίων,  $\Delta x$ , και κατακόρυφων μετατοπίσεων,  $\Delta z$ , κατά μήκος της επιφάνειας του εδάφους. Η οριζόντια απόσταση,  $x$ , μετράται από το αριστερό άκρο του προσομοιώματος. Επίσης, παρουσιάζεται και η μεταβολή της γωνιακής παραμόρφωσης,  $\beta$ , της επιφάνειας του εδάφους κατά μήκος του προσομοιώματος. Η γωνιακή παραμόρφωση  $\beta$  χαρακτηρίζει την παραμόρφωση της επιφάνειας του εδάφους: αποτελεί μία χρήσιμη παράμετρο για την εκτίμηση της πιθανότητας βλάβης κατασκευών, οι οποίες βρίσκονται πάνω ή κοντά στη διάρρηξη. Ανάμεσα σε δύο σημεία της επιφάνειας του εδάφους, A και B, η γωνιακή παραμόρφωση του εδάφους ορίζεται ως:

$$\beta = \frac{\Delta z^A - \Delta z^B}{x^A - x^B}$$

, όπου  $\Delta z^A$  και  $\Delta z^B$  η κατακόρυφη μετατόπιση των σημείων A και B, και  $x^A$ ,  $x^B$  οι οριζόντιες συντεταγμένες των αντίστοιχων σημείων.

Παρατηρείται ότι μέχρι η κανονικοποιημένη επιβαλλόμενη μετατόπιση να πάρει την τιμή  $h / H = 0.7 \%$  η επιφάνεια του εδάφους παραμορφώνεται ομαλά, παρουσιάζοντας μια ήπια καμπυλότητα. Όταν  $h / H = 1.0 \%$  η πρωτεύουσα διάρρηξη μόλις που φτάνει στην επιφάνεια στη θέση  $x = 46$  m. Αν η διάρρηξη διαδίδετο

κατακόρυφα, τότε θα εμφανιζόταν στην επιφάνεια στη θέση  $x = 36$  m, ενώ αν ακολουθούσε ίδια κλίση με την αρχικώς επιβαλλόμενη ( $\alpha = 45^\circ$ ), τότε θα εμφανιζόταν στη θέση  $x = 64$  m. Ωστόσο, η κλίση της διάρρηξης αυξάνεται κατά τη διάδοση της διαμέσου του εδάφους και η μέση κλίση της παίρνει την τιμή  $\vartheta = \arctan ( H / ( x - x_{\text{initial}} ) ) = \arctan ( 28 / ( 46 - 36 ) ) \approx 70^\circ$

Η δευτερεύουσα διάρρηξη φτάνει στην επιφάνεια όταν  $h / H > 3.5$  %. Η θέση εμφάνισης της είναι η  $x = 24$  m και η μέση κλίση της είναι  $\vartheta \approx 67^\circ$ . Το ήδη υπό μόνρφωση κατακρήμνισμα (graben) γίνεται φανερό σε μεγαλύτερες επιβαλλόμενες μετατοπίσεις, το δε πλάτος του είναι περίπου 22 m ( $\approx 0.78 H$ ). Οι δύο αιχμές που παρουσιάζονται στο διάγραμμα γωνιακής παραμόρφωσης καταδεικνύουν τις θέσεις εμφάνισης της πρωτεύουσας και δευτερεύουσας διάρρηξης στην επιφάνεια του εδάφους. Εντυπωσιακό είναι το πώς οι παραμορφώσεις συγκεντρώνονται στις 2 αυτές περιοχές αφήνοντας το υπόλοιπο της επιφάνειας ανεπηρέαστο. Το fault scarp είναι περίπου 3.5 m (δηλαδή περίπου ίσο με  $1.3 h$ ). Τα αποτελέσματα αυτά είναι σε συμφωνία με τις αναλύσεις του Ι. Αναστασόπουλου (I. Anastasopoulos, 2005) για πυκνή άμμο (scarp =  $1.25h$  και εμφάνιση στη επιφάνεια για  $h / H = 3\%$ )

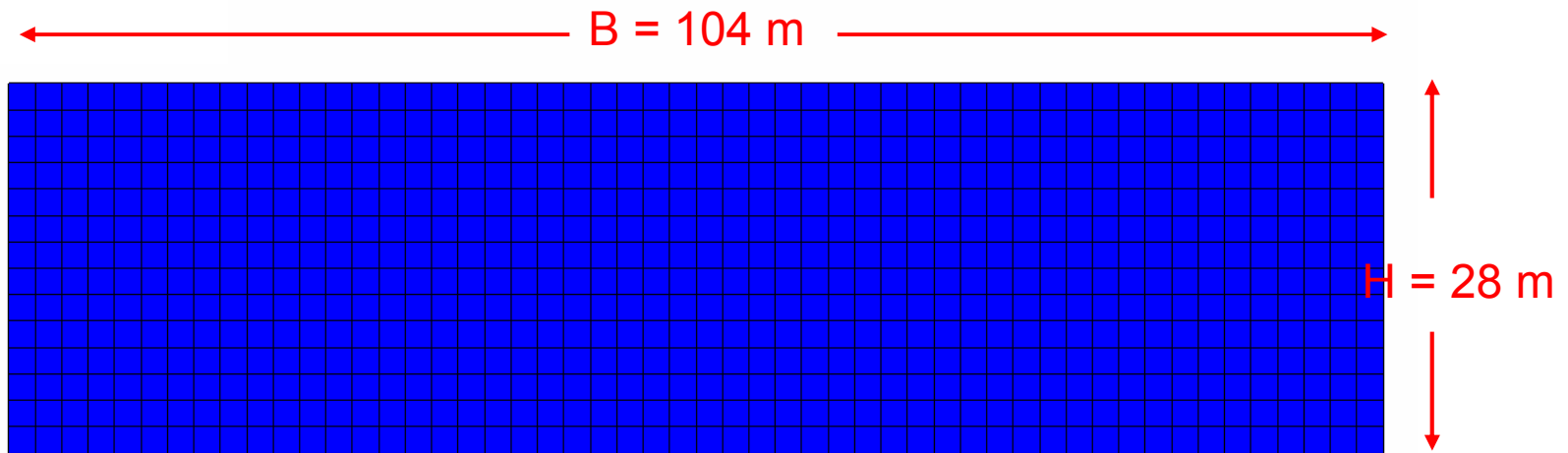


### 3.3 Συμπεράσματα

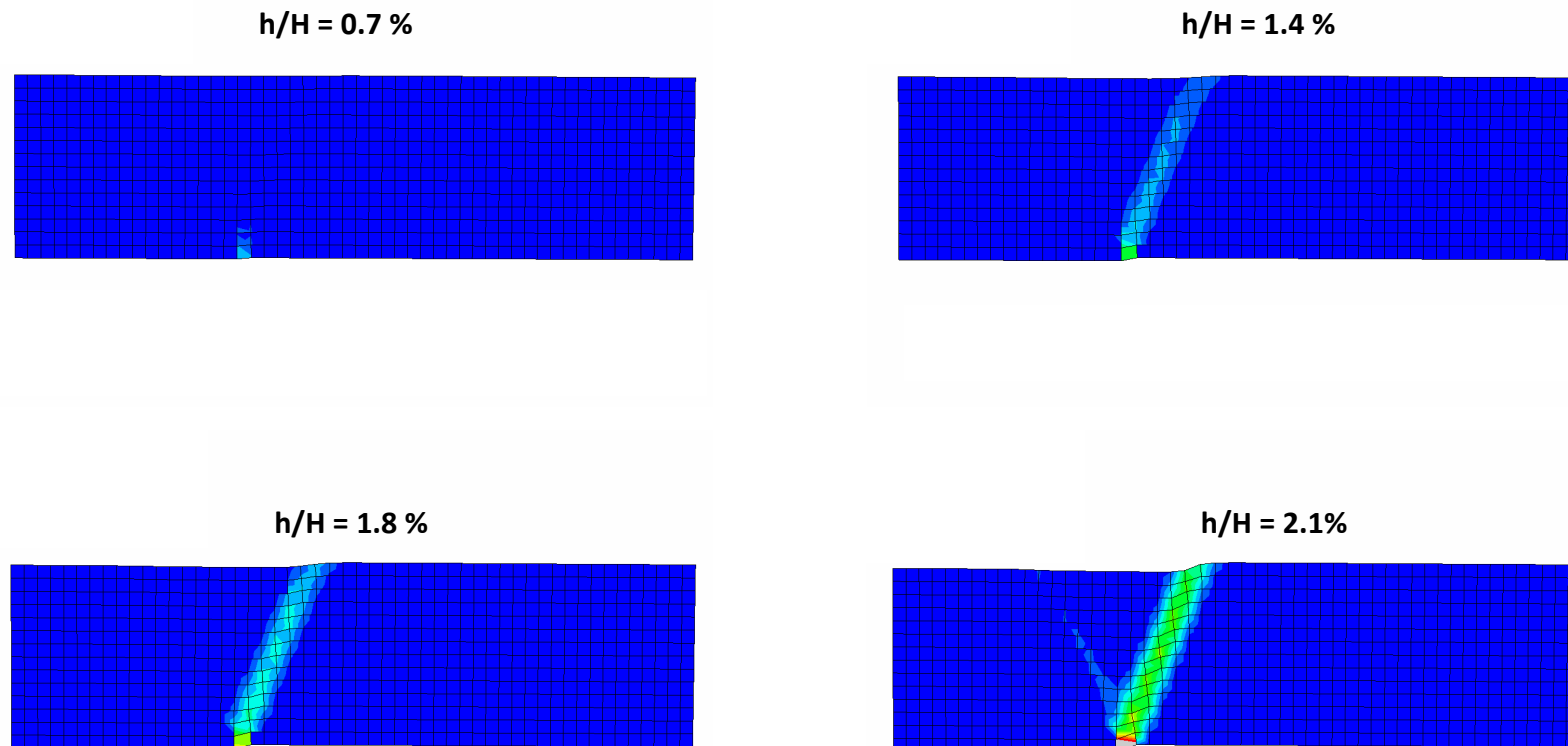
Τα κυριότερα συμπεράσματα της ανάλυσης στο ελεύθερο πεδίο παρουσιάζονται παρακάτω:

1. Η κανονική διάρρηξη κατά τη διάδοσή της στο έδαφος κάμπτεται προς το κατερχόμενο τέμαχος, αυξάνοντας την κλίση της.
2. Η απαιτούμενη επιβαλλόμενη μετατόπιση για διάδοση της διάρρηξης μέχρι την επιφάνεια ισούται με  $h / H = 1.0 \%$ . Το αποτέλεσμα αυτό βρίσκεται σε πλήρη συμφωνία με τις δισδιάστατες αναλύσεις του Ι. Αναστασόπουλου (2005).
3. Όπως αναμένετο, εξαιτίας του γεγονότος ότι η γωνία επιβολής της διάρρηξης είναι  $\alpha = 45^\circ < 45 + \psi / 2$ , παρατηρείται εμφάνιση και δευτερεύουσας διάρρηξης, καθώς και σχηματισμός κατακρημνίσματος. Η δευτερεύουσα διάρρηξη εμφανίζεται στην επιφάνεια του εδάφους για μεγαλύτερες επιβαλλόμενες μετατοπίσεις ( $h / H > 3.5 \%$ ).
4. Το πλάτος του κατακρημνίσματος μετρήθηκε ίσο με  $0.78H$ .

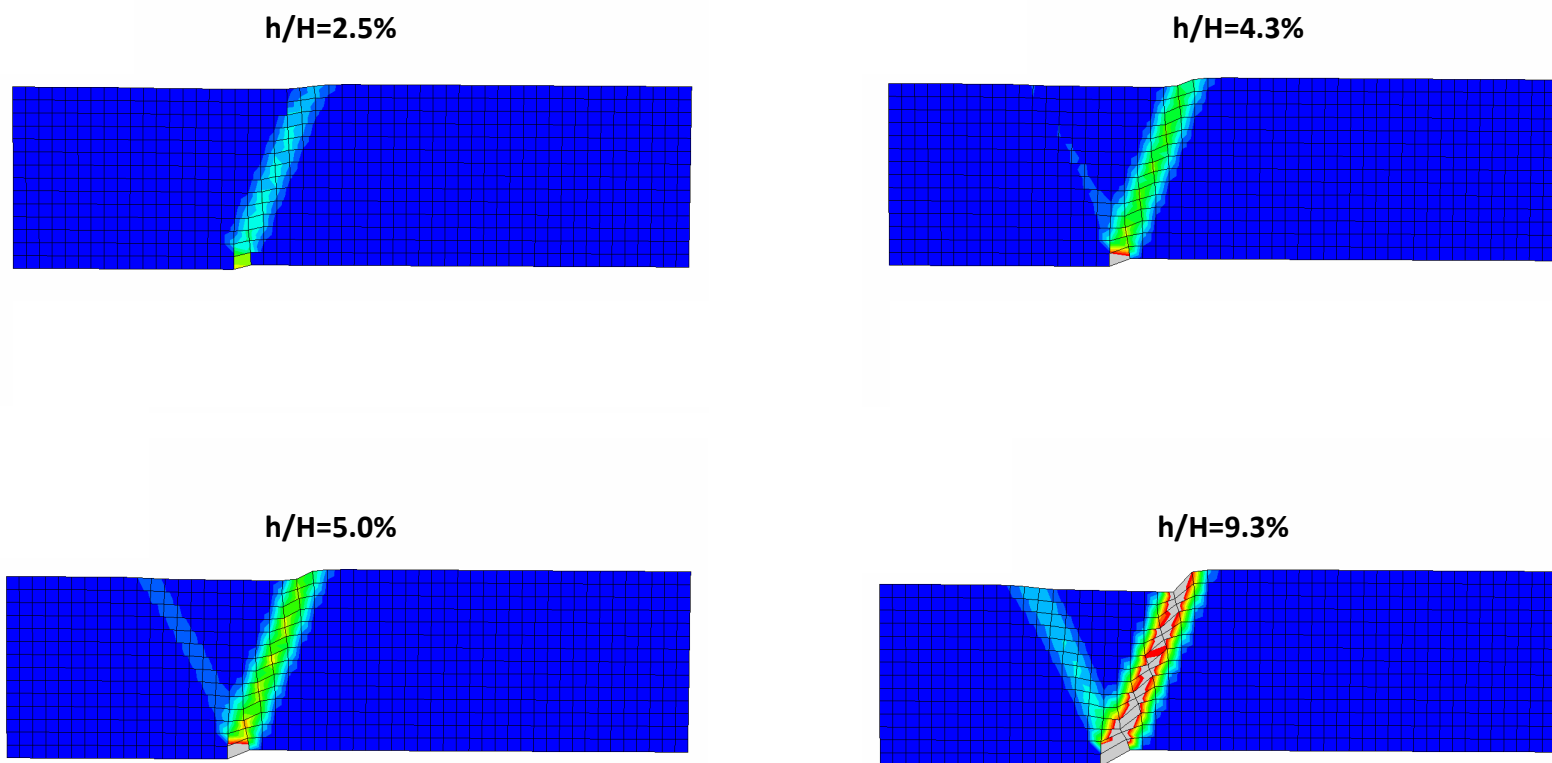




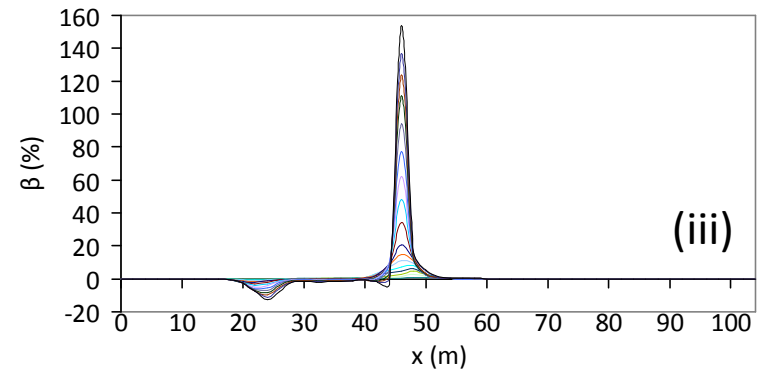
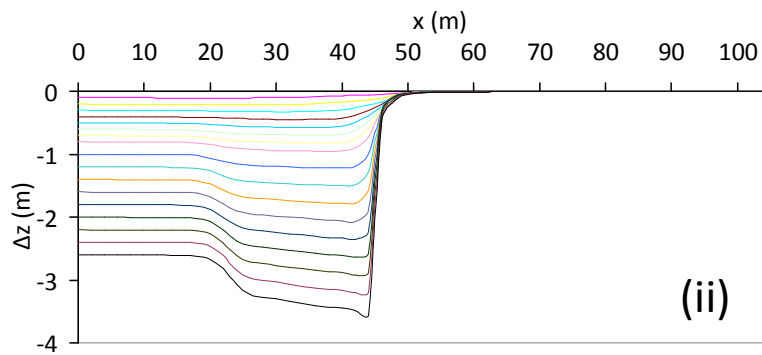
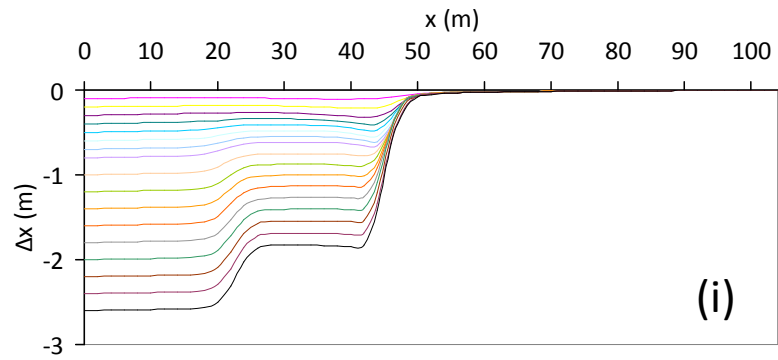
**Σχήμα 3.1** :Γεωμετρία του προβλήματος και διακριτοποίηση του προσομοιώματος



**Σχήμα 3.2 :** Στιγμιότυπα του παραμορφωμένου καννάβου και η πλαστική παραμόρφωση για διάρρηξη λόγω τεκτονικής μετατόπισης υπό κλίση  $45^\circ$  και κανονικοποιημένες κατακόρυφες μετατοπίσεις  $h/H=0.7, 1.4, 1.8, 2.1 \%$ , σε άμμο  $\varphi = 54^\circ$ ,  $\varphi_{res} = 35^\circ$ ,  $\psi = 22^\circ$ ,  $\psi_{res} = 3^\circ$ ,  $\gamma\gamma = 1.5$



**Σχήμα 3.3:** Στιγμιότυπα του παραμορφωμένου καννάβου και η πλαστική παραμόρφωση για διάρρηξη λόγω τεκτονικής μετατόπισης υπό κλίση  $45^\circ$  και κανονικοποιημένες κατακόρυφες μετατοπίσεις  $h/H=2.5, 4.3, 5.0, 9.3 \%$ , σε άμμο με  $\varphi = 54^\circ$ ,  $\varphi_{res} = 35^\circ$ ,  $\psi = 22^\circ$ ,  $\psi_{res} = 3^\circ$ ,  $\gamma\gamma = 1.5 \%$ .



**Σχήμα 3.4.** Αποτελέσματα για σεισμική διάρρηξη αρχικής γωνίας επιβολής μετατόπισης  $\alpha = 45^\circ$  και επιβαλλόμενη μετατόπιση  $h = 0.1 \text{ m}$  έως  $h = 2.6 \text{ m}$ : (i) επιφανειακές οριζόντιες μετακινήσεις  $\Delta x$ , (ii) επιφανειακές κατακόρυφες μετακινήσεις  $\Delta z$ , (iii) γωνία παραμόρφωσης επιφάνειας  $\beta$ .

## Κεφάλαιο 4

### Αλληλεπίδραση κανονικής τεκτονικής διάρρηξης–εδάφους– θεμελίου

#### 4.1 Αριθμητικό προσομοίωμα

Η θεμελίωση προσομοιώνεται με στοιχεία κελύφους, τοποθετείται στην επιφάνεια του εδάφους και συνδέεται με αυτό με ειδικά στοιχεία διεπιφάνειας κενού (gap elements). Τα στοιχεία αυτά είναι απείρως δύσκαμπτα σε θλίψη, αλλά δεν παρουσιάζουν καμία αντοχή σε εφελκυσμό. Η συμπεριφορά τους σε διάτμηση διέπεται από το νόμο Coulomb. Με αυτόν τον τρόπο, η θεμελίωση δεν ενώνεται άρρηκτα με το έδαφος και τόσο το ανασήκωμα όσο και η ολίσθηση είναι επιτρεπτά.

Οι κύριοι παράγοντες που επηρεάζουν την αλληλεπίδραση σεισμικής διάρρηξης-εδάφους-θεμελίωσης είναι οι εξής:

- ο τύπος της θεμελίωσης, π.χ. μεμονωμένα πέδιλα, πάσσαλοι, κιβωτιοειδείς θεμελιώσεις.
- Η καμπτική και αξονική δυσκαμψία της θεμελίωσης
- το φορτίο της ανωδομής
- η δυσκαμψία της ανωδομής
- η δυσστησία του εδάφους ( $G$ ), οι παράμετροι αντοχής ( $\varphi$ ,  $c$ ) και οι κινηματικές παράμετροι ( $\psi$ ).

Η παρούσα ανάλυση θα επικεντρωθεί σε μία άκαμπτη τετραγωνική θεμελίωση πλάτους  $B' = 10$  m (οπότε ο λόγος πλάτους κατασκευής προς πάχος εδαφικού σχηματισμού ισούται με  $B' / H = 0.36$ ) και φορτίου  $q = 20$  kPa. Το μέτρο ελαστικότητας της είναι  $E = 77000000$  kPa, ενώ η δυσκαμψία της ισούται με  $EI = 1 \times 10^8$  kN m<sup>2</sup>. Η θέση εμφάνισης της διάρρηξης στην επιφάνεια σε σχέση με την αριστερό άκρο της θεμελίωσης ποικίλλει από  $d = 12$  m, 10 m, 8 m, 6 m, 4 m, 0 m, -2 m, -4 m, και επομένως η σχετική απόσταση κανονικοποιημένη προς το πλάτος της κατασκευής παίρνει τις τιμές  $d / B' = -0.2, 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1, 1.2$ .

Το εδαφικό προσομοίωμα, το οποίο παρουσιάζεται στο **Σχήμα 4.1**, παραμένει το ίδιο: εδαφικό στρώμα πάχους  $H = 28$  m, στη βάση του οποίου προκαλείται κανονική διάρρηξη λόγω τεκτονικής μετατόπισης. Η γωνία κλίσης της διάρρηξης είναι  $\alpha = 45^\circ$  και το μέγεθος της επιβαλλόμενης μετατόπισης είναι  $h$ . Το συνολικό μήκος του προσομοιώματος είναι  $B = 104$  m και το πλάτος του είναι  $T = 36$  m. Ο λόγος  $B / H = 3.7$  προσεγγίζει ικανοποιητικά τις συστάσεις του Bray (1990), σύμφωνα με τις οποίες ένας λόγος  $B / H = 4$  είναι επαρκής για τη μη εμφάνιση παρασιτικών φαινομένων λόγω της επίδρασης των συνοριακών συνθηκών. Ο κάρναβος παραμένει σε όλο το προσομοίωμα ίδιος, με διαστάσεις στοιχείων 2 m x 2 m x 2 m (μήκος x πλάτος x ύψος). Η επιλογή τέτοιων μεγάλων στοιχείων αναμένεται να δώσει ως αποτέλεσμα πιο ευρείες ζώνες διάτμησης απ' ό,τι θα προέκυπτε από μία πυκνότερη διακριτοποίηση. Η επιβαλλόμενη μετατόπιση,  $h$ , επιβάλλεται στο αριστερό τμήμα του προσομοιώματος με μικρά, διαδοχικά βήματα,  $\Delta h$ .



Κατά την ανάλυση, υιοθετήθηκε το εξής ελαστοπλαστικό καταστατικό μοντέλο: Κριτήριο αστοχίας Mohr – Coulomb με ισότροπη χαλάρωση. Η χαλάρωση εφαρμόζεται στη συνοχή του εδαφικού δοκιμίου,  $c$ , στη γωνία τριβής,  $\varphi$ , και στη γωνία διαστολικότητας,  $\psi$ . Αν  $\gamma_f$  η πλαστική παραμόρφωση κατά την οποία το έδαφος φτάνει την απομένουσα αντοχή του, γίνεται η παραδοχή ότι τα  $c$ ,  $\varphi$ ,  $\psi$ , μειώνονται γραμμικά με την αύξηση της συνολικής πλαστικής παραμόρφωσης μέχρι τις απομένουσες τιμές τους  $c_{res}$ ,  $\varphi_{res}$ ,  $\psi_{res}$ . Οι τιμές αυτές εξαρτώνται από το είδος του εδάφους: Στην περίπτωση εδαφών που δεν παρουσιάζουν σημαντική χαλάρωση, όπως η Ottawa άμμος που χρησιμοποιήθηκε στα πειράματα των Roth et al [1982] και στις σχετικές αναλύσεις [Roth et al 1981,1982], η απομένουσα γωνία διαστολικότητας παραμένει περίπου ίση με την αρχική,  $\psi_{res} \approx \psi$ . Αντιθέτως, στα περισσότερα εδάφη που παρουσιάζουν χαλάρωση, η απομένουσα γωνία διαστολικότητας σχεδόν μηδενίζεται,  $\psi_{res} \approx 0$ . Οι τυπικές τιμές της απομένουσας παραμόρφωσης κυμαίνονται από 5% έως 15% ( $\gamma_f = 5\% \div 15\%$ ). Εξίσου σημαντική είναι η παραμόρφωση διαρροής,  $\gamma_y$ , η οποία εξαρτάται από τις παραμέτρους αντοχής και της διατμητική δυσκαμψία. Τόσο η παραμόρφωση διαρροής,  $\gamma_y$ , όσο και η απομένουσα παραμόρφωση,  $\gamma_f$ , βαθμονομούνται μέσω αριθμητικής προσομοίωσης του πειράματος απευθείας διάτμησης.

## 4.2 Αποτελέσματα

Τα κυριότερα αποτελέσματα της ανάλυσης της αλληλεπίδρασης της σεισμικής διάρρηξης–εδάφους–θεμελίου θα παρουσιαστούν μέσω του παραμορφωμένου καννάβου, της κατανομής πλαστικών παραμορφώσεων, της εκτροπής της διάρρηξης  $D$ , του προφίλ κατακόρυφων μετατοπίσεων  $\Delta z$ , της γωνίας παραμόρφωσης  $\beta$ , και των τάσεων επαφής  $\sigma_v$  κατά μήκος της διεπιφάνειας εδάφους-θεμελίου. Επίσης, παρουσιάζεται η καταπόνηση του θεμελίου σε όρους καμπτικών ροπών  $M$  και αναπτυσσομένων τεμνουσών δυνάμεων  $Q$ . Τα αποτελέσματα συγκρίνονται με τα αντίστοιχα αποτελέσματα από την ανάλυση της διάδοσης της διαρρήξεως στο ελεύθερο πεδίο, έτσι ώστε να αναδειχθεί ο ρόλος της αλληλεπίδρασης σεισμικής διάρρηξης–εδάφους–θεμελίου. Οι τάσεις επαφής συγκρίνονται με την αρχική στατική κατανομή τους ( $h / H = 0 \%$ , πριν την επιβολή της τεκτονικής μετατόπισης στο βραχώδες υπόβαθρο), έτσι ώστε να αναδειχθούν τα τμήματα της θεμελίωσης που χάνουν την επαφή τους με το υποκείμενο έδαφος, να αναδειχθεί με άλλα λόγια η αποκόλληση της θεμελίωσης. Εις το εξής, το αριστερό τμήμα της θεμελίωσης που ανασηκώνεται θα υποδηλώνεται ως  $u_L$ , το δεξί τμήμα ως  $u_R$ , και το κεντρικό τμήμα που ανασηκώνεται ως  $u$ . Το τμήμα της θεμελίωσης που διατηρεί την επαφή του με το έδαφος θα δηλώνεται ως  $b_L$ ,  $b_R$ ,  $b$  αντίστοιχα. Παρουσιάζεται επίσης και η μέση καθίζηση της θεμελίωσης  $\delta z$ , η στροφή της  $\vartheta$ , και η ολίσθηση  $\delta x$ , κυρίως για να δειχθεί η επίδρασή της διάρρηξης στη λειτουργικότητα της θεμελίωσης και κατά προέκταση της ανωδομής.

#### 4.2.1 Σεισμική διάρρηξη σε σχετική απόσταση $d / B' = 1.2$

Όπως γίνεται φανερό και στο **Σχήμα 4.2**, η άκαμπτη θεμελίωση στην περίπτωση αυτή δεν επηρεάζει καθόλου τη διαδρομή της διάρρηξης. Η διάρρηξη εμφανίζεται δίπλα από το δεξί άκρο του θεμελίου ( $x = 46$  m), χωρίς να παρουσιάσει καμία εκτροπή, προκαλώντας έτσι σε αυτό αποκόλληση σε μήκος 1.6 m ( 16% του συνολικού πλάτους) στο δεξί άκρο του θεμελίου ( $u_R = 1.6$  m,  $b = 8.4$  m). Το σχηματιζόμενο κατακρήμνισμα έχει πλάτος 22 m , όπως και στην περίπτωση του ελεύθερου πεδίου. Η εκδήλωση της αλληλεπίδρασης του θεμελίου με το υποκείμενο έδαφος και τη διάρρηξη γίνεται φανερή μόνο από τα διαγράμματα γωνιακής παραμόρφωσης του εδάφους (**Σχήμα 4.4**). Συγκρίνοντάς τα, παρατηρείται ότι στην περίπτωση του θεμελίου, αυτή περιορίζεται ποσοτικά τόσο στην περιοχή της πρωτεύουσας, όσο και στην περιοχή της δευτερεύουσας διάρρηξης, χωρίς όμως να προκαλεί σημαντικές διαφορές σε όρους μετατοπίσεων. Το θεμέλιο υφίσταται μία μέση καθίζηση  $\delta z = 3.4$  m, (μεγαλύτερη δηλαδή από την επιβαλλόμενη μετατόπιση στο βραχώδες υπόβαθρο  $h = 2.6$  m:  $s = 1.25 h$  ). Βέβαια, όπως γίνεται φανερό στο **Σχήμα 4.6**, η στροφή του θεμελίου και κατά προέκταση η διαφορική του καθίζηση και το ανασήκωμα των άκρων του μεταβάλλονται με την αύξηση της επιβαλλόμενης μετατόπισης. Έτσι, η μέγιστη τιμή της στροφής ( $\vartheta = 0.45^\circ$  ) και κατά συνέπεια οι δυσμενέστερες συνθήκες για την ανωδομή επιτυγχάνονται για επιβαλλόμενη μετατόπιση  $h / H = 1.5$  %. Από το σημείο αυτό και μετά, η τιμή της στροφής μειώνεται μέχρι να μηδενιστεί, όταν  $h / H = 6$  %. Μετά, το θεμέλιο αρχίζει να στρέφεται προς την αντίθετη πλευρά με συνέπεια στο τέλος της επιβολής της μετατόπισης το δεξί του άκρο να έχει αποκολληθεί και το θεμέλιο να έχει

στραφεί κατά  $\vartheta = - 0.85^\circ$ . Μία πιθανή εξήγηση είναι η εξής: Κατά την διάρκεια του φαινομένου στα αρχικά στάδια, οι παραμορφώσεις στην περιοχή του κατακρημνίσματος είναι μεγαλύτερες από ό,τι στη περιοχή της διάρρηξης και μάλιστα η μέγιστη τιμή τους εντοπίζεται στο μέσο περίπου της περιοχής του κατακρημνίσματος, εκεί δηλαδή που βρίσκεται και το αριστερό τμήμα του θεμελίου. Κατά συνέπεια, μέχρι οι παραμορφώσεις να αρχίσουν να συγκεντρώνονται στην περιοχή της διάρρηξης και το φαινόμενο της διαστολικότητας να ολοκληρωθεί, η αριστερή πλευρά του θεμελίου καθιζάνει περισσότερο από τη δεξιά πλευρά. Στη συνέχεια όμως το έδαφος στην περιοχή θεμελίωσης πλαστικοποιείται, η αντοχή του μειώνεται και το θεμέλιο τελικά στρέφεται προς την αντίθετη πλευρά.). Τέλος, περαιτέρω αύξηση της επιβαλλόμενης παραμόρφωσης αναγκάζει το θεμέλιο να αποκολληθεί στο δεξί τμήμα του (δηλαδή στην πλευρά της διάρρηξης.). Η περιστροφή του θεμελίου σε κάτοψη είναι ανεπαίσθητη. Επιπλέον, το θεμέλιο ολισθαίνει ελάχιστα στην αρχή, της τάξης των 2 cm, ενώ με αύξηση της επιβαλλόμενης μετατόπισης άνω της τιμής  $h / H = 6.5 \%$  αρχίζει να εξελίσσεται απότομα μέχρι να πάρει την τιμή  $\delta x = 23 \text{ cm}$  στο τέλος της επιβολής της μετατόπισης.

Το διάγραμμα τάσεων επαφής του θεμελίου (**Σχήμα 4.5**) επιβεβαιώνει τα παραπάνω. Η αρχική κατανομή τάσεων προσεγγίζει ποιοτικά την κατανομή Boussinesq (Davis & Selvadurai 1996) για άκαμπτα θεμέλια (ανεστραμμένη παραβολή). Κατόπιν, οι τάσεις αυξάνονται στο δεξί τμήμα του και το θεμέλιο χάνει την επαφή του με το έδαφος στο αριστερό τμήμα του για  $h / H = 6.4 \%$ . Αυξάνοντας περαιτέρω την επιβαλλόμενη μετατόπιση το θεμέλιο ξαναποκτά επαφή με το έδαφος σε όλο το

πλάτος του, για να αποκολληθεί τελικά στο δεξί άκρο για μετατοπίσεις μεγαλύτερες του  $h / H = 7.9 \%$ . ( $u_R=3m$ )

Από το διάγραμμα των ροπών (**Σχήμα 4.5**) γίνονται φανερά τα εξής: Πρώτον, κατά την επιβολή της μετατόπισης, η μέγιστη ροπή αυξάνεται δραματικά, από 42 kNm σε 148 kNm για  $h / H = 2.9 \%$ . Δεύτερον, οι μεγάλες επιβαλλόμενες μετατοπίσεις, οι οποίες οδήγησαν και στην αποκόλληση του θεμελίου, προκάλεσαν σε αυτό και αρνητικές ροπές της τάξης των 43 kNm και τη λειτουργία των δεξιών 3 m του θεμελίου ως προβόλου.

#### **4.2.2 Σεισμική διάρρηξη σε σχετική απόσταση $d / B' = 1.0$**

Οι παραμορφωμένοι κάρναβοι του ελεύθερου πεδίου και του εγγυς του θεμελίου πεδίου παραθέτονται στο **Σχήμα 4.9**. Η επιρροή της αλληλεπίδρασης στη διαδρομή της διάρρηξης είναι εμφανής. Όπως καταδεικνύει το διάγραμμα γωνιακής παραμόρφωσης στο **Σχήμα 4.9**, η διάρρηξη διακλαδίζεται σε 2 μικρότερες, οι οποίες βγαίνουν στην επιφάνεια στις θέσεις  $x = 44 m$  και  $x = 48 m$  αντίστοιχα. Αυτό βέβαια λόγω του αραιού καννάβου του προσομοιώματος δεν μπορεί να γίνει εμφανές στα στιγμιότυπα της ανάλυσης. Επίσης, συγκρίνοντας το διάγραμμα γωνιακής παραμόρφωσης του ελεύθερου πεδίου με το αντίστοιχο του άκαμπτου θεμελίου, παρατηρείται ότι η ύπαρξη του θεμελίου επηρεάζει αισθητά το προφίλ των παραμορφώσεων: πρώτον, όπως ήδη έχει αναφερθεί, αναγκάζει τη διάρρηξη να διακλαδιστεί, σε μια προσπάθεια να αποφύγει το θεμέλιο, δεύτερον διευρύνει τη ζώνη επιρροής της διάρρηξης μειώνοντας όμως τις κορυφαίες τιμές παραμόρφωσης από 150 % σε 85 %. Το μέγεθος

της εκτροπής  $D$  είναι 2 m και για τις δύο διακλαδώσεις της διάρρηξης. Η δευτερεύουσα διάρρηξη που συμβάλλει στο σχηματισμό του κατακρημνίσματος δεν επηρεάζεται από το θεμέλιο. Η διακλάδωση της διάρρηξης και η διασπορά της παραμόρφωσης στην επιφάνεια αποτυπώνεται και στο προφίλ των κατακόρυφων μετατοπίσεων (**Σχήμα 4.8**).

Η μέση καθίζηση της θεμελίωσης (**Σχήμα 4.11**) αυξάνει συνεχώς με την αύξηση της επιβαλλόμενης τεκτονικής μετατόπισης, για να πάρει τελικά την τιμή  $\delta z = 2.45$  m. Ίδια συμπεριφορά παρουσιάζει και η στροφή της (**Σχήμα 4.11**), η οποία παίρνει κορυφαία τιμή  $\vartheta = 8.1^\circ$ .

Τα παραπάνω οδηγούν σε ανασήκωμα της θεμελίωσης από το έδαφος  $b_R = 2.5$  m,  $u = 7.5$  m. Η καταπόνηση της αυτή δεν οφείλεται μόνο στη διάρρηξη, αλλά και στην αστοχία του σχηματιζόμενου πρανούς λόγω του φορτίου της. Στροφή του θεμελίου επί του επιπέδου του δεν παρατηρείται, ενώ η ολίσθηση του επί του σχηματιζόμενου πρανούς είναι ανεπαίσθητη (**Σχήμα 4.11**).

Το διάγραμμα καμπτικών ροπών του θεμελίου αντικατοπτρίζει την παραπάνω περιγραφείσα συμπεριφορά (**Σχήμα 4.10**). Το θεμέλιο, καθώς στηρίζεται στα 2 άκρα του, συμπεριφέρεται ως αμφιέριστη δοκός και εμφανίζει μέγιστη ροπή στο μέσο του, η οποία τελικά φτάνει να είναι περίπου 6 φορές μεγαλύτερη από την αρχική.

#### **4.2.3 Σεισμική διάρρηξη σε σχετική απόσταση $d / B' = 0.8$**

Σε αυτή την περίπτωση (**Σχήμα 4.12**) η διάρρηξη αρχίζει να εκτρέπεται αφού φτάσει στα ανώτερα 4 m του εδαφικού σχηματισμού, εξαιτίας της αλληλεπίδρασης της με το άκαμπτο θεμέλιο. Από τα διαγράμματα της γωνιακής παραμόρφωσης

(**Σχήμα 4.14**) γίνεται φανερό ότι η διάρρηξη επηρεάζει μεγαλύτερο τμήμα της επιφάνειας του εδάφους. Δυστυχώς, η διάρρηξη αρχικά εκτρέπεται προς τα αριστερά κατά  $D = 4$  m και εμφανίζεται στην επιφάνεια κάτω από το θεμέλιο, προκαλώντας όμως μικρότερες παραμορφώσεις συγκριτικά με το ελεύθερο πεδίο ( $\beta = 80$  % ενώ στο ελεύθερο πεδίο  $\beta = 150$  %). Παρατηρώντας το προφίλ των κατακόρυφων μετατοπίσεων (**Σχήμα 4.13**) γίνεται εμφανές ότι μετά την εμφάνιση της διάρρηξης στην επιφάνεια το υπό μόρφωση πρανές οδηγείται σε αστοχία.

Το θεμέλιο, όπως ήδη έχει αναφερθεί βρίσκεται πάνω στο υπό μόρφωση πρανές. Κατά συνέπεια, η μέση καθίζησή του αυξάνει σταδιακά με τελική τιμή  $\delta z = 2.12$  m (**Σχήμα 4.16**), ενώ στρέφεται κατά περίπου  $\vartheta \approx 15.5^\circ$  (**Σχήμα 4.16**). Επιπρόσθετα, το θεμέλιο ολισθαίνει κατά  $\Delta u_x = 0.85$  m (**Σχήμα 4.16**). Τελικά, το θεμέλιο απλά στηρίζεται στο αριστερό άκρο του, αποκολλάται από το υποκείμενο έδαφος για  $u = 6$  m, ανακτά πάλι επαφή με αυτό, για να αποκολληθεί τελικά στο δεξί άκρο του  $u_R = 2$  m. Η τιμή της μέγιστης ροπής αυξάνεται 3.5 φορές περίπου, από  $M_{staticload} = 40$  kNm σε  $M_{final} = 140$  kNm (**Σχήμα 4.15**). Η αρχική μορφή της κατά την επιβολή του στατικού μόνο φορτίου της ανωδομής, αντικατοπτρίζει την κατανομή των τάσεων στο άκαμπτο θεμέλιο. Οι τάσεις παίρνουν μεγαλύτερη τιμή στα άκρα, και μικρότερη στο κεντρικό τμήμα του θεμελίου, με αποτέλεσμα το θεμέλιο να συμπεριφέρεται σαν αμφιαρθρωτή δοκός. Με την επιβολή της τεκτονικής μετατόπισης και την αποκόλληση του θεμελίου στο εσωτερικό τμήμα του, η κατανομή αυτή των ροπών δεν επηρεάζεται, παρά μόνο ποσοτικά. Η εμφάνιση αρνητικών ροπών

σηματοδοτεί την έναρξη αποκόλλησης του θεμελίου στο δεξί άκρο του και τη λειτουργία αυτού του τμήματος ως προβόλου.

#### 4.2.4 Σεισμική διάρρηξη σε σχετική απόσταση $d / B' = 0.6$

Σε αυτή την περίπτωση παρατηρείται το εξής: Η διάρρηξη εκτρέπεται προς τα αριστερά κατά  $D = 2$  m αλλά δεν καταφέρνει να βγει στην επιφάνεια. Οι παραμορφώσεις εξαπλώνονται σε μεγαλύτερη έκταση, αλλά έχουν πολύ μικρότερες τιμές, προκαλώντας έτσι μόνο μια κύρτωση της επιφάνειας του εδάφους. Στο προφίλ κατακόρυφων μετακινήσεων (**Σχήμα 4.17**) αποτυπώνεται η αστοχία του πρηνούς στην περιοχή του θεμελίου. Η αλληλεπίδραση εδώ δηλαδή είναι έντονη και εμφανής.

Το διάγραμμα τάσεων επαφής και το διάγραμμα καμπτικών ροπών (**Σχήμα 4.20**) καταδεικνύουν τη συμπεριφορά του θεμελίου. Το θεμέλιο όπως ήδη έχει αναφερθεί, αρχικά παρουσιάζει κατανομή ροπών όπως η αμφιαρθρωτή δοκός. Η σταδιακή αποκόλληση του στο δεξί άκρο μετατρέπει τη συμπεριφορά του σε ανάλογη με μονοπροέχουσα δοκό με στήριξη όχι στο άκρο αλλά στο μέσο. Η μέγιστη απόλυτη τιμή της ροπής δεν επιτυγχάνεται στην μέγιστη επιβαλλόμενη μετατόπιση αλλά στο  $h / H = 2.5$  % και είναι τριπλάσια της αρχικής. Μέγιστη θετική ροπή επιτυγχάνεται για  $h / H = 9.3$  % και είναι λίγο μεγαλύτερη της αρχικής.

Παρ' όλα αυτά, το θεμέλιο υφίσταται μεγάλη στροφή, ( $\theta = 19.5^\circ$  , και μεγάλη μέση καθίζηση  $\delta z = 1.7$  m (**Σχήμα 4.21**). Παρατηρείται επιπροσθέτως και μια μικρή στροφή της τάξης των  $0.3^\circ$  επί του οριζοντίου επιπέδου. Τέλος, πρέπει να τονιστεί ότι το θεμέλιο ολισθαίνει επί του εδάφους κατά  $\delta x = 1.5$  m (**Σχήμα 4.21**) Τελικά, το θεμέλιο



απλά στηρίζεται στο αριστερό άκρο του, αποκολλάται από το έδαφος για  $u = 3.5$  m, ανακτά επαφή για  $b = 3$  m περίπου, για να την ξαναχάσει στο δεξί τμήμα του  $u_R = 3.5$  m.

#### 4.2.5 Σεισμική διάρρηξη σε σχετική απόσταση $d / B' = 0.4$

Στο στιγμιότυπο της ανάλυσης η διάρρηξη φαίνεται να εκτρέπεται προς το κατερχόμενο τέμαχος (Σχήμα 4.22). Αυτό βέβαια, λόγω του αραιού καννάβου δεν μπόρεσε να αποτυπωθεί στα διαγράμματα γωνιακής παραμόρφωσης (Σχήμα 4.24), όπου το μόνο που φαίνεται είναι η μείωση των τιμών της παραμόρφωσης από  $\beta = 150$  % σε  $\beta = 90$  % . Η διάρρηξη εκδηλώνεται με κύρτωση της επιφάνειας του εδάφους στην περιοχή εμφάνισης της. Η καμπύλωση αυτή είναι ηπιότερη από την αντίστοιχη παρατηρηθείσα στο ελεύθερο πεδίο, λόγω της αστοχίας του πρηνούς κάτω από το θεμέλιο.

Το διάγραμμα καμπτικών ροπών (Σχήμα 4.25) καταδεικνύει το ανασήκωμα του θεμελίου. Η συμπεριφορά του μπορεί να παρομοιαστεί άριστα με αυτή 2 προβόλων με κοινή στήριξη. Μέγιστη κατ' απόλυτη τιμή της ροπής επιτυγχάνεται από  $h / H = 1.4$  % και παραμένει σταθερή μέχρι το τέλος,  $M_{final} = 160$  kNm =  $4 * M_{static load}$ .

Το θεμέλιο υφίσταται μέση καθίζηση  $\delta z = 0.55$  m και αντίστοιχα η στροφή του προσεγγίζει την τιμή  $\vartheta = 7.5^\circ$  (Σχήμα 4.26). Επίσης, παρατηρείται και στροφή του θεμελίου σε κάτοψη κατά  $\omega = 0.6^\circ$ . Τέλος, το θεμέλιο ολισθαίνει κατά τον άξονα x κατά  $\delta x = 0.62$  m, ενώ το ενεργό πλάτος του περιορίζεται σε  $b = 2.0$  m ( $u_L = 4$  m ,  $u_R = 3.5$  m )

#### 4.2.6 Σεισμική διάρρηξη σε σχετική απόσταση $d/B' = 0.2$

Η επίδραση του θεμελίου στη διαδρομή της διάρρηξης δεν είναι σε αυτή την περίπτωση έντονη (**Σχήμα 4.27**). Η διάρρηξη εκτρέπεται ελάχιστα προς το κατερχόμενο τέμαχος κατά τη διέλευση της από τα ανώτερα 2 m του εδάφους. Από το διάγραμμα γωνιακής παραμόρφωσης (**Σχήμα 4.29**) καταδεικνύεται ότι το θεμέλιο καταφέρει μόνο να περιορίσει τη ζώνη επιρροής της διάρρηξης στην επιφάνεια του εδάφους. κάτω από το αριστερό τμήμα του θεμελίου ( $u_L = 4$  m).

Η συμπεριφορά του θεμελίου έχει ως εξής: Παρότι με απλή παρατήρηση του παραμορφωμένου καννάβου η έκταση της αποκόλλησης του θεμελίου δεν φαίνεται ανησυχητική, ένας καλύτερος έλεγχος των τάσεων επαφής (**Σχήμα 4.30**) και των στοιχείων κενού του προσομοιώματος, φανερώνουν ότι και σε αυτή τη θέση το θεμέλιο έχει χάσει την επαφή του με το έδαφος σε μεγάλο εύρος αριστερά ( $u_L = 4$  m) και δεξιά ( $u_R = 4$  m). Το διάγραμμα καμπτικών ροπών και κατά συνέπεια η καταπόνηση του θεμελίου είναι ίδια με την προηγούμενη θέση. Όσον αφορά στις μετατοπίσεις του θεμελίου, αρχικά και μέχρι την τιμή της επιβαλλόμενης μετατόπισης  $h/H = 1.5\%$  το θεμέλιο στρέφεται με μέγιστη  $\vartheta = 1.3^\circ$ . Έπειτα σταθεροποιείται σε αυτή τη θέση παρά τη συνεχή αύξηση της επιβαλλόμενης μετατόπισης. Μόλις όμως η επιβαλλόμενη μετατόπιση ξεπεράσει το  $h/H = 6.5\%$ , αρχίζει πάλι να αυξάνει την στροφή του με τελική τιμή την  $\vartheta = 1.6^\circ$ . Η παραπάνω εξέλιξη παρουσιάζεται στο **Σχήμα 4.31**. Η μέση καθίζηση παρουσιάζει ίδια συμπεριφορά με τελική μέγιστη τιμή την  $\delta z = 0.1$  m. Όσον αφορά στην ολίσθηση του θεμελίου, αυτή αρχικά αυξάνεται μέχρι την τιμή  $\delta x = 0.06$  m.

Η επιβαλλόμενη μετατόπιση στο βραχώδες υπόβαθρο είναι περίπου  $h / H = 1.5 \%$ . Περαιτέρω αύξηση της μετατόπισης δεν προκαλεί ολίσθηση στο θεμέλιο. Ωστόσο, από την τιμή  $h / H = 6.5 \%$  και μετά, ξαναρχίζει η ολίσθηση του θεμελίου, η οποία και μεγιστοποιείται στο τέλος της επιβολής της μετατόπισης στην τιμή  $\delta x = 0.086 \text{ m}$ .

#### 4.2.7 Σεισμική διάρρηξη σε σχετική απόσταση $d / B' = 0.0$

Το σχηματιζόμενο από την εκδήλωση της διάρρηξης στην επιφάνεια πρηνές αστοχεί και προκαλεί μία καμπυλότητα στην επιφάνεια, σε αντίθεση με την απότομη κλίση που διατηρεί στο ελεύθερο πεδίο. Αυτή η καμπυλότητα μπορεί να διακριθεί και μέσα από τη σύγκριση των προφίλ των κατακόρυφων μετατοπίσεων στο ελεύθερο και στο εγγύς στο θεμέλιο πεδίο (**Σχήμα 4.33**). Η εκδήλωση της διάρρηξης στην επιφάνεια του εδάφους, όπως καταδεικνύεται στο διάγραμμα γωνιακής παραμόρφωσης (**Σχήμα 4.34**), παρατηρείται στην ίδια θέση με το ελεύθερο πεδίο, δηλαδή στη θέση  $x = 46 \text{ m}$ .

Το θεμέλιο αποκολλάται στο αριστερό τμήμα του ( $u_L = 2 \text{ m}$ ). Με προσεκτικότερη παρατήρηση γίνεται ορατή και η αποκόλληση του δεξιού άκρου ( $u_R = 1 \text{ m}$ ). Η μέση καθίζηση και στροφή του θεμελίου (**Σχήμα 4.36**) αρχικά παίρνουν την κορυφαία τιμή τους για  $h / H = 1 \%$ ,  $\delta z = 0.05 \text{ cm}$  και  $\theta = 0.37^\circ$ , τιμές σχετικά μικρές. Στη συνέχεια επέρχεται μια προσωρινή πτώση των τιμών τους, μέχρι  $h / H = 2 \%$ .

Αύξηση της επιβαλλόμενης μετατόπισης μέχρι  $h / H = 6 \%$  δεν επηρεάζει αισθητά το θεμέλιο. Για  $h / H > 6 \%$ , το έδαφος απλά ακολουθεί την κίνηση του βραχώδους υποβάθρου, την οποία και μεταφέρει στο θεμέλιο, αυξάνοντας του την στροφή και

μέση καθίζηση μέχρι την τελική τους τιμή,  $\vartheta = 0.45^\circ$  και  $\delta z = 0.06$  m. Η ολίσθηση του θεμελίου εξελίσσεται παρόμοια με τη στροφή και τη μέση καθίζηση του **(Σχήμα 4.36)** : μέχρι  $h / H = 1$  % αυξάνεται απότομα, έπειτα σταθεροποιείται και για  $h / H > 6$  % ολισθαίνει μέχρι  $\delta x = 0.03$  m

Όσον αφορά στις καμπτικές ροπές, παρατηρείται πλήρης αντιστροφή καθώς και αύξηση των τιμών τους κατά 1.5 φορά.

#### 4.2.8 Σεισμική διάρρηξη σε σχετική απόσταση $d / B' = - 0.2$

Έπειτα από σύγκριση των διαγραμμάτων γωνιακής παραμόρφωσης στο ελεύθερο πεδίο και στο εγγύς του θεμελίου πεδίο **(Σχήμα 4.39)**, διαπιστώνεται ότι το θεμέλιο δεν επηρεάζει ουσιαστικά τη διαδρομή της διάρρηξης και τις παραμορφώσεις της επιφάνειας του εδάφους. Το μόνο που επιτυγχάνει είναι μία ελάχιστη μείωση των κορυφαίων τιμών της γωνιακής παραμόρφωσης. Ωστόσο η θεμελίωση αποκολλάται από το έδαφος τόσο στο αριστερό, όσο και στο δεξί τμήμα της. Η απομείωση των τιμών των τάσεων επαφής **(Σχήμα 4.40)** στα πλαϊνά τμήματα του θεμελίου και η μείωση του ενεργού πλάτους του από 10 σε 6 μέτρα αποτυπώνεται στο διάγραμμα τάσεων επαφής. Η hogging deformation του θεμελίου αντικατοπτρίζεται στο διάγραμμα καμπτικών ροπών **(Σχήμα 4.40)** : Οι ροπές από θετικές γίνονται αρνητικές με μέγιστη κατ' απόλυτη τιμή  $M_{final} = 1.75 * M_{static\ load} = 70$  kNm. Μέχρι  $h / H = 1$  % , η μέση καθίζηση και στροφή του θεμελίου **(Σχήμα 4.41)** αυξάνεται σταδιακά, μετά σταθεροποιείται μέχρι  $h / H = 6$  % και για μεγαλύτερες επιβαλλόμενες μετατοπίσεις οι τιμές της στροφής και της μέσης καθίζησης ξανααυξάνονται μέχρι τις τελικές τιμές

του,  $\vartheta = 0.28^\circ$  και  $\delta z = 0.04$  m. Η ολίσθηση του θεμελίου (**Σχήμα 4.41**) σε αυτή την περίπτωση παραμένει σε πολύ μικρά επίπεδα της τάξης του  $\delta x = 0.01$  m.

### 4.3 Σύνοψη και Συμπεράσματα

Στο **Σχήμα 4.43** και **Σχήμα 4.44** παρουσιάζεται η μεταβολή χαρακτηριστικών μεγεθών συναρτήσει της σχετικής θέσης επιφανειακής εμφάνισης της διάρρηξης  $d / B$ .

- a)  $d / B' = 1.2$ : Η θεμελίωση δεν εκτρέπει την διάρρηξη. Πρέπει να τονιστεί ότι παρόλο που η διάρρηξη εμφανίζεται 2 m μακριά από το δεξί άκρο του θεμελίου, εντούτοις προκαλεί αποκόλληση του δεξιού τμήματος του. Ωστόσο αυτό συμπεριφέρεται πολύ καλά σε όρους στροφών και μετατοπίσεων, στρεφόμενο μόνον κατά  $\vartheta = 0.85^\circ$  και ολισθαίνοντας κατά  $\delta x = 0.23$  m. Ωστόσο η καταπόνηση του είναι μεγάλη, όχι μόνον στην τελική του θέση, αλλά και στις ενδιάμεσες, πιθανόν λόγω της επίδρασης της διαστολικότητας του εδάφους στις παραμορφώσεις (προκαταρκτική εξήγηση). Για αυτό το λόγο, για μικρή ακόμα επιβαλλόμενη μετατόπιση  $h / H = 3.6$  %, η θετική ροπή παίρνει τη μέγιστη τιμή της  $M = 148$  kNm, περίπου 4 φορές μεγαλύτερη από την αρχικώς επιβαλλόμενη, ενώ για μεγάλες μετατοπίσεις οι ροπές γίνονται αρνητικές και περίπου ίσες κατ' απόλυτο μέγεθος με την αρχική. Καταδεικνύεται έτσι με αυτό τον τρόπο, ότι η συμπεριφορά του θεμελίου δεν επηρεάζεται μόνον από την σχετική θέση εμφάνισης της διάρρηξης αλλά και από τις ιδιότητες του υποκείμενου εδάφους.

- b)  $d / B' = 1.0$ : Πρόκειται σίγουρα για μία από τις δυσμενέστερες σχετικές θέσεις εμφάνισης της διάρρηξης. Παρά το γεγονός ότι το θεμέλιο αναγκάζει τη διάρρηξη να διακλαδιστεί και να περιορίσει τη γωνιακή παραμόρφωση της επιφάνειας, η απώλεια επαφής στο κεντρικό τμήμα του οδήγησε σε ανάπτυξη μεγάλων ροπών της τάξης  $M = 230 \text{ kNm}$ . Αυτή η τιμή είναι η μεγαλύτερη που παρατηρήθηκε για όλες τις αναλυθείσες σχετικές θέσεις. Επιπρόσθετα, η καταγραφείσα στροφή  $\vartheta = 8.1^\circ$  ανήκει στις μεγαλύτερες καταγραφείσες όλων των αναλύσεων και σίγουρα προκαλούν μεγάλα προβλήματα λειτουργικότητας στην ανωδομή.
- c)  $d / B' = 0.8$ : Σε αυτή τη θέση η θεμελίωση αναγκάζει τη ρωγμή να διακλαδιστεί και περιορίζει κατά πολύ τη γωνιακή παραμόρφωση της επιφάνειας ( $\beta = 80 \%$ ). Και αυτή η θέση είναι δυσμενής για την κατασκευή, καθώς δεν είναι μεγάλες μόνο οι αναπτυσσόμενες ροπές (2 έως 4 φορές μεγαλύτερες από την αρχική για όλες τις επιβαλλόμενες μετατοπίσεις) αλλά και οι τιμές της στροφής με μέγιστο  $\theta = 15.5^\circ$ . Παρά δηλαδή την έντονη αλληλεπίδραση του θεμελίου με τη διάρρηξη, η εμφάνιση ενός κλάδου της διάρρηξης κάτω από αυτό και η απώλεια επαφής με το υποκείμενο έδαφος καταπονούν έντονα το θεμέλιο και εμποδίζουν τη μετέπειτα πιθανή λειτουργικότητα της ανωδομής.
- d)  $d / B' = 0.6$ : Σε όρους γωνιακής παραμόρφωσης και αναπτυσσόμενης καμπτικής ροπής στο θεμέλιο αυτή η θέση αποτελεί μία από τις ευνοϊκότερες. Η θεμελίωση περιορίζει κατά πολύ τη γωνιακή παραμόρφωση στην επιφάνεια  $\beta = 67 \%$ . Όσον αφορά στις ροπές, η απώλεια στήριξης του θεμελίου στο

- αριστερό τμήμα και στο δεξί άκρο, προκάλεσε αρνητικές ροπές 3 φορές περίπου μεγαλύτερες κατ' απόλυτο συγκριτικά με την αρχική. Και εδώ μεγαλύτερη τιμή της ροπής δεν παρατηρήθηκε για μεγάλες επιβαλλόμενες μετατοπίσεις αλλά για  $h / H = 2.1 \%$ . Ωστόσο, σε αυτή τη θέση παρατηρούνται μεγάλη στροφή  $\vartheta = 19.5^\circ$ , και ολίσθηση  $\delta x = 1.5 \text{ m}$ , οι οποίες και προφανώς θα έχουν δυσμενείς επιπτώσεις στην ανωδομή.
- e)  $d / B' = 0.4$ : Συγκριτικά με τις προηγούμενες θέσεις, η συγκεκριμένη καταδεικνύει εντονότερα τον ευνοϊκό ρόλο της αλληλεπίδρασης του θεμελίου με τη διάρρηξη. Τα μεγέθη της στροφής ( $\vartheta = 7.5^\circ$ ) και ολίσθησης ( $\delta x = 0.62 \text{ m}$ ) παραμένουν μεγάλα, αλλά συγκριτικά με τα ήδη παρουσιασθέντα σε άλλες σχετικές θέσεις είναι εμφανώς μικρότερα. Το κόστος βέβαια της εκτροπής αυτής της διάρρηξης και του περιορισμού των παραμορφώσεων είναι η ανάπτυξη μεγάλων αρνητικών ροπών (4 φορές μεγαλύτερες από την αρχική) σχεδόν από την αρχή της επιβολής της μετατόπισης.
- f)  $d / B' = 0.2$ : Η διάρρηξη παρότι εμφανίζεται δίπλα από το αριστερό άκρο του θεμελίου προκαλεί σε αυτό μεγάλη καταπόνηση σε όρους ροπών όμοια με αυτή της προηγούμενης θέσης. Ωστόσο το θεμέλιο συμπεριφέρεται πολύ καλά σε όρους στροφών ( $\theta = 1.6^\circ$ ) και ολίσθησης ( $\delta x = 0.09 \text{ m}$ ). Οι μικρές αυτές όμως μετακινήσεις δεν οφείλονται στον περιορισμό των επιπτώσεων της διάρρηξης λόγω του θεμελίου, αλλά στην σχετική θέση θεμελίου – διάρρηξης.
- g)  $d / B' = 0.0$ : Μία από τις ευνοϊκότερες σχετικές θέσεις διάρρηξης – θεμελίου. Παρά το γεγονός ότι η διάρρηξη εμφανίζεται 2 m μακριά από το αριστερό άκρο

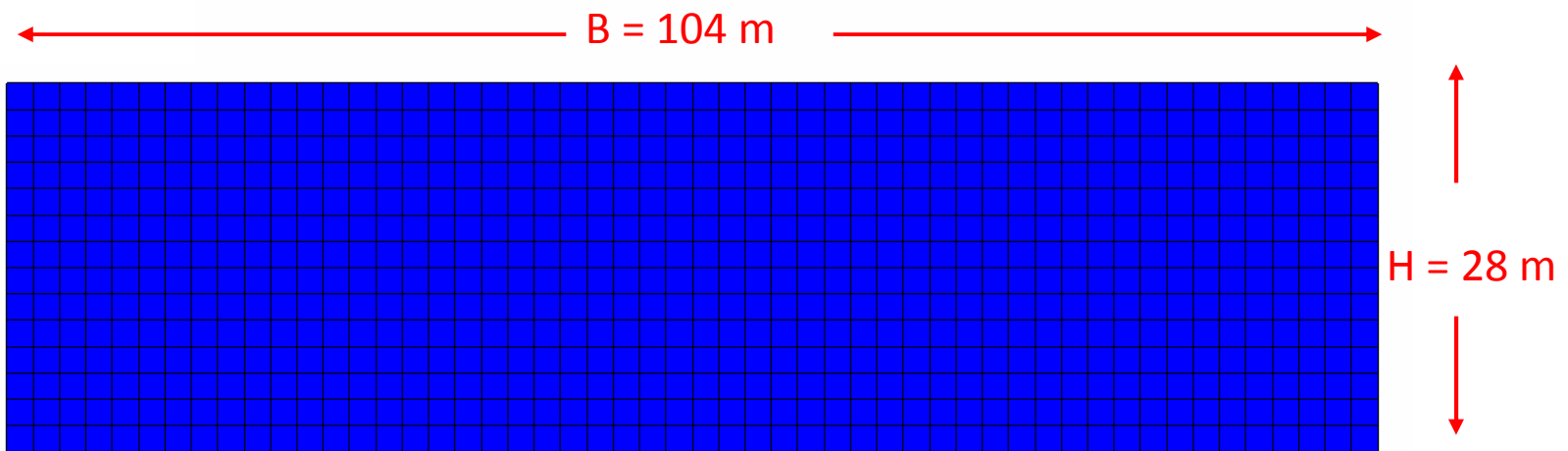
- του θεμελίου, το θεμέλιο περιορίζει την γωνιακή παραμόρφωση στην επιφάνεια χωρίς να αναπτύσσει μεγάλη στροφή ( $\vartheta = 0.5^\circ$ ) και ολίσθηση ( $\delta x = 0.025 \text{ m}$ ), ενώ οι ροπές που αναπτύσσονται είναι σχετικά μικρές ( $M = - 2 M_{staticload}$ )
- η)  $d / B' = - 0.2$ : Παρά το γεγονός ότι η διάρρηξη εμφανίζεται μακριά από το θεμέλιο και δεν υπάρχει αλληλεπίδραση με αυτό σε όρους γωνιακής παραμόρφωσης, η απώλεια επαφής του θεμελίου με το έδαφος οδηγεί στην ανάπτυξη αρνητικών ροπών, πολύ μικρότερων βέβαια από αυτές των προηγούμενων θέσεων ( $M = - 1.5 M_{staticload}$ ), και ανεπαίσθητων μετακινήσεων.

Όπως παρουσιάστηκε παραπάνω, η διάρρηξη αλληλεπιδρά με διάφορους τρόπους με το έδαφος και τη θεμελίωση, ανάλογα με την σχετική θέση των δύο. Η διάρρηξη άλλοτε εκτρέπεται, άλλοτε διακλαδίζεται και σε κάποια θέση το θεμέλιο περιορίζει τη γωνιακή παραμόρφωση της επιφάνειας. Το θεμέλιο με τη σειρά του ολισθαίνει επί του έδαφος, ανασηκώνεται και στρέφεται, ενώ οι ροπές που αναπτύσσονται σε αυτό όχι μόνο αυξάνονται έως και 4 φορές, αλλά μερικές φορές αλλάζουν και πρόσημο. Η διάρρηξη επηρεάζει το θεμέλιο ακόμα και όταν εμφανίζεται σχετικά μακριά από αυτό ( $d / B' = 1.2$  ή  $d / B' = - 0.2$ ). Ο τρόπος με τον οποίο επιδρά το θεμέλιο στον τρόπο εμφάνισης της διάρρηξης στην επιφάνεια παρουσιάζεται καλύτερα στο **Σχήμα 42 (i) και (ii)**. Το θεμέλιο έχει αφαιρεθεί από την εικόνα για να εξεταστεί καλύτερα η εκδήλωση της διάρρηξης στην επιφάνεια. Παρατηρείται ότι ακόμα και όταν η διάρρηξη εμφανίζεται σχετικά μακριά προκαλεί αποκόλληση του θεμελίου από το

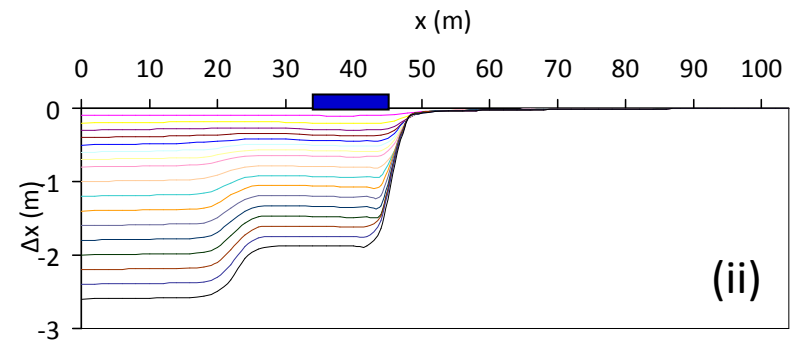
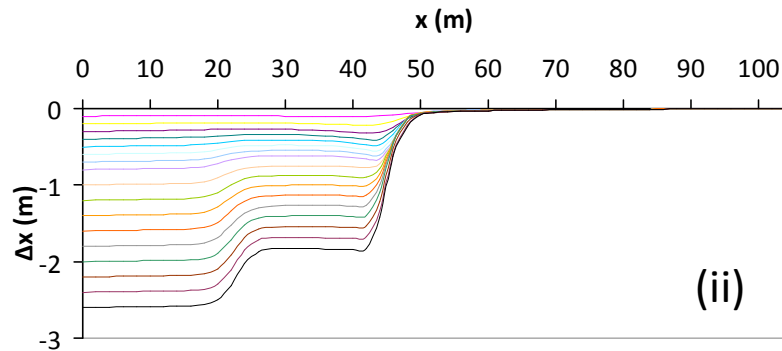
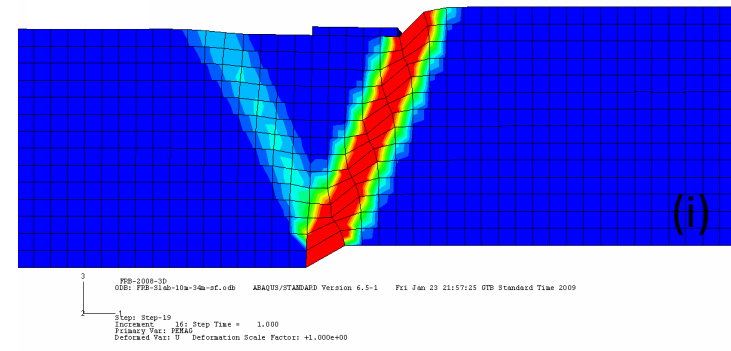
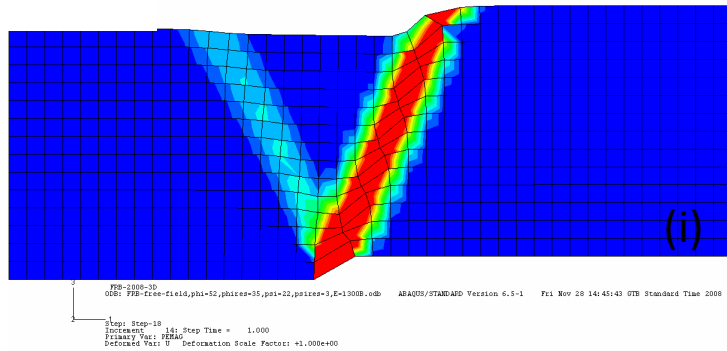


υποκείμενο έδαφος. Ωστόσο, πρέπει να σημειωθεί ότι το εύρος επιρροής της διάρρηξης μπορεί να μην είναι τόσο μεγάλο, αλλά ο αραιός κάρναβος που χρησιμοποιήθηκε να επηρέασε τα αποτελέσματα.

*Μαργαρίτα Παλαιολόγου, Διπλωματική Εργασία, ΕΜΠ 2009*



**Σχήμα 4.1** :Γεωμετρία του προβλήματος και διακριτοποίηση του προσομοιώματος

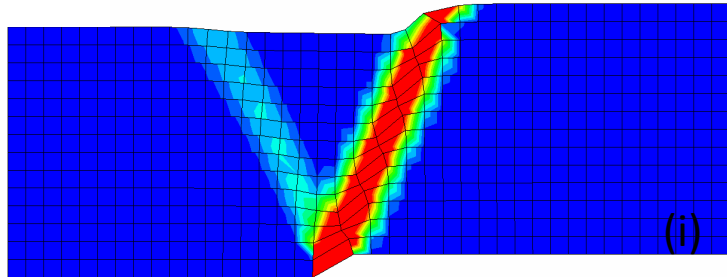


(α) ελεύθερο πεδίο

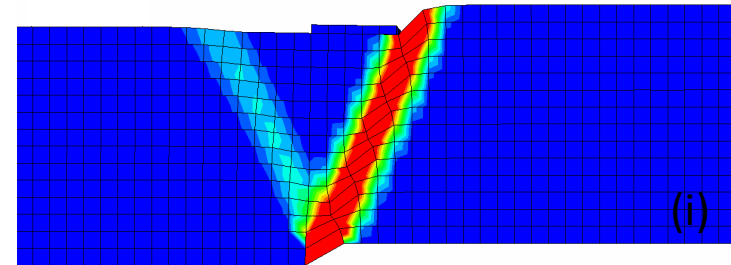
(β) εγγύς του θεμελίου

**Σχήμα 4.2.** Αλληλεπίδραση κανονικής διάρρηξης – εδάφους – άκαμπτου θεμελίου σε σχετική απόσταση  $d / B' = 1.2$ :  
 (i) παραμορφωμένος κάρναβος και πλαστική παραμόρφωση, (ii) προφίλ επιφανειακών οριζόντιων μετατοπίσεων  $\Delta x$  στο  
 (α) ελεύθερο πεδίο και (β) στην εγγύς του θεμελίου περιοχή.

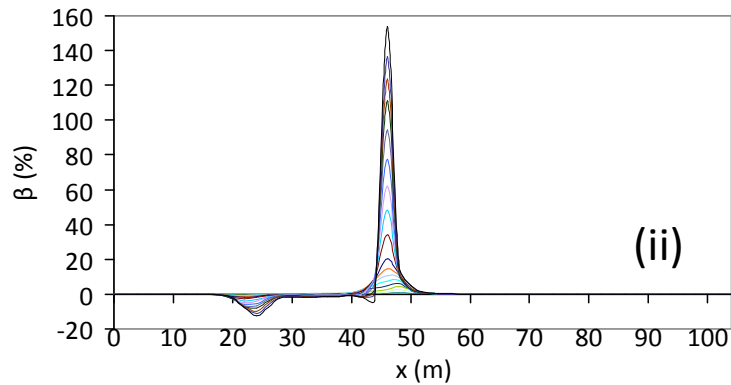




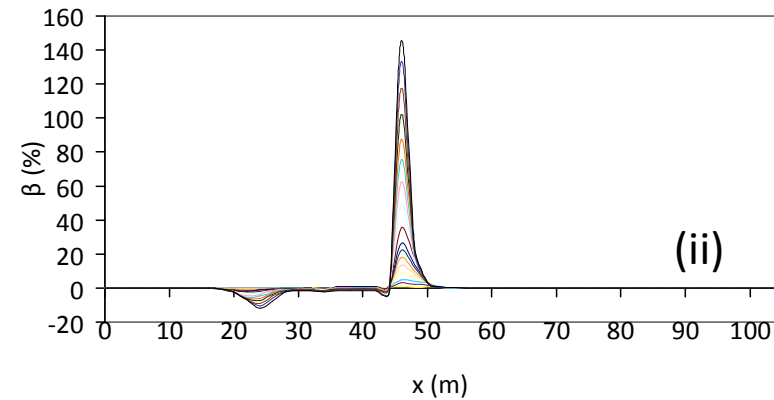
PPS-2008-20  
 Odb: PPS-free-field,phi=52,phiies=35,psi=22,psies=0,K=1.3008.odb ABAQUS/STANDARD Version 6.5-1 Fri Nov 20 14:45:43 STD Standard Time 2008  
 Step: Step=19  
 Increment: 14; Step Time = 1.000  
 Finality Val: PERRAD  
 Deformed Val: 0 Deformation Scale Factor: +1.000e+00



PPS-2008-20  
 Odb: PPS-10a-94m-cr.odb ABAQUS/STANDARD Version 6.5-1 Fri Jan 23 21:57:25 STD Standard Time 2009  
 Step: Step=19  
 Increment: 16; Step Time = 1.000  
 Finality Val: PERRAD  
 Deformed Val: 0 Deformation Scale Factor: +1.000e+00

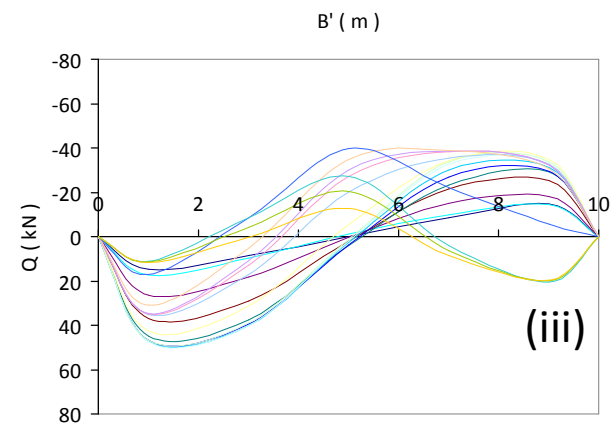
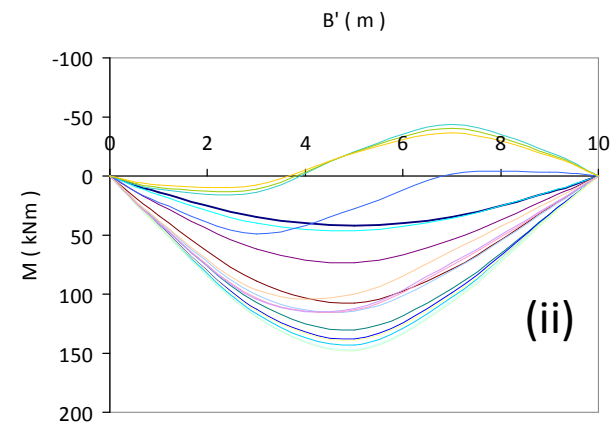
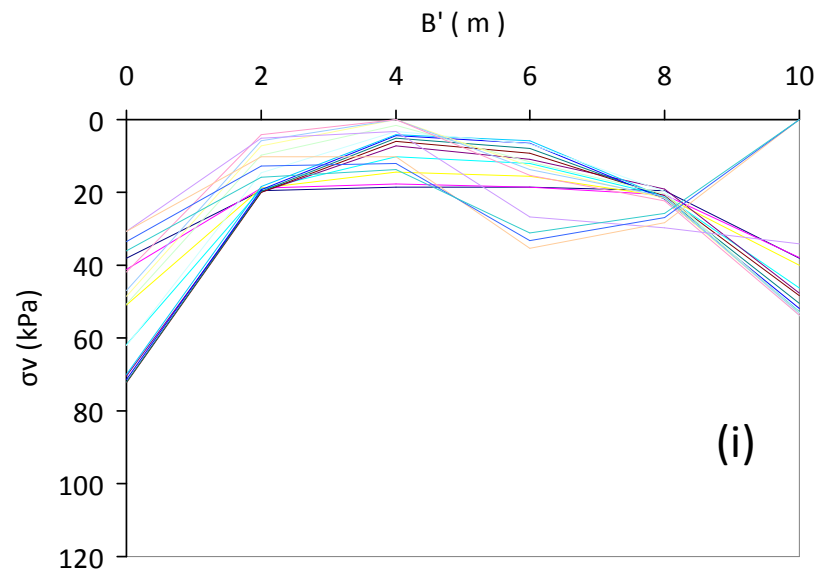


(α) ελεύθερο πεδίο

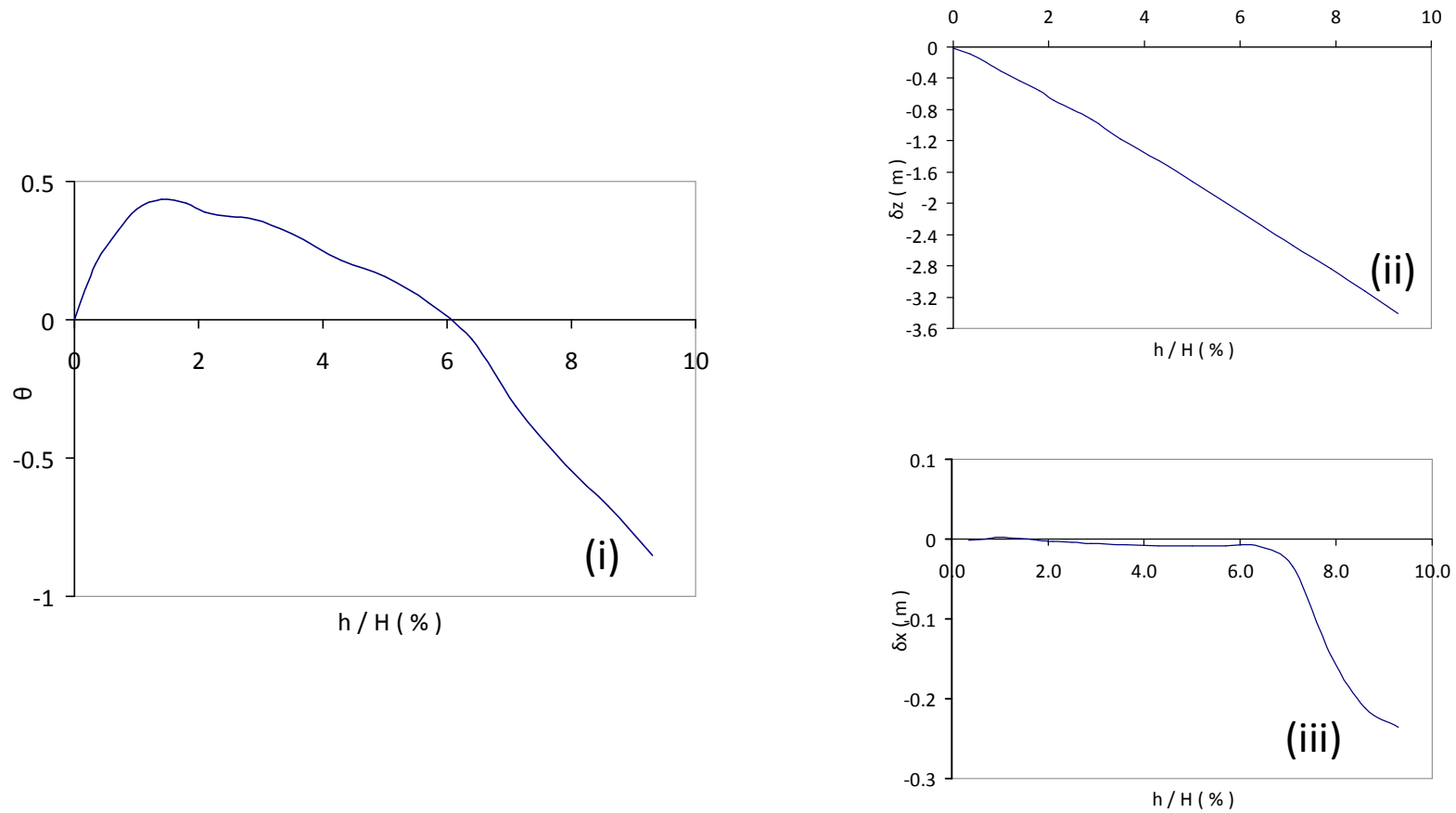


(β) εγγύς του θεμελίου

**Σχήμα 4.4.** Αλληλεπίδραση κανονικής διάρρηξης – εδάφους – άκαμπτου θεμελίου σε σχετική απόσταση  $d / B' = 1.2$ :  
 ( i ) παραμορφωμένος κάρναβος και πλαστική παραμόρφωση , (ii) προφίλ γωνιακής παραμόρφωσης  $\beta$  στο  
 (α) ελεύθερο πεδίο και ( β ) στην εγγύς του θεμελίου περιοχή.

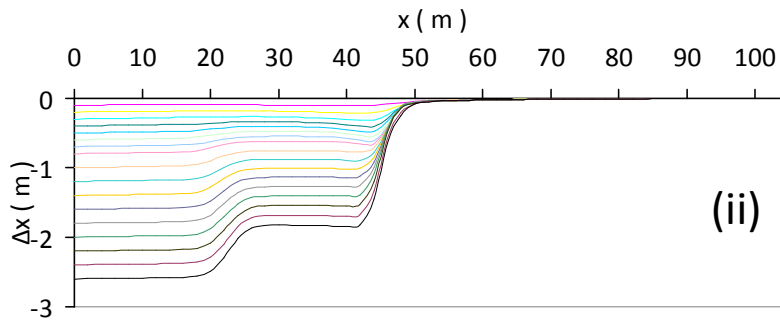
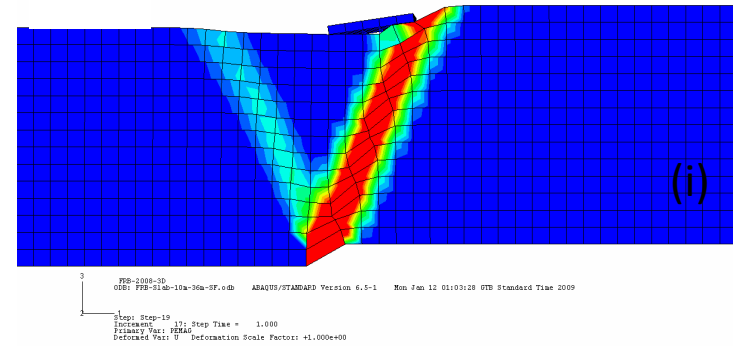
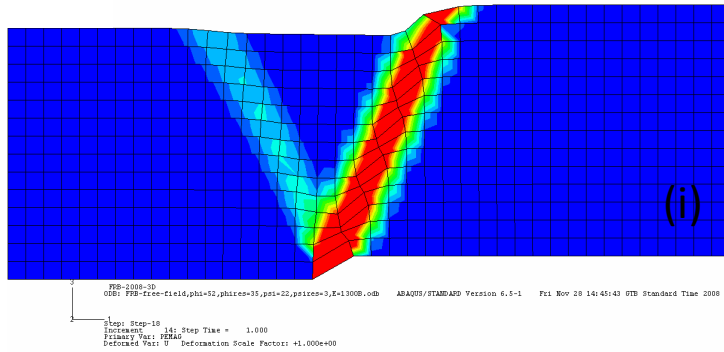


**Σχήμα 4.5.** Αλληλεπίδραση κανονικής διάρρηξης – εδάφους – άκαμπτου θεμελίου σε σχετική απόσταση  $d / B' = 1.2$ : ( i ) τάσεις επαφής  $\sigma_n$ , (ii) καμπτικές ροπές θεμελίου  $M$  και (iii) τέμνουσες  $Q$ .

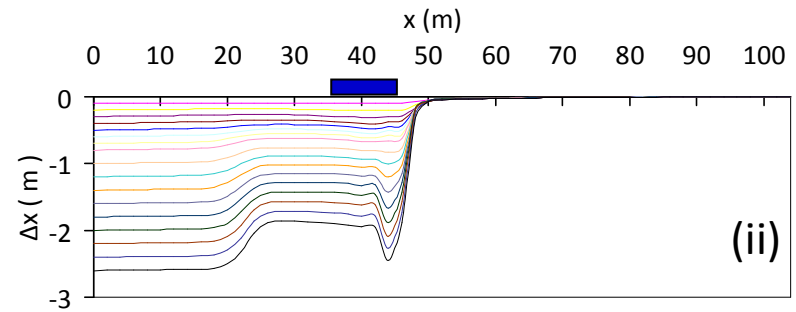


**Σχήμα 4.6.** Αλληλεπίδραση κανονικής διάρρηξης – εδάφους – άκαμπτου θεμελίου σε σχετική απόσταση  $d / B' = 1.2$ : (i) στροφή θεμελίου  $\theta$  (deg), (ii) διαφορική καθίζηση θεμελίου  $\delta z$  και (iii) ολίσθηση θεμελίου  $\delta x$ .



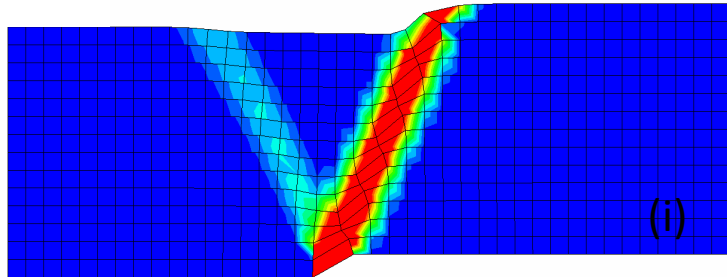


(α) ελεύθερο πεδίο

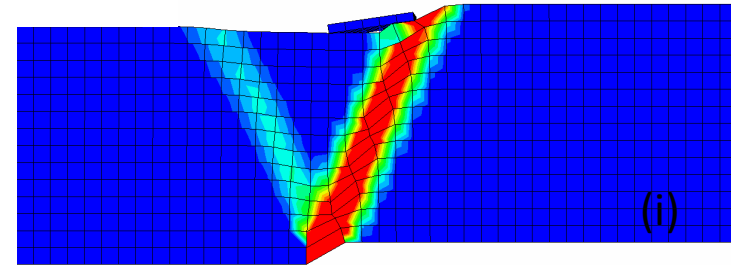


(β) εγγύς του θεμελίου

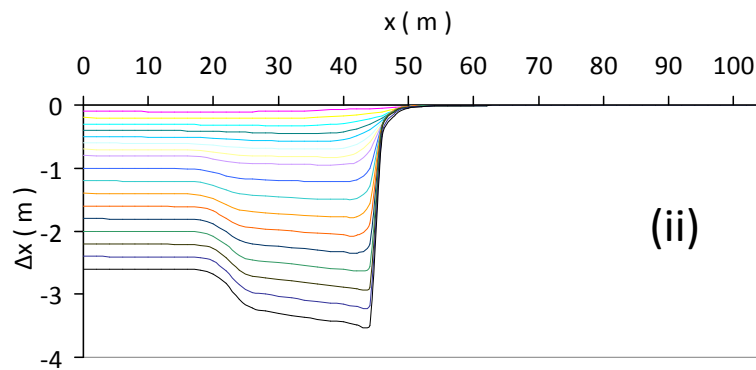
**Σχήμα 4.7.** Αλληλεπίδραση κανονικής διάρρηξης – εδάφους – άκαμπτου θεμελίου σε σχετική απόσταση  $d / B' = 1.0$ :  
 ( i ) παραμορφωμένος κάρναβος και πλαστική παραμόρφωση , (ii) προφίλ επιφανειακών οριζόντιων μετατοπίσεων  $\Delta x$  στο  
 (α) ελεύθερο πεδίο και ( β ) στην εγγύς του θεμελίου περιοχή.



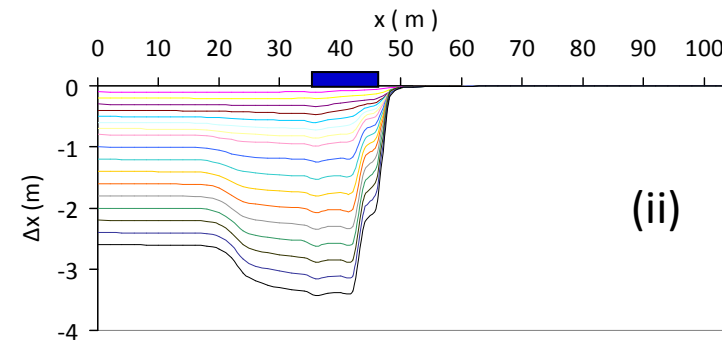
PFD-2008-20  
 Obj: PFD-free-field,phi=52,phiite=35,psi=22,psite=0,K=1.9008.odt ABAQUS/STANDARD Version 6.5-1 Fri Nov 20 14:45:43 OTB Standard Time 2008  
 Step: Step-19  
 Increment: 14; Step Time = 1.000  
 Primary Var: PFMAG  
 Deformed Val: 0 Deformation Scale Factor: +1.000e+00



PFD-2008-20  
 Obj: PFD-10a-10a-36a-3F.odt ABAQUS/STANDARD Version 6.5-1 Mon Jan 12 01:03:28 OTB Standard Time 2009  
 Step: Step-19  
 Increment: 13; Step Time = 1.000  
 Primary Var: PFMAG  
 Deformed Val: 0 Deformation Scale Factor: +1.000e+00

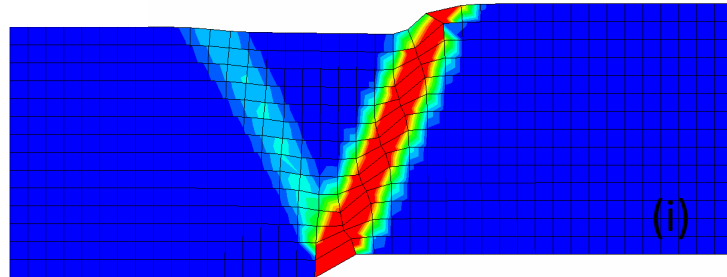


(α) ελεύθερο πεδίο

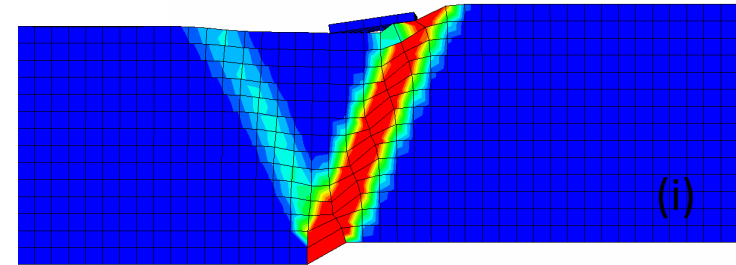


(β) εγγύς του θεμελίου

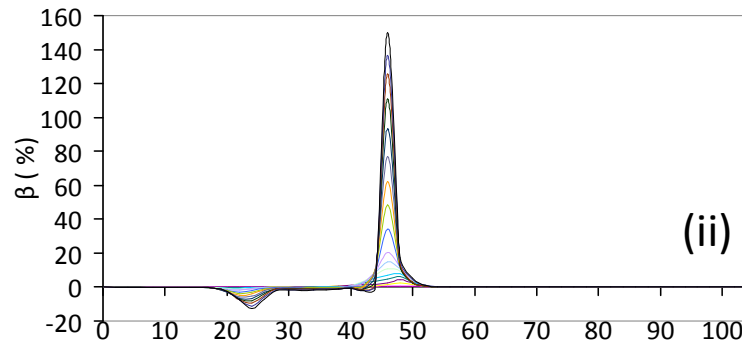
**Σχήμα 4.8.** Αλληλεπίδραση κανονικής διάρρηξης – εδάφους – άκαμπτου θεμελίου σε σχετική απόσταση  $d / B' = 1.0$ :  
 ( i ) παραμορφωμένος κάρναβος και πλαστική παραμόρφωση , (ii) προφίλ επιφανειακών κατακόρυφων μετατοπίσεων  $\Delta z$  στο  
 (α) ελεύθερο πεδίο και ( β ) στην εγγύς του θεμελίου περιοχή.



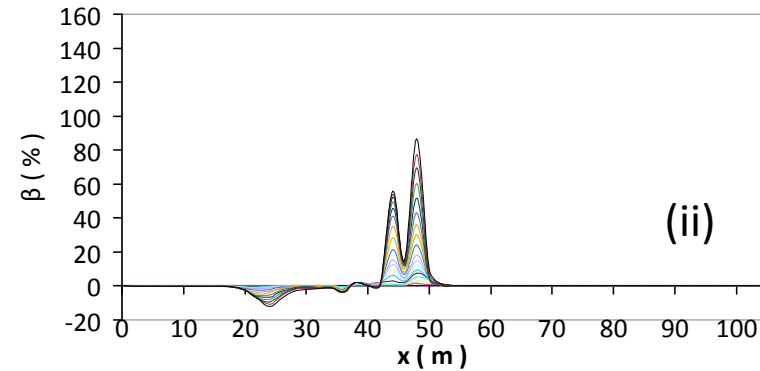
P08-2008-10  
 ODB: P08-10e-f1e1d,phi+52,phi1res+35,phi1+22,phi1res+3,E-13008.rdb ABAQUS/STANDARD Version 6.5-1 Fri Nov 28 14:45:43 CDT Standard Time 2008  
 Stop: Step-18  
 Increment: 14; Step Time = 1.000  
 Primary Var: PZMAX  
 Secondary Var: U Information Scale Factor: +1.000e+00



P08-2008-10  
 ODB: P08-10d-10a-36a-3F.rdb ABAQUS/STANDARD Version 6.5-1 Mon Jan 12 01:03:28 CDT Standard Time 2009  
 Stop: Step-19  
 Increment: 11; Step Time = 1.000  
 Primary Var: PZMAX  
 Secondary Var: U Information Scale Factor: +1.000e+00

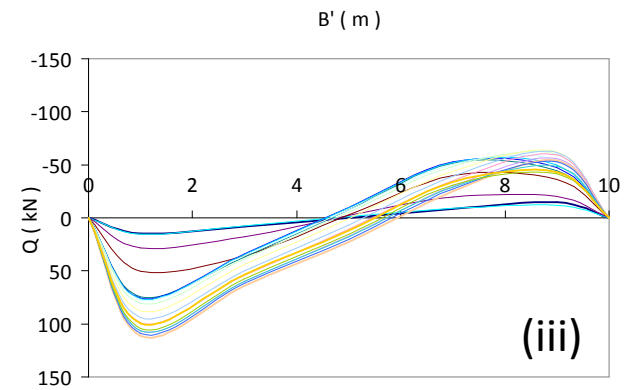
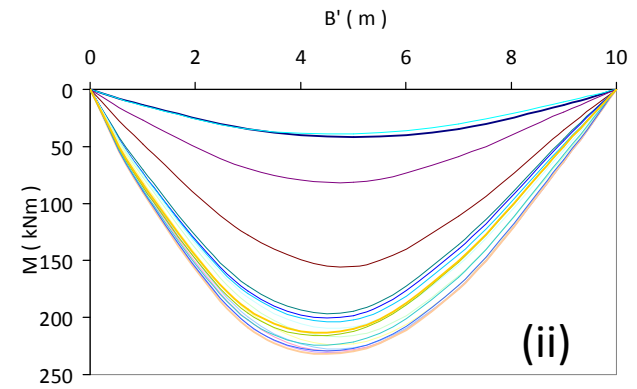
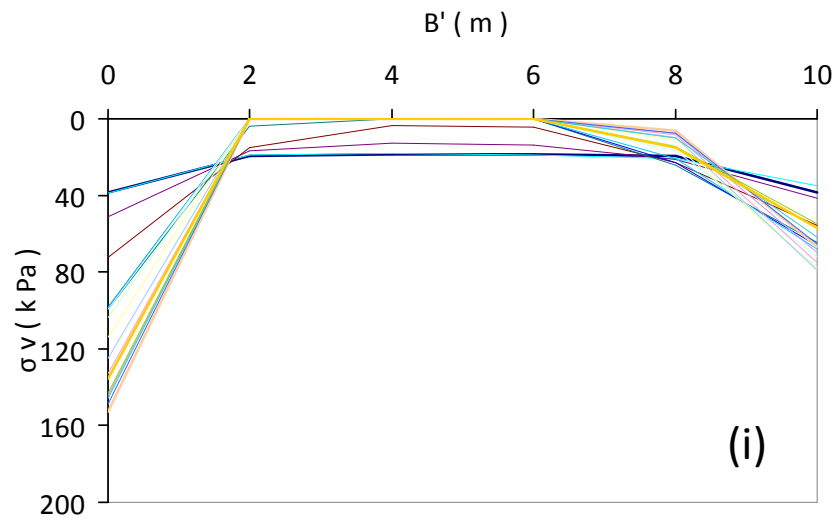


(α) ελεύθερο πεδίο

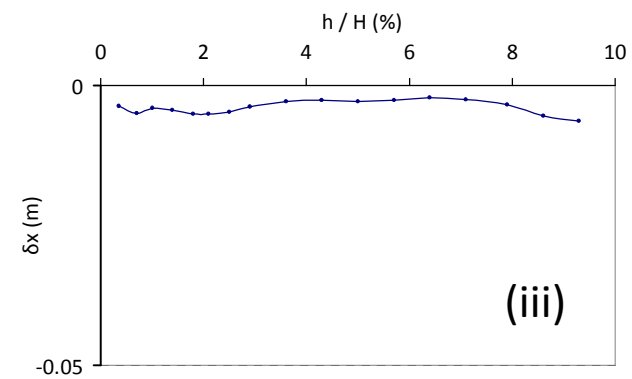
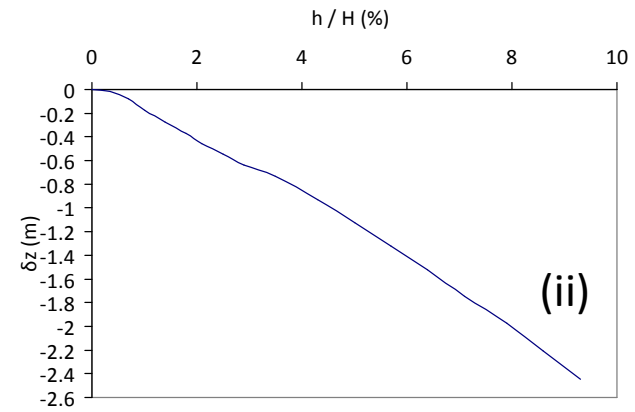
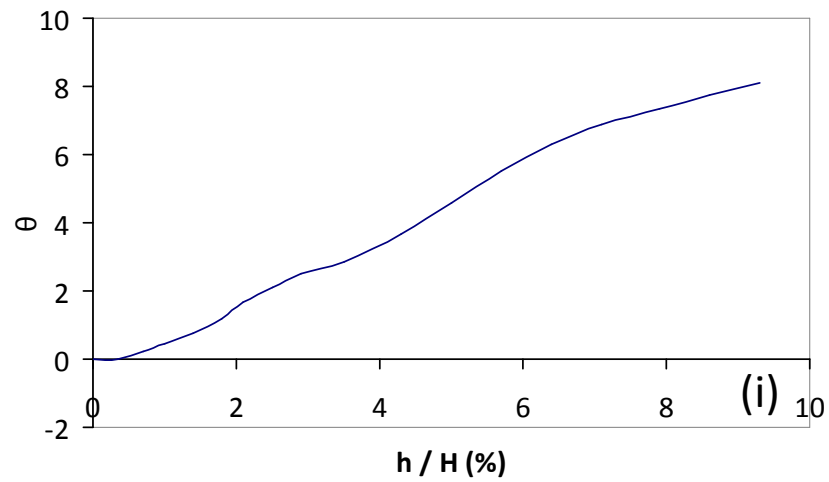


(β) εγγύς του θεμελίου

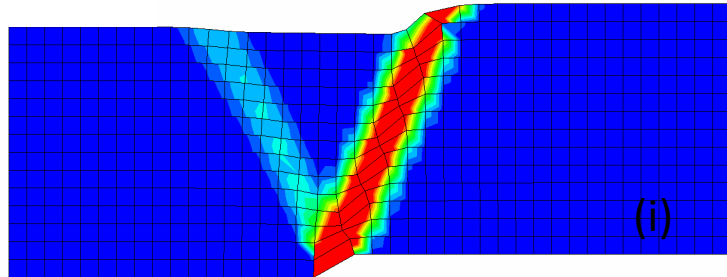
**Σχήμα 4.9.** Αλληλεπίδραση κανονικής διάρρηξης – εδάφους – άκαμπτου θεμελίου σε σχετική απόσταση  $d / B' = 1.0$ :  
 ( i ) παραμορφωμένος κώνναβος και πλαστική παραμόρφωση , (ii) προφίλ γωνιακής παραμόρφωσης  $\beta$  στο  
 (α) ελεύθερο πεδίο και ( β ) στην εγγύς του θεμελίου περιοχή.



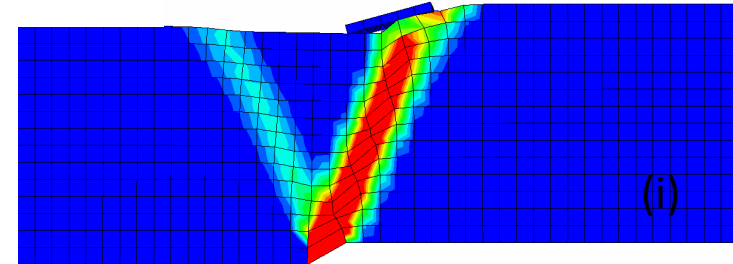
**Σχήμα 4.10.** Αλληλεπίδραση κανονικής διάρρηξης – εδάφους – άκαμπτου θεμελίου σε σχετική απόσταση  $d / B' = 1.0$  : (i) τάσεις επαφής  $\sigma_v$ , (ii) καμπτικές ροπές θεμελίου  $M$  και (iii) τέμνουσες  $Q$ .



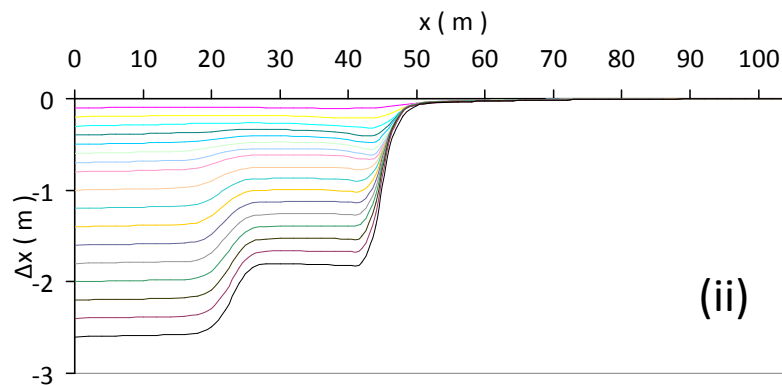
**Σχήμα 4.11.** Αλληλεπίδραση κανονικής διάρρηξης – εδάφους – άκαμπτου θεμελίου σε σχετική απόσταση  $d/B' = 1.0$  :  
 ( i ) στροφή θεμελίου  $\theta$  (deg) , (ii) διαφορική καθίζηση θεμελίου  $\delta z$  και (iii) ολίσθηση θεμελίου  $\delta x$ .



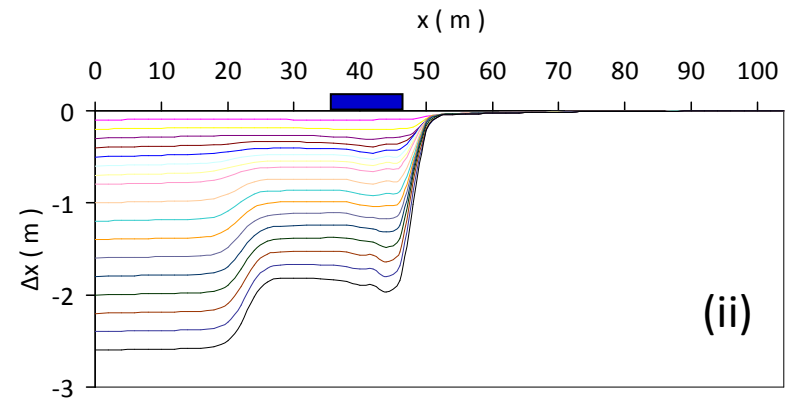
PFD-2208-10  
 C001: PFD-Case-Field.phi=52,phi1ex=35,psi=22,ps1ex=3,K=1300B.oib ABAQUS/STANDARD Version 6.5-1 Fri Nov 28 14:45:43 CDT Standard Time 2008  
 Step: Step-18  
 Increment: 14; Step Time = 1.000  
 Primary Var: PERRAD  
 Deformed Var: 0 Deformation Scale Factor: +1.000e+00



PFD-2208-10  
 C001: PFD-10a-10m-rc.oib ABAQUS/STANDARD Version 6.5-1 Mon Jan 12 15:04:27 CDT Standard Time 2009  
 Step: Step-19  
 Increment: 13; Step Time = 1.000  
 Primary Var: PERRAD  
 Deformed Var: 0 Deformation Scale Factor: +1.000e+00

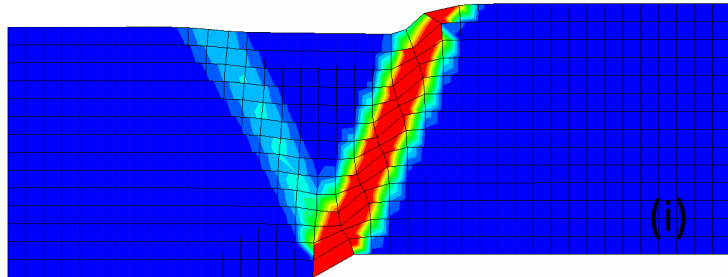


(α) ελεύθερο πεδίο

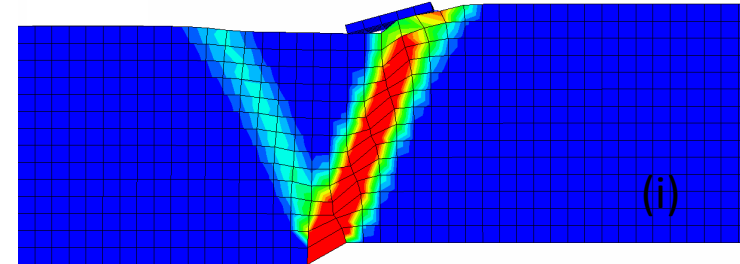


(β) εγγύς του θεμελίου

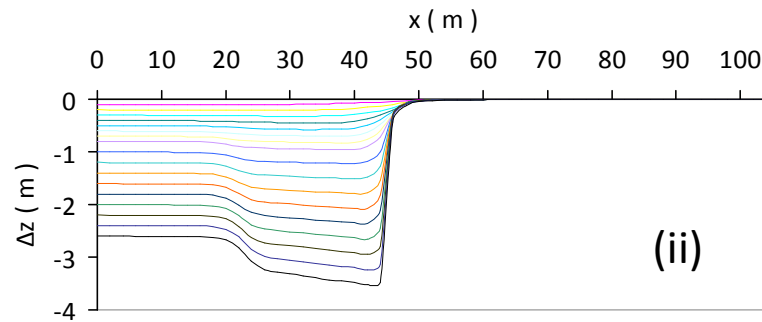
**Σχήμα 4.12.** Αλληλεπίδραση κανονικής διάρρηξης – εδάφους – άκαμπτου θεμελίου σε σχετική απόσταση  $d / B' = 0.8$ :  
 ( i ) παραμορφωμένος κάρναβος και πλαστική παραμόρφωση , (ii) προφίλ επιφανειακών οριζόντιων μετατοπίσεων  $\Delta x$  στο  
 (α) ελεύθερο πεδίο και ( β ) στην εγγύς του θεμελίου περιοχή.



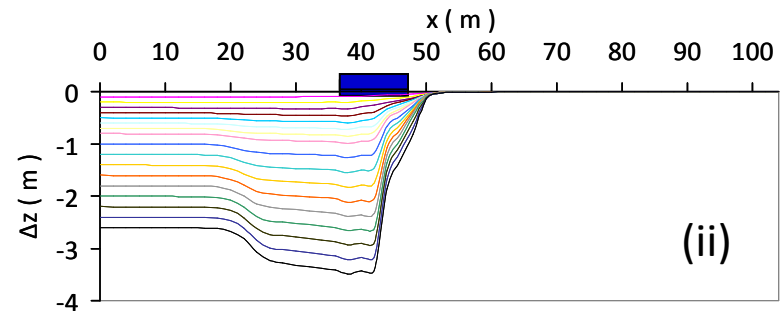
PDB-2208-20  
 C:\msd\case-field\phi1=52,\phi1res=35,\psi1=22,\psi1res=3,E=1300B.cdb ABAQUS/STANDARD Version 6.5-1 Fri Nov 20 14:45:43 OTB Standard Time 2008  
 Step: Step-18  
 Increment: 14; Step Time = 1.000  
 Primary Var: PERR  
 Deformed Var: 0 Deformation Scale Factor: +1.000e+00



PDB-2208-20  
 C:\msd\case-field\phi1=52,\phi1res=35,\psi1=22,\psi1res=3,E=1300B.cdb ABAQUS/STANDARD Version 6.5-1 Mon Jan 12 15:04:27 OTB Standard Time 2009  
 Step: Step-19  
 Increment: 13; Step Time = 1.000  
 Primary Var: PERR  
 Deformed Var: 0 Deformation Scale Factor: +1.000e+00

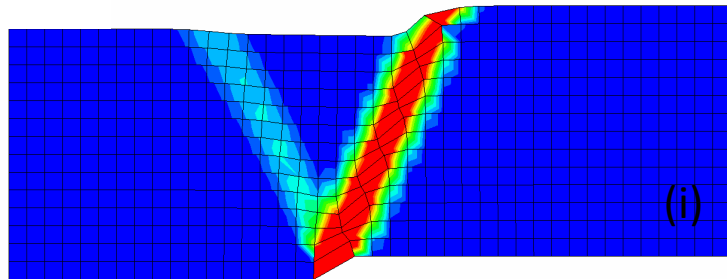


(α) ελεύθερο πεδίο

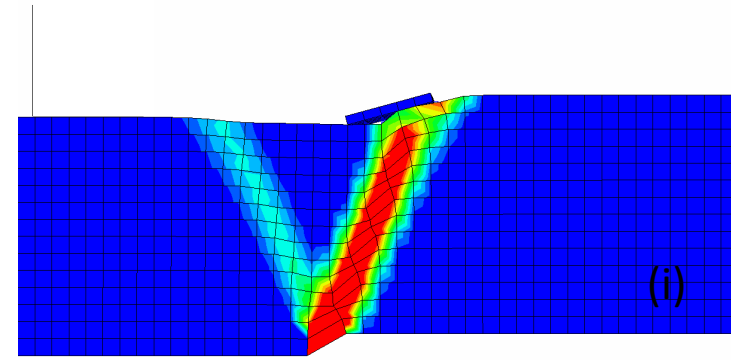


(β) εγγύς του θεμελίου

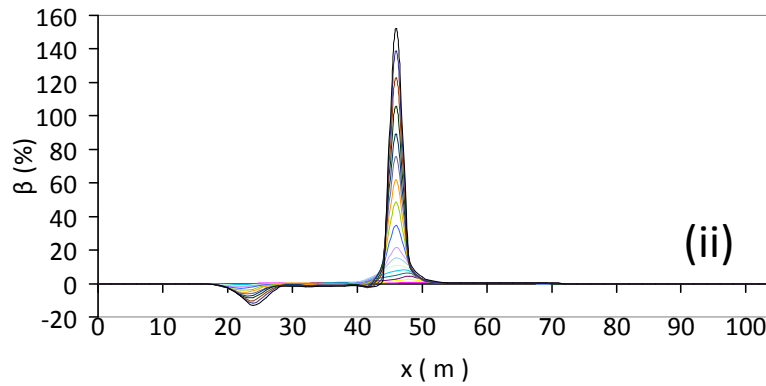
**Σχήμα 4.13.** Αλληλεπίδραση κανονικής διάρρηξης – εδάφους – άκαμπτου θεμελίου σε σχετική απόσταση  $d / B' = 0.8$  :  
 ( i ) παραμορφωμένος κάρναβος και πλαστική παραμόρφωση , (ii) προφίλ επιφανειακών κατακόρυφων μετατοπίσεων  $\Delta z$  στο  
 (α) ελεύθερο πεδίο και ( β ) στην εγγύς του θεμελίου περιοχή.



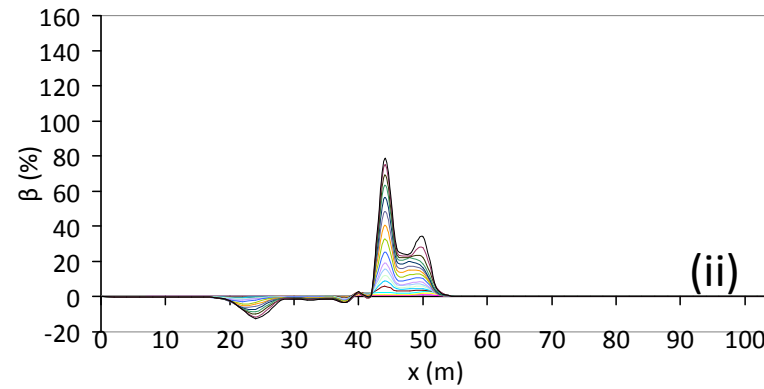
PFR-2108-10  
 OS: PFR-Case-field,phi=52,phiies=35,psi=22,psies=3,K=13008.odt ABAQUS/STANDARD Version 6.5-1 Fri Nov 28 14:45:43 DTB Standard Time 2009  
 Step: Step-18  
 Increment: 14; Step Time = 1.000  
 Primary Var: PFRAG  
 Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +1.000e+00



PFR-2108-10  
 OS: PFR-1ad-10a-30a-of.odt ABAQUS/STANDARD Version 6.5-1 Mon Jan 12 15:04:27 DTB Standard Time 2009  
 Step: Step-19  
 Increment: 11; Step Time = 1.000  
 Primary Var: PFRAG  
 Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +1.000e+00



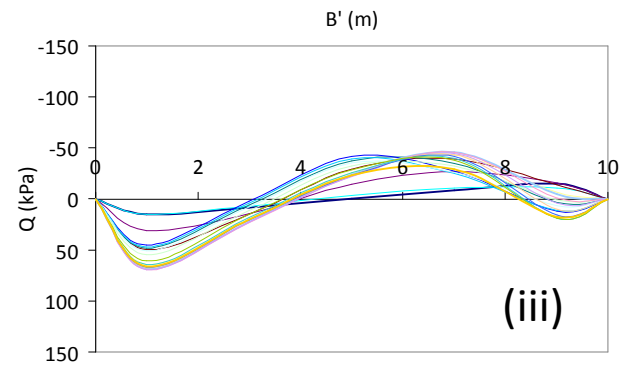
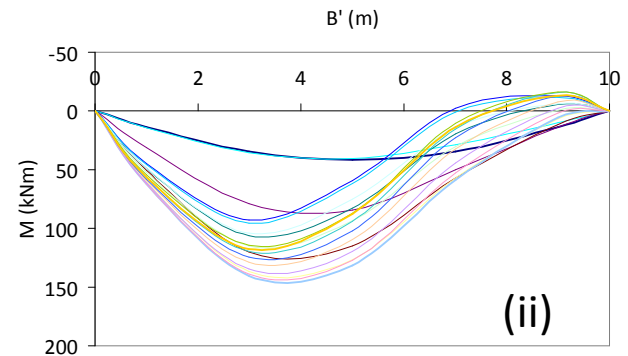
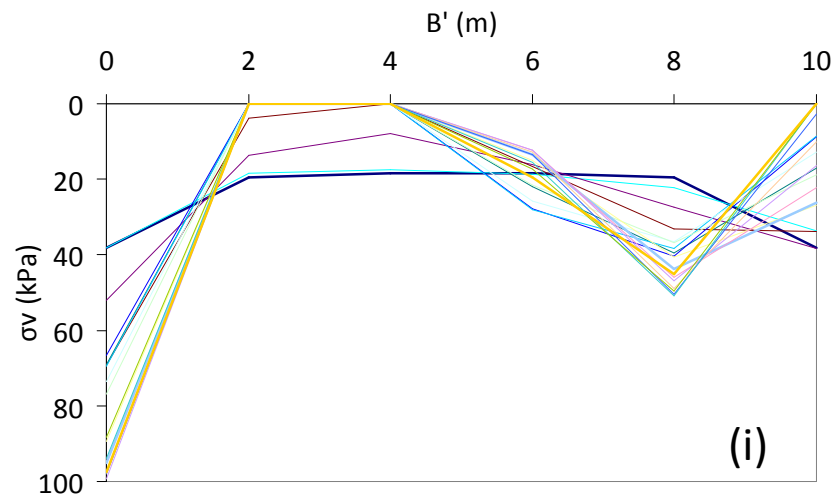
(α) ελεύθερο πεδίο



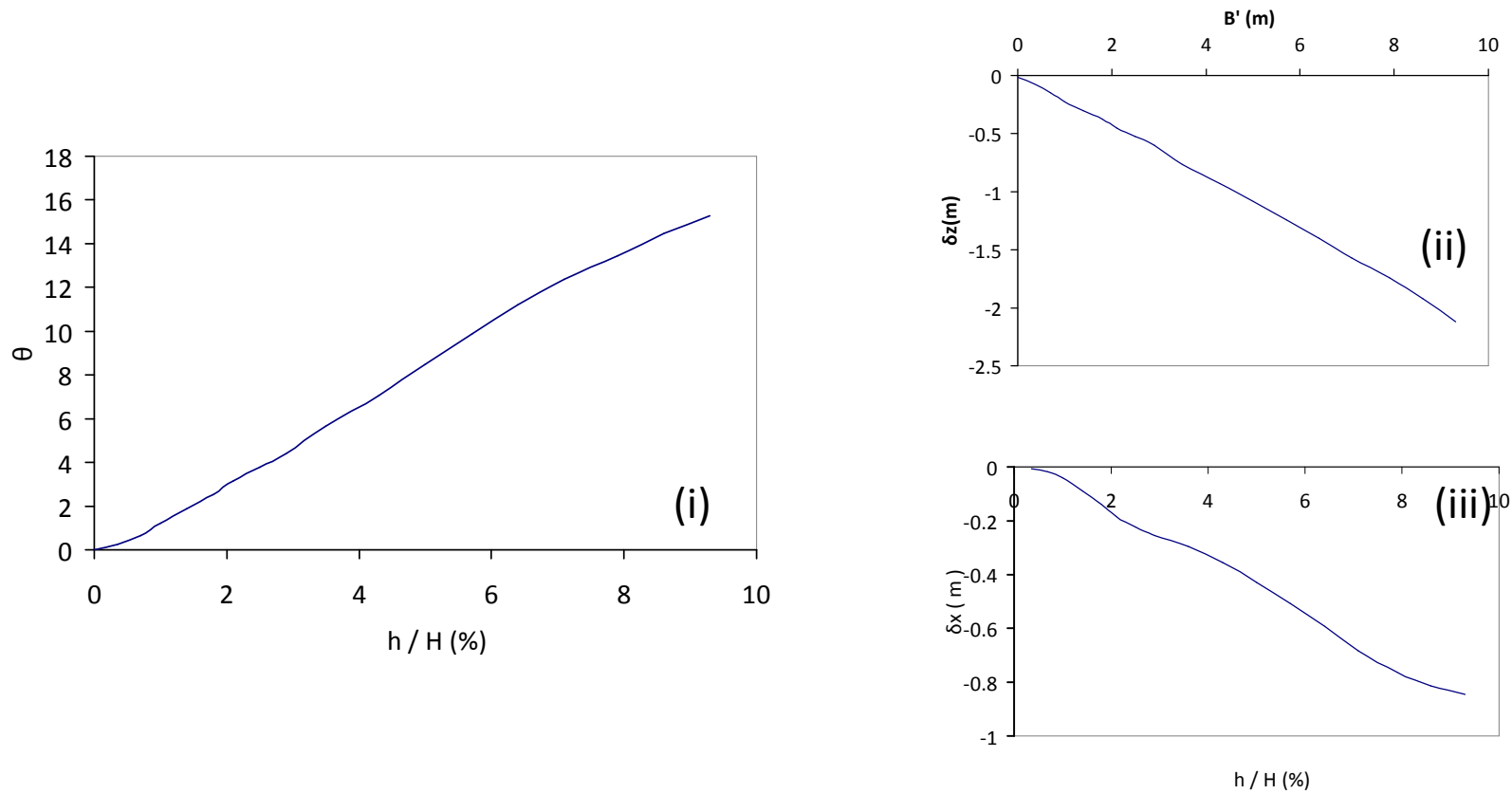
(β) εγγύς του θεμελίου

**Σχήμα 4.14.** Αλληλεπίδραση κανονικής διάρρηξης – εδάφους – άκαμπτου θεμελίου σε σχετική απόσταση  $d / B' = 0.8$  :  
 ( i ) παραμορφωμένος κάρναβος και πλαστική παραμόρφωση , (ii) προφίλ γωνιακής παραμόρφωσης  $\beta$  στο  
 (α) ελεύθερο πεδίο και (β) στην εγγύς του θεμελίου περιοχή.

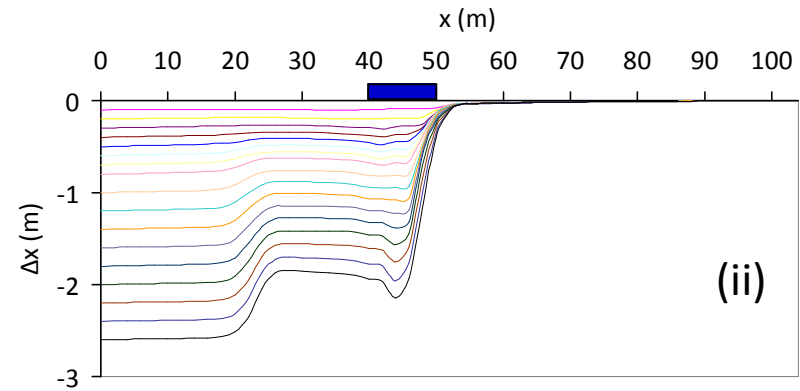
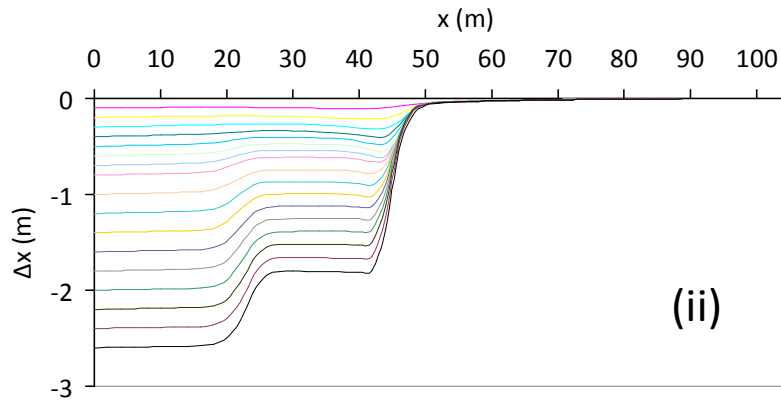
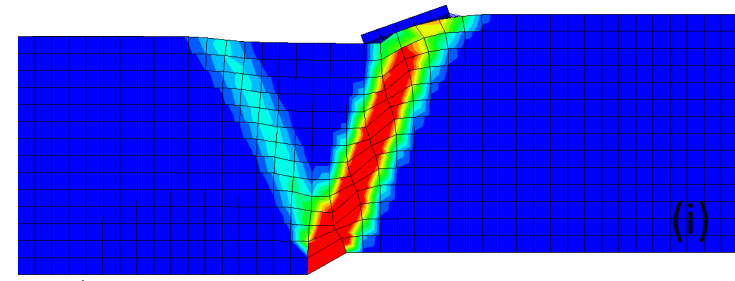
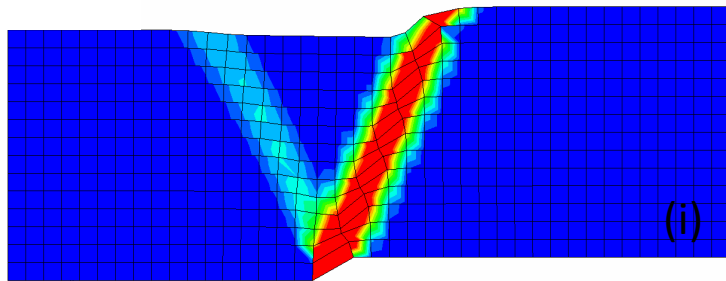




**Σχήμα 4.15.** Αλληλεπίδραση κανονικής διάρρηξης – εδάφους – άκαμπτου θεμελίου σε σχετική απόσταση  $d / B' = 0.8$  : ( i ) τάσεις επαφής  $\sigma_v$  , (ii) καμπτικές ροπές θεμελίου  $M$  και (iii) τέμνουσες  $Q$ .



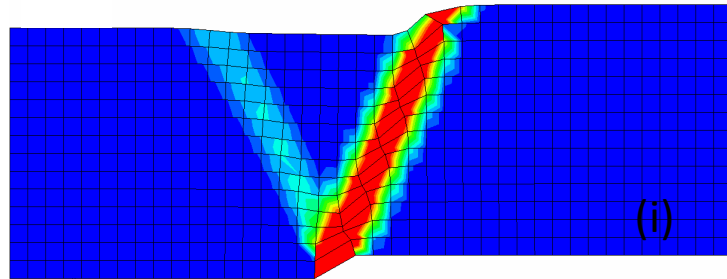
**Σχήμα 4.16.** Αλληλεπίδραση κανονικής διάρρηξης – εδάφους – άκαμπτου θεμελίου σε σχετική απόσταση  $d / B' = 0.8$  : (i) στροφή θεμελίου  $\vartheta$  (deg), (ii) διαφορική καθίζηση θεμελίου  $\delta z$  και (iii) ολίσθηση θεμελίου  $\delta x$ .



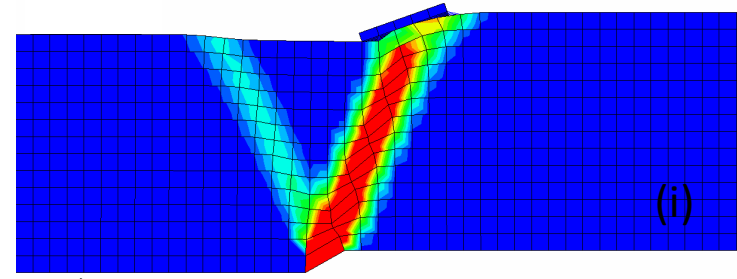
(α) ελεύθερο πεδίο

(β) εγγύς του θεμελίου

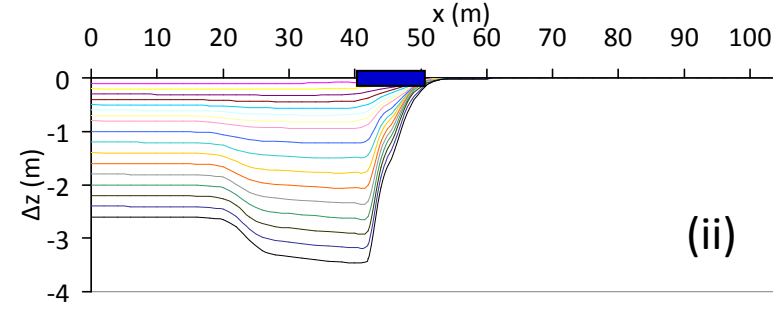
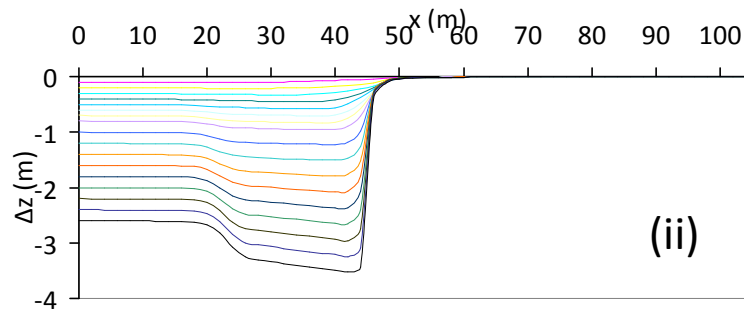
**Σχήμα 4.17.** Αλληλεπίδραση κανονικής διάρρηξης – εδάφους – άκαμπτου θεμελίου σε σχετική απόσταση  $d / B' = 0.6$ :  
 (i) παραμορφωμένος κάρναβος και πλαστική παραμόρφωση, (ii) προφίλ επιφανειακών οριζόντιων μετατοπίσεων  $\Delta x$  στο  
 (α) ελεύθερο πεδίο και (β) στην εγγύς του θεμελίου περιοχή.



P22-010b-30  
 ODB: P22-010b-30-10a-40-sf.odb ABAQUS/STANDARD Version 6.5-1 Fri Nov 28 14:45:43 UTC Standard Time 2009  
 Step: Step-19  
 Increment: 14; Step Time = 1.000  
 Primary Var: PEMAG  
 Secondary Var: U Deformation Scale Factor: +1.000e+00



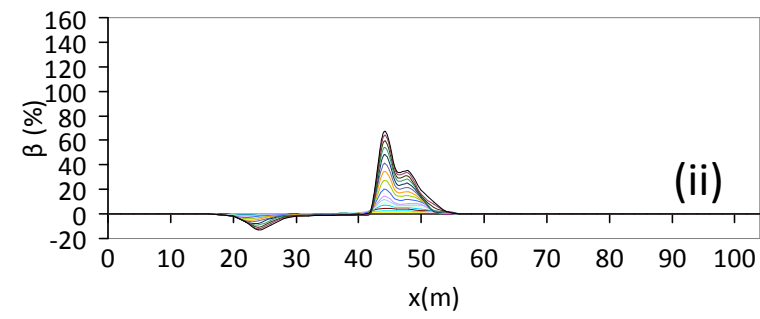
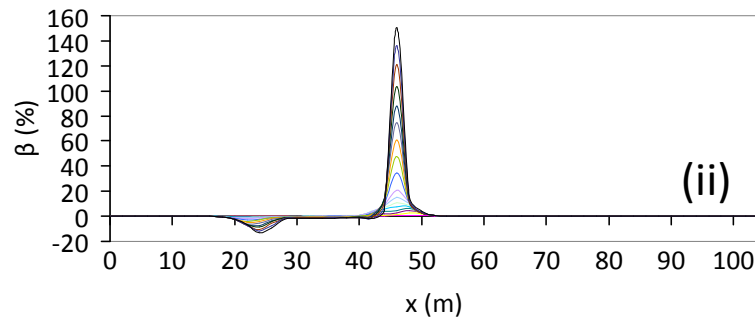
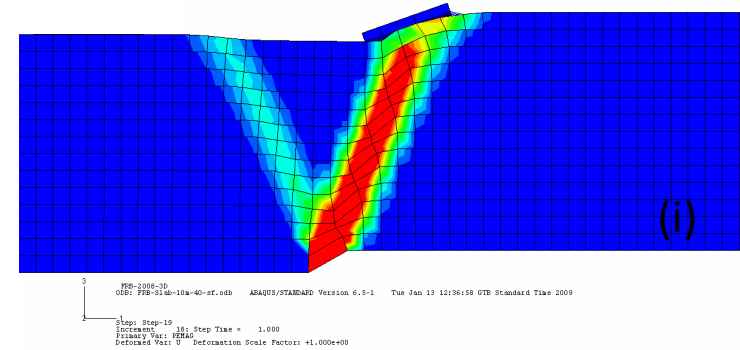
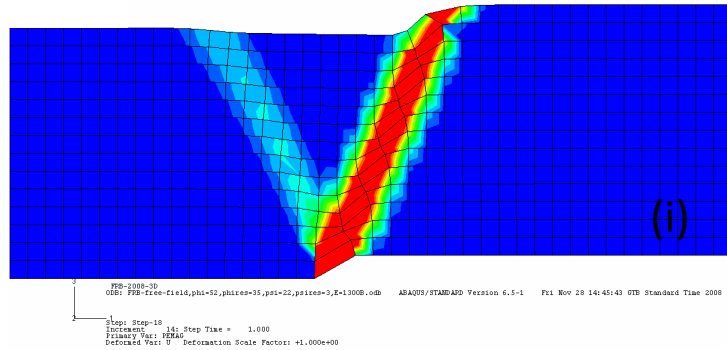
P22-010b-30  
 ODB: P22-010b-10a-40-sf.odb ABAQUS/STANDARD Version 6.5-1 Tue Jan 13 12:36:58 UTC Standard Time 2009  
 Step: Step-19  
 Increment: 18; Step Time = 1.000  
 Primary Var: PEMAG  
 Secondary Var: U Deformation Scale Factor: +1.000e+00



(α) ελεύθερο πεδίο

(β) εγγύς του θεμελίου

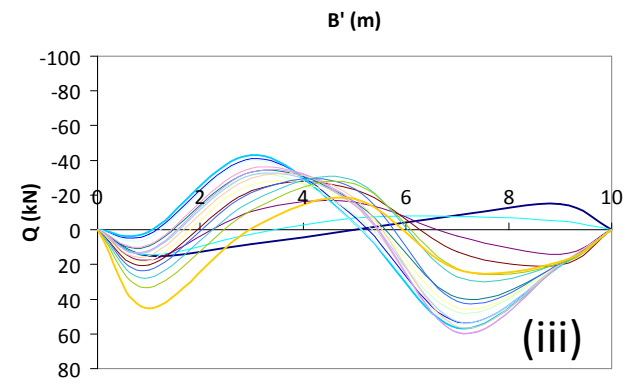
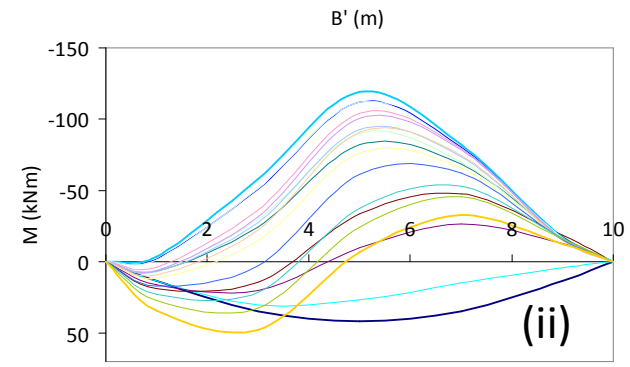
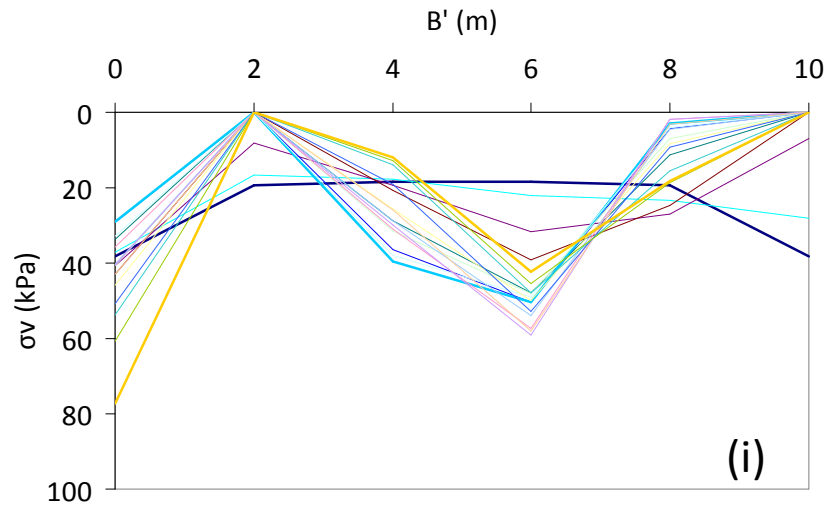
**Σχήμα 4.18.** Αλληλεπίδραση κανονικής διάρρηξης – εδάφους – άκαμπτου θεμελίου σε σχετική απόσταση  $d / B' = 0.6$  :  
 ( i ) παραμορφωμένος κάρναβος και πλαστική παραμόρφωση , ( ii ) προφίλ επιφανειακών κατακόρυφων μετατοπίσεων  $\Delta z$  στο  
 (α) ελεύθερο πεδίο και ( β ) στην εγγύς του θεμελίου περιοχή.



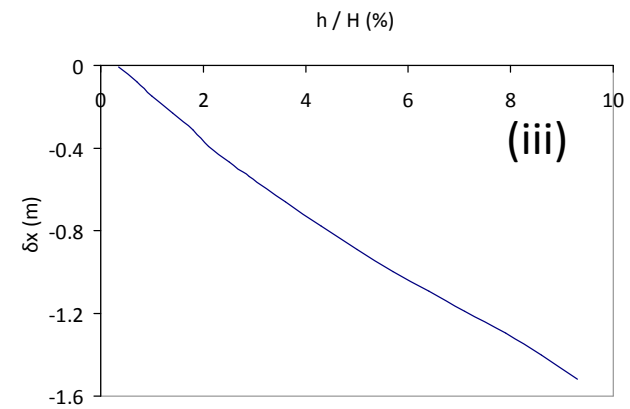
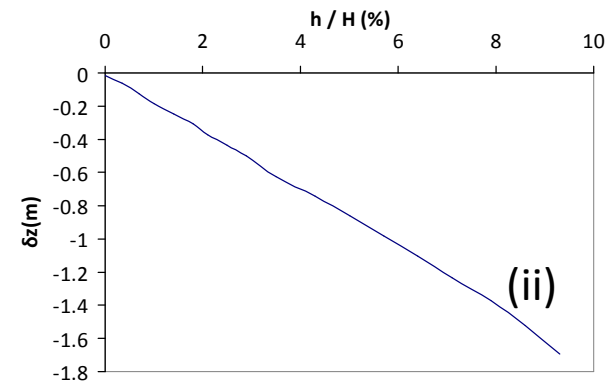
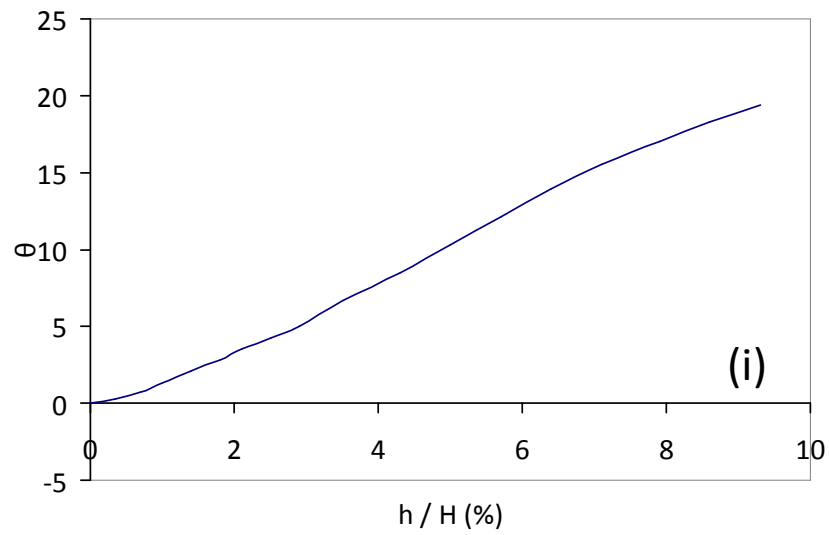
(α) ελεύθερο πεδίο

(β) εγγύς του θεμελίου

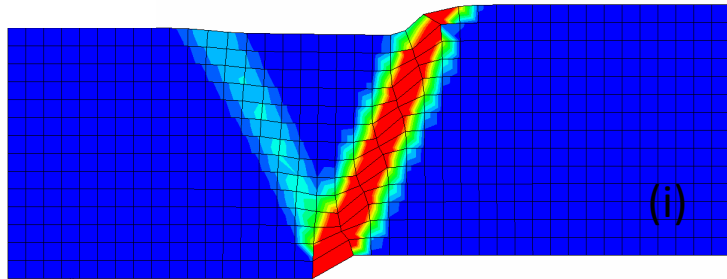
**Σχήμα 4.19.** Αλληλεπίδραση κανονικής διάρρηξης – εδάφους – άκαμπτου θεμελίου σε σχετική απόσταση  $d / B' = 0.6$  :  
 ( i ) παραμορφωμένος κάρναβος και πλαστική παραμόρφωση , (ii) προφίλ γωνιακής παραμόρφωσης  $\beta$  στο  
 (α) ελεύθερο πεδίο και ( β ) στην εγγύς του θεμελίου περιοχή.



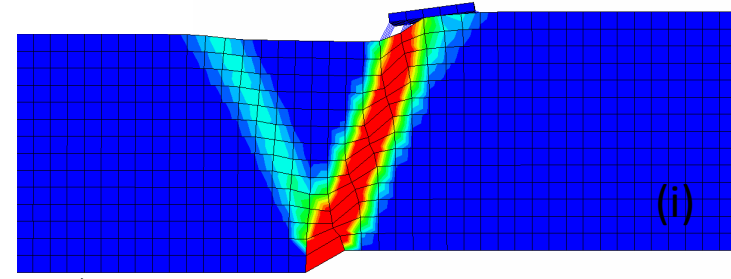
**Σχήμα 4.20.** Αλληλεπίδραση κανονικής διάρρηξης – εδάφους – άκαμπτου θεμελίου σε σχετική απόσταση  $d / B' = 0.6$  : (i) τάσεις επαφής  $\sigma_v$ , (ii) καμπτικές ροπές θεμελίου  $M$  και (iii) τέμνουσες  $Q$ .



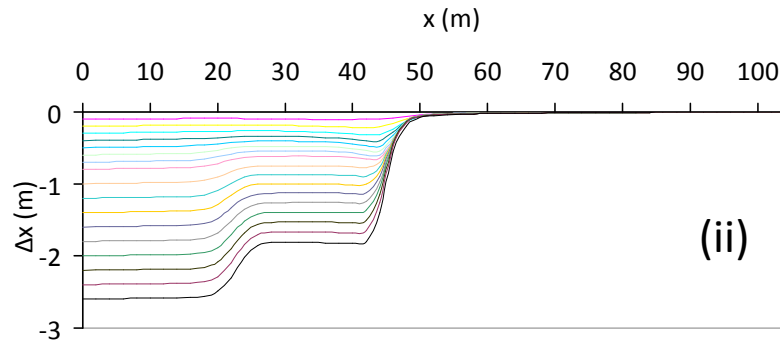
**Σχήμα 4.21.** Αλληλεπίδραση κανονικής διάρρηξης – εδάφους – άκαμπτου θεμελίου σε σχετική απόσταση  $d / B' = 0.6$  :  
 ( i ) στρόφη θεμελίου  $\theta$  (deg) , (ii) διαφορική καθίζηση θεμελίου  $dz$  και (iii) ολίσθηση θεμελίου  $dx$ .



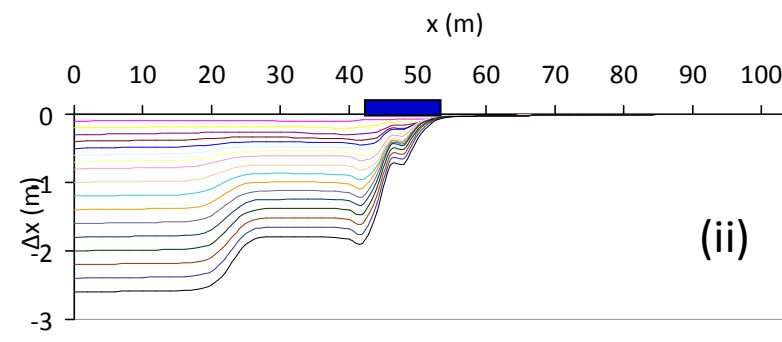
PPS-220b-30  
 ODB: PPS-220e-r1e1d,phi=52,phi1ee=35,psi=22,psi1ee=0,K=1.300E+08 ABAQUS/STANDARD Version 6.5-1 Fri Nov 28 14:45:43 CDT Standard Time 2008  
 Step: Step-18  
 Increment: 14; Step Time = 1.000  
 Primary Var: PSMAG  
 Secondary Var: U Deformation Scale Factor: \*1.000e+00



PPS-100b-30  
 ODB: PPS-214b-10a-ef.odb ABAQUS/STANDARD Version 6.5-1 Sat Jan 10 15:50:22 CDT Standard Time 2009  
 Step: Step-19  
 Increment: 12; Step Time = 1.000  
 Primary Var: PSMAG  
 Secondary Var: U Deformation Scale Factor: \*1.000e+00



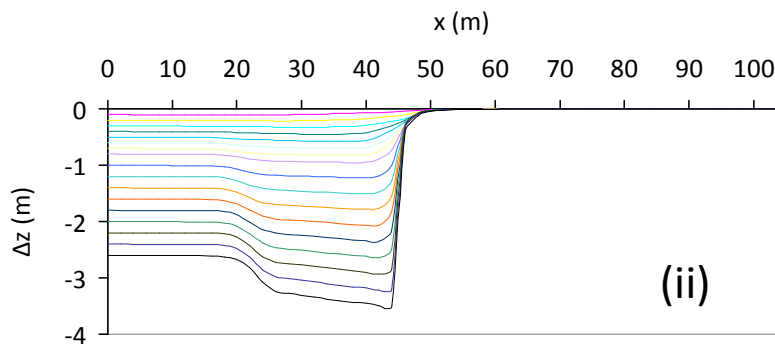
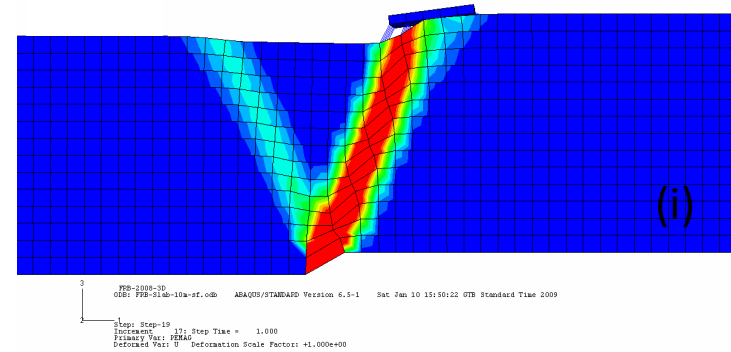
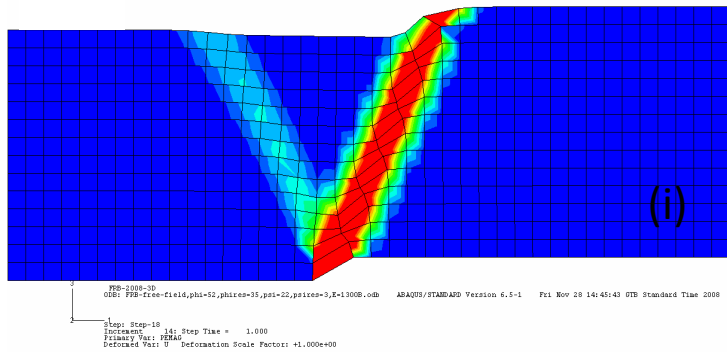
(α) ελεύθερο πεδίο



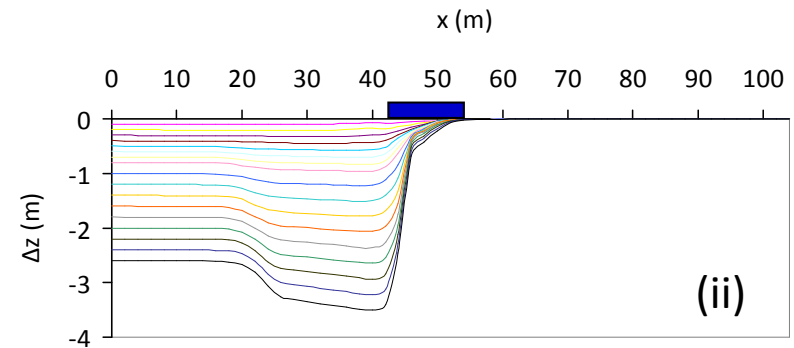
(β) εγγύς του θεμελίου

**Σχήμα 4.22.** Αλληλεπίδραση κανονικής διάρρηξης – εδάφους – άκαμπτου θεμελίου σε σχετική απόσταση  $d / B' = 0.4$ :  
 (i) παραμορφωμένος κάρναβος και πλαστική παραμόρφωση, (ii) προφίλ επιφανειακών οριζόντιων μετατοπίσεων  $\Delta x$  στο  
 (α) ελεύθερο πεδίο και (β) στην εγγύς του θεμελίου περιοχή.



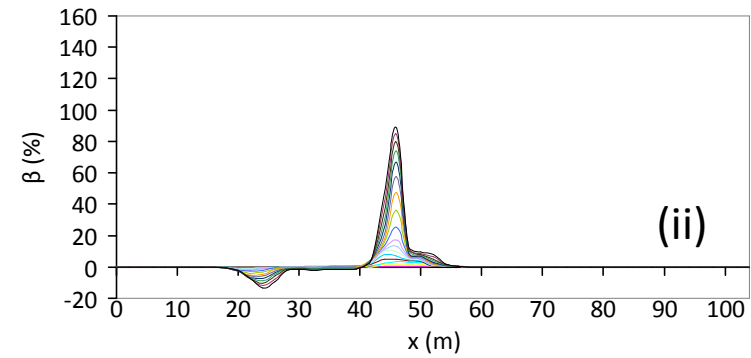
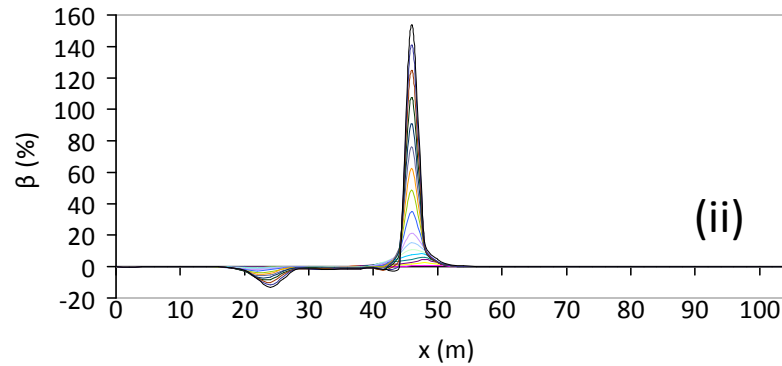
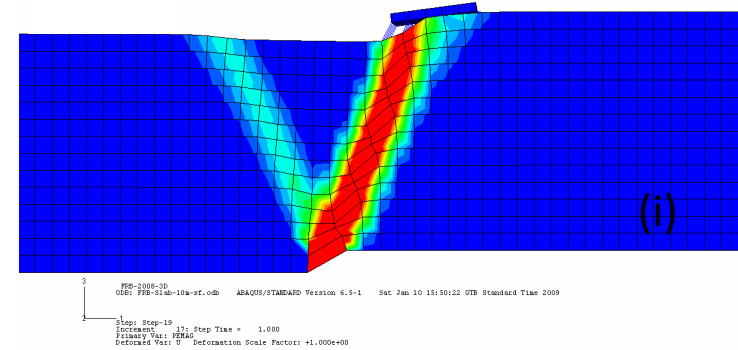
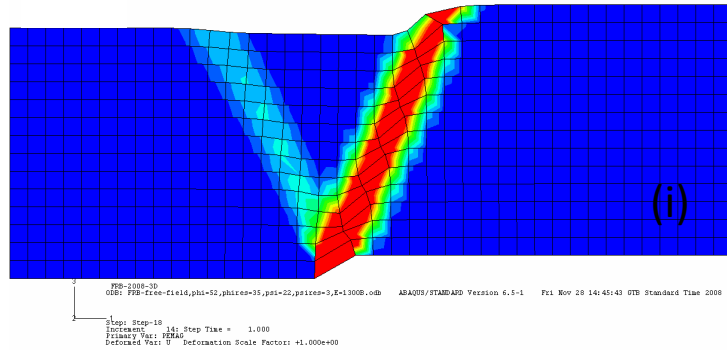


(α) ελεύθερο πεδίο



(β) εγγύς του θεμελίου

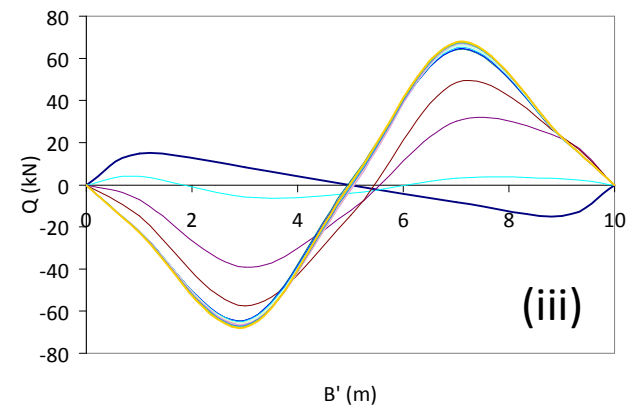
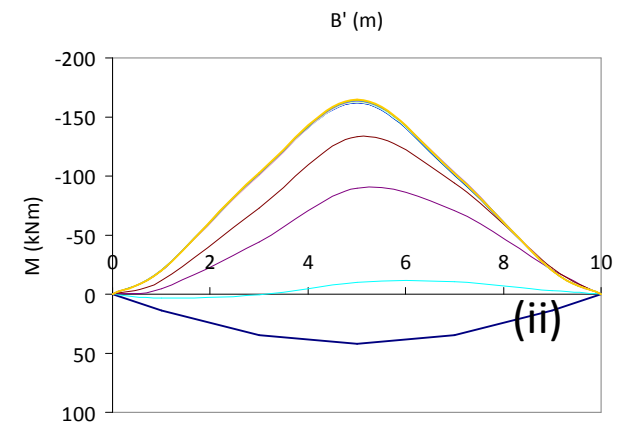
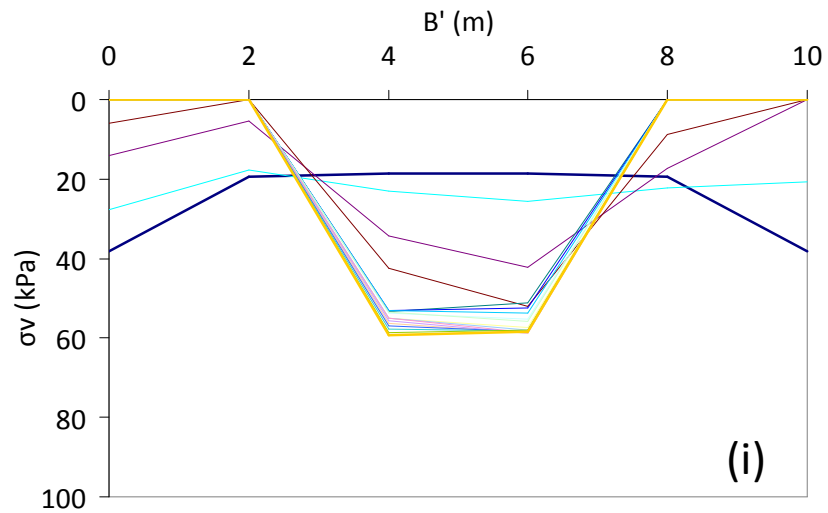
**Σχήμα 4.23.** Αλληλεπίδραση κανονικής διάρρηξης – εδάφους – άκαμπτου θεμελίου σε σχετική απόσταση  $d / B' = 0.4$  : ( i ) παραμορφωμένος κάρναβος και πλαστική παραμόρφωση , (ii) προφίλ επιφανειακών κατακλίσεων  $\Delta z$  στο (α) ελεύθερο πεδίο και ( β ) στην εγγύς του θεμελίου περιοχή.



(α) ελεύθερο πεδίο

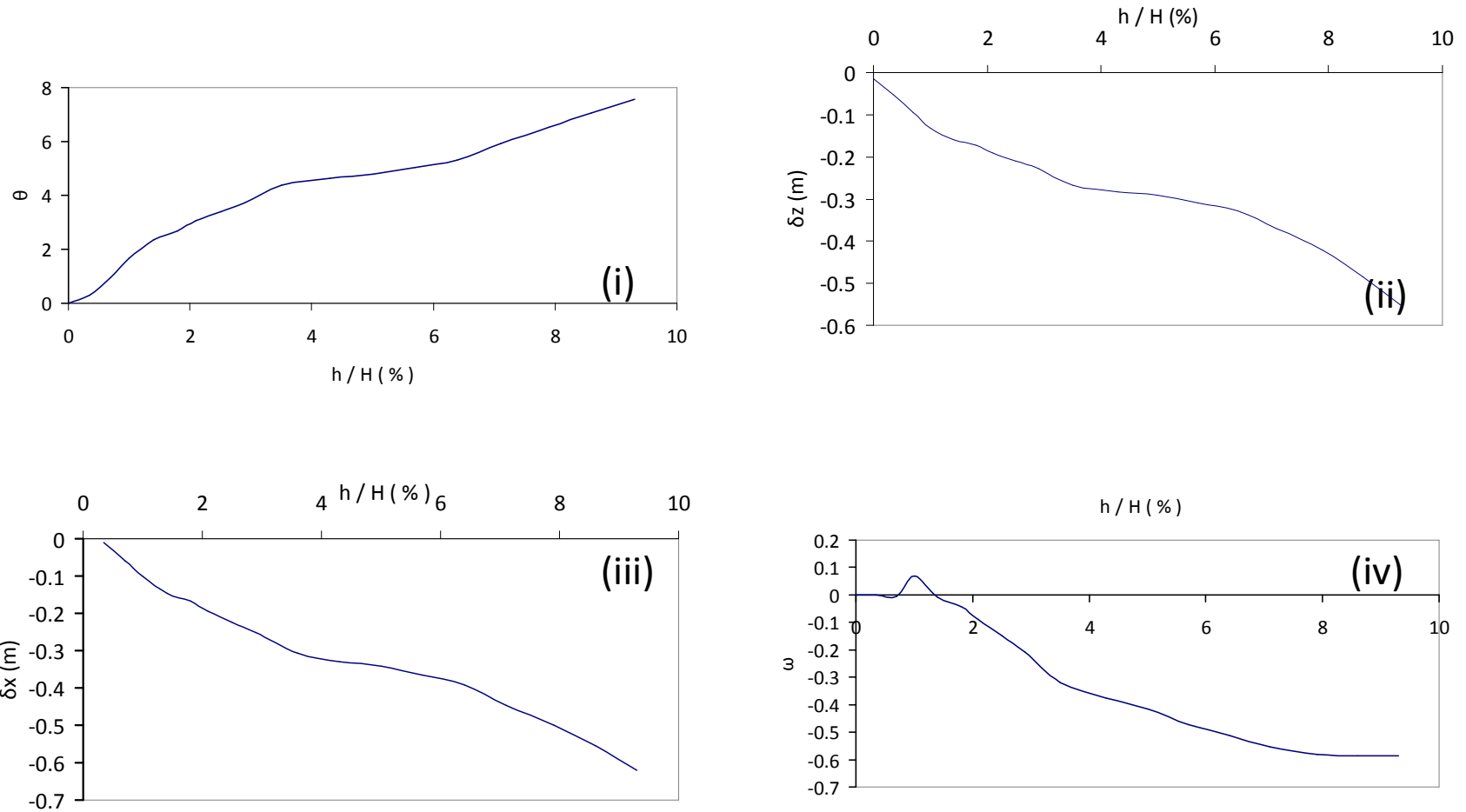
(β) εγγύς του θεμελίου

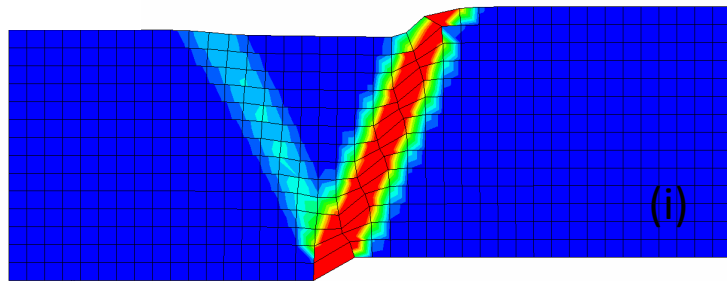
**Σχήμα 4.24.** Αλληλεπίδραση κανονικής διάρρηξης – εδάφους – άκαμπτου θεμελίου σε σχετική απόσταση  $d / B' = 0.4$  :  
 ( i ) παραμορφωμένος κάρναβος και πλαστική παραμόρφωση , (ii) προφίλ γωνιακής παραμόρφωσης  $\beta$  στο  
 (α) ελεύθερο πεδίο και ( β ) στην εγγύς του θεμελίου περιοχή.



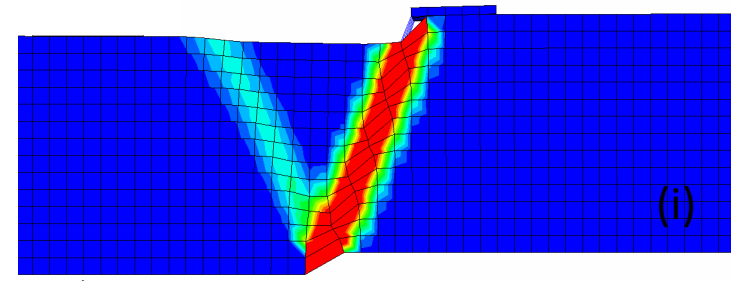
**Σχήμα 4.25.** Αλληλεπίδραση κανονικής διάρρηξης – εδάφους – άκαμπτου θεμελίου σε σχετική απόσταση  $d / B' = 0.4$  :  
 ( i ) τάσεις επαφής  $\sigma_{\nu}$  , (ii) καμπτικές ροπές θεμελίου  $M$  και (iii) τέμνουσες  $Q$ .

**Σχήμα 4.26.** Αλληλεπίδραση κανονικής διάρρηξης – εδάφους – άκαμπτου θεμελίου σε σχετική απόσταση  $d / B' = 0.4$  :  
 ( i ) στροφή θεμελίου  $\vartheta$  (deg) , (ii) διαφορική καθίζηση θεμελίου  $\delta z$ , (iii) ολίσθηση θεμελίου  $\delta x$  και ( iv) στροφή θεμελίου  $\omega$  επί του επιπέδου (deg)

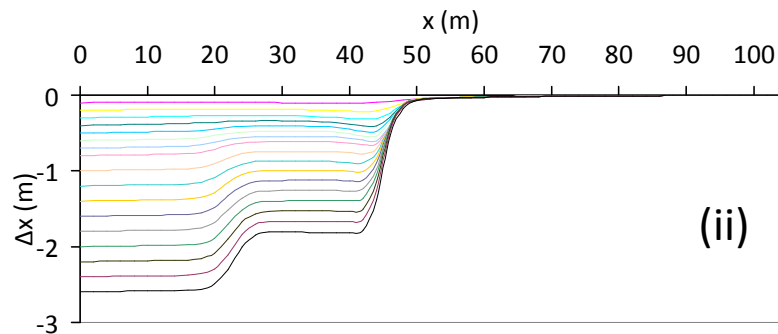




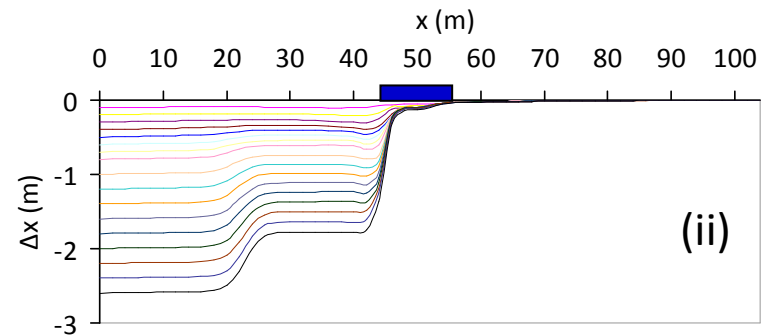
PDB-1000-30  
 ODB: PDB-1000-30-10a-4m-3F.o db ABAQUS/STANDARD Version 6.5-1 Fri Nov 28 14:45:43 OTB Standard Time 2009  
 Step: Step-18  
 Increment: 18; Step Time = 1.000  
 Primary Var: PEERAG  
 Deformed Var: 0 Deformation Scale Factor: +1.000e+00



PDB-1000-30  
 ODB: PDB-1000-30-10a-4m-3F.o db ABAQUS/STANDARD Version 6.5-1 Wed Jan 14 13:46:57 OTB Standard Time 2009  
 Step: Step-19  
 Increment: 18; Step Time = 1.000  
 Primary Var: PEERAG  
 Deformed Var: 0 Deformation Scale Factor: +1.000e+00

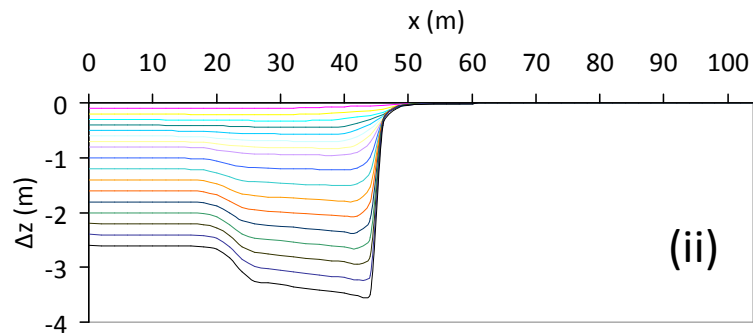
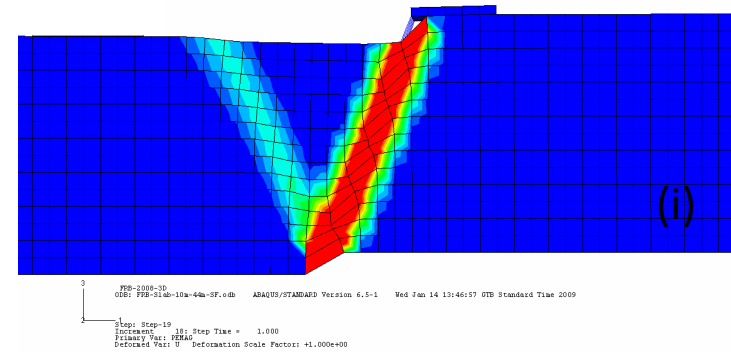
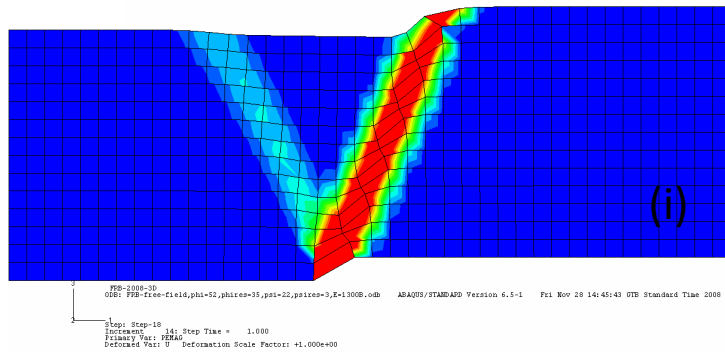


(α) ελεύθερο πεδίο

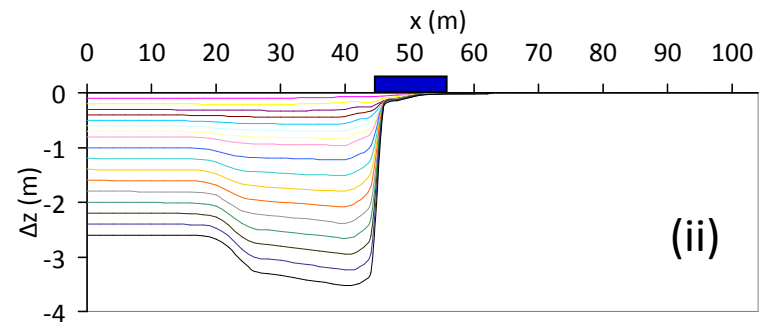


(β) εγγύς του θεμελίου

**Σχήμα 4.27.** Αλληλεπίδραση κανονικής διάρρηξης – εδάφους – άκαμπτου θεμελίου σε σχετική απόσταση  $d / B' = 0.2$ :  
 ( i ) παραμορφωμένος κάρναβος και πλαστική παραμόρφωση , (ii) προφίλ επιφανειακών οριζόντιων μετατοπίσεων  $\Delta x$  στο  
 (α) ελεύθερο πεδίο και ( β ) στην εγγύς του θεμελίου περιοχή.

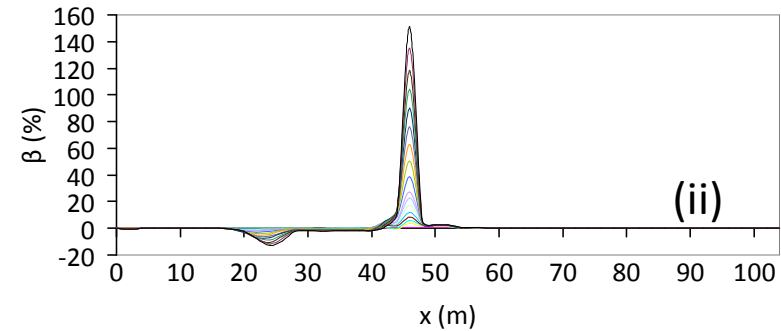
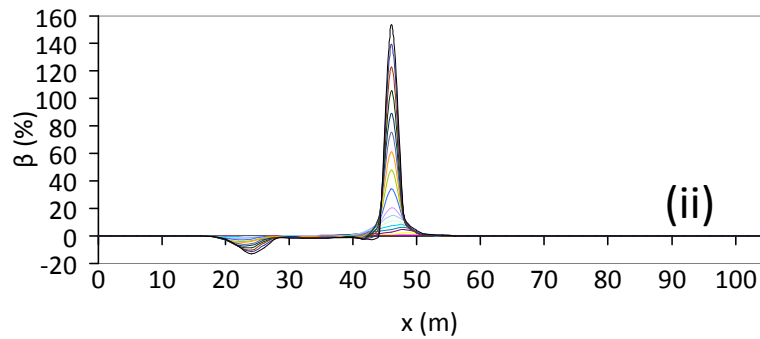
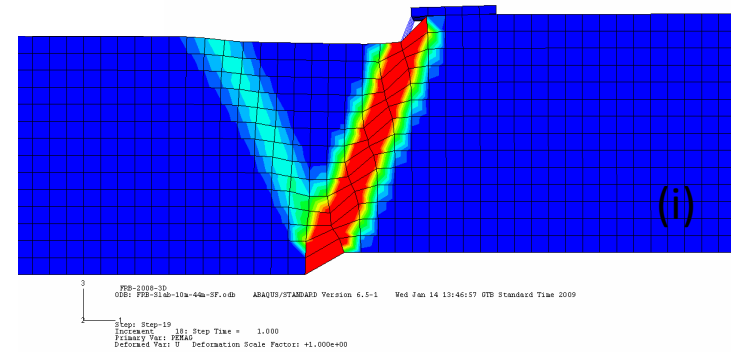
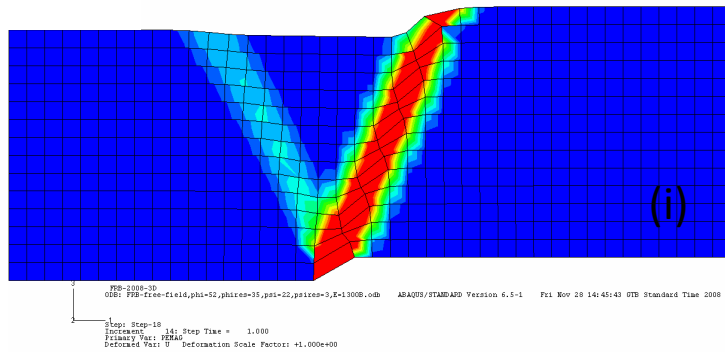


(α) ελεύθερο πεδίο



(β) εγγύς του θεμελίου

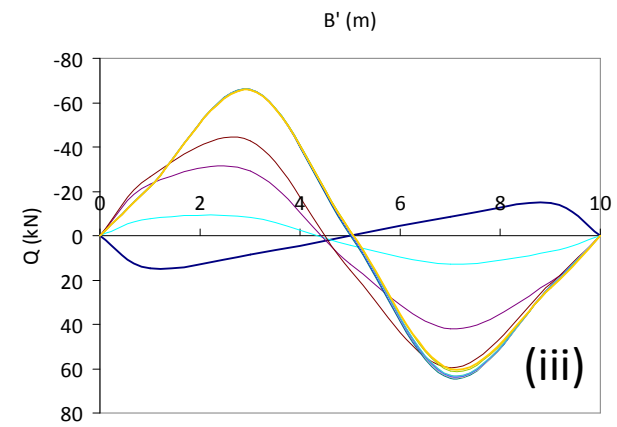
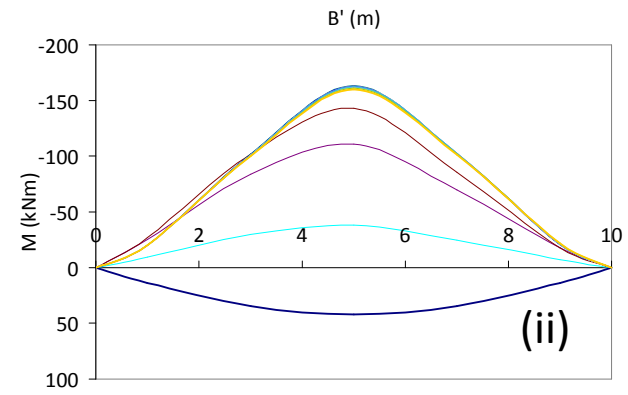
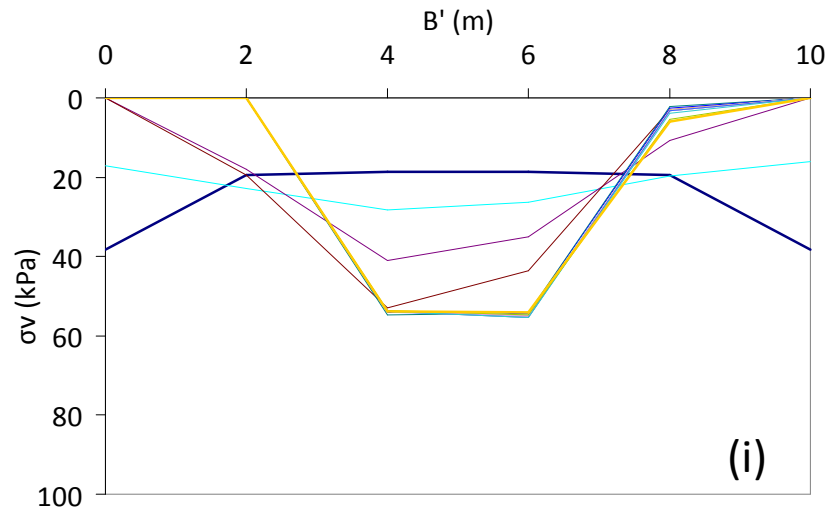
**Σχήμα 4.28.** Αλληλεπίδραση κανονικής διάρρηξης – εδάφους – άκαμπτου θεμελίου σε σχετική απόσταση  $d / B' = 0.2$  :  
 ( i ) παραμορφωμένος κάρναβος και πλαστική παραμόρφωση , (ii) προφίλ επιφανειακών κατακόρυφων μετατοπίσεων  $\Delta z$  στο  
 (α) ελεύθερο πεδίο και ( β ) στην εγγύς του θεμελίου περιοχή.



(α) ελεύθερο πεδίο

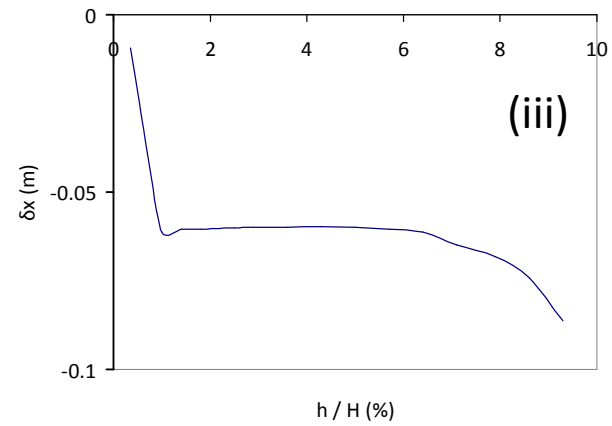
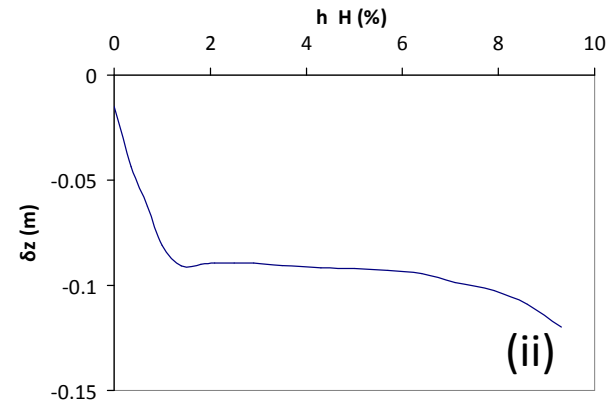
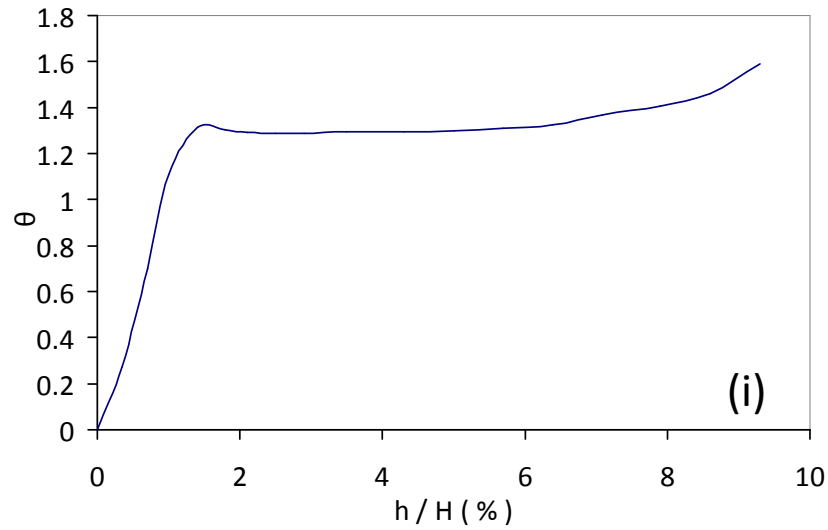
(β) εγγύς του θεμελίου

**Σχήμα 4.29.** Αλληλεπίδραση κανονικής διάρρηξης – εδάφους – άκαμπτου θεμελίου σε σχετική απόσταση  $d / B' = 0.2$  :  
 ( i ) παραμορφωμένος κάρναβος και πλαστική παραμόρφωση , (ii) προφίλ γωνιακής παραμόρφωσης  $\beta$  στο  
 (α) ελεύθερο πεδίο και ( β ) στην εγγύς του θεμελίου περιοχή.

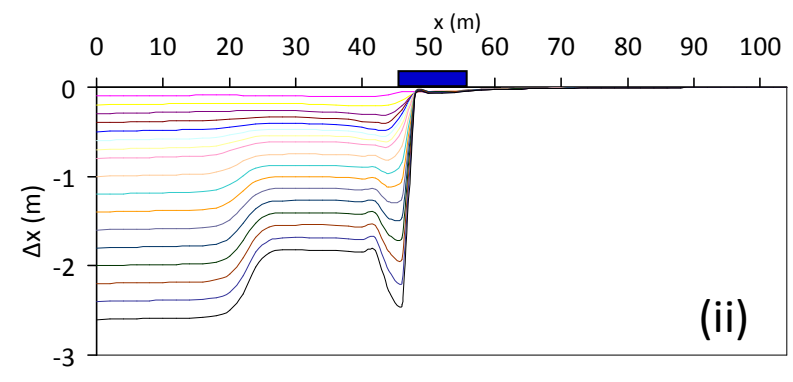
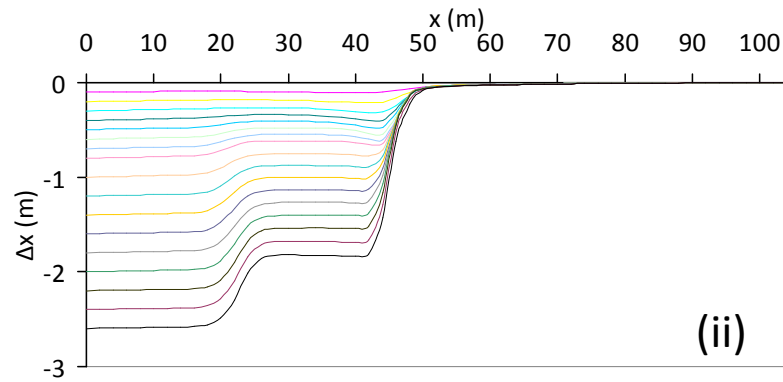
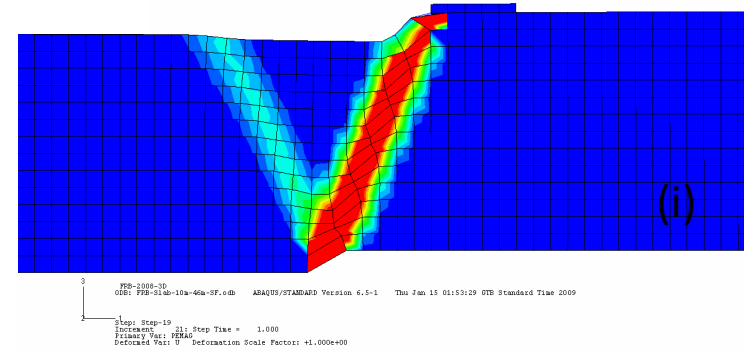
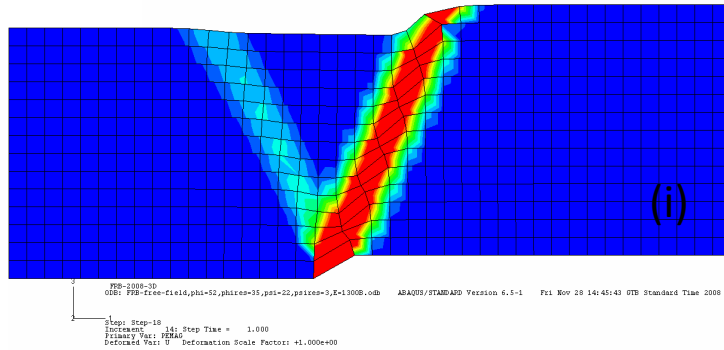


**Σχήμα 4.30.** Αλληλεπίδραση κανονικής διάρρηξης – εδάφους – άκαμπτου θεμελίου σε σχετική απόσταση  $d / B' = 0.2$  :  
 ( i ) τάσεις επαφής  $\sigma_v$  , (ii) καμπτικές ροπές θεμελίου  $M$  και (iii) τέμνουσες  $Q$ .





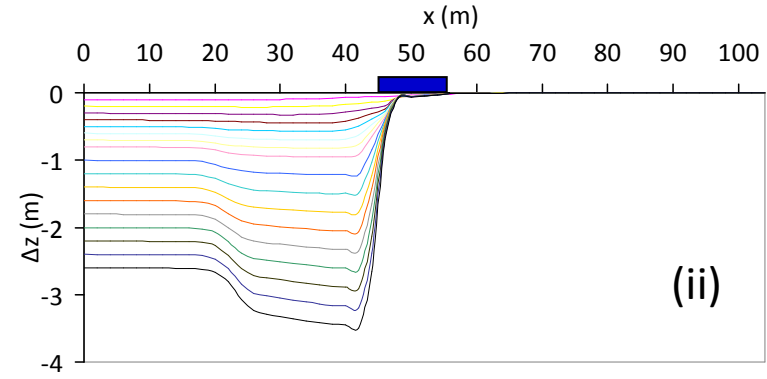
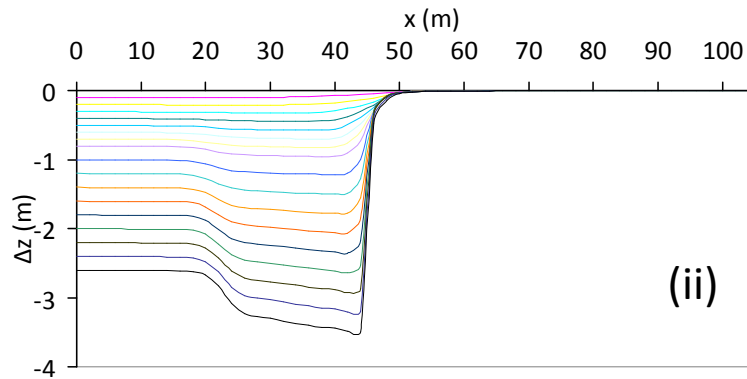
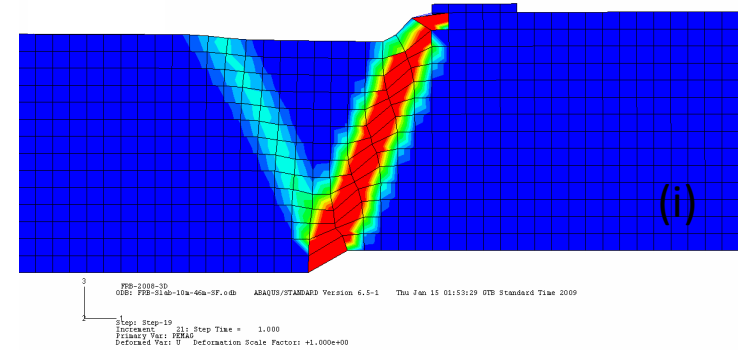
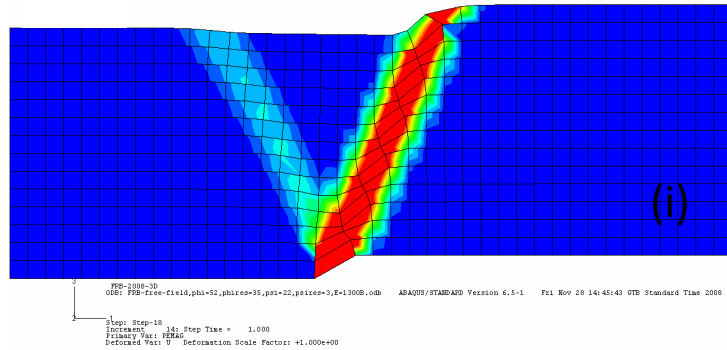
**Σχήμα 4.31.** Αλληλεπίδραση κανονικής διάρρηξης – εδάφους – άκαμπτου θεμελίου σε σχετική απόσταση  $d / B' = 0.2$  :  
 ( i ) στροφή θεμελίου  $\theta$  (deg) , (ii) διαφορική καθίζηση θεμελίου  $\delta z$  και (iii) ολίσθηση θεμελίου  $\delta x$ .



(α) ελεύθερο πεδίο

(β) εγγύς του θεμελίου

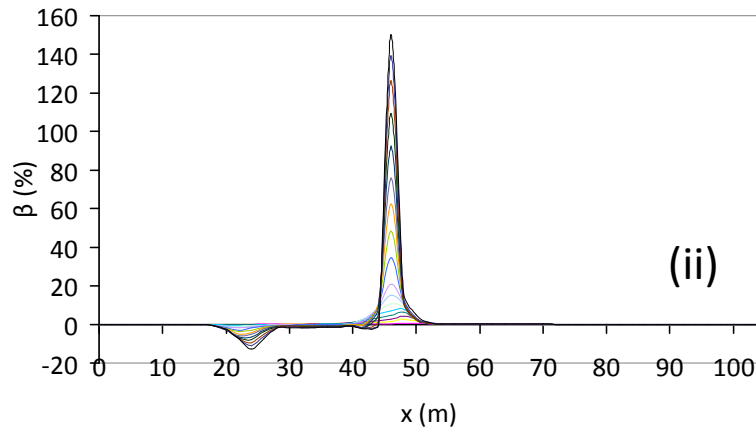
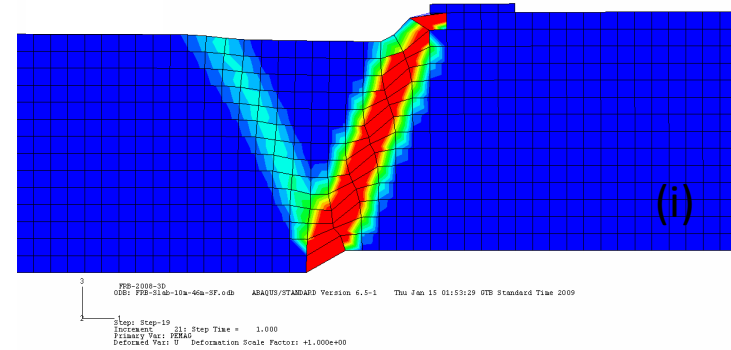
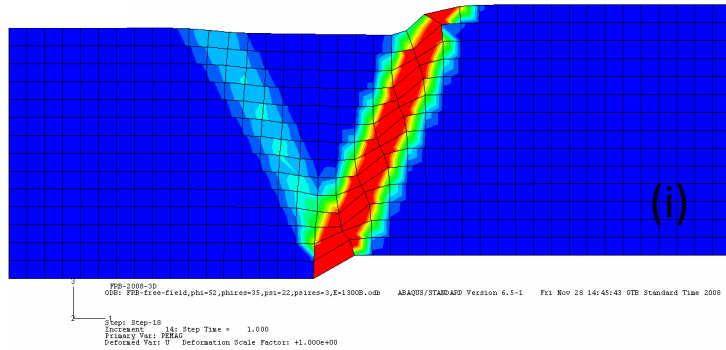
**Σχήμα 4.32.** Αλληλεπίδραση κανονικής διάρρηξης – εδάφους – άκαμπτου θεμελίου σε σχετική απόσταση  $d / B' = 0.0$ :  
 ( i ) παραμορφωμένος κάρναβος και πλαστική παραμόρφωση , ( ii ) προφίλ επιφανειακών οριζόντιων μετατοπίσεων  $\Delta x$  στο  
 ( α ) ελεύθερο πεδίο και ( β ) στην εγγύς του θεμελίου περιοχή.



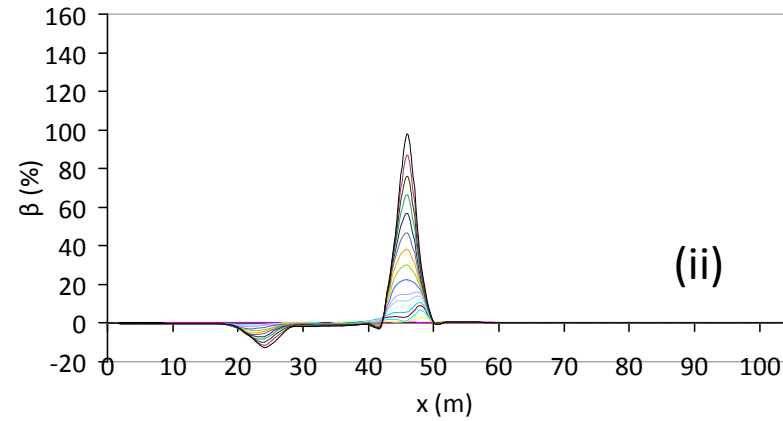
(α) ελεύθερο πεδίο

(β) εγγύς του θεμελίου

**Σχήμα 4.33.** Αλληλεπίδραση κανονικής διάρρηξης – εδάφους – άκαμπτου θεμελίου σε σχετική απόσταση  $d / B' = 0.0$  : ( i ) παραμορφωμένος κάρναβος και πλαστική παραμόρφωση , (ii) προφίλ επιφανειακών κατακόρυφων μετατοπίσεων  $\Delta z$  στο (α) ελεύθερο πεδίο και ( β ) στην εγγύς του θεμελίου περιοχή.

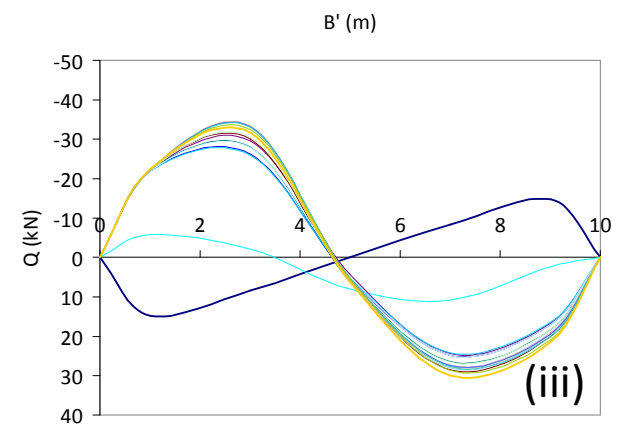
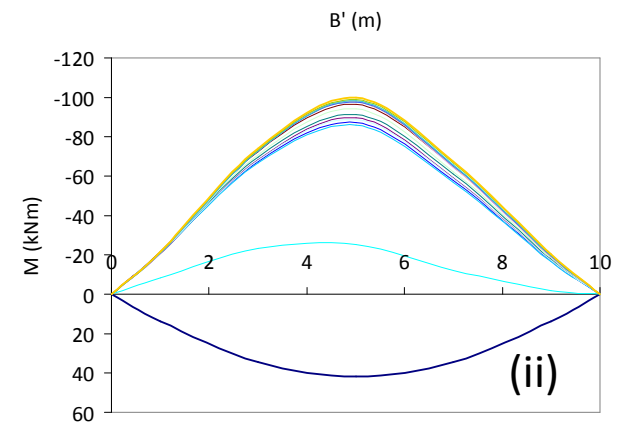
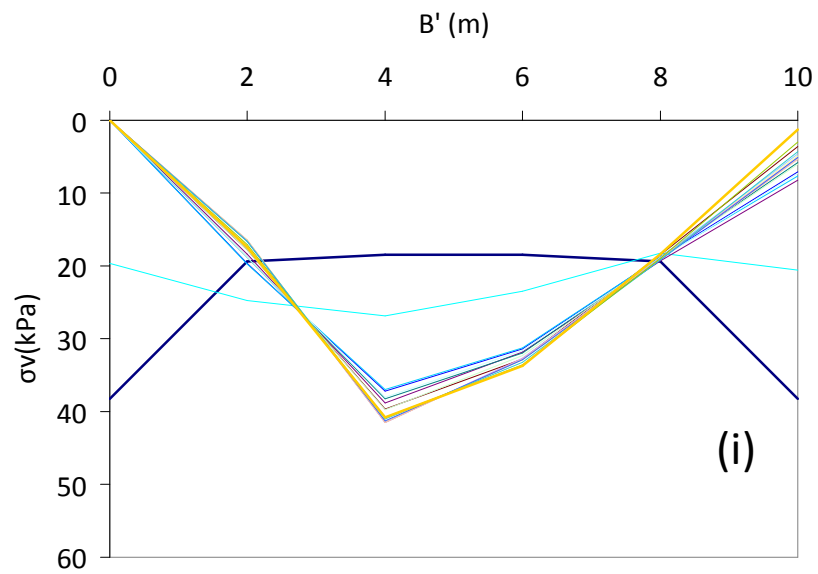


(α) ελεύθερο πεδίο

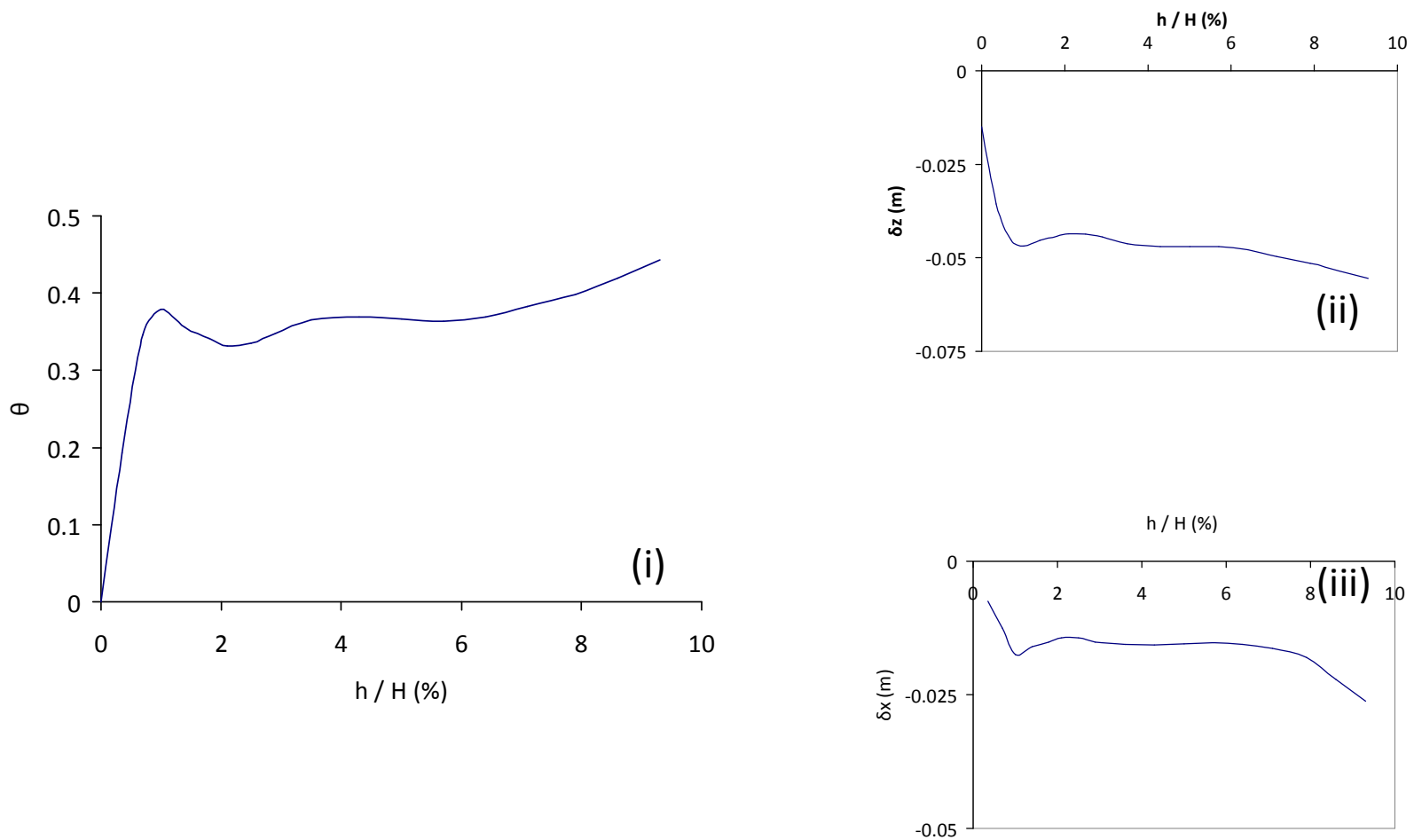


(β) εγγύς του θεμελίου

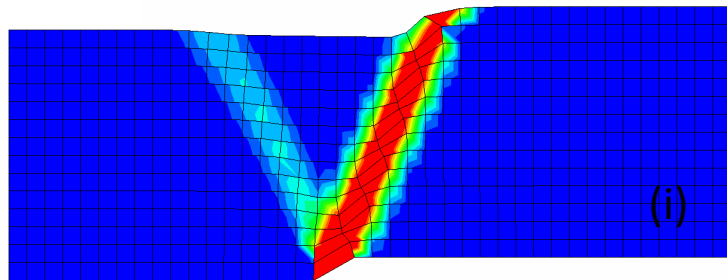
**Σχήμα 4.34.** Αλληλεπίδραση κανονικής διάρρηξης – εδάφους – άκαμπτου θεμελίου σε σχετική απόσταση  $d / B' = 0.0$  :  
 ( i ) παραμορφωμένος κάρναβος και πλαστική παραμόρφωση , (ii) προφίλ γωνιακής παραμόρφωσης  $\beta$  στο  
 (α) ελεύθερο πεδίο και ( β ) στην εγγύς του θεμελίου περιοχή.



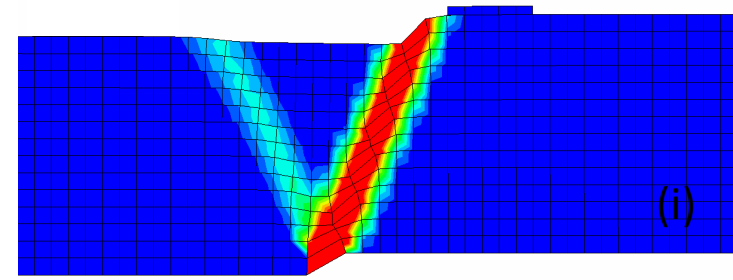
**Σχήμα 4.35.** Αλληλεπίδραση κανονικής διάρρηξης – εδάφους – άκαμπτου θεμελίου σε σχετική απόσταση  $d / B' = 0.0$  :  
 ( i ) τάσεις επαφής  $\sigma_v$ , (ii) καμπτικές ροπές θεμελίου  $M$  και (iii) τέμνουσες  $Q$ .



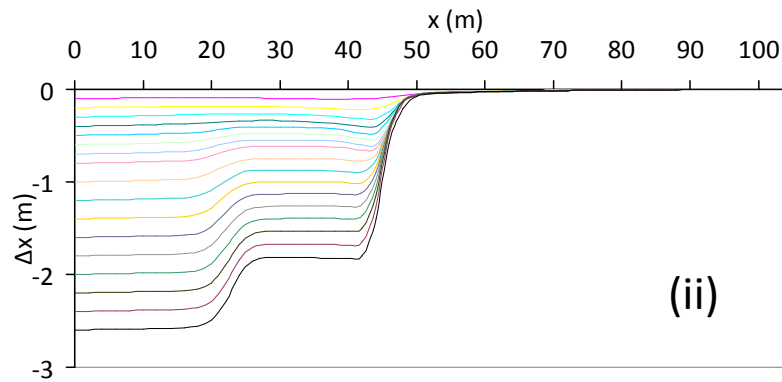
**Σχήμα 4.36.** Αλληλεπίδραση κανονικής διάρρηξης – εδάφους – άκαμπτου θεμελίου σε σχετική απόσταση  $d/B' = 0.0$  :  
 ( i ) στροφή θεμελίου  $\theta$  (deg) , (ii) διαφορική καθίζηση θεμελίου  $\delta z$  και (iii) ολίσθηση θεμελίου  $\delta x$ .



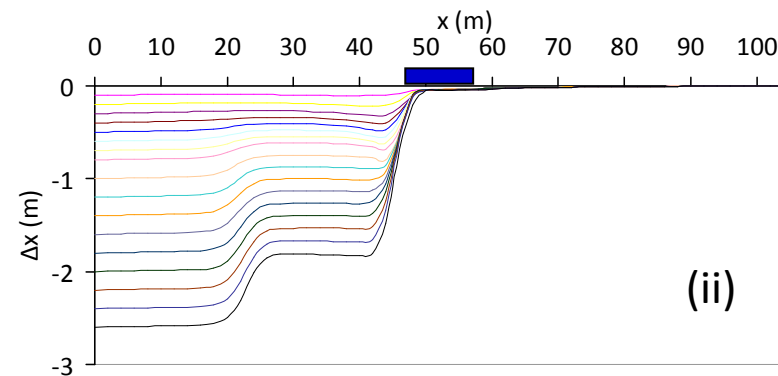
PDB-1000-30  
 ODB: PDB-1000-30-Field.phi=52,phi=35,psi=22,psi=3,K=13000.odb  
 ABAQUS/STANDARD Version 6.5-1 Fri Nov 20 14:45:43 OTB Standard Time 2009  
 Step: Step-18  
 Increment: 14; Step Time = 1.000  
 Primary Var: PERRAS  
 Secondary Var: Deformation Scale Factor: +1.000e+00



PDB-1000-30  
 ODB: PDB-1000-30-40m-3F.odb  
 ABAQUS/STANDARD Version 6.5-1 Mon Jan 26 21:54:45 OTB Standard Time 2009  
 Step: Step-19  
 Increment: 19; Step Time = 1.000  
 Primary Var: PERRAS  
 Secondary Var: Deformation Scale Factor: +1.000e+00

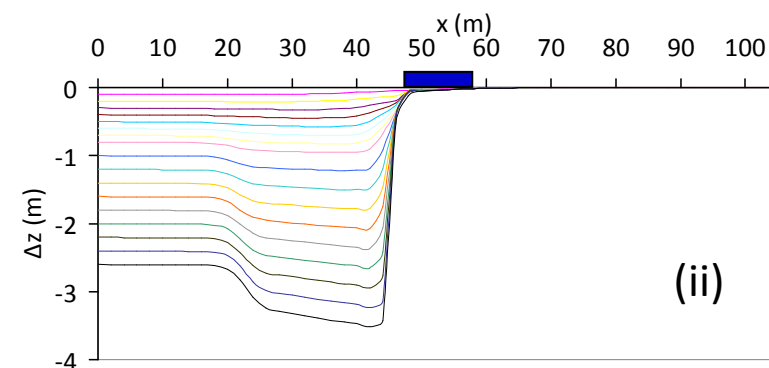
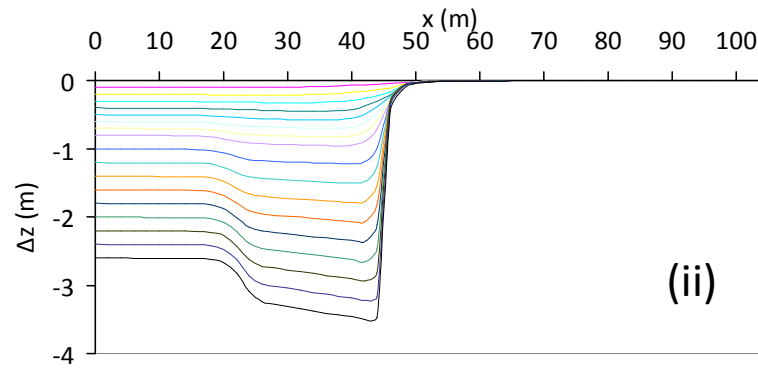
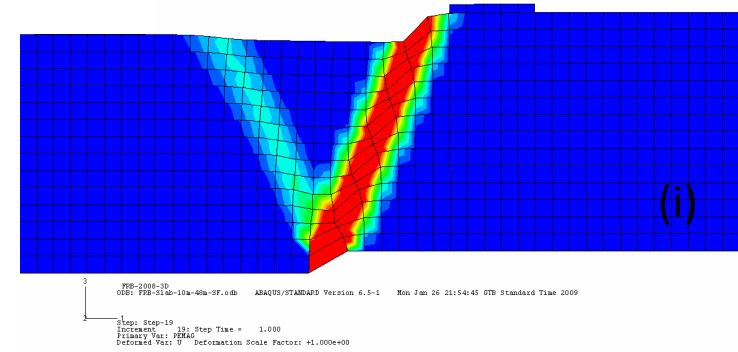
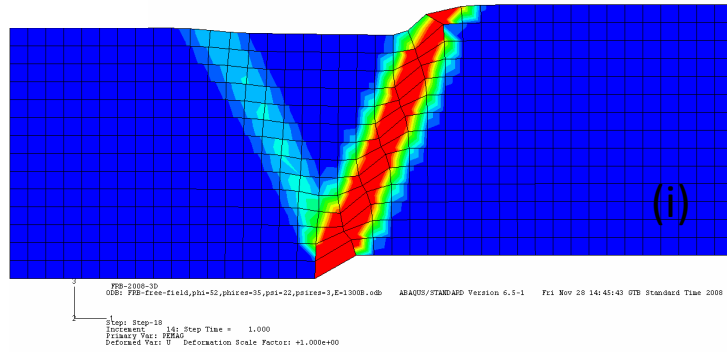


(α) ελεύθερο πεδίο



(β) εγγύς του θεμελίου

**Σχήμα 4.37.** Αλληλεπίδραση κανονικής διάρρηξης – εδάφους – άκαμπτου θεμελίου σε σχετική απόσταση  $d/B' = -0.2$ :  
 (i) παραμορφωμένος κάρναβος και πλαστική παραμόρφωση, (ii) προφίλ επιφανειακών οριζόντιων μετατοπίσεων  $\Delta x$  στο  
 (α) ελεύθερο πεδίο και (β) στην εγγύς του θεμελίου περιοχή.

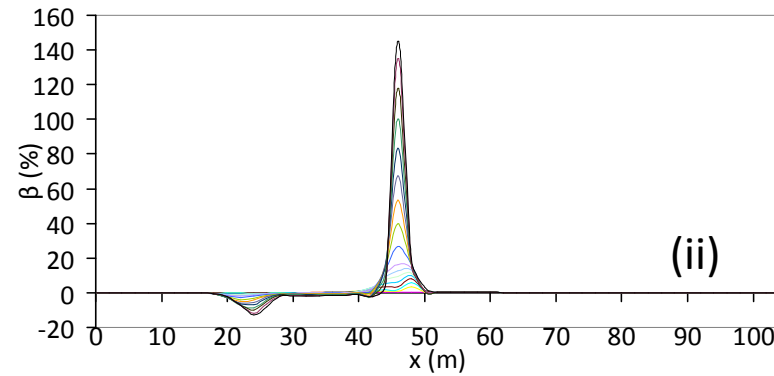
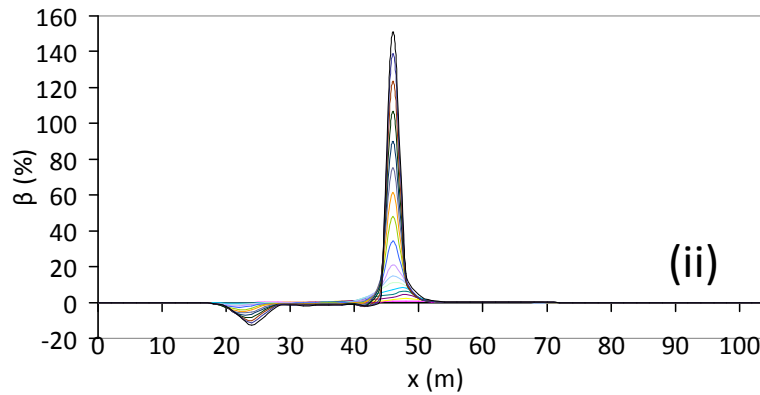
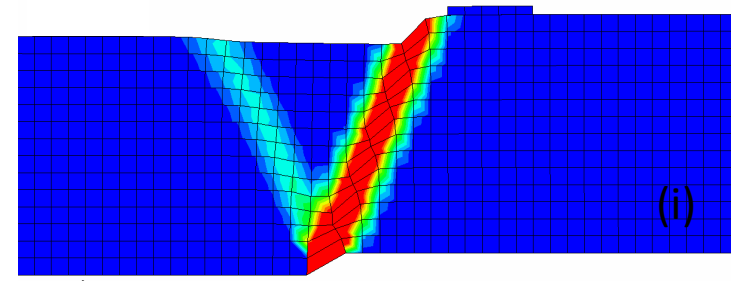
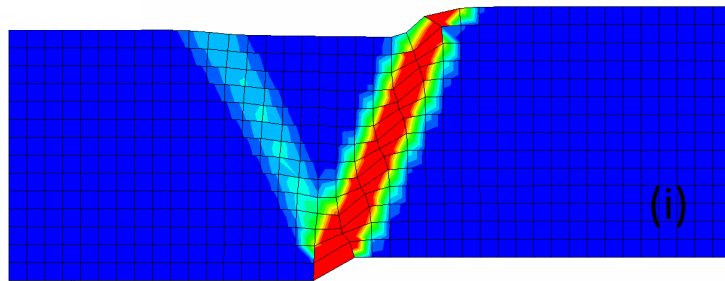


(α) ελεύθερο πεδίο

(β) εγγύς του θεμελίου

**Σχήμα 4.38.** Αλληλεπίδραση κανονικής διάρρηξης – εδάφους – άκαμπτου θεμελίου σε σχετική απόσταση  $d / B' = -0.2$  :  
 ( i ) παραμορφωμένος κώνναβος και πλαστική παραμόρφωση , (ii) προφίλ επιφανειακών κατακόρυφων μετατοπίσεων  $\Delta z$  στο  
 (α) ελεύθερο πεδίο και ( β ) στην εγγύς του θεμελίου περιοχή.

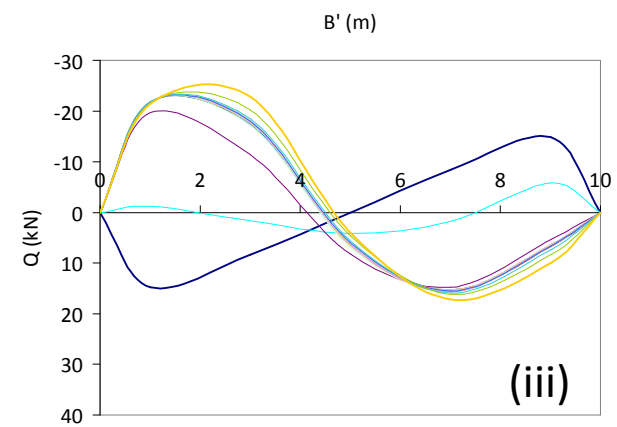
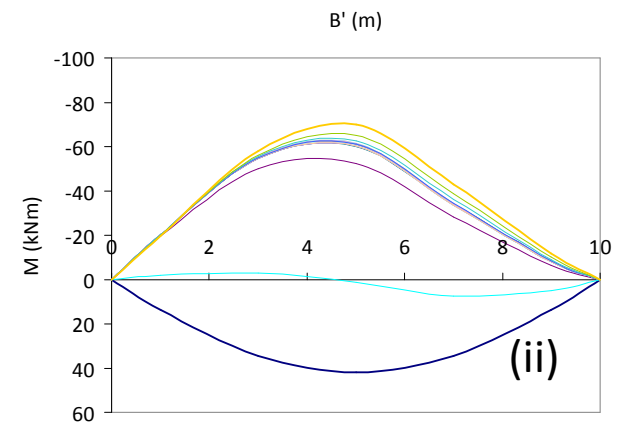
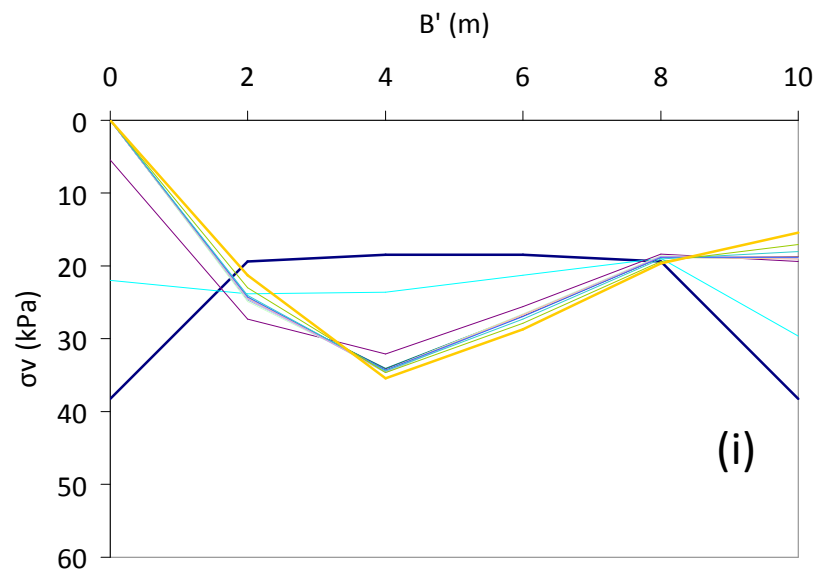




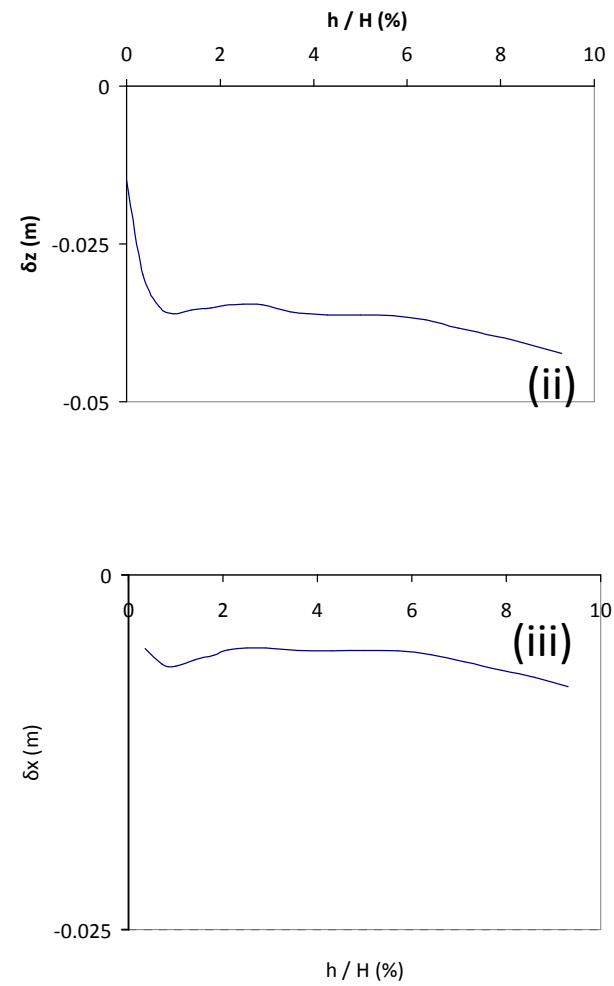
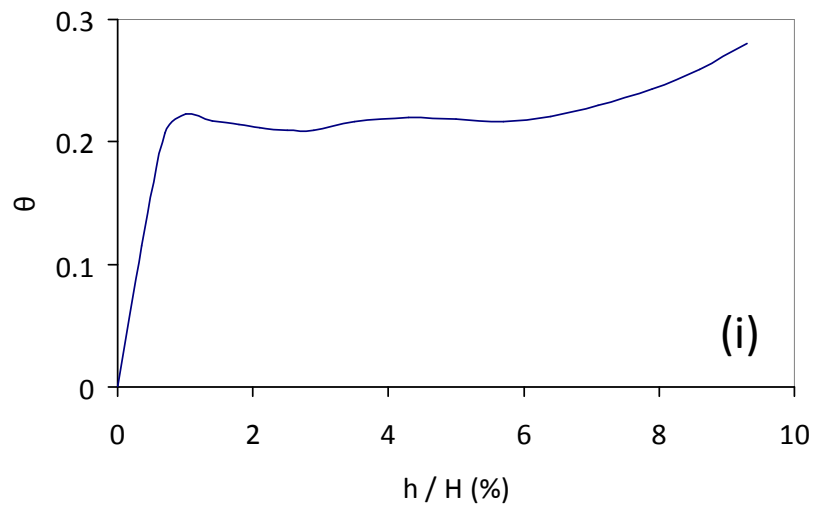
(α) ελεύθερο πεδίο

(β) εγγύς του θεμελίου

**Σχήμα 4.39.** Αλληλεπίδραση κανονικής διάρρηξης – εδάφους – άκαμπτου θεμελίου σε σχετική απόσταση  $d / B' = -0.2$  :  
 ( i ) παραμορφωμένος κάρναβος και πλαστική παραμόρφωση , (ii) προφίλ γωνιακής παραμόρφωσης  $\beta$  στο  
 (α) ελεύθερο πεδίο και ( β ) στην εγγύς του θεμελίου περιοχή.

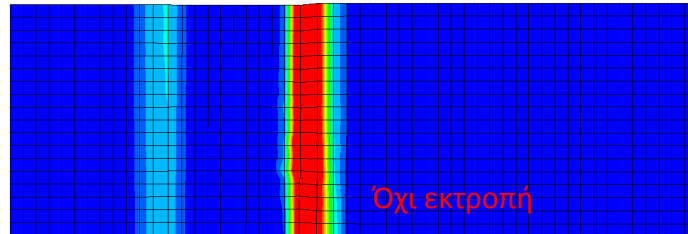


**Σχήμα 4.40.** Αλληλεπίδραση κανονικής διάρρηξης – εδάφους – άκαμπτου θεμελίου σε σχετική απόσταση  $d / B' = -0.2$  :  
 ( i ) τάσεις επαφής  $\sigma_v$  , (ii) καμπτικές ροπές θεμελίου  $M$  και (iii) τέμνουσες  $Q$ .



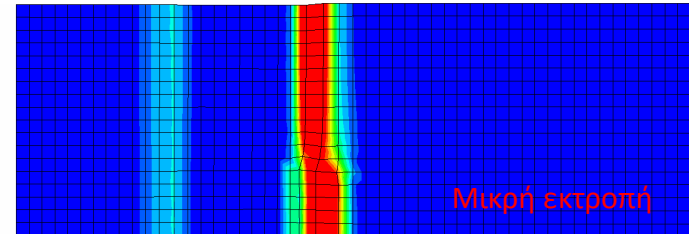
**Σχήμα 4.41.** Αλληλεπίδραση κανονικής διάρρηξης – εδάφους – άκαμπτου θεμελίου σε σχετική απόσταση  $d / B' = -0.2$  :  
 (i) στροφή θεμελίου  $\vartheta$  (deg), (ii) διαφορική καθίζηση θεμελίου  $\delta z$  και (iii) ολίσθηση θεμελίου  $\delta x$ .

$d / B' = 1.2$



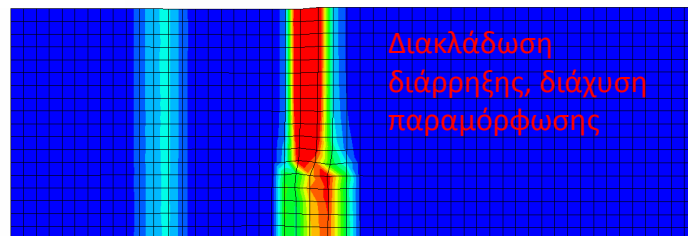
PF8-1000-10  
OBJ: PF8-01db-10a-04a-ef.cdb ABAQUS/STANDARD Version 6.5-1 Fri Jan 23 21:57:25 OTB Standard Time 2009  
Step: Step-19  
Increment: 16; Step Time = 1.000  
Primary Var: PFMAG  
Reference Var: U Deformation Scale Factor: +1.000e+00

$d / B' = 1.0$



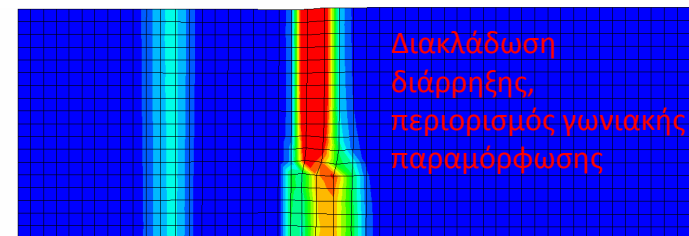
PF8-1000-10  
OBJ: PF8-01db-10a-04a-ef.cdb ABAQUS/STANDARD Version 6.5-1 Mon Jan 12 01:03:28 OTB Standard Time 2009  
Step: Step-19  
Increment: 12; Step Time = 1.000  
Primary Var: PFMAG  
Reference Var: U Deformation Scale Factor: +1.000e+00

$d / B' = 0.8$



PF8-1000-10  
OBJ: PF8-01db-10a-04a-ef.cdb ABAQUS/STANDARD Version 6.5-1 Mon Jan 12 15:04:27 OTB Standard Time 2009  
Step: Step-19  
Increment: 13; Step Time = 1.000  
Primary Var: PFMAG  
Reference Var: U Deformation Scale Factor: +1.000e+00

$d / B' = 0.6$



PF8-1000-10  
OBJ: PF8-01db-10a-40-ef.cdb ABAQUS/STANDARD Version 6.5-1 Tue Jan 13 12:36:58 OTB Standard Time 2009  
Step: Step-19  
Increment: 18; Step Time = 1.000  
Primary Var: PFMAG  
Reference Var: U Deformation Scale Factor: +1.000e+00

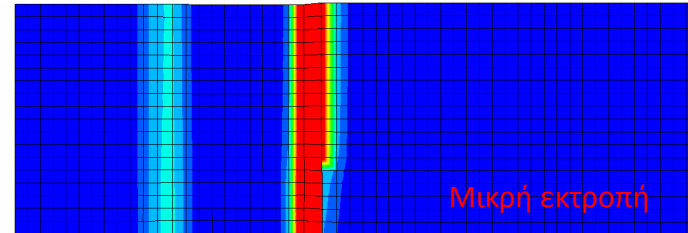
Σχήμα 4.42 (i): Εκδήλωση της διάρρηξης στην επιφάνεια για κάθε σχετική θέση

$d / B' = 0.4$



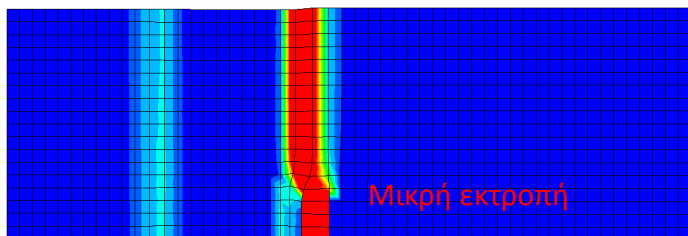
PF8-2008-10  
OBJ: PF8-21db-10a-ef.f0db ABAQUS/STANDARD Version 6.5-1 Sat Jan 10 15:50:22 OTB Standard Time 2009  
Step: Step-19  
Increment: 12; Step Time = 1.000  
Primary Var: PFMAG  
Deformed Plot: U Deformation Scale Factor: +1.000e+00

$d / B' = 0.2$



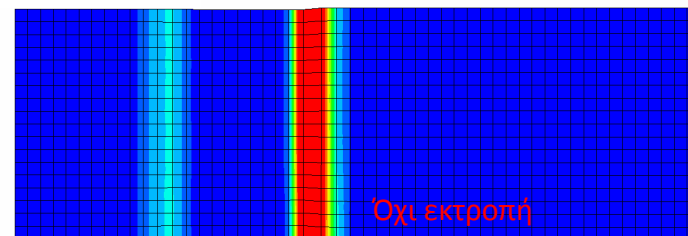
PF8-2008-10  
OBJ: PF8-21db-10a-60a-9f.f0db ABAQUS/STANDARD Version 6.5-1 Wed Jan 14 13:46:57 OTB Standard Time 2009  
Step: Step-19  
Increment: 12; Step Time = 1.000  
Primary Var: PFMAG  
Deformed Plot: U Deformation Scale Factor: +1.000e+00

$d / B' = 0.0$



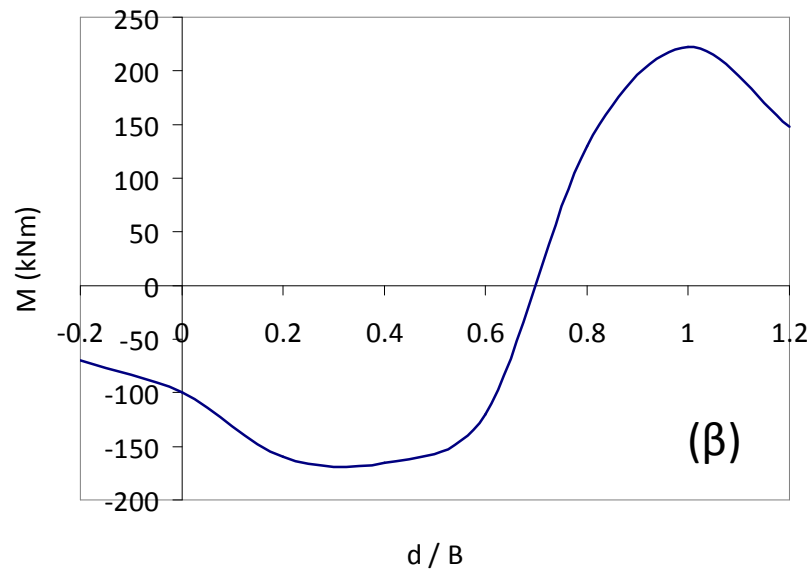
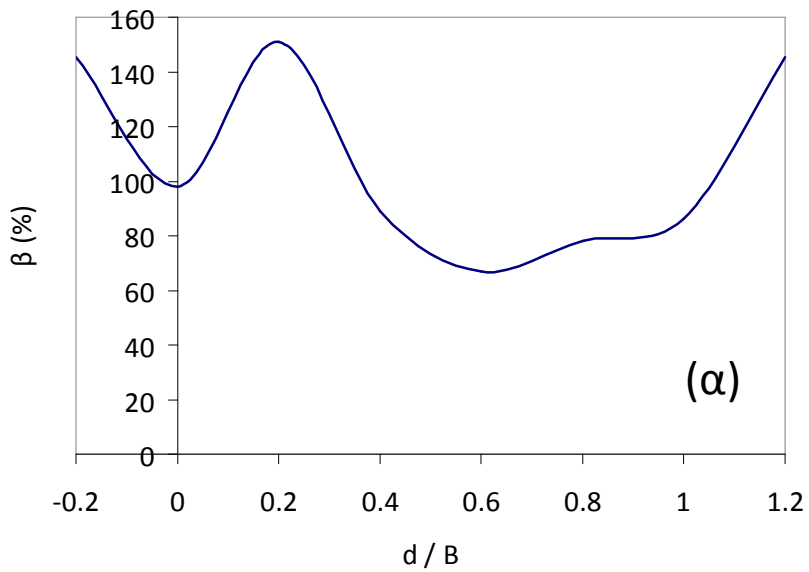
PF8-2008-10  
OBJ: PF8-21db-10a-60a-9f.f0db ABAQUS/STANDARD Version 6.5-1 Thu Jan 15 01:53:29 OTB Standard Time 2009  
Step: Step-19  
Increment: 12; Step Time = 1.000  
Primary Var: PFMAG  
Deformed Plot: U Deformation Scale Factor: +1.000e+00

$d / B' = -0.2$

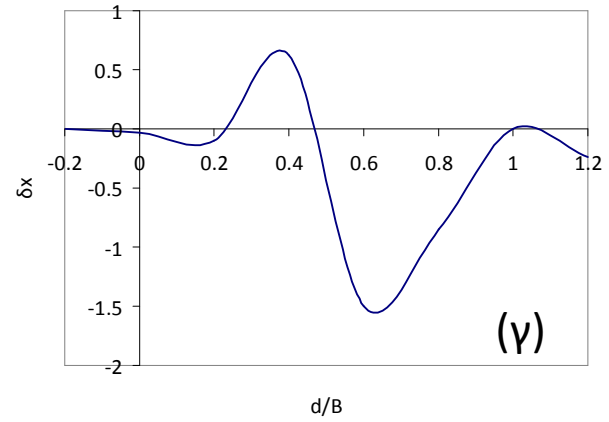
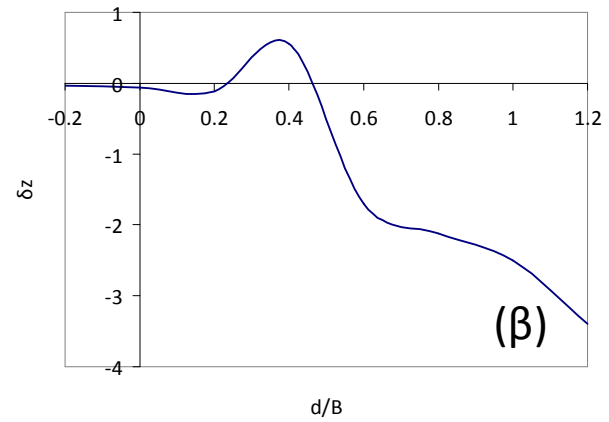
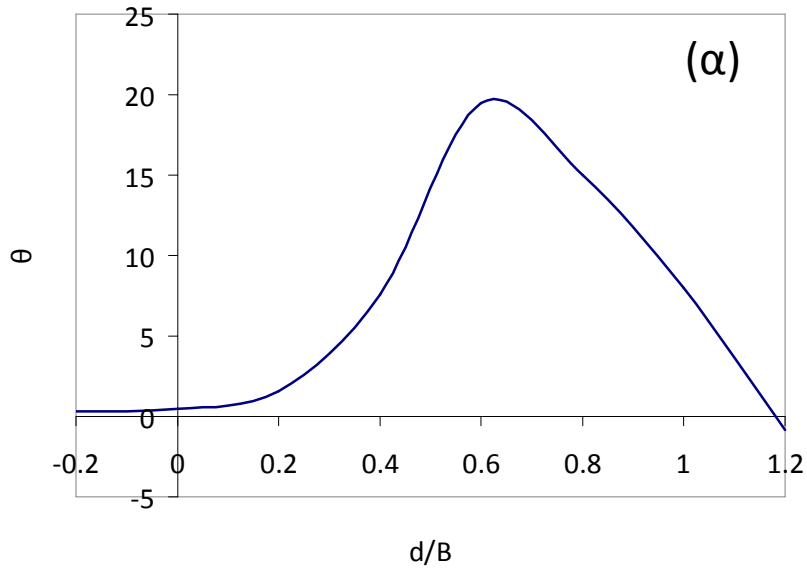


PF8-2008-10  
OBJ: PF8-21db-10a-60a-9f.f0db ABAQUS/STANDARD Version 6.5-1 Mon Jan 26 21:54:45 OTB Standard Time 2009  
Step: Step-19  
Increment: 12; Step Time = 1.000  
Primary Var: PFMAG  
Deformed Plot: U Deformation Scale Factor: +1.000e+00

Σχήμα 4.42 (ii): Εκδήλωση της διάρρηξης στην επιφάνεια για κάθε σχετική θέση



**Σχήμα 4.43:** Μεταβολή (α) γωνίας παραμόρφωσης και (β) καμπτικών ροπών θεμελίου συναρτήσει σχετικής θέσης επιφανειακής εμφάνισης διάρρηξης  $d / B$



**Σχήμα 4.44:** Μεταβολή (α) στροφής, (β) μέσης καθίζησης και (γ) ολίσθησης θεμελίου συναρτήσει σχετικής θέσης επιφανειακής εμφάνισης διάρρηξης  $d / B$





## Κεφάλαιο 5

# Σύγκριση 3-D Ανάλυσης με πείραμα, με 3-D ανάλυση με διαφορετικές συνθήκες δέσμευσης θεμελίου και με 2-D ανάλυση

### 5.1 Σύγκριση ανάλυσης με πείραμα

#### 5.1.1 Ελεύθερο πεδίο

Σύμφωνα με την ήδη παρουσιασθείσα ανάλυση, η διάρρηξη διαδίδεται μέσω του εδάφους με αυξανόμενη κλίση και βγαίνει στην επιφάνεια προκαλώντας ανασήκωμα του εδάφους και σχηματίζοντας κατακρήμνισμα σε συνεργασία με τη δευτερεύουσα διάρρηξη. Αφού ολοκληρωθεί αυτή η διαδικασία, οι παραμορφώσεις συσσωρεύονται στις ήδη σχηματισμένες ζώνες διάτμησης.

Στο πείραμα που διεξήχθη, η παρατηρηθείσα συμπεριφορά ήταν παρόμοια. Χαρακτηριστικά στιγμιότυπα του πειράματος και της ανάλυσης παρουσιάζονται στο **Σχήμα 5.1** και στο **Σχήμα 5.2**. Αρχικά ξεκίνησε η διάδοση της πρωτεύουσας διάρρηξης, ακολούθησε η δευτερεύουσα και ο σχηματισμός του κατακρημνίσματος και τέλος άρχισε η συσσώρευση των παραμορφώσεων κατά μήκος των ήδη σχηματισμένων ζωνών.

Πρώτη διαφορά που πρέπει να τονιστεί είναι οι επιπλέον διαρρήξεις που παρατηρήθηκαν στο πείραμα.. Αυτές μπορεί να οφείλονται στη μη ικανοποιητική

λειτουργία της μονωτικής μεμβράνης, η οποία και επηρέασε την εξέλιξη του φαινομένου. Μάλιστα, για να ελεγχθεί κατά πόσο η μεμβράνη έχει επιρροή στην αλληλεπίδραση της διάρρηξης με το έδαφος, διεξήχθη μία σχετική αριθμητική ανάλυση, η οποία κατέληξε στο συμπέρασμα ότι η μεμβράνη αλλοίωσε το πείραμα μόνο στα αρχικά στάδια επιβολής της μετατόπισης. Είναι, όμως, πολύ πιθανό, ο αραιός κάρναβος της ανάλυσης να μην μπόρεσε να αποτυπώσει τον σχηματισμό αυτών των διαρρήξεων, οι οποίες σε προγενέστερες αναλύσεις είχαν αποτυπωθεί. (Anastasopoulos et al., 2007), και επιπρόσθετα ξαναεμφανίστηκαν σε μεταγενέστερα πειράματα.

Ομοιότητα παρατηρήθηκε κατά την ποσοτική σύγκριση του παραμορφωμένου καννάβου και των στιγμιότυπων του πειράματος, όσον αφορά στις τιμές της επιβαλλόμενης μετατόπισης  $h / H$  για τις οποίες εκδηλώνεται ή ολοκληρώνεται το κάθε φαινόμενο. Για παράδειγμα, η διάρρηξη στο πείραμα εμφανίζεται στην επιφάνεια για  $h / H = 1.2 \%$ , ενώ στην ανάλυση για  $h / H = 1.0 \%$ . Όσον αφορά στη δευτερεύουσα διάρρηξη και το σχηματισμό του κατακρημνίσματος, η σύγκλιση των αποτελεσμάτων παραμένει ίδια:  $h / H = 2.7 \%$  στο πείραμα, ενώ στην ανάλυση  $h / H = 2.9 \%$ . Η γωνία διάδοσης της πρωτεύουσας διάρρηξης μετρήθηκε στο πείραμα  $75^\circ$  περίπου, ενώ από την ανάλυση η γωνία διάδοσης μετρήθηκε  $70^\circ$ , διαφορά σχετικά μικρή. Ωστόσο, η διαφορά αυτή στις δύο μετρηθείσες γωνίες επηρεάζει και το πλάτος του κατακρημνίσματος, για αυτό και στο πείραμα το πλάτος του μετρήθηκε  $W = 0.65 H$ , ενώ στην ανάλυση ήταν σαφώς μεγαλύτερο  $W = 0.78 H$ .

### 5.1.2 Αλληλεπίδραση με το θεμέλιο

Όπως παρουσιάζεται και στο **Σχήμα 5.3** μέχρι και το **Σχήμα 5.10**, τόσο στην τελική θέση του θεμελίου όσο και κατά τη διαδρομή της διάρρηξης, οι 2 προσεγγίσεις παρουσιάζουν σύγκλιση: η διάρρηξη έχει εκτραπεί λίγο προς τα αριστερά, το θεμέλιο έχει χάσει επαφή και στα δύο άκρα, ενώ το πρανές υπό του θεμελίου έχει αστοχήσει.

Ωστόσο, ενώ στο πείραμα αποκόλληση και του δεξιού τμήματος του θεμελίου πραγματοποιήθηκε για σχετικά μεγάλες επιβαλλόμενες μετατοπίσεις ( $h > 5.4 \text{ cm}$ , δηλαδή σε φυσική κλίμακα  $h > 2.2 \text{ m}$ ) στην ανάλυση η αποκόλληση εμφανίζεται από τα αρχικά στάδια..

Παρατηρώντας στη συνέχεια τις μετρηθείσες κατακόρυφες μετακινήσεις του θεμελίου, αλλά και τον τρόπο με τον οποίο αυτές εξελίχθηκαν, διαπιστώθηκε το εξής: ενώ στο πείραμα οι μετακινήσεις και στροφή αυξάνονται ομαλά μέχρι  $h / H = 7.8 \%$  περίπου και στη συνέχεια παρουσιάζουν μία απότομη αύξηση προφανώς λόγω της αστοχίας του πρανούς, στην ανάλυση παρουσιάστηκε διαφορετική συμπεριφορά: Η κλίση της καμπύλης μεταβολής της διαφορικής καθίζησης και στροφής του θεμελίου αρχικά και μέχρι  $h / H = 3.5 \%$  αυξάνει απότομα, προφανώς λόγω της έντονης διαστολικότητας του εδάφους. Στη συνέχεια η αύξηση είναι ήπια, ενώ η αστοχία του πρανούς μάλλον πραγματοποιείται αφού  $h / H = 6.4\%$ , οπότε και τα παραπάνω μεγέθη αυξάνονται απότομα, όπως και στο πείραμα.. Ποσοτικά, ωστόσο, τα αποτελέσματα του πειράματος και της αριθμητικής προσομοίωσης παρουσιάζουν ικανοποιητική σύγκλιση. Η μέγιστη οριζόντια ολίσθηση πειράματος στην τελική του θέση ( $h / H = 8.3 \%$ ) μετρήθηκε ίση με  $\delta x = 0.8 \text{ m}$  περίπου, ενώ η αντίστοιχη αριθμητική οριζόντια

μετατόπιση ήταν  $\delta x = 0.6 \text{ m}$ . Σε όρους μέσης καθίζησης, η πειραματική μέση καθίζηση μετρήθηκε  $\delta z = 0.42 \text{ m}$  περίπου, ενώ η αντίστοιχη αριθμητική ήταν  $\delta z = 0.5 \text{ m}$ . Η σύγκλιση των αποτελεσμάτων είναι ορατή και στο **Σχήμα 5.11**. Σημαντική διαφορά όμως παρατηρήθηκε στη μετρηθείσα στροφή του θεμελίου, καθώς στο πείραμα  $\theta = 12^\circ$ , ενώ στην αριθμητική ανάλυση  $\theta = 7^\circ$ .

Η σύγκλιση αποτελεσμάτων παραμένει και στην οριζόντια ολίσθηση του θεμελίου με συμπεριφορά όμοια με αυτή της εξέλιξης της στροφής.

Εξαιρετικά εντυπωσιακό ήταν, τέλος, το εξής: Κατά το πείραμα, το θεμέλιο παρουσίασε μικρή στροφή σε κάτοψη. Αυτή η στροφή παρουσιάστηκε και στην ανάλυση.

## **5.2 Σύγκριση Ανάλυσης πειράματος με Ανάλυση θεωρώντας άξονα συμμετρίας**

### **5.2.1 Εισαγωγή**

Στις προηγούμενες αναλύσεις, οι κινηματικοί περιορισμοί αντιστοιχούσαν στις συνθήκες του πειράματος. Δηλαδή, το μεν θεμέλιο τοποθετήθηκε στα όρια του νοητού άξονα συμμετρίας, χωρίς όμως να δεσμεύσουμε τις στροφές. Προκειμένου να διερευνηθεί η επιρροή της ατελούς αυτής συμμετρίας, επαναλαμβάνουμε την ανάλυση θεωρώντας συνθήκες πλήρους συμμετρίας.

### 5.2.2 Αποτελέσματα

Τα κυριότερα αποτελέσματα της ανάλυσης της αλληλεπίδρασης της σεισμικής διάρρηξης–εδάφους–θεμελίου θα παρουσιαστούν μέσω του παραμορφωμένου καννάβου, της κατανομής πλαστικών παραμορφώσεων, του προφίλ κατακόρυφων μετατοπίσεων  $\Delta z$ , της γωνίας παραμόρφωσης  $\beta$ , και των τάσεων επαφής  $\sigma_v$  κατά μήκος της διεπιφάνειας εδάφους-θεμελίου. Επίσης, παρουσιάζεται η καταπόνηση του θεμελίου σε όρους καμπτικών ροπών  $M$  και αναπτυσσομένων τεμνουσών δυνάμεων  $Q$ . Τέλος, παρουσιάζεται η ολίσθηση και στροφή του θεμελίου, καθώς και η στροφή του σε κάτοψη. Τα αποτελέσματα συγκρίνονται με τα αντίστοιχα αποτελέσματα από την ανάλυση της διάδοσης της διαρρήξεως με δέσμευση του θεμελίου στην οριζόντια διεύθυνση, έτσι ώστε να αναδειχθεί ο ρόλος της παραπάνω δέσμευσης. Εις το εξής, ο όρος *ανάλυση I* θα αναφέρεται στην γνωστή ανάλυση, ενώ ο όρος *ανάλυση SYM* στην ανάλυση με δέσμευση.

Συγκρίνοντας τα προφίλ οριζόντιων και κατακόρυφων μετατοπίσεων,  $\Delta x$  και  $\Delta z$  αντίστοιχα, δεν παρατηρείται καμία ποσοτική ή ποιοτική διαφορά (**Σχήμα 5.15**, **Σχήμα 5.16**). Η ομοιότητα των αποτελεσμάτων γωνιακής παραμόρφωσης,  $\beta$ , (**Σχήμα 5.17**) είναι εξαιρετική. Ωστόσο, η ανάλυση SYM δίνει μέγιστη  $\beta = 95\%$  περίπου, ενώ η ανάλυση I  $\beta = 89\%$ . διαφορά δηλαδή περίπου 6%. Εξετάζοντας τώρα τα διαγράμματα τάσεων επαφής, παρατηρείται το εξής: Όσον αφορά την αρχική κατανομή τάσεων αλλά και την μετέπειτα ανακατανομή τους, ποιοτικά και οι δύο αναλύσεις δίνουν όμοια αποτελέσματα (**Σχήμα 5.18**). Η συνισταμένη του φορτίου όμως είναι στην ανάλυση I κατά 10% υπερτιμημένη, ενώ στην ανάλυση SYM είναι κατά 10% υποτιμημένη.

[Ουσιαστικά υπολογίστηκε το ανά μέτρο φορτίο που επιβάλλεται στο έδαφος,  $q_m = 20 \text{ kPa} \times 10\text{m} = 200 \text{ kN/m}$ . Στη συνέχεια υπολογίστηκε από τα διαγράμματα το ολοκλήρωμα των τάσεων επαφής και έγινε η σύγκριση ( $q_{mI} = 224 \text{ kN/m}$ ,  $q_{m \text{ SYM}} = 180 \text{ kN/m}$ ) Αυτή η ποσοτική διαφορά στις τάσεις επαφής μεταφέρεται και στα διαγράμματα ροπών και τέμνουσας. Η στροφή, μέση καθίζηση και ολίσθηση του θεμελίου προσεγγίζεται και από τις δύο αναλύσεις πανομοιότυπα (**Σχήμα 5.19** έως **Σχήμα 5.21**). Μόνη ουσιαστική και εμφανής διαφορά είναι η στροφή του θεμελίου σε κάτοψη. Η ανάλυση I δίνει στροφή  $\omega = 0.6^\circ$ , όσο περίπου παρατηρήθηκε και στο πείραμα, ενώ η ανάλυση SYM δίνει μηδενική στροφή (**Σχήμα 5.22**).

### 5.3 Σύγκριση με 2-Δ ανάλυση 2-ορωφου κτιρίου με $B' / H = 0.5$

Σε αυτή την παράγραφο θα παρουσιαστεί συνοπτικά η σύγκριση των πιο χαρακτηριστικών αποτελεσμάτων με τις αντίστοιχες πραγματοποιηθείσες αναλύσεις (I. Anastasopoulos 2005). Εις το εξής, ο όρος ανάλυση I θα αναφέρεται στις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν στο πλαίσιο εκπόνησης αυτής της διπλωματικής και ο όρος ανάλυση II στις πραγματοποιηθείσες κατά τη διδακτορική διατριβή του I. Αναστασόπουλου (2005). Η διαφορά ανάμεσα στα δύο προσομοιώματα εντοπίζεται:

1. στον κάρναβο του εδαφικού προσομοιώματος: ο κάρναβος II είναι δισδιάστατος (I. Anastasopoulos 2005) και αποτελείται από εδαφικά στοιχεία  $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ , ενώ ο κάρναβος I είναι τρισδιάστατος και αποτελείται από στοιχεία  $2 \text{ m} \times 2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$ .
2. Ο λόγος  $B' / H$  στην ανάλυση I είναι  $0.35$ , ενώ στην ανάλυση II είναι  $0.5$ .

3. στη θεμελίωση: Η θεμελίωση της ανάλυσης I έχει προσομοιωθεί με στοιχείο κελύφους, ενώ της ανάλυσης II με στοιχεία δοκού.

4. στο φορτίο ανωδομής: Στην ανάλυση I έχει οριστεί  $q = 20$  kPa, ενώ στην ανάλυση II  $q = 25$  kPa.

Δεδομένων αυτών των διαφορών, η σύγκριση έχει ως στόχο τον εντοπισμό ποιοτικών κυρίως συγκλίσεων.

### 5.3.1 Σεισμική διάρρηξη σε σχετική απόσταση $d / B' = 0.2$

Όπως φαίνεται και στο **Σχήμα 5.23**, το άκαμπτο θεμέλιο δεν προκαλεί σημαντική εκτροπή στη διάρρηξη, ούτε στην ανάλυση I ούτε στην ανάλυση II. Και στα δύο στιγμιότυπα, παρατηρείται ότι η διάρρηξη έχει εκτραπεί προς το κατερχόμενο τέμαχος, χωρίς όμως να αποφύγει το θεμέλιο. Όσον αφορά στα προφίλ κατακόρυφων μετατοπίσεων, η ανάλυση I παρουσίασε μία διάχυση της κατακόρυφης μετατόπισης στην περιοχή του θεμελίου, μάλλον λόγω της αστοχίας του πρανούς, κάτι το οποίο δεν παρατηρήθηκε στην ανάλυση II. Η διαφορά αυτή ωστόσο δεν επηρέασε τη σύγκλιση αποτελεσμάτων σε όρους καθίζησης θεμελίου και απώλειας επαφής με το υποκείμενο έδαφος (**Σχήμα 5.24**): Το θεμέλιο και στις δύο περιπτώσεις αποκολλάται στο αριστερό και δεξί 1 / 5 του πλάτους τους.

Τέλος, διαφορά παρατηρείται στα διαγράμματα γωνιακής παραμόρφωσης (**Σχήμα 5.24**): Στην ανάλυση I η εκτροπή προς τα αριστερά και κύρτωση της διάρρηξης προς το κατερχόμενο τέμαχος, δεν αντικατοπτρίζεται στο διάγραμμα, πιθανώς λόγω του αραιού καννάβου. Αντίθετα, η αλληλεπίδραση του θεμελίου με τη διάρρηξη

αποτυπώνεται στο διάγραμμα γωνιακής παραμόρφωσης της ανάλυσης II με μεταφορά των καμπυλών προς τα αριστερά και μείωση των τιμών της.

### 5.3.2 Σεισμική διάρρηξη σε σχετική απόσταση $d / B' = 0.6$

Όπως παρουσιάζεται στο **Σχήμα 5.25** και στο **Σχήμα 5.26** μετακινώντας το θεμέλιο σε σχετική απόσταση  $d / B' = 0.6$  η αλληλεπίδραση παίζει σημαντικότερο ρόλο. Η διάρρηξη όχι μόνο εκτρέπεται αλλά χωρίζεται και σε δύο διακλαδώσεις. Στην ανάλυση I η διακλάδωση δε φαίνεται στον παραμορφωμένο κάρναβο, αλλά μπορεί να αναγνωριστεί από το διάγραμμα γωνιακής παραμόρφωσης. Ο αριστερός κλάδος και στις 2 περιπτώσεις εκτρέπεται κατά 2 περίπου μέτρα, αλλά τελικά η διάρρηξη ξεπροβάλλει κάτω από το θεμέλιο. Το θεμέλιο και στις δύο αναλύσεις διατηρεί την επαφή του στο αριστερό τμήμα, την χάνει κοντά στο μέσο του, στη συνέχεια ανακτά επαφή, για να αποκολληθεί στο δεξί τμήμα του. Τα προφίλ κατακόρυφης μετατόπισης παρουσιάζουν όμοια μεταβολή, όπως και τα διαγράμματα τάσεων επαφής. Χαρακτηριστική είναι η σύγκλιση των διαγραμμάτων γωνιακής παραμόρφωσης τόσο ποιοτικά όσο και ποσοτικά. Και τα δύο αποτυπώνουν την εκτροπή της διάρρηξης και τον περιορισμό της παραμόρφωσης από 60 % σε 40 %.

### 5.3.3 Σεισμική διάρρηξη σε σχετική απόσταση $d / B' = 0.8$

Τα εξαγόμενα αποτελέσματα παραθέτονται στο **Σχήμα 5.27** και στο **Σχήμα 5.28**. Η μετακίνηση της επιβαλλόμενης μετατόπισης στη σχετική απόσταση  $d / B' = 0.8$  επηρεάζει την αλληλεπίδραση της διάρρηξης με το θεμέλιο. Η διάρρηξη και εδώ



διαχωρίζεται σε 2 κλάδους και στις 2 αναλύσεις. Αυτό φυσικά στον αραιό κάνναβο της ανάλυσης I δεν είναι ορατό. Τα διαγράμματα όμως γωνιακής παραμόρφωσης μαρτυρούν το παραπάνω φαινόμενο. Η κύρια διάρρηξη και στις δύο αναλύσεις εκτρέπεται προς το σταθερό τέμαχος κατά 2 μέτρα, ενώ η γωνιακή παραμόρφωση μειώνεται και στις 2 αναλύσεις από 60% σε 40 % περίπου. Η ομοιότητα των διαγραμμάτων επαφής επιβεβαιώνει τα στιγμιότυπα του παραμορφωμένου καννάβου και τα όμοια αποτελέσματα των 2 αναλύσεων: Το θεμέλιο χάνει επαφή με το υποκείμενο έδαφος στο κεντρικό τμήμα του, ενώ διατηρεί την επαφή στα δύο άκρα. Η μετατόπιση της διάρρηξης προς τα δεξιά αντικατοπτρίζεται και στις δύο αναλύσεις με όμοιο τρόπο και στο προφίλ κατακόρυφων μετακινήσεων.

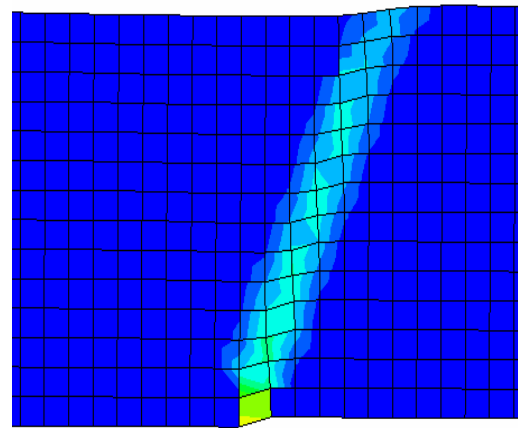
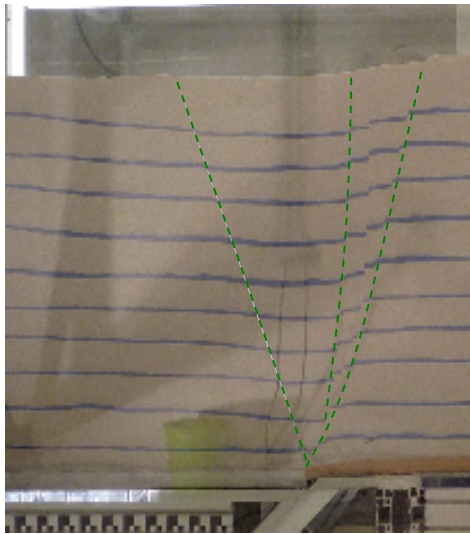
## 5.4 Συμπεράσματα

Με την σύγκριση πειράματος-ανάλυσης έγινε φανερό ότι το πείραμα προσεγγίζει πολύ καλά τις προηγηθείσες αναλύσεις: Η διάδοση της διαρρήξεως στην επιφάνεια, η «κάμψη» της προς το κατερχόμενο τέμαχος, η εμφάνιση της στην επιφάνεια αποτυπώθηκαν με αξιοσημείωτη σύγκλιση των αποτελεσμάτων. Η μη εμφάνιση των 3 διαρρήξεων του πειράματος στην ανάλυση προφανώς και οφείλεται στον αραιό κάνναβο, ενώ η διαφορά στο πλάτος του κατακρημνίσματος ίσως να οφείλεται σε μικροδιαφορές της γωνίας τριβής του εδαφικού δείγματος του πειράματος και του υπολογιστικού προσομοιώματος. Εξετάζοντας τώρα την αλληλεπίδραση του εδάφους με το θεμέλιο, θετικό ήταν το γεγονός ότι η στροφή του θεμελίου σε κάτοψη, όπως η

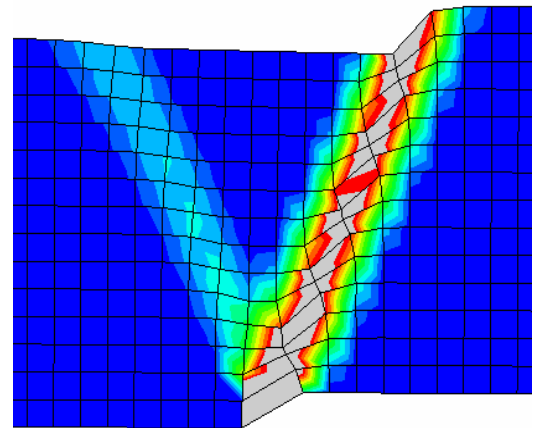
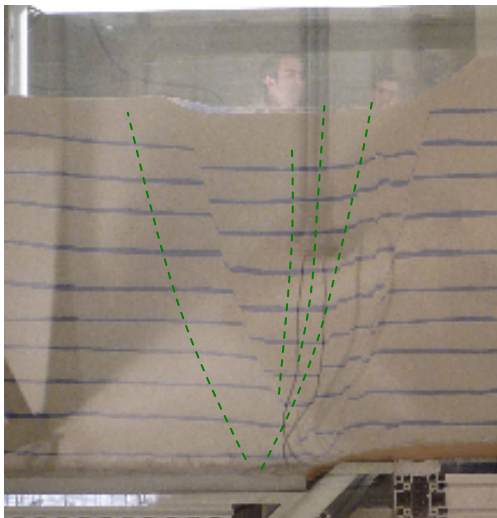
καθίζηση και οριζόντια ολίσθηση του προβλέφθηκαν επιτυχώς με το αριθμητικό προσομοίωμα. Η διαφορά στην εξέλιξή τους μέχρι την τελική τιμή οφείλεται πιθανώς στις τιμές της διαστολικότητας που υιοθετήθηκαν στο αριθμητικό προσομοίωμα., που φυσικά αποτελούν χονδροειδή μόνο αποτύπωση της πραγματικότητας

Η σύγκριση της ανάλυσης I με την ανάλυση SYM κατέδειξε ότι η αλλαγή των συνοριακών συνθηκών του θεμελίου δεν επηρεάζει την προσομοίωση του προβλήματος παρά μόνο σε όρους στροφής σε κάτοψη. Τα υπόλοιπα μεγέθη προσομοιώνονται με τον ίδιο τρόπο και από τις δύο αναλύσεις.

Όσον αφορά στη σύγκριση με τις αναλύσεις του Αναστασόπουλου (2005), αποδείχτηκε ότι και τα δύο προσομοιώματα καταλήγουν σε ίδια ποιοτικά αποτελέσματα και μπορούν να προβλέψουν τη συμπεριφορά της θεμελίωσης



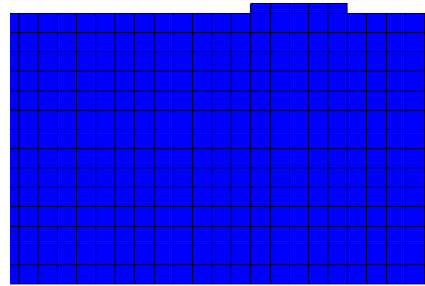
**Σχήμα 5.1.** Χαρακτηριστικά στιγμιότυπα (i) πειράματος και (ii) ανάλυσης για διάδοση της διάρρηξης στο ελεύθερο πεδίο ( $h = 0.8 \text{ m}$ ;  $h / H = 2.9 \%$ )



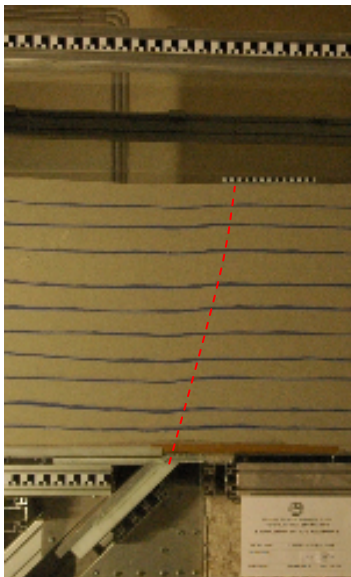
**Σχήμα 5.2.** Χαρακτηριστικά στιγμιότυπα (i) πειράματος και (ii) ανάλυσης για διάδοση της διάρρηξης στο ελεύθερο πεδίο ( $h = 2.2 \text{ m}$ ;  $h / H = 7.9 \%$ )



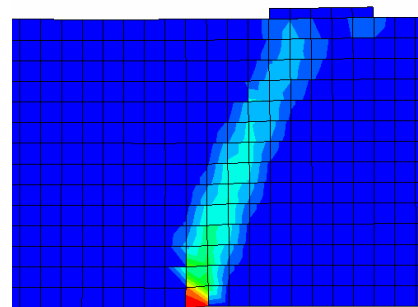
(α) Μετακίνηση Ρήγματος  $\Delta h = 0 \text{ cm}$



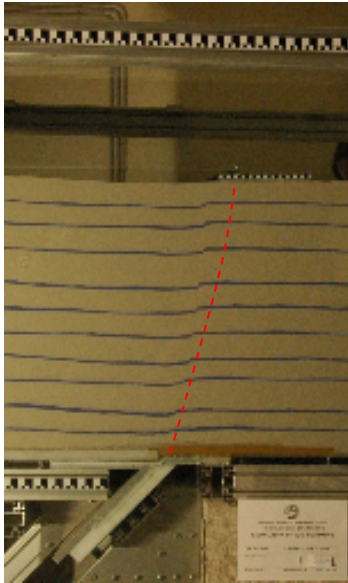
**Σχήμα 5.3.** Χαρακτηριστικά στιγμιότυπα (i) πειράματος και (ii) ανάλυσης για διάδοση της διάρρηξης και αλληλεπίδραση της με το άκαμπτο θεμέλιο ( $h = 0.0 \text{ m}$ ;  $h / H = 0.0 \%$ )



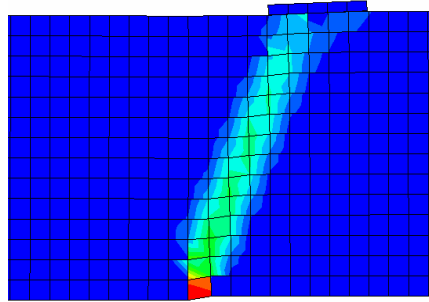
(β) Μετακίνηση Ρήγματος  $\Delta h = 0.5 \text{ cm}$



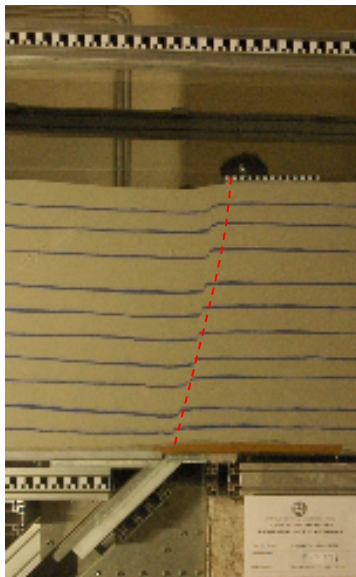
**Σχήμα 5.4.** Χαρακτηριστικά στιγμιότυπα (i) πειράματος και (ii) ανάλυσης για διάδοση της διάρρηξης και αλληλεπίδραση της με το άκαμπτο θεμέλιο ( $h = 0.2 \text{ m}$ ;  $h / H = 0.7 \%$ )



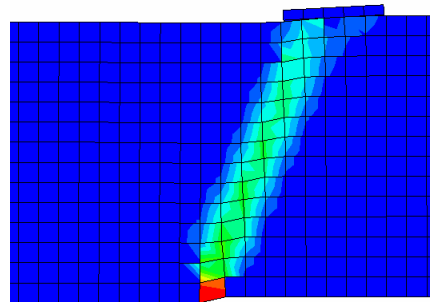
(α) Μετακίνηση ρήγματος  $\Delta h = 0.9 \text{ cm}$



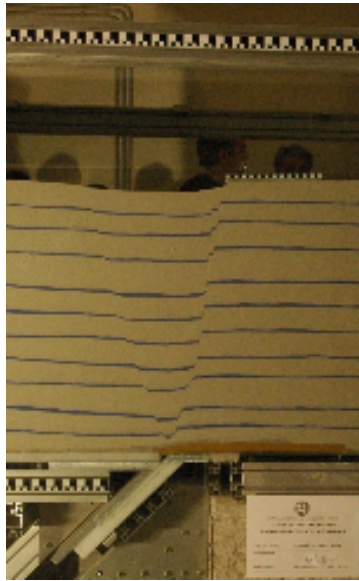
**Σχήμα 5.5.** Χαρακτηριστικά στιγμιότυπα (i) πειράματος και (ii) ανάλυσης για διάδοση της διάρρηξης και αλληλεπίδραση της με το άκαμπτο θεμέλιο ( $h = 0.4 \text{ m}$ ;  $h / H = 1.4 \%$ )



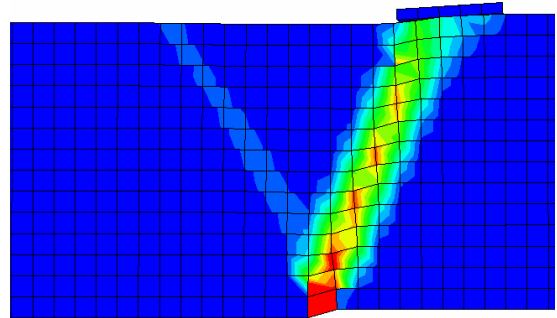
(β) Μετακίνηση ρήγματος  $\Delta h = 1.4 \text{ cm}$



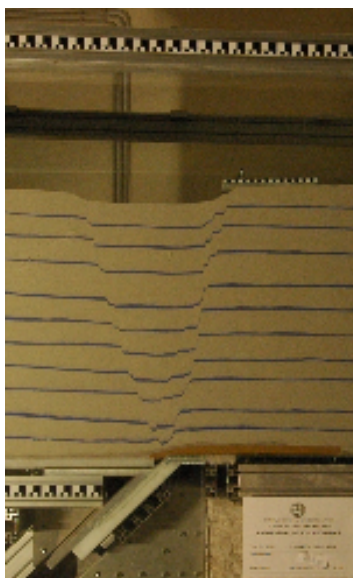
**Σχήμα 5.6.** Χαρακτηριστικά στιγμιότυπα (i) πειράματος και (ii) ανάλυσης για διάδοση της διάρρηξης και αλληλεπίδραση της με το άκαμπτο θεμέλιο ( $h = 0.6 \text{ m}$ ;  $h / H = 2.1 \%$ )



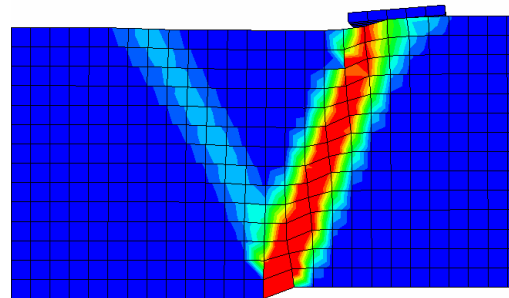
(α) Μετακίνηση Ρήγματος  $\Delta h = 2.0 \text{ cm}$



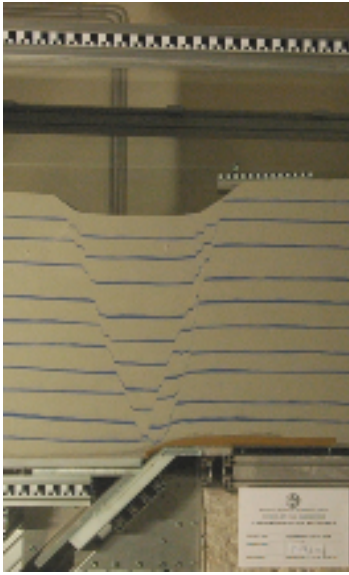
**Σχήμα 5.7.** Χαρακτηριστικά στιγμιότυπα (i) πειράματος και (ii) ανάλυσης για διάδοση της διάρρηξης και αλληλεπίδραση της με το άκαμπτο θεμέλιο ( $h = 0.8 \text{ m}$ ;  $h / H = 2.9 \%$ )



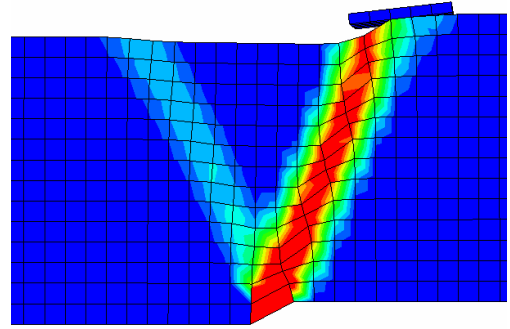
(β) Μετακίνηση Ρήγματος  $\Delta h = 3.0 \text{ cm}$



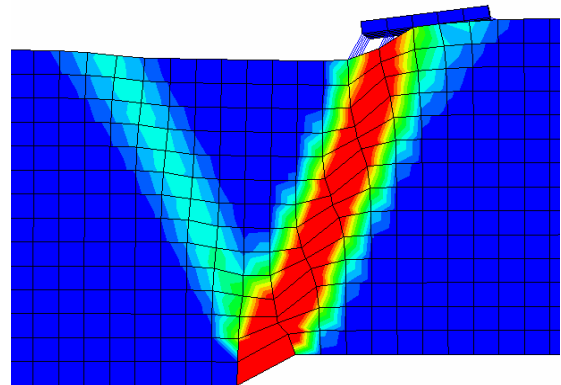
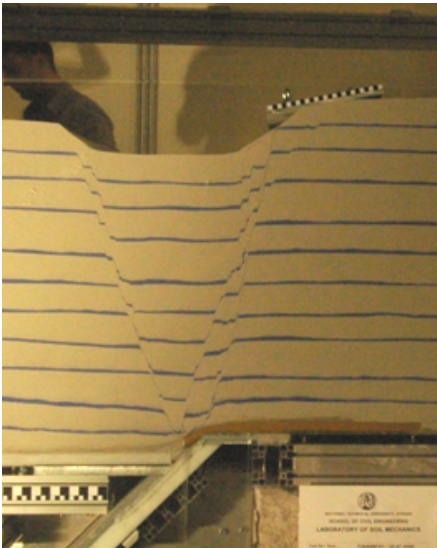
**Σχήμα 5.8.** Χαρακτηριστικά στιγμιότυπα (i) πειράματος και (ii) ανάλυσης για διάδοση της διάρρηξης και αλληλεπίδραση της με το άκαμπτο θεμέλιο ( $h = 1.2 \text{ m}$ ;  $h / H = 4.3 \%$ )



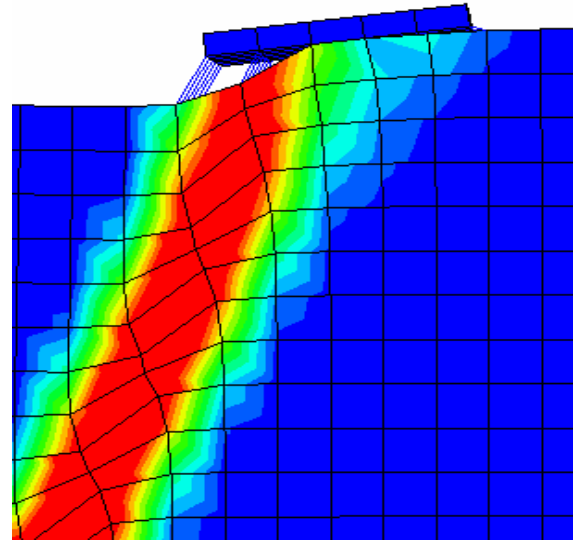
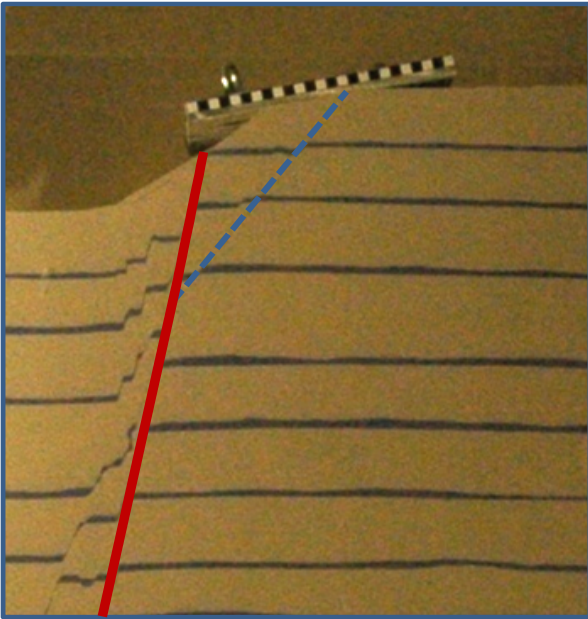
(α) Μετακίνηση Ρήγματος  $\Delta h = 5.4 \text{ cm}$



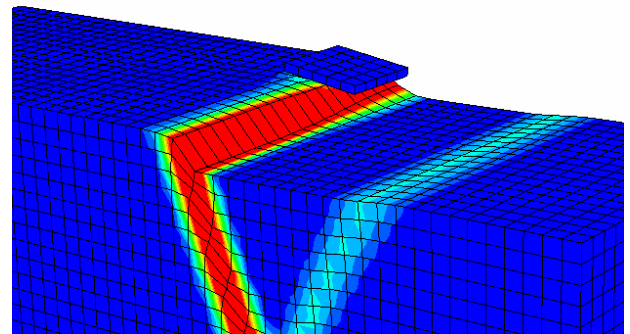
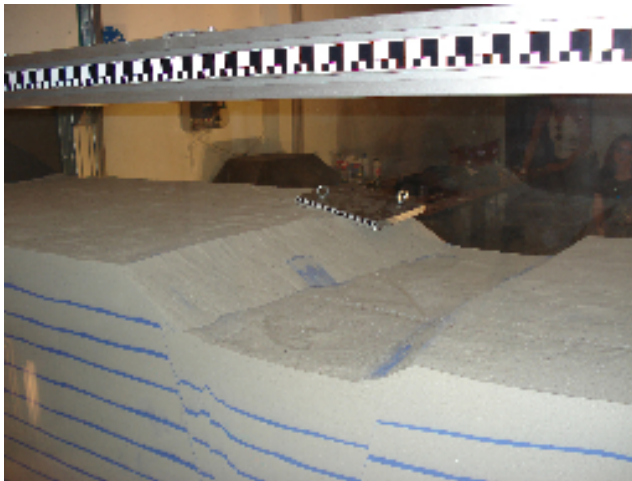
**Σχήμα 5.9.** Χαρακτηριστικά στιγμιότυπα (i) πειράματος και (ii) ανάλυσης για διάδοση της διάρρηξης και αλληλεπίδραση της με το άκαμπτο θεμέλιο ( $h = 2.2 \text{ m}$ ;  $h / H = 7.9 \%$ )



**Σχήμα 5.10.** Χαρακτηριστικά στιγμιότυπα (i) πειράματος και (ii) ανάλυσης για διάδοση της διάρρηξης και αλληλεπίδραση της με το άκαμπτο θεμέλιο ( $h = 2.6 \text{ m}$ ;  $h / H = 9.3 \%$ )

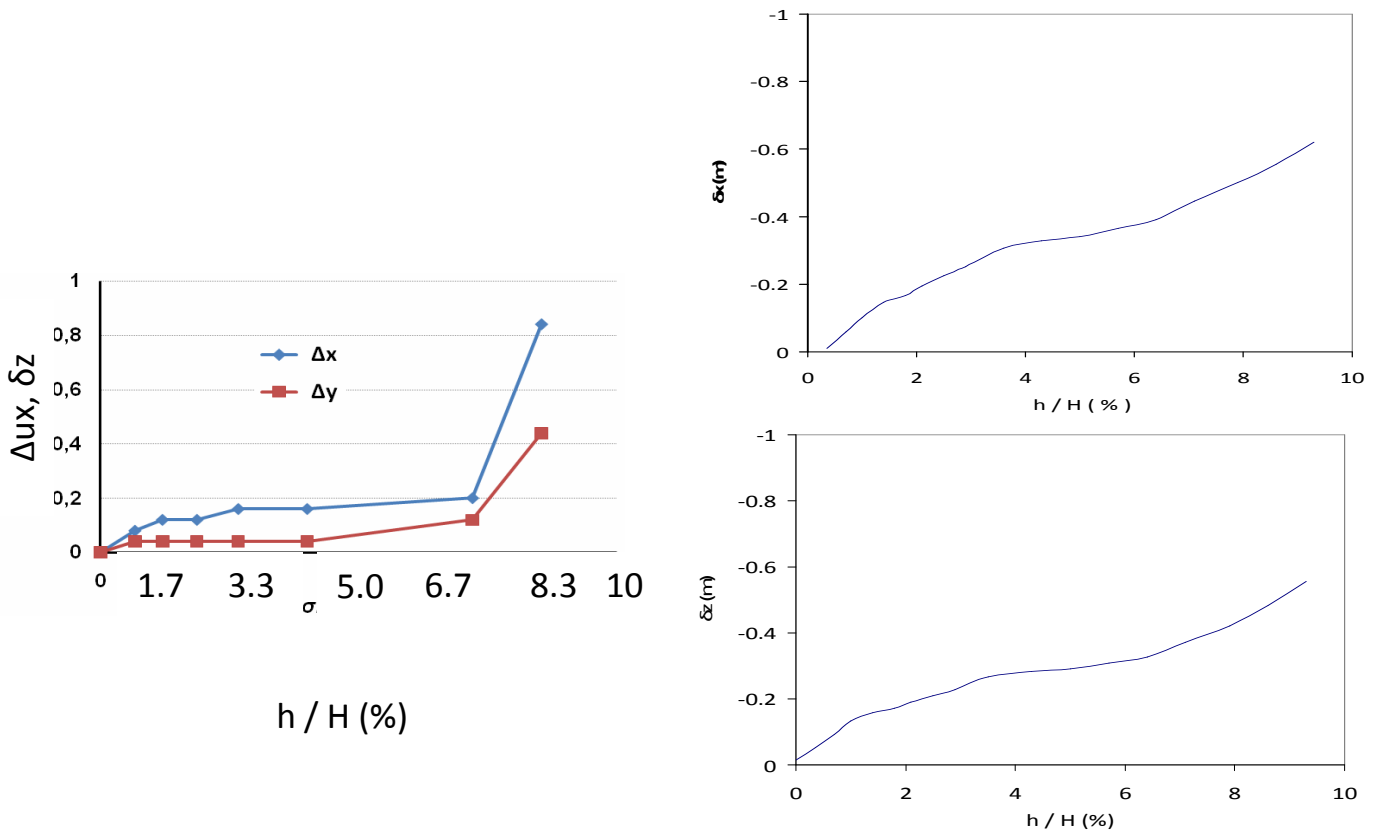


**Σχήμα 5.11.** Λεπτομέρεια της περιοχής έδρασης της πλάκας θεμελίωσης. Τόσο στο πείραμα όσο και στην ανάλυση παρατηρείται απώλεια στήριξης στο αριστερό άκρο της πλάκας και το ανασήκωμα στο δεξιό του άκρο. Με κόκκινη γραμμή απεικονίζεται η διάδοση της διάρρηξης του ρήγματος και με γαλάζιο η δευτερογενής αστοχία λόγω αυξημένης τάσης στο άκρο του διαμορφωμένου πρανούς ( $h = 2.6 \text{ m}$ ;  $h / H = 9.3 \%$ )

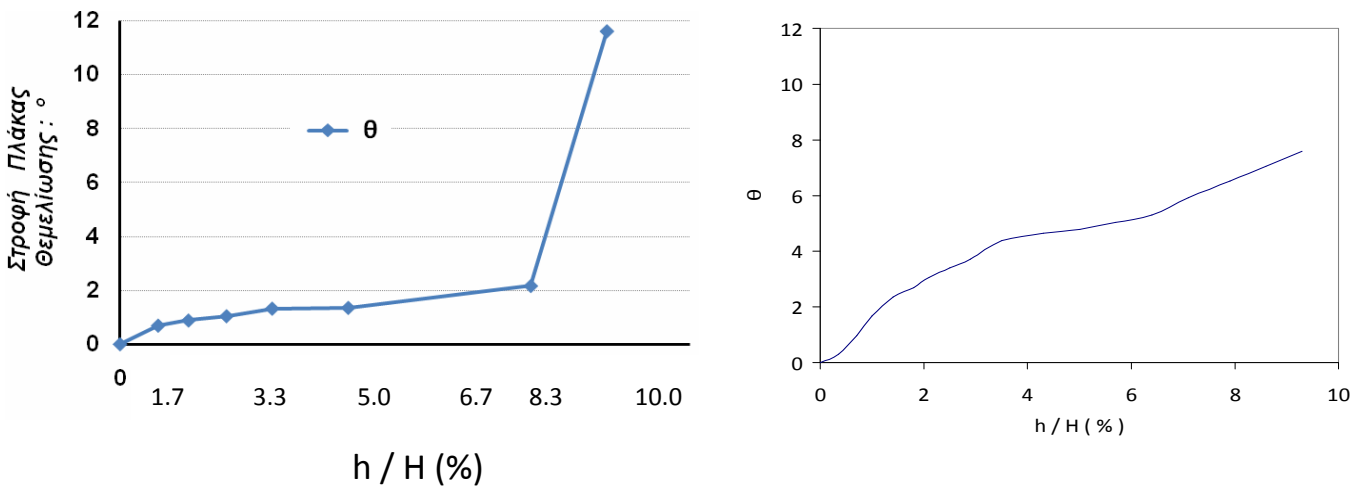


**Σχήμα 5.12.** Η στροφή της πλάκας θεμελίωσης για  $h = 2.6 \text{ m}$  ( $h / H = 9.3 \%$ ), και τα πρανή που διαμορφώθηκαν στην επιφάνεια του εδαφικού ομοιώματος. Το κατακρήμνισμα (“graben”) είναι εμφανές.

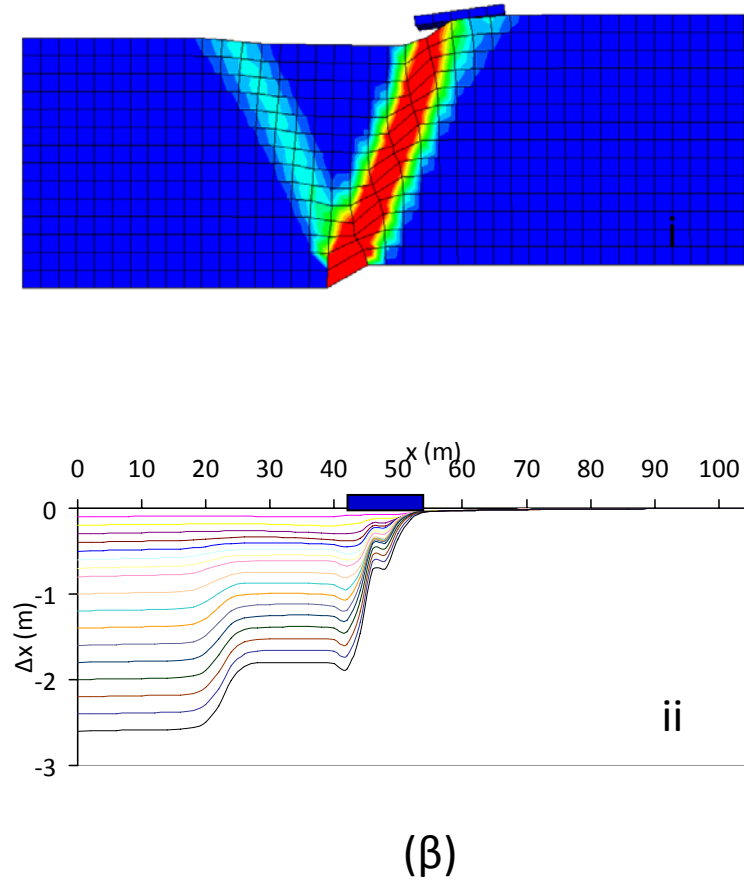
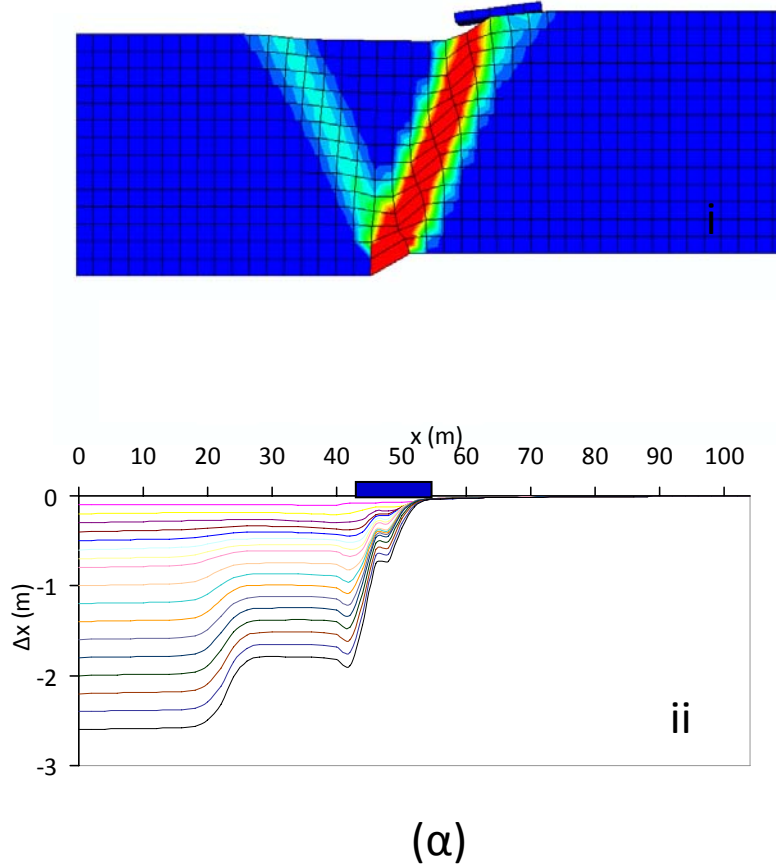




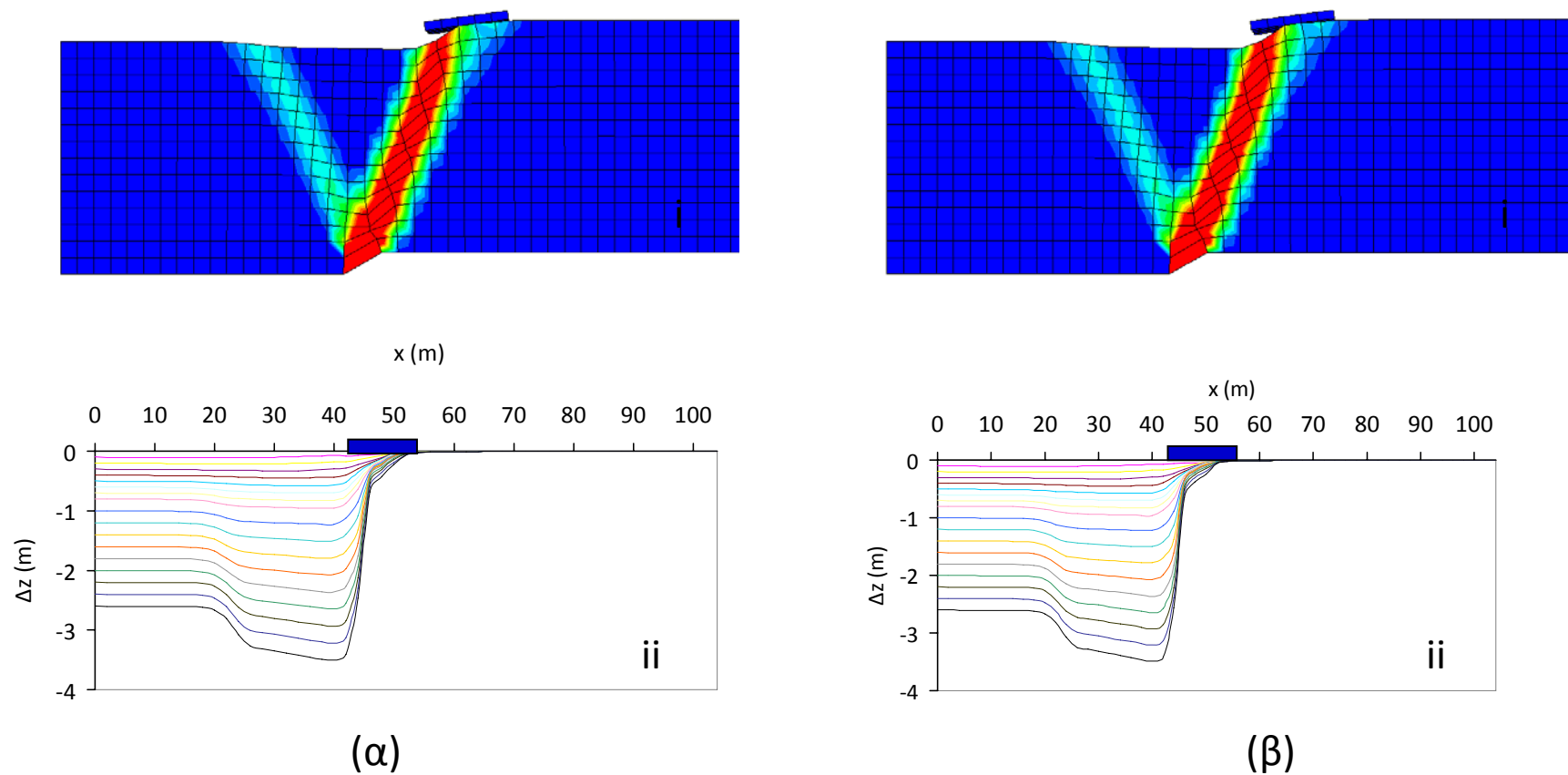
**Σχήμα 5.13.** Οριζόντια  $\Delta x$  και κατακόρυφη μετατόπιση  $\Delta z$  της πλάκας θεμελίωσης συναρτήσει της επιβαλλόμενης τεκτονικής μετατόπισης  $h / H$  (%).  
(i) πείραμα (ii) ανάλυση



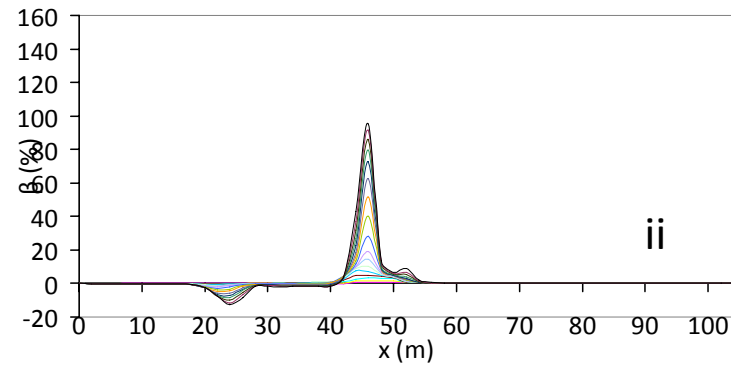
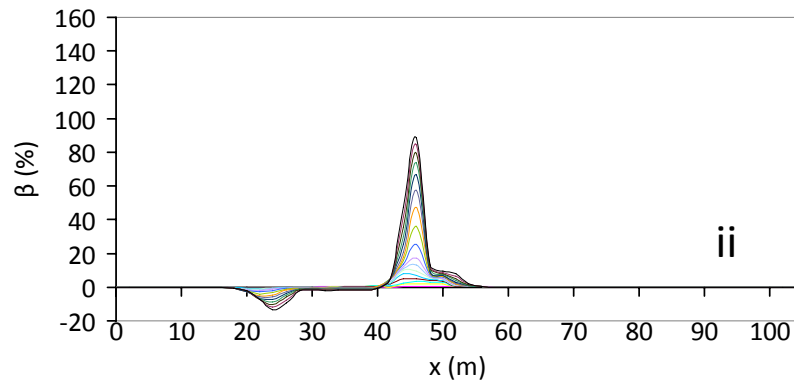
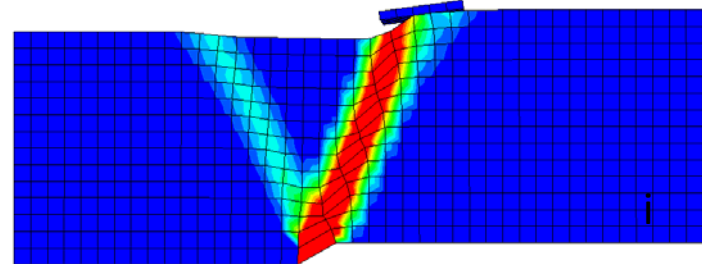
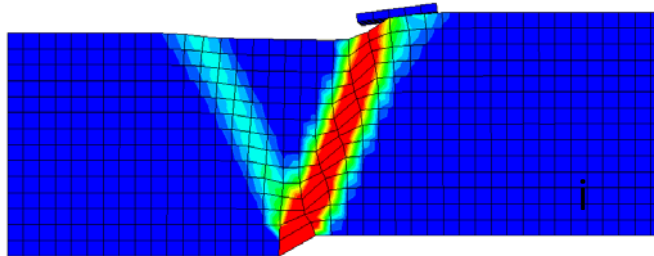
**Σχήμα 5.14.** Στροφή  $\theta$  της πλάκας θεμελίωσης συναρτήσει της επιβαλλόμενης τεκτονικής μετατόπισης  $h / H$  (%).  
(i) πείραμα (ii) ανάλυση



**Σχήμα 5.15:** Αλληλεπίδραση κανονικής διάρρηξης – εδάφους – άκαμπτου θεμελίου σε σχετική απόσταση  $d / B' = 0.4$ :  
 ( i ) παραμορφωμένος κάρναβος και πλαστική παραμόρφωση , (ii) προφίλ επιφανειακών οριζόντιων μετατοπίσεων  $\Delta x$  στην  
 (α) *ανάλυση I* και ( β ) *ανάλυση SYM*



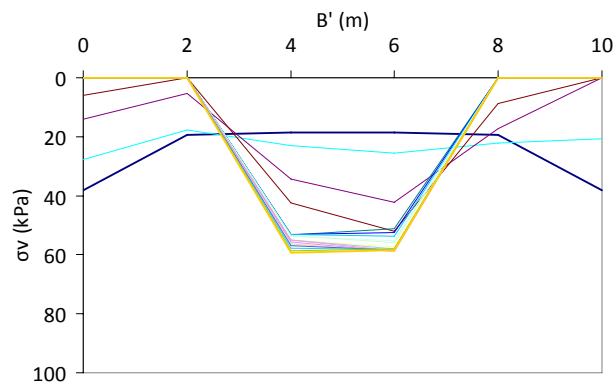
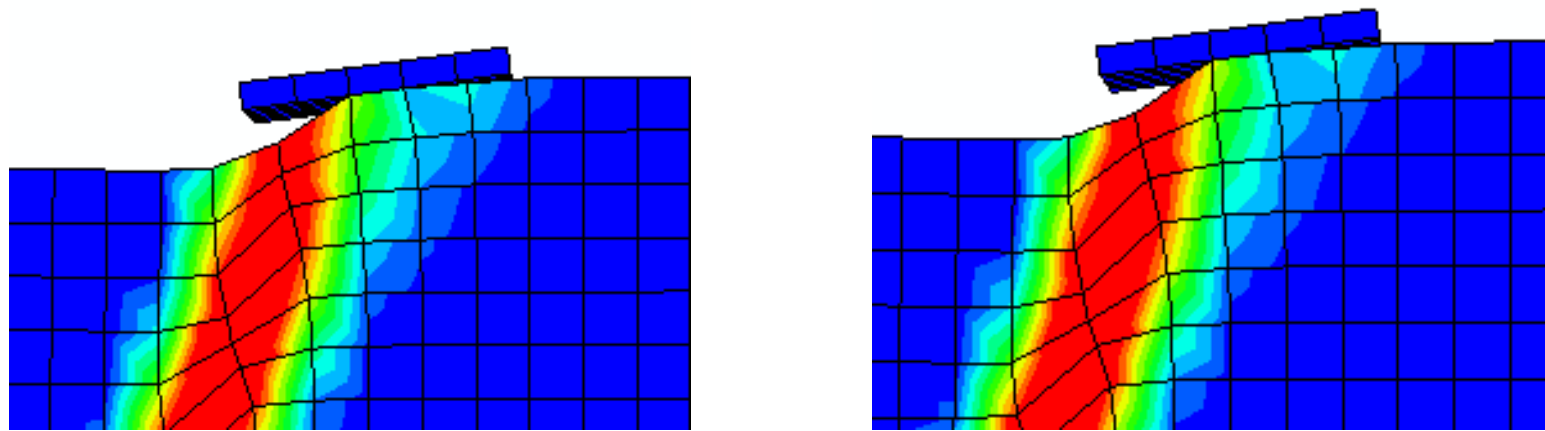
**Σχήμα 5.16.** Αλληλεπίδραση κανονικής διάρρηξης – εδάφους – άκαμπτου θεμελίου σε σχετική απόσταση  $d / B' = 0.4$  :  
 ( i ) παραμορφωμένος κάρναβος και πλαστική παραμόρφωση , ( ii ) προφίλ επιφανειακών κατακλίσεων  $\Delta z$  στο  
 ( α ) *ανάλυση I* και ( β ) στην *ανάλυση SYM*.



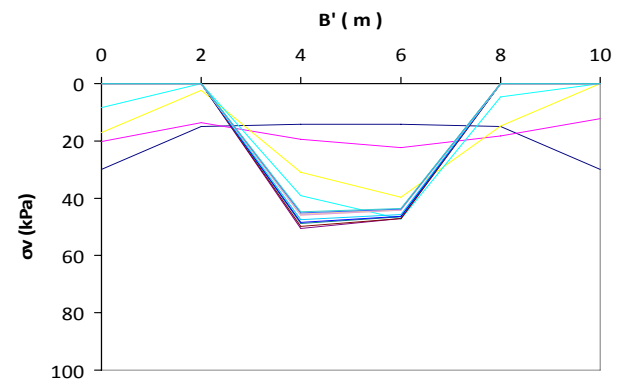
(α)

(β)

**Σχήμα 5.17.** Αλληλεπίδραση κανονικής διάρρηξης – εδάφους – άκαμπτου θεμελίου σε σχετική απόσταση  $d / B' = 0.4$  :  
 ( i ) παραμορφωμένος κάρναβος και πλαστική παραμόρφωση , (ii) προφίλ γωνιακής παραμόρφωσης  $\beta$  στην  
 (α) *ανάλυση I* και ( β ) στην *ανάλυση SYM*.

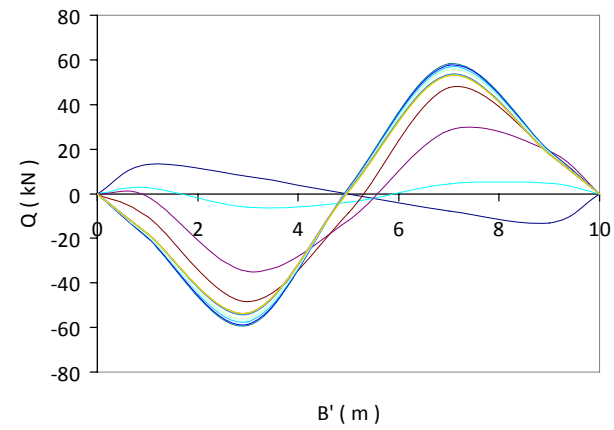
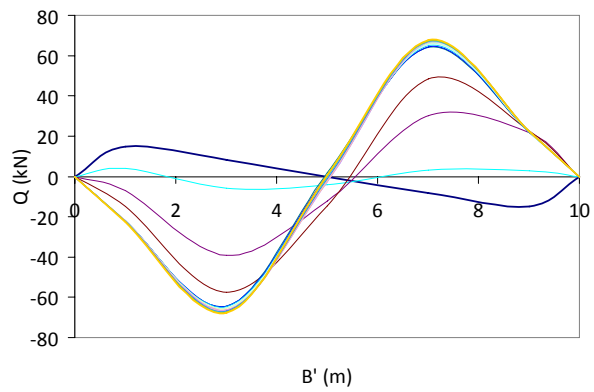
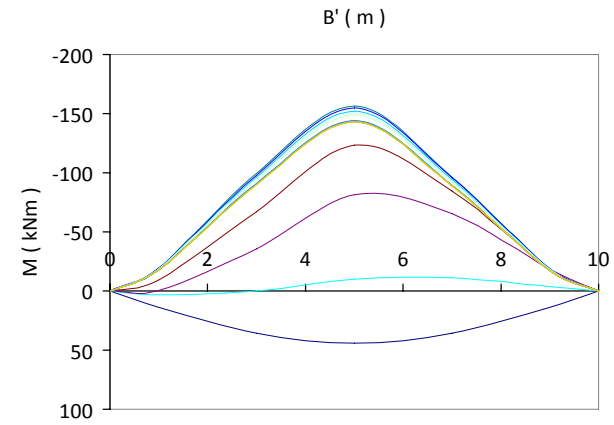
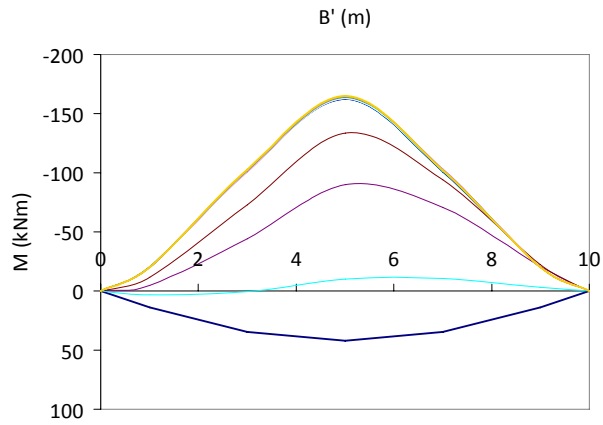


(α)



(β)

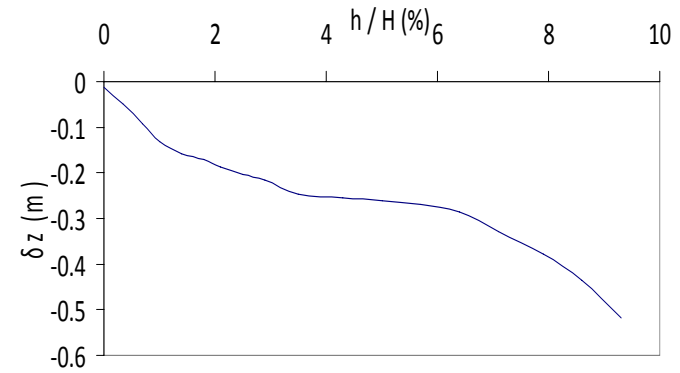
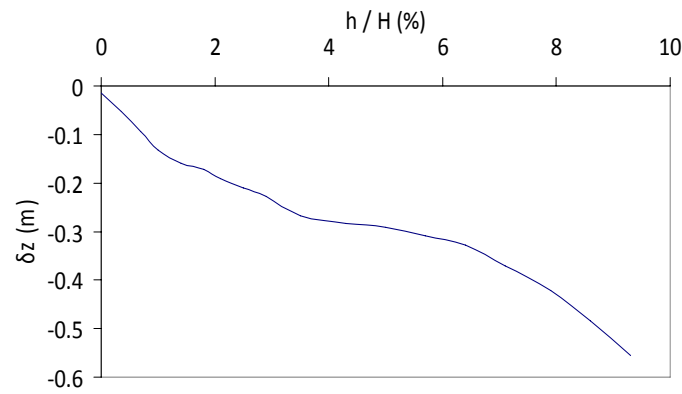
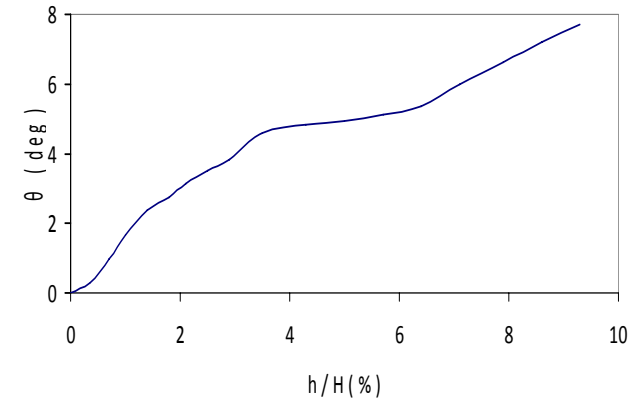
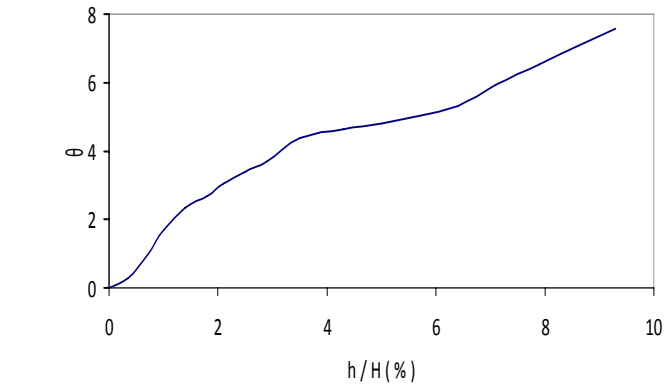
**Σχήμα 5.18.** Αλληλεπίδραση κανονικής διάρρηξης – εδάφους – άκαμπτου θεμελίου σε σχετική απόσταση  $d / B' = 0.4$  :  
 τάσεις επαφής  $\sigma_v$   
 (α) *ανάλυση I* και (β) *ανάλυση SYM*.



(α)

(β)

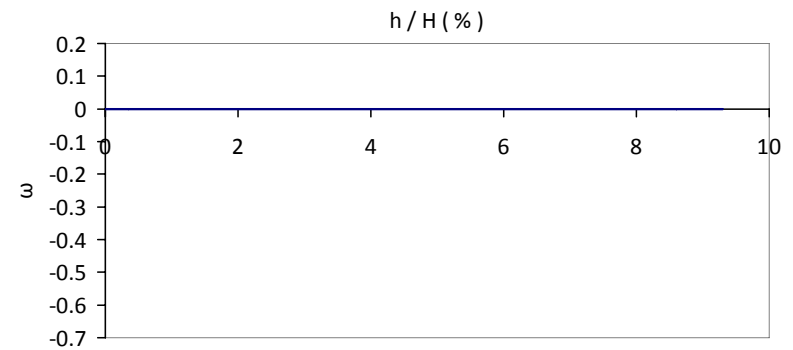
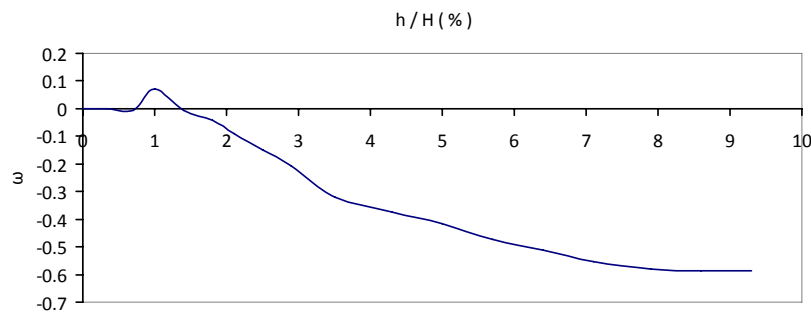
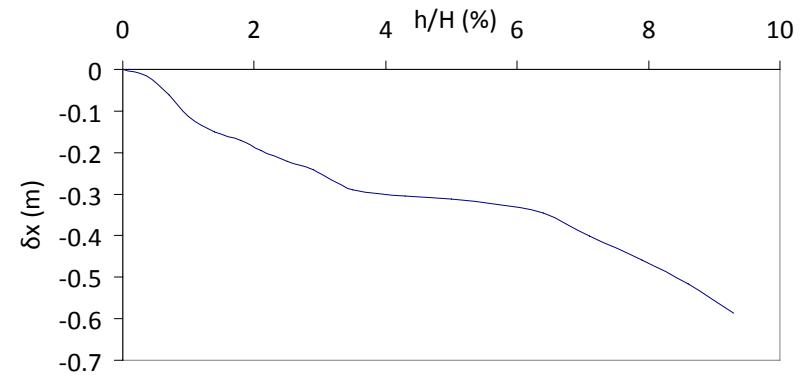
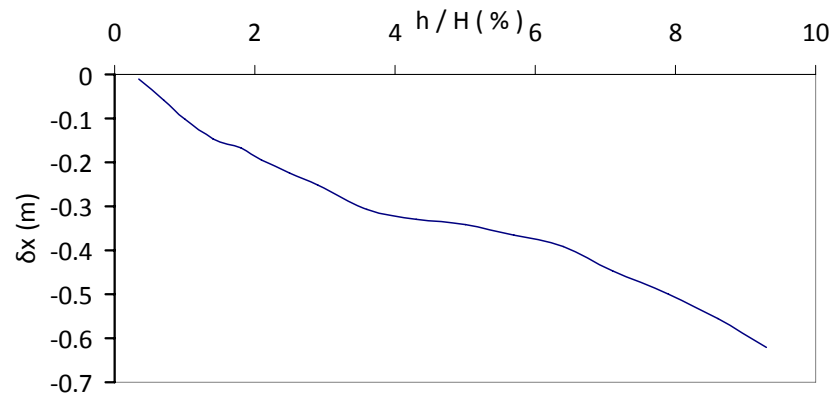
**Σχήμα 5.19.** Αλληλεπίδραση κανονικής διάρρηξης – εδάφους – άκαμπτου θεμελίου σε σχετική απόσταση  $d / B' = 0.4$  :  
 (i) καμπτικές ροπές θεμελίου  $M$  και (ii) τέμνουσες  $Q$ .  
 (α) *ανάλυση I* και (β) *ανάλυση SYM*.



(α)

(β)

**Σχήμα 5.20.** Αλληλεπίδραση κανονικής διάρρηξης – εδάφους – άκαμπτου θεμελίου σε σχετική απόσταση  $d / B' = 0.4$  :  
 ( i ) στροφή θεμελίου  $\vartheta$  (deg) , (ii) διαφορική καθίζηση θεμελίου  $\delta z$   
 (α) *ανάλυση I* και ( β ) *ανάλυση SYM*.

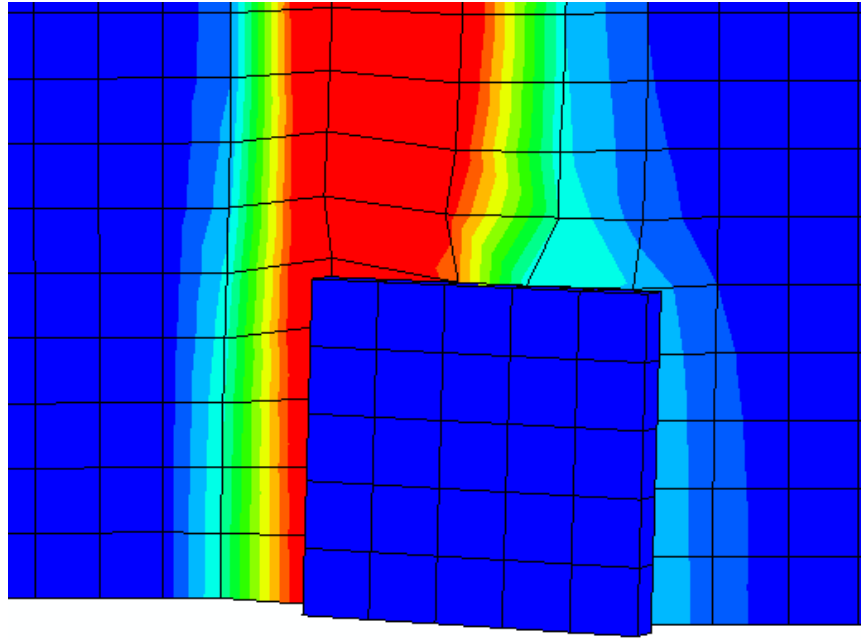


(α)

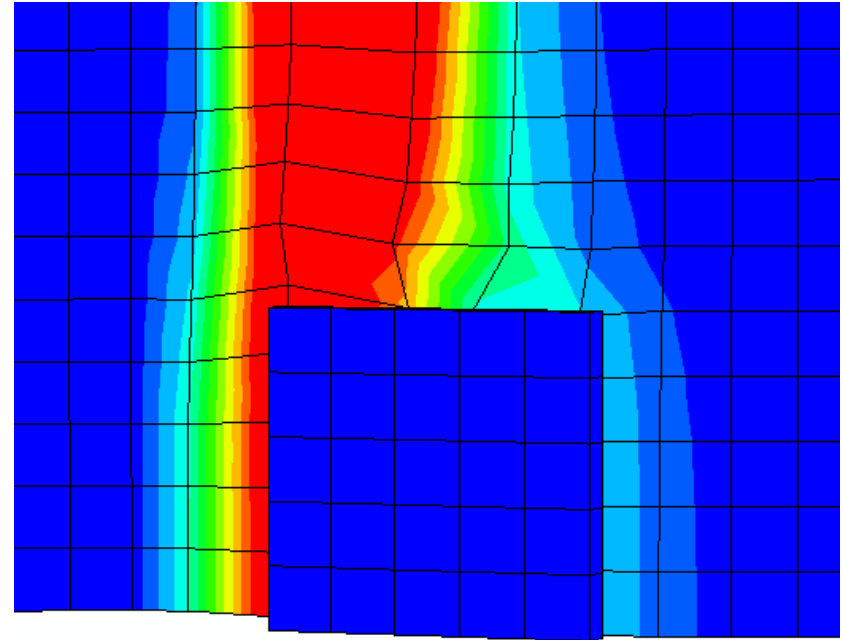
(β)

**Σχήμα 5.21.** Αλληλεπίδραση κανονικής διάρρηξης – εδάφους – άκαμπτου θεμελίου σε σχετική απόσταση  $d/B' = 0.4$  :  
 (i) ολίσθηση θεμελίου  $\delta x$  και (ii) στροφή θεμελίου  $\omega$  επί του επιπέδου (deg)  
 (α) *ανάλυση I* και (β) *ανάλυση SYM*.



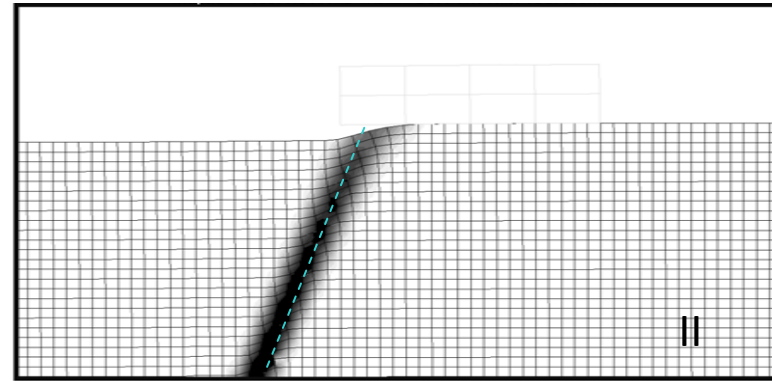
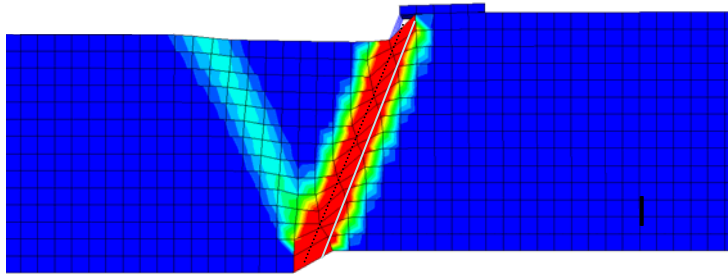


(α)

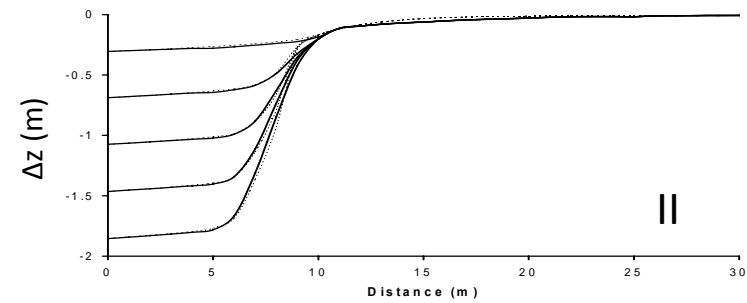
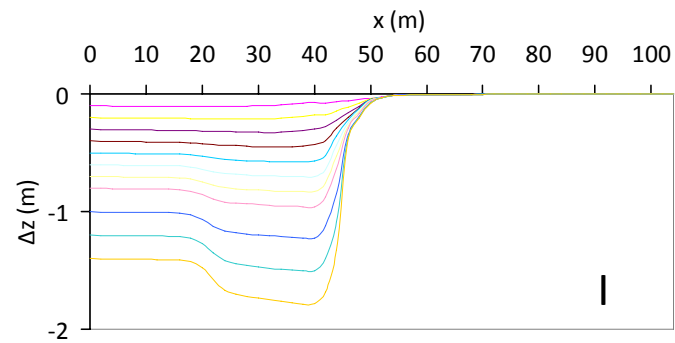


(β)

**Σχήμα 5.22.** Αλληλεπίδραση κανονικής διάρρηξης – εδάφους – άκαμπτου θεμελίου σε σχετική απόσταση  $d / B' = 0.4$  :  
στιγμιότυπο στροφής θεμελίου  $\omega$  σε κάτοψη (deg)  
(α) *ανάλυση I* και (β) *ανάλυση SYM*.

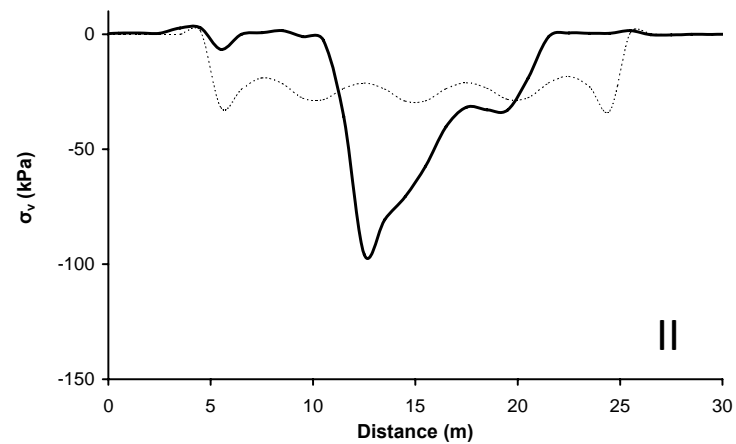
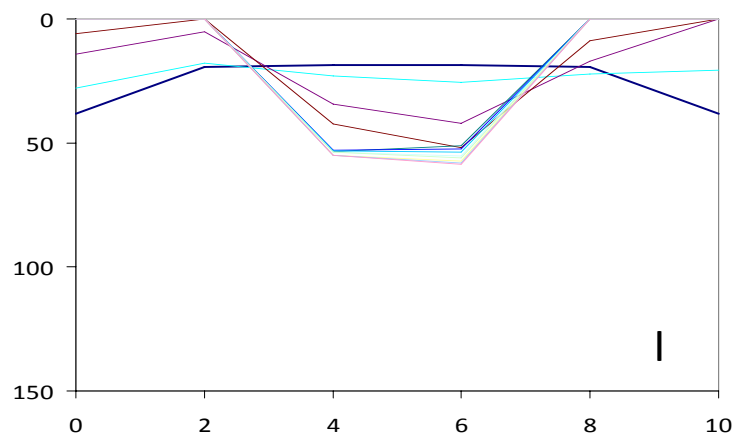


(α)

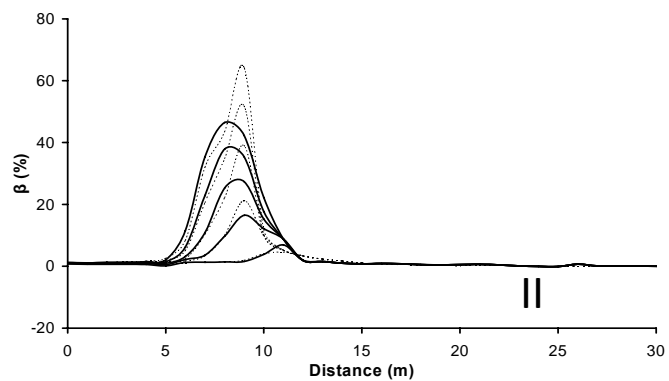
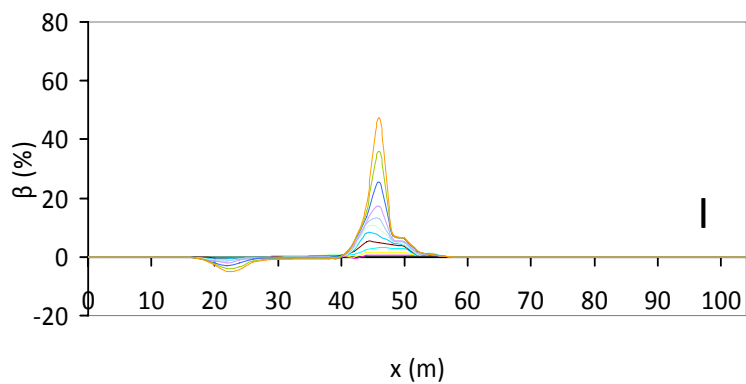


(β)

**Σχήμα 5.23:** Σύγκριση αποτελεσμάτων ανάλυσης I και ανάλυσης II για  $d / B' = 0.2$  :  
 (α) παραμορφωμένος κάρναβος (β) προφίλ κατακόρυφων μετατοπίσεων  $\Delta z$

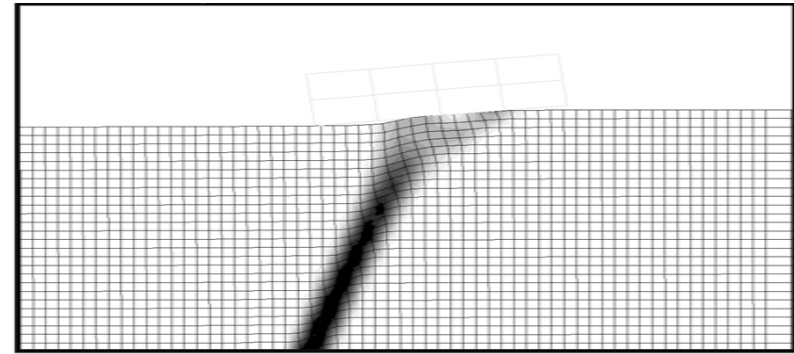
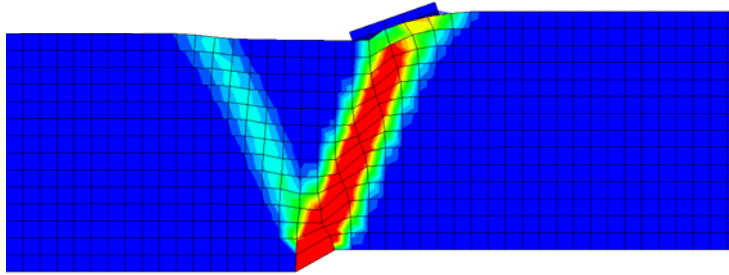


(α)

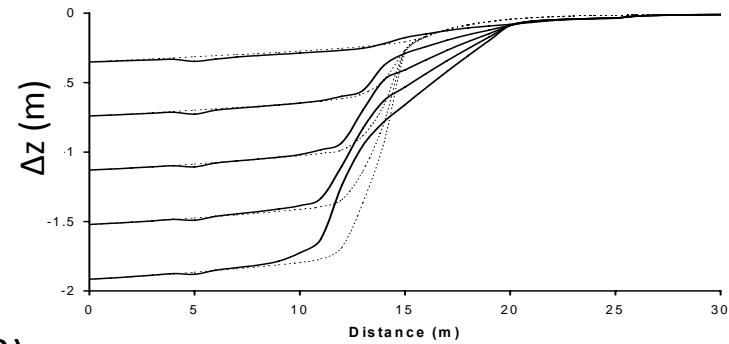
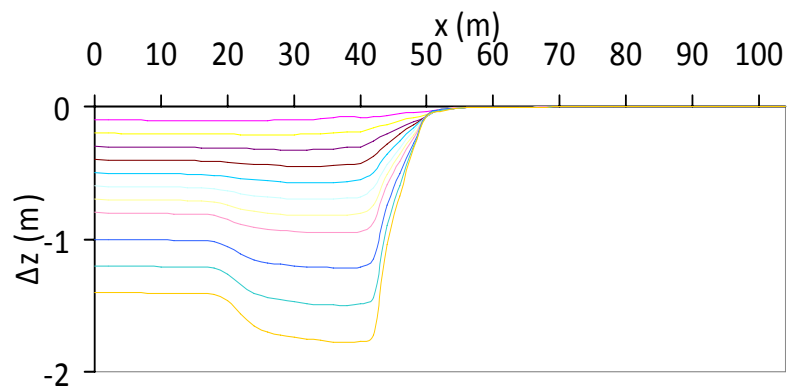


(β)

**Σχήμα 5.24:** Σύγκριση αποτελεσμάτων ανάλυσης I και ανάλυσης II για  $d / B' = 0.2$  :  
 (α) τάσεις επαφής θεμελίου (β) γωνία παραμόρφωσης επιφάνειας εδάφους

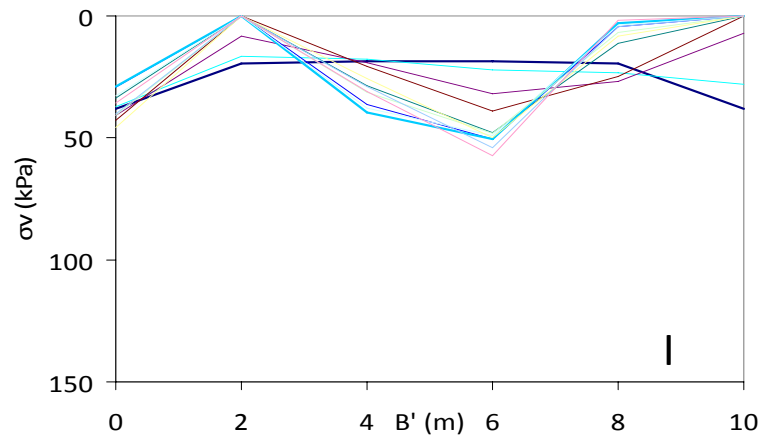


(α)

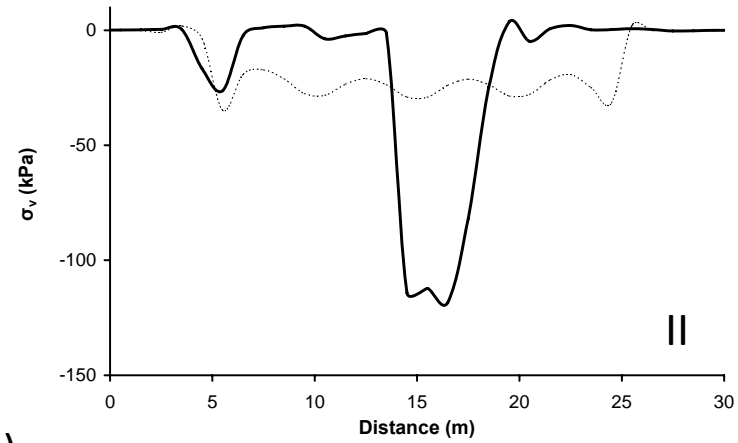


(β)

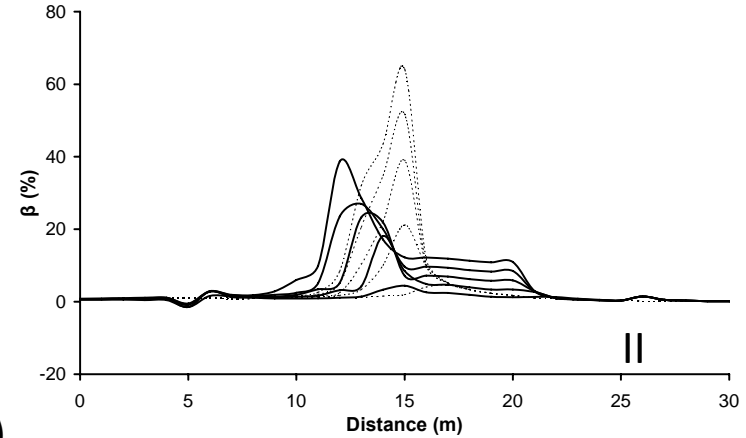
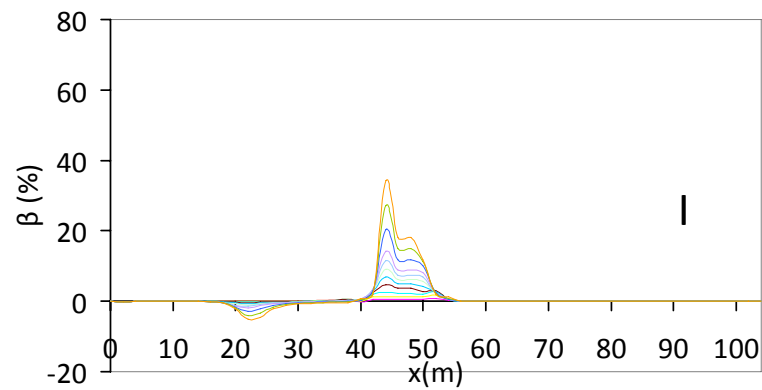
**Σχήμα 5.25:** Σύγκριση αποτελεσμάτων ανάλυσης I και ανάλυσης II για  $d / B' = 0.6$ :  
 (α) παραμορφωμένος κάρναβος (β) προφίλ κατακόρυφων μετατοπίσεων  $\Delta z$



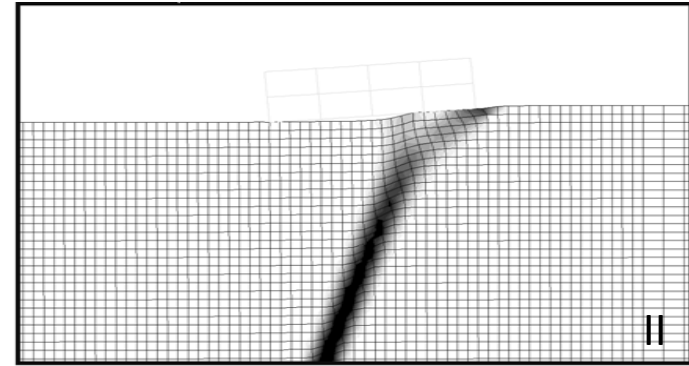
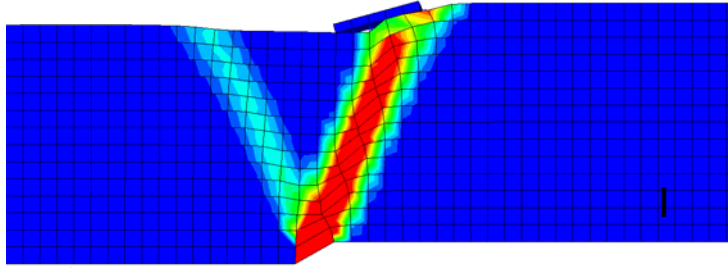
(α)



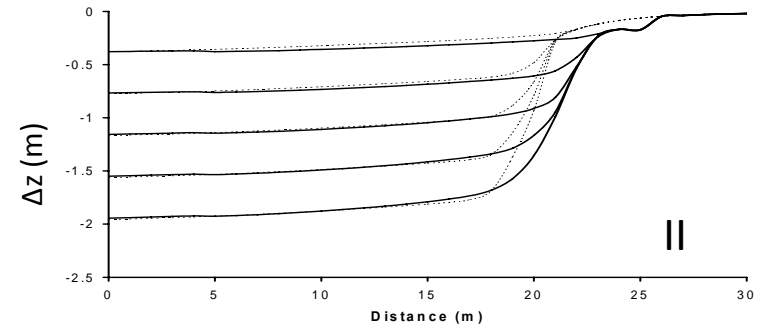
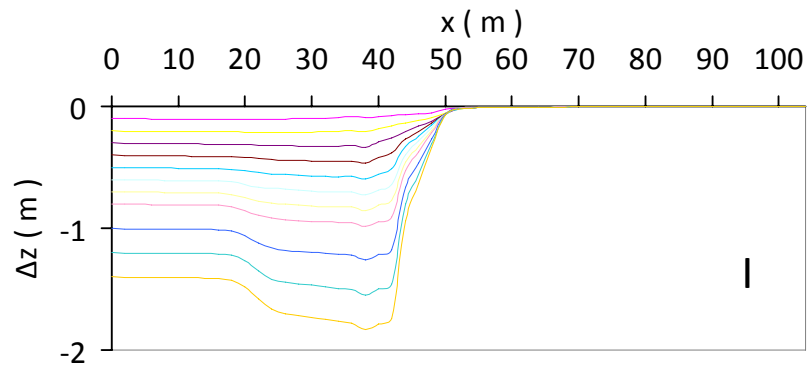
(β)



**Σχήμα 5.26:** Σύγκριση αποτελεσμάτων ανάλυσης I και ανάλυσης II για  $d / B' = 0.6$  :  
 (α) τάσεις επαφής θεμελίου (β) γωνία παραμόρφωσης επιφάνειας εδάφους

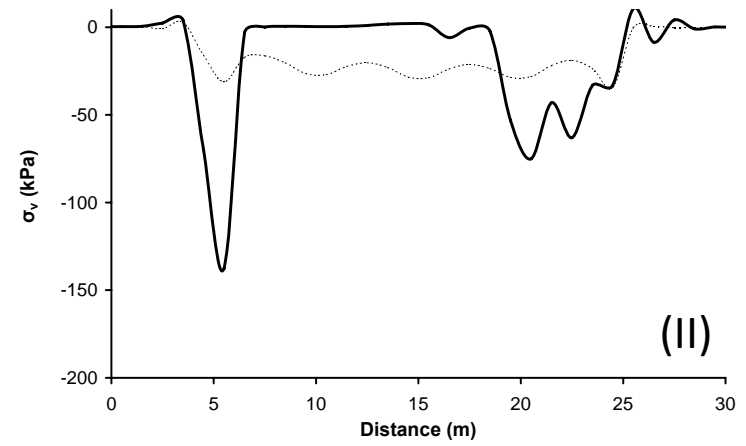
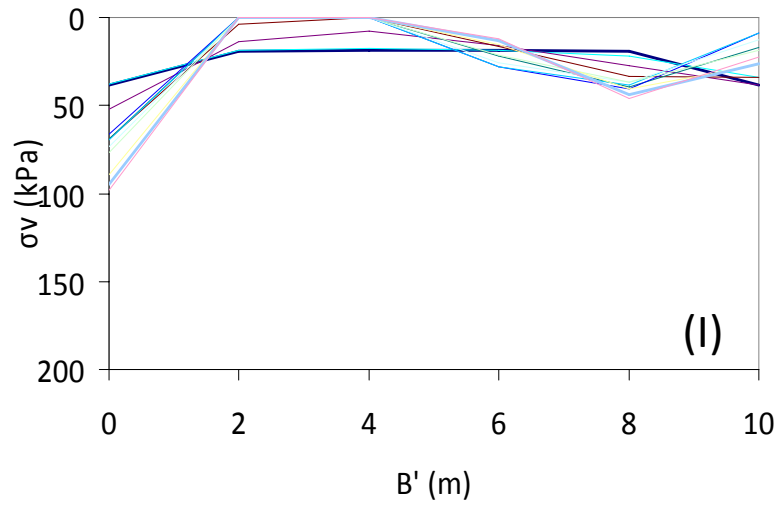


(α)

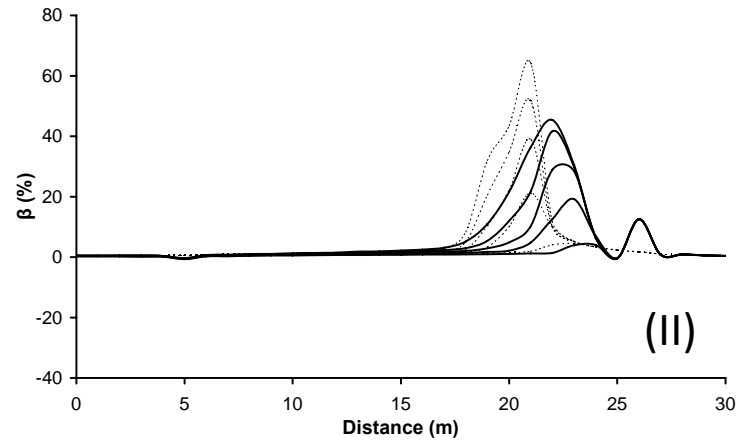
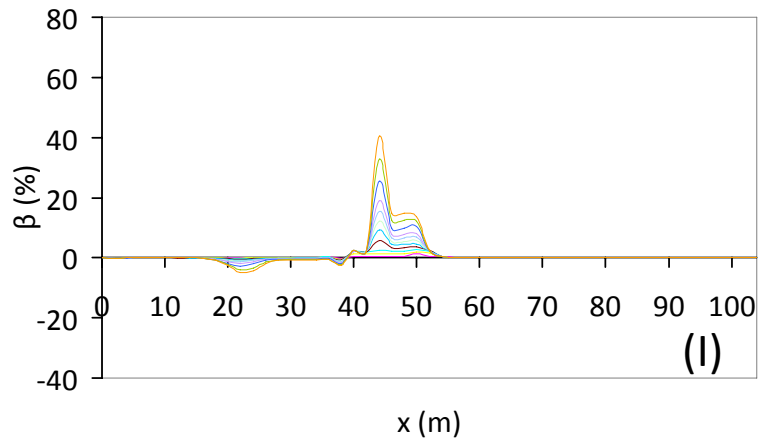


(β)

**Σχήμα 5.27:** Σύγκριση αποτελεσμάτων ανάλυσης I και ανάλυσης II για  $d / B' = 0.6$ :  
 (α) παραμορφωμένος κάρναβος (β) προφίλ κατακόρυφων μετατοπίσεων  $\Delta z$



(α)



(β)

**Σχήμα 5.28:** Σύγκριση αποτελεσμάτων ανάλυσης I και ανάλυσης II για  $d / B' = 0.8$  :  
 (α) τάσεις επαφής θεμελίου (β) γωνία παραμόρφωσης επιφάνειας εδάφους