

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΦΡΑΓΜΑ ΛΙΘΟΡΡΙΠΤΟ ΜΕ ΑΝΑΝΤΗ ΠΛΑΚΑ
ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΥΠΟ ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΔΙΕΓΕΡΣΗ



ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ : κ. ΝΤΑΚΟΥΛΑΣ ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ
ΦΟΙΤΗΤΡΙΕΣ: ΚΑΖΑΝΤΖΗ ΑΝΑΣΤΑΣΙΑ- ΚΑΣΙΑ ΑΝΘΗ
ΕΤΟΣ : 2012-2013



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ & ΚΕΝΤΡΟ ΠΛΗΡΟΦΟΡΗΣΗΣ
ΕΙΔΙΚΗ ΣΥΛΛΟΓΗ «ΓΚΡΙΖΑ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ»

Αριθ. Εισ.: 12130/1
Ημερ. Εισ.: 26-11-2013
Δωρεά: Συγγραφέα
Ταξιθετικός Κωδικός: ΠΤ – ΠΜ
2013
ΚΑΖ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1. ΦΡΑΓΜΑΤΑ ΛΙΘΟΡΡΙΠΗΣ ΜΕ ΑΝΑΝΤΗ ΠΛΑΚΑ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ.....	5
1.2. ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ.....	7
1.3. ΑΙΤΙΕΣ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΦΡΑΓΜΑΤΩΝ ΛΙΘΟΡΡΙΠΗΣ.....	11
1.4. ΣΚΟΠΟΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	13

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ

2.1. ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ.....	15
2.1.1. ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ.....	16
2.1.2. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΟΠΛΟΥ ΜΕ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ.....	20
2.2. ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ.....	21
2.2.1 ΡΟΛΟΣ ΤΩΝ ΙΝΩΝ.....	22
2.3. ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ ΜΕ ΙΝΕΣ ΧΑΛΥΒΑ (SFRC).....	25
2.4. ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ ΜΕ ΙΝΕΣ ΓΥΑΛΙΟΥ (GFRC).....	28
2.5. ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ ΜΕ ΙΝΕΣ ΠΟΛΥΠΡΟΠΥΛΕΝΙΟΥ.....	31
2.6. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ.....	34

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ

3.1.ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΛΙΘΟΡΡΙΠΤΩΝ ΦΡΑΓΜΑΤΩΝ.....	35
3.2.ΜΕΘΟΔΟΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΦΡΑΓΜΑΤΩΝ.....	38

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ

4.1. ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ ΤΟΥ ΙΝΟΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΤΗΣ ΑΝΑΝΤΗ ΠΛΑΚΑΣ ΤΟΥ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ ΛΙΘΟΡΡΙΠΗΣ.....54

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ ΛΙΘΟΡΡΙΠΗΣ ΜΕ ΑΝΑΝΤΗ ΠΛΑΚΑ ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

5.1. ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ.....60

5.2.ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΚΑΙ ΠΛΗΡΩΣΗΣ ΤΗΣ ΛΕΚΑΝΗΣ.....61

5.2.1.ΣΤΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....63

5.3 ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ – ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....75

5.3.1.ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΧΩΡΙΣ ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΚΑΘΙΖΗΣΗ...75

5.3.2.ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΜΕ ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΚΑΘΙΖΗΣΗ.....83

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 : ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....91

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....93

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την ολοκλήρωση της διπλωματικής μας εργασίας θα θέλαμε να εκφράσουμε τις ευχαριστίες μας προς όλους όσους υποστήριξαν έμπρακτα την προσπάθεια μας.

Πρωτίστως, ευχαριστούμε θερμά τον Επιβλέπων Καθηγητή μας, Κύριο Ντακούλα Παναγιώτη, για την άριστη συνεργασία που είχαμε καθώς μέσα από την καθοδήγηση του επετεύχθη η ολοκλήρωση της διπλωματικής μας.

Επίσης, θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε ιδιαίτερα τις οικογένειές μας, για τη συνεχή κατανόηση που έδειξαν, καθώς και για τη σημαντική εμπύχωση που μας παρείχαν κατά τη διάρκεια της προσπάθειάς μας.

Τέλος, ευχαριστούμε τους φίλους μας, που ενίσχυσαν την προσπάθειά μας αυτή με την υποστήριξη και την συμπαράσταση που μας έδωσαν.

Κεφάλαιο 1^ο

1.1 ΦΡΑΓΜΑΤΑ ΛΙΘΟΡΡΙΠΗΣ ΜΕ ΑΝΑΝΤΗ ΠΛΑΚΑ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

Το φράγμα είναι τεχνικό έργο που κατασκευάζεται κάθετα στην κοίτη ενός φυσικού ρεύματος (ποταμού) για την αποκοπή της ροής, με σκοπό την αποθήκευση, παροχέτευση ή ανάσχεση της πλημμυρικής παροχής του ρεύματος.

Τα φράγματα από λιθορριπή με ανάντη πλάκα σκυροδέματος αναπτύχθηκαν έντονα κατά τις τελευταίες δεκαετίες. Αρκετές εφαρμογές του λιθόρριπτου φράγματος με ανάντη πλάκα σκυροδέματος (CFRD) συναντώνται στην παγκόσμια κατασκευαστική δραστηριότητα. Όπως είναι γνωστό το φράγμα αποτελεί μεγάλο και πολυσύνθετο κατασκευαστικό έργο με το οποίο οι μηχανικοί επεμβαίνουν στη γεωμορφολογία της περιοχής λόγω αναγκών διαχείρισης των νερών προς όφελος του κοινωνικού συνόλου. Είναι έργο που πρέπει να πληροί απαιτήσεις ύψιστης ασφάλειας τόσο κατά την κατασκευή του όσο και κατά τη λειτουργία του. Αποτελείται από επιμέρους τμήματα όπως το κύριο σώμα του φράγματος, τον υπερχειλιστή και τον εκκενωτή πυθμένα, που είναι αναπόσπαστα τμήματα της ασφαλούς λειτουργίας του.

Κατά τα τελευταία είκοσι χρόνια κατασκευάσθηκε ένας σημαντικός αριθμός φραγμάτων λιθορριπής με ανάντη πλάκα σκυροδέματος (CFRDs) στην Κίνα, Βραζιλία, Μεξικό, Η.Π.Α., Αυστραλία, Νότιο-Ανατολική Ασία, κλπ. Μέχρι το 2005 πάνω από 150 CFRDs είχαν ολοκληρωθεί μόνο στην Κίνα, εκ των οποίων 37 ήταν υψηλότερα των 100 m και 14 ήταν υψηλότερα των 150 m (Ma & Cao 2007). Το φράγμα Shuibuya ύψους 233 m, το οποίο ολοκληρώθηκε το 2007, είναι προς το παρόν το υψηλότερο φράγμα του κόσμου, αλλά δεν πρόκειται κρατήσει τον τίτλο αυτό για πολύ. Πράγματι, λόγω της μεγάλης ζήτησης για ύδρευση και παραγωγή ενέργειας, υπάρχει στην παρούσα περίοδο παγκοσμίως μία μεγάλη δραστηριότητα για την κατασκευή υψηλών CFRDs (H>150 m).

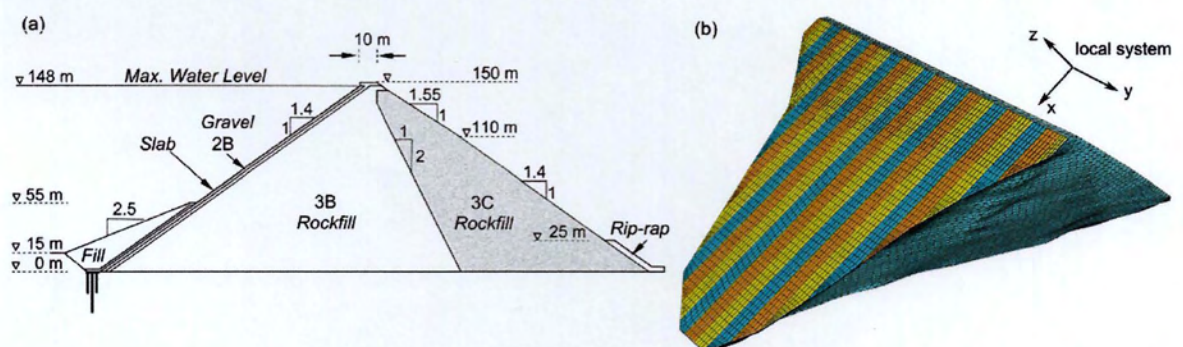
Τα CFRDs προσφέρουν μερικά σημαντικά πλεονεκτήματα (Sherard & Cooke 1987, Ma & Cao 2007, Gazetas & Dakoulas 1992):

- Εύκολη προσαρμοστικότητα σε διαφορετικές γεωλογικές και τοπογραφικές συνθήκες
- Μικρότερο όγκο επιχώματος και λίγα υλικά προς μεταφορά από άλλες περιοχές
- Η μεγάλη τιμή της γωνίας διατμητικής αντοχής συμπυκνωμένων χαλίκων και λιθορριπής, επιτρέπουν μεγάλες κλίσεις πρανών.

- Η σημαντική πίεση του νερού αυξάνει την δυσκαμψία και την αντοχή της λιθορριπής
- Η κατασκευή του επιχώματος είναι δυνατόν να γίνει υπό βροχή, επιτυγχάνοντας οικονομία χρόνου και μάλλον καλύτερη συμπύκνωση
- Λόγω μεγάλων κλίσεων πρανών υπάρχει οικονομία υλικών
- Απαιτούνται λιγότερα υλικά από μακρινές περιοχές
- Η κατασκευή είναι ταχύτερη, η λειτουργία ασφαλέστερη και η συντήρηση ευκολότερη

Η εξέλιξη του σχεδιασμού των CFRDs μέχρι τώρα βασίστηκε κυρίως στην εμπειρία από την συμπεριφορά των ήδη κατασκευασμένων φραγμάτων. Όμως η επέκταση της εμπειρίας αυτής σε νέες κατασκευές με συνεχώς αυξανόμενα ύψη οδήγησε πρόσφατα σε προβλήματα (Marques Filho et al. 2005). Οι πρόσφατες αυτές εμπειρίες καθιστούν εμφανή την ανάγκη ο σχεδιασμός των CFRD να ξεφύγει από τον έντονο εμπειρισμό και να συμπεριλάβει νέες μεθοδολογίες αριθμητικής προσομοίωσης που σε συνδυασμό με τις εργαστηριακές δοκιμές και τις επιτόπου μετρήσεις, επιτρέπουν την καλύτερη κατανόηση της συμπεριφοράς και την αποτίμηση της επιρροής των σημαντικών παραμέτρων (Dakoulas et al. 2008).

Στο Σχήμα 1α δίδεται μία τυπική διατομή ενός CFRDs, αποτελούμενη από την ανάντη ζώνη λιθορριπής 3B και την κατάντη ζώνη λιθορριπής 3C. Η πλάκα σκυροδέματος στην ανάντη πλευρά τοποθετείται πάνω από μία ζώνη χαλίκων 2B. Για περαιτέρω προστασία, στο κάτω μέλος της πλάκας τοποθετείται ένα λεπτόκοκκο επίχωμα.



Σχήμα 1.1 (α) Τυπική διατομή και (β) 3D γεωμετρία φράγματος με ανάντη πλάκα σκυροδέματος

1.2 ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΤΟΥ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ ΛΙΘΟΡΡΙΠΗΣ

Ζώνη 2B : Μεταβατική στρώση χαλικιού

Η Ζώνη 2B διαστρώνεται στην ανάντη εξωτερική παρειά του φράγματος και αποτελεί τη βάση πάνω στην οποία στηρίζεται η πλάκα σκυροδέματος. Το υλικό της ζώνης είναι διαβαθμισμένο αμμώδες υλικό, με καθορισμένα αλλά ελαστικά όρια κοκκομετρικής διαβάθμισης. Η μέγιστη διάσταση κόκκου συνήθως κυμαίνεται μεταξύ 19 και 25 mm, αλλά μπορεί να φθάσει και τα 75 mm. Προκειμένου να περιοριστούν στο ελάχιστο οι παραμορφώσεις της πλάκας σκυροδέματος μετά την πλήρωση του ταμιευτήρα, η ζώνη 2B πρέπει να έχει χαμηλό μέτρο παραμορφωσιμότητας και επομένως υψηλό βαθμό συμπύκνωσης. Η συμπύκνωση της ζώνης αυτής απαιτεί ιδιαίτερες μεθόδους και χρήση ειδικού εξοπλισμού.

Ζώνη 3B : Λιθορριπή

Ζώνη λιθορριπής με μέγιστη διάσταση λίθου 1 m. Η ζώνη αυτή αποτελεί την κύρια ζώνη του αναχώματος, επειδή παραλαμβάνει τις υδροστατικές πιέσεις του ταμιευτήρα από τις ζώνες 2B και 3A και τις μεταφέρει στη θεμελίωση. Οι υψηλές απαιτήσεις συμπύκνωσης που ισχύουν για τις Ζώνες 2B και 3A ισχύουν και για τη Ζώνη 3B.

Ζώνη 3C : Λιθορριπή

Η Ζώνη 3C δεν συμμετέχει στην ανάληψη των φορτίων του ταμιευτήρα και απλώς στηρίζει και συγκρατεί τη Ζώνη 3B στη θέση της. Επομένως δεν απαιτείται η ζώνη αυτή να έχει υψηλές μηχανικές ιδιότητες και κατά συνέπεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί υλικό υποδεέστερων μηχανικών χαρακτηριστικών. Οι μειωμένες απαιτήσεις της Ζώνης 3C επιτρέπουν την κατασκευή της ζώνης είτε με υλικά χαμηλής διατμητικής αντοχής, είτε την εφαρμογή μειωμένου βαθμού συμπύκνωσης. Η πρώτη επιλογή επιτρέπει τη χρησιμοποίηση υλικών που είναι ακατάλληλα για την κατασκευή της Ζώνης 3B και τα οποία θα έπρεπε να απορριφθούν. Η δεύτερη επιλογή επιτρέπει τη διάστρωση και συμπύκνωση των υλικών σε στρώσεις πάχους μεγαλύτερου από 1 m, που μπορεί να φθάσει τα 2 m.

Οι θετικές εμπειρίες από την συμπεριφορά πολλών έργων και η σημαντική προσφορά του «πατέρα του CFRD», Barry Cooke, κατά την περίοδο 1980-1999, οδήγησαν στην κατασκευή όλο και περισσότερων φραγμάτων, με ύψη που προσεγγίζουν τα 200m. Έως το τέλος του 2005 περισσότερα από 150 CFRD ολοκληρώθηκαν ή ήταν υπό κατασκευή στην Κίνα, με 37 από αυτά σε ύψη άνω των 100m.

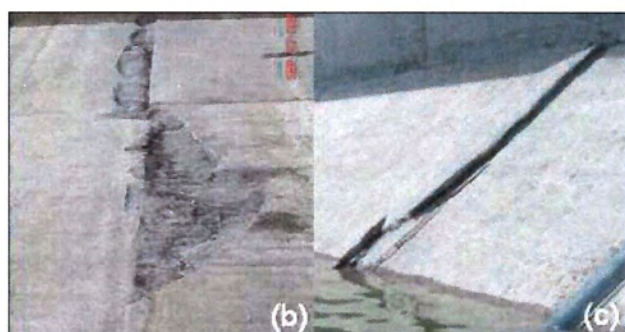
Η αύξηση αυτή του ύψους των έργων αλλά και η υιοθέτηση ταχύτερων ρυθμών κατασκευής με σταδιακή σκυροδέτηση της πλάκας, ανέδειξε κατά τα τελευταία χρόνια προβλήματα έντονης παραμόρφωσης του επιχώματος και αστοχίες στην πλάκα σκυροδέματος:

- Οι εφελκυστικές ρηγματώσεις λόγω ανομοιογενών καθιζήσεων που παρουσιάστηκαν σε μερικά φράγματα όπως στα Aquamilra (187m) και TSQ-1 (178m) καθώς και
- οι θλιπτικές αστοχίες στο σκυρόδεμα των Barra Grande (185m), Campos Novos (202m) και σε άλλα έργα που κατασκευάστηκαν σε στενές κοιλάδες, ήταν μερικά φαινόμενα που έδωσαν την ευκαιρία να διερευνηθούν βαθύτερα οι μηχανισμοί και οι παράμετροι που επηρεάζουν την συμπεριφορά.

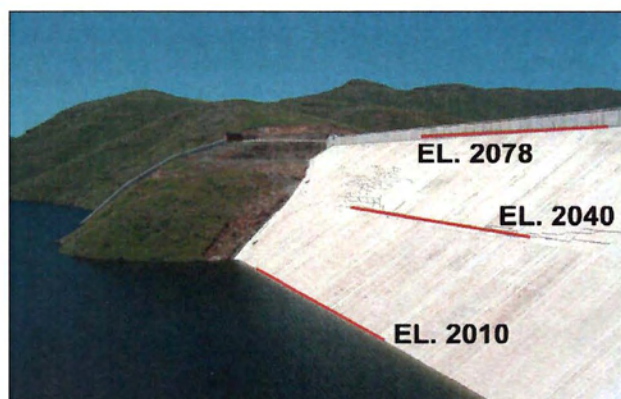
Κατά την κατασκευή, την πλήρωση και λειτουργία του φράγματος λαμβάνουν χώρα καθιζήσεις. Οι καθιζήσεις των CFRDs οφείλονται κυρίως στην συμπίεση και τον ερπυσμό της λιθορριπής και του υλικού θεμελίωσης υπό το ίδιο βάρος και το βάρος του νερού και εξαρτώνται από την φύση του υλικού, την διαβάθμιση και το βαθμό συμπύκνωσης. Επίσης, καθιζήσεις είναι δυνατόν να προκύψουν κατά την διάρκεια σημαντικής σεισμικής δόνησης λόγω της δυναμικής συνίζησης και της παραμόρφωσης των πρανών (bulging). Σε παλαιότερα φράγματα, η ελαφρά συμπύκνωση ή η χρήση μεγάλου και ομοιόμορφου μεγέθους λιθορριπής είχε ως συνέπεια την εμφάνιση σημαντικών καθιζήσεων.

Σε σύγχρονα φράγματα επιδιώκεται καλή συμπύκνωση με στρώσεις πάχους ≤ 1 m και αρκετές διελεύσεις του συμπυκνωτή. Όμως, με την συνεχή αύξηση του ύψους των νέων φραγμάτων, αυξάνονται σημαντικά οι τάσεις και οι αντίστοιχες παραμορφώσεις.

Στα Σχήματα 1.2 και 1.3 παρουσιάζονται σημαντικές ρωγμές που εμφανίστηκαν στις πλάκες των φραγμάτων Campos Novos (H=202 m), Barra Grande (H=186 m) και Mohale (H=145 m).



Σχήμα 1.2. Αστοχίες της πλάκας σκυροδέματος: (a) Campos Novos (b) Barra Grande (c) Mohale (Marulanda, C. 2009)



Σχήμα 1.3 Ρωγμές στην πλάκα του φράγματος Mohale μετά την πλήρωση

Η κατασκευή των φραγμάτων CFRD κατά τα τελευταία 40 χρόνια στηρίχτηκε σε εμπειρικά κριτήρια σχεδιασμού και σε επιτυχημένες εφαρμογές. Εν τούτοις οι εξελίξεις στις αναλυτικές μεθόδους προσομοίωσης της τρισδιάστατης συμπεριφοράς είναι σημαντικές και φαίνεται ότι θα αποτελέσουν χρήσιμο εργαλείο στην μελέτη των μελλοντικών μεγάλων έργων.

Ενδιαφέρον επίσης για τα υψηλά φράγματα έχουν και οι εργαστηριακές δοκιμές προσδιορισμού των μηχανικών χαρακτηριστικών της λιθορριπής σε δοκίμια μεγάλης διαμέτρου, δεδομένου ότι αυτά εξαρτώνται από την μέση τιμή της τάσης σ_{is} που επικρατεί στο επίχωμα. Με τον τρόπο αυτό είναι δυνατόν να μεταβάλλονται οι κλίσεις των πρανών για να επιτυγχάνεται ο επιθυμητός συντελεστής ασφάλειας (R. Albert & E. Frossard 2008)

Ορισμένοι πρακτικοί κανόνες είναι ωστόσο χρήσιμο να υιοθετηθούν στον σχεδιασμό των νέων έργων και κάποιες σημαντικές βελτιώσεις έχουν ήδη γίνει σε πρόσφατα κατασκευασμένα φράγματα όπως το Karahnukar (202m) και το Shuibuya (233m). Οι βελτιώσεις αυτές αφορούν σε (MA Hongqi, CAO Keming 2008):

- Αύξηση της ακαμψίας του επιχώματος στην ανάντη περιοχή στα 2/3 της διατομής και στο πάνω ¼ Η του φράγματος, με βελτίωση της πυκνότητας του. Υιοθέτηση δηλαδή στα τμήματα αυτά καλύτερης διαβάθμισης στην λιθορριπή, στρώσης συμπύκνωσης 0,6~0,8m, περισσότερες διελεύσεις δονητικού οδοστρωτήρα (6~8) και συστηματικής διαβροχής.
- Ενίσχυση της πλάκας ώστε να αντιμετωπίζονται τα φαινόμενα θλιπτικής αστοχίας της. Στο μέτρο αυτό περιλαμβάνονται: Αύξηση του πάχους της, τοποθέτηση οπλισμού σε 2 εσχάρες και στις παρειές των αρμών, πρόβλεψη ανοίγματος για απορρόφηση των παραμορφώσεων σε 2 κατακόρυφους αρμούς, επανασχεδιασμό των λεπτομερειών που αδυνατίζουν το πάχος της πλάκας, κλπ
- Καθορισμό των σταδίων κατασκευής του φράγματος ώστε να προβλέπεται χρόνος για ολοκλήρωση του μέγιστου μέρους των καθιζήσεων πριν την κατασκευή της πλάκας.

Λόγω της υψηλής διατμητικής αντοχής της συμπυκνωμένης λιθορριπής και της απουσίας υπερπιέσεων του ύδατος πόρων, τα φράγματα λιθορριπής με ανάντη πλάκα σκυροδέματος θεωρούνται ότι συμπεριφέρονται γενικά καλύτερα κατά τη διάρκεια σεισμών σε σύγκριση με φράγματα λιθορριπής αργιλικού πυρήνα (Gazetas & Dakoulas 1992, Sherard & Cooke 1987). Όμως, η εκτίμηση αυτή βασίζεται σε ελάχιστα ιστορικά περιστατικών τέτοιων φραγμάτων. Ο ισχυρός σεισμός μεγέθους $M = 7.8$ που δόνησε την περιοχή Sichuan της Κίνας δημιούργησε σημαντικές ρωγμές στην ανάντη πλάκα σκυροδέματος του φράγματος Zipingpu και, τουλάχιστον για μερικές ώρες μετά τον σεισμό, έντονη

αγωνία για την ασφάλεια της πολύ πυκνά κατοικημένης ευρύτερης περιοχής στην κατάντη πλευρά του φράγματος. Το πρόσφατο αυτό περιστατικό του φράγματος κατέδειξε ξεκάθαρα την ανάγκη για βαθύτερη κατανόηση της σεισμικής συμπεριφοράς φραγμάτων λιθορριπής με ανάντη πλάκα σκυροδέματος.

1.3 ΑΙΤΙΕΣ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΕΝΟΣ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ

Οι πιο κοινές αιτίες των αστοχιών των φραγμάτων είναι :

- Υπερχείλιση των αναχωμάτων λόγω ανεπάρκειας του υπερχειλιστή
- Λάθη στο σχεδιασμό ή στη κατασκευή
- Γεωλογικά προβλήματα στη θεμελίωση
- Κατολισθήσεις στον ταμιευτήρα
- Ανθρώπινοι παράγοντες
- Λειτουργικοί παράγοντες
- Σεισμοί

Υπερχείλιση των αναχωμάτων λόγω της ανεπάρκειας του υπερχειλιστή

Αυτό είναι μια από τις πιο κοινές αιτίες των αστοχιών φραγμάτων. Οποιοδήποτε ανάχωμα κινδυνεύει να αστοχήσει εάν ο υπερχειλιστής είναι μικρός και η πλημμύρα αρκετά μεγάλη ώστε να περάσει πάνω από την στέψη του αναχώματος. Μια τέτοια υπερχείλιση μπορεί να προκληθεί επίσης από ένα κύμα που θα προκαλέσει μια κατολίσθηση στον ταμιευτήρα μετά από ένα σεισμό, ή μια μεγάλη κίνηση σε κάποιο ρήγμα που διασχίσει τα θεμέλια του φράγματος.

Η εκτίμηση του μεγέθους της μέγιστης πλημμύρας που ένα φράγμα θα πρέπει να επιζήσει κατά τη διάρκεια της ζωής του μεταβάλλεται με την συνεχή εξέλιξη της επιστήμης κατά τη διάρκεια του τελευταίου αιώνα, με αποτέλεσμα πολλά φράγματα που κατασκευάστηκαν μερικές δεκαετίες πριν, να κρίνονται σήμερα ότι έχουν ανεπαρκή υπερχειλιστή, ακόμα κι αν αυτοί σχεδιάστηκαν στα πρότυπα της ασφάλειας που ίσχυαν κατά την διάρκεια της κατασκευής του φράγματος.

Λάθη στο σχεδιασμό ή στη κατασκευή

Λάθη στην κατασκευή ενός φράγματος μπορεί να αποβούν μοιραία και να οδηγήσουν μέχρι και στην αστοχία του. Ανεπαρκής συμπύκνωση των υλικών ή χρήση του λανθασμένου τύπου υλικών μπορεί να οδηγήσουν σε αυξημένες καθιζήσεις ή σε εσωτερικές διαβρώσεις και σε μεγάλες διαρροές (ripping).

Γενικά στο σχεδιασμό και τη κατασκευή ενός φράγματος πρέπει να προσεχθούν τα εξής σημεία:

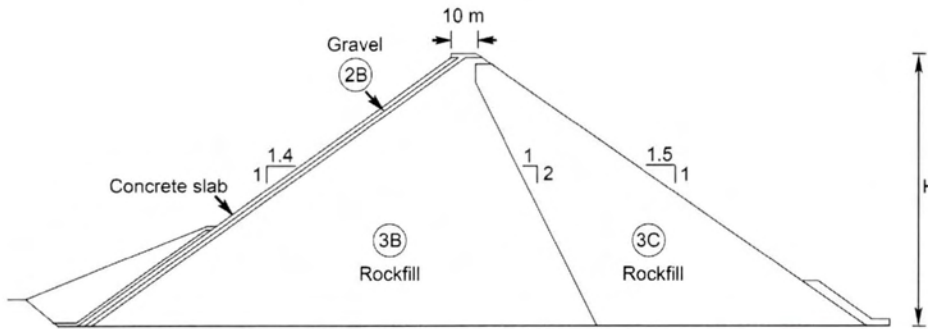
- Στη θεμελίωση πρέπει να μην υπάρχουν υλικά που να είναι επιρρεπή σε ρευστοποίηση και να περιέχουν χαλαρά ή ευαίσθητα αργιλώδη υλικά.
- Τα υλικά που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή ενός φράγματος να είναι καλά συμπυκνωμένα τουλάχιστο στο 95% της μέγιστης ξηρής πυκνότητας ή στο 80% της σχετικής πυκνότητας.
- Ο στατικός συντελεστής ασφάλειας, για όλες τις πιθανές επιφάνειες ολίσθησης να είναι μεγαλύτερος από 1.5 σε συνθήκες πλήρους φόρτισης και πίεσεως νερού πόρων
- Το ελεύθερο ύψος μεταξύ υπερχείλισης και στέψης να μην είναι μικρότερο του 3-5% του ύψους του φράγματος.

Γεωλογικά προβλήματα με τα θεμέλια του φράγματος

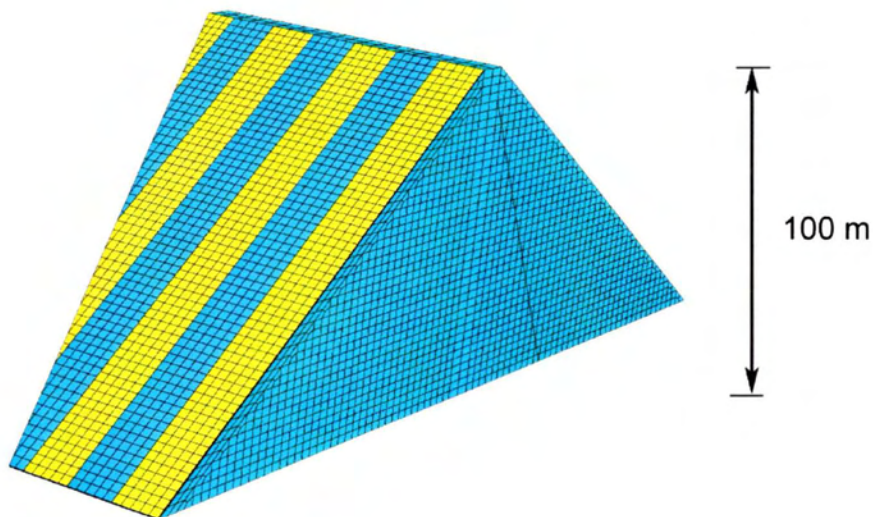
Η ποιότητα των θεμελίων του φράγματος είναι από τα πιο σημαντικά που πρέπει να μελετηθούν με κάθε λεπτομέρεια, ώστε να είναι ικανά να δεχθούν τις τεράστιες πιέσεις τόσο του ιδίου του φράγματος, όσο και του νερού, αλλά να μην έχουν άλλα γεωλογικά προβλήματα (ρήγματα, ζώνες διάτμησης κ.λπ.) ή να περιέχουν υλικά που να είναι εύκολα σε διάβρωση και να δημιουργήσουν συνθήκες αποσύνθεσης μετά το γέμισμα του ταμιευτήρα.

1.4 ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η εργασία αυτή ερευνά τη συμπεριφορά ενός λιθόρριπτου φράγματος με ανάντη πλάκα σκυροδέματος, ύψους 100 m. Το φράγμα έχει κατασκευαστεί σε μια στενή κοιλάδα και έχει αναλογία ίση με $L / H = 2$. Η κλίση στα ανάντη 1:1.4, ενώ προς τα κατόντη είναι πιο ήπια και ίση με 1:1.5. Στο Σχήμα 1.4 δίδεται μία τυπική διατομή του CFRDs, οι κύριες ζώνες υλικών που θεωρούνται για την αριθμητική ανάλυση είναι η ανάντη ζώνη λιθορριπής 3B, η κατόντη ζώνη λιθορριπής 3C και μια ζώνη χαλίκων 2B στην ανάντη πλευρά κάτω από την πλάκα. Το μήκος της στέψης είναι 200 m και το πλάτος 10 m. Για περαιτέρω προστασία, στο κάτω μέλος της πλάκας τοποθετείται ένα λεπτόκοκκο επίχωμα.



(α)



(β)

Σχήμα 1.4 (α) τυπική διατομή φράγματος (β) διακριτοποίηση της 3Δ γεωμετρίας

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση της συμπεριφοράς του ενισχυμένου σκυροδέματος με ίνες χάλυβα (SFRC) υπό την επιρροή σεισμικής διέγερσης. Στόχος αυτής της σεισμικής διέγερσης είναι να εξετασθεί η συμπεριφορά του ινοπλισμένου σκυροδέματος έτσι ώστε να καταστεί δυνατή η χρήση του ως υλικό κατασκευής της ανάντη πλάκας ενός φράγματος λιθορριπής. Σε ένα έργο τέτοιας εμβέλειας, ζητούμενο είναι η μείωση της πιθανότητας αστοχίας και η αντοχή στο χρόνο μέσα από τη χρήση υλικών με αυξημένη πλαστιμότητα και βέλτιστη συμπεριφορά σε οριακές καταστάσεις φόρτισης. Οι αστοχίες των φραγμάτων είναι ιδιαίτερου ενδιαφέροντος επειδή οι καταστροφές που μπορεί να προκαλέσουν είναι τεράστιες, τόσο σε ανθρώπινες ζωές όσο και σε υλικές ζημιές και είναι μεγαλύτερες από τι μπορεί να προκαλέσει η αστοχία οποιασδήποτε άλλης ανθρώπινης κατασκευής. Αυτό είναι λόγω της καταστρεπτικής δύναμης του κύματος των πλημμυρών που δημιουργούνται από την ξαφνική κατάρρευση ενός μεγάλου φράγματος.

Κεφάλαιο 2^ο

2.1 ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ

Το σκυρόδεμα είναι ένα πολύ σημαντικό υλικό κατασκευών και η εφαρμογή του αυξάνεται συνεχώς σε παγκόσμια βάση. Τα τελευταία χρόνια, μάλιστα αναπτύσσονται συνεχώς νέα προϊόντα με διαφορετικά χαρακτηριστικά (όπως γρήγορη ωρίμανση, αντοχή σε διάβρωση, κλπ) ανάλογα με την εφαρμογή. Το βασικό μειονέκτημα του σκυροδέματος είναι η χαμηλή σχετικά αντοχή σε εφελκυσμό και η ψαθυρότητά του, δηλαδή η χαμηλή αντοχή του στην εξάπλωση ρηγματώσεων (Brandt, 2008). Για την βελτίωση των ιδιοτήτων του σε τέτοιες περιπτώσεις και ειδικά σε σκυροδέματα υψηλών και υπερυψηλών αντοχών συχνά προστίθενται στο μίγμα ίνες με διαφορετική γεωμετρία και από διαφορετικά υλικά (Radmarajaiah and Ramaswamy, 2004).

Είναι ένα υλικό που σε μεγάλα πάχη θεωρείται αδιαπέρατο. Χαμηλή υδατοδιαπερατότητα (συντελεστής διαπερατότητας K της τάξεως του 10^{-8} cm/sec) μπορεί να επιτευχθεί με κατάλληλο σχεδιασμό και συντήρηση του σκυροδέματος. Για τα φράγματα χρησιμοποιείται σκυρόδεμα άοπλο μεγάλου όγκου χονδρόκοκκων αδρανών και σχετικά μικρής περιεκτικότητας σε τσιμέντο. Ο μεγάλος όγκος του φράγματος δομείται με block (μονόλιθους) σκυροδέματος που διαχωρίζονται με κατακόρυφους αρμούς ενώ ανάλογα με την τεχνική κατασκευής του φράγματος δημιουργούνται αναπόφευκτα και οριζόντιοι αρμοί. Τόσο οι κατακόρυφοι όσο και οι διαμήκεις οριζόντιοι αρμοί αποτελούν τις ασθενείς περιοχές στο κύριο σώμα του φράγματος από σκυρόδεμα.

Το σκυρόδεμα έχει χρησιμοποιηθεί ως κύριο υλικό κατασκευής φραγμάτων από τα τέλη του 19^{ου} αιώνα και στη διάρκεια του 20^{ου} αιώνα εξελίχθηκε σημαντικά η τεχνογνωσία κατασκευής ώστε δεδομένων των γεωμορφολογικών προϋποθέσεων να αποτελεί την πλέον συμφέρουσα λύση από άποψη κόστους και οικονομίας υλικών και χρόνου κατασκευής. Χαρακτηριστική περίπτωση αποτελεί το φράγμα της Πλατανόβρυσης (1995-97) στην Ελλάδα.

Επειδή το σκυρόδεμα είναι από τη φύση του ένα υλικό πορώδες που επηρεάζεται από τις θερμο-υγρασιακές συνθήκες του περιβάλλοντος που λειτουργεί, από τυχόν χημικές δράσεις που εξελίσσονται στη μάζα του ιδιαίτερα σε υγρό περιβάλλον και από παραμορφώσεις που εκδηλώνονται με το χρόνο, τα μηχανικά χαρακτηριστικά του δεν είναι σταθερά σε όλη τη διάρκεια ζωής μιας κατασκευής αλλά υφίστανται μεταβολή. Μετά την ανάπτυξη δηλαδή της μέγιστης αντοχής του σκυροδέματος, οι προαναφερόμενοι παράγοντες επιφέρουν μείωση της μέγιστης αντοχής ανάλογα με την αρχική ποιότητα του σκυροδέματος. Ένα καλής ποιότητας σκυρόδεμα σε συνδυασμό με έργο υψηλών προδιαγραφών κατασκευής και συντήρησης, παρουσιάζει μικρότερη φθορά λόγω του χρόνου. Το ερώτημα λοιπόν στην περίπτωση των φραγμάτων από σκυρόδεμα είναι κατά πόσον η φθορά από την πιθανή σχεδιασμένη δράση των παραπάνω παραγόντων έχει λόγω του χρόνου απομειώσει την αντοχή και θέτει θέμα ασφαλούς λειτουργίας.

Φθορές παρουσιάζονται και σ' άλλα τμήματα των φραγμάτων όπως είναι οι υπερχειλιστές που δέχονται μεγάλα φορτία φερτών υλικών και μεγάλης ταχύτητας ροή νερού ή άλλα οπλισμένα στοιχεία που παρουσιάζουν έντονη διάβρωση του οπλισμού λόγω της υγρασίας του περιβάλλοντος.

2.1.1 Ιδιότητες Σκυροδέματος

ΕΡΓΑΣΙΜΟΤΗΤΑ

Με τον όρο εργασιμότητα ή εργάσιμο χαρακτηρίζεται γενικά η ευκολία με την οποία είναι δυνατόν να μεταφερθεί, διαστρωθεί και συμπυκνωθεί το σκυρόδεμα. Σύμφωνα με έναν άλλο ορισμό, η εργασιμότητα ορίζεται ως το έργο που απαιτείται για να υπερνικηθούν οι εσωτερικές τριβές και να επιτευχθεί πλήρης συμπύκνωση.

ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

Η αντοχή του σκυροδέματος σε μηχανική καταπόνηση θεωρείται ως η πιο σημαντική ιδιότητά του και εκφράζει την ικανότητα του υλικού να αντεπεξέλθει στη μηχανική καταπόνηση που υπόκειται. Η ποσοτική της εκτίμηση δίνεται σε μονάδες φορτίου ανά επιφάνεια (N/mm^2 ή Mpa). Η αντοχή συνδέεται άμεσα με τη δομή της τσιμεντόπαστας και είναι ιδιαίτερα σημαντική στο σχεδιασμό των κατασκευών.

- **Μονοαξονική θλιπτική αντοχή**

Η μονοαξονική θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος, f_c , αποτελεί το πιο χαρακτηριστικό μέγεθος του υλικού και μπορεί εύκολα να προσδιοριστεί πειραματικά. Η θλιπτική αντοχή αποτελεί γενικό δείκτη της ποιότητας του σκυροδέματος, γιατί όλες, σχεδόν, οι ιδιότητες του σκληρυμένου σκυροδέματος (υδατοστεγανότητα, αντοχή σε επιφανειακή φθορά, ανθεκτικότητα, κλπ), βελτιώνονται με τη μείωση της διαπερατότητας του σκυροδέματος η οποία σχετίζεται με το πορώδες του υλικού το οποίο είναι καθοριστικός παράγοντας της θλιπτικής αντοχής του. Η αντοχή του σκυροδέματος σε μονοαξονική θλίψη προσδιορίζεται με επιπόνηση σε κεντρική θλίψη δοκιμίων από σκυρόδεμα, οριζόμενη ως η μέγιστη τάση θραύσεως των δοκιμίων. Τα αποτελέσματα αυτού του προσδιορισμού για ηλικία σκυροδέματος 28 ημερών και για συμβατικές συνθήκες παρασκευής, συντήρησης και δοκιμασίας των δοκιμίων (που προδιαγράφονται στους κανονισμούς τεχνολογίας σκυροδέματος) χρησιμοποιούνται για να χαρακτηρίσουν την ποιότητα του υλικού

- **Μονοαξονική εφελκυστική αντοχή**

Η αντοχή του σκυροδέματος σε εφελκυσμό είναι περίπου το 10% της αντοχής του σε θλίψη. Γι' αυτό, στις κατασκευές το σκυρόδεμα είναι ρηγματωμένο στις περιοχές ανάπτυξης εφελκυστικών τάσεων (από τα φορτία λειτουργίας ή από έμμεσες δράσεις). Λόγω του μικρού μεγέθους της, η εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος θεωρείται σ' αρκετές περιπτώσεις αμελητέα κατά το σχεδιασμό κατασκευών. Υπάρχουν, όμως, περιπτώσεις στις οποίες λαμβάνεται υπόψη (π.χ. περιορισμένη προένταση, έλεγχος ανοίγματος ρωγμών) και γι' αυτό απαιτείται ο προσδιορισμός της. Λόγω των δυσχερειών των πειραμάτων για τον άμεσο προσδιορισμό της έχουν διατυπωθεί εμπειρικές σχέσεις έκφρασης της εφελκυστικής αντοχής συναρτήσει της αντοχής του σκυροδέματος σε θλίψη και έχουν αναπτυχθεί έμμεσες δοκιμές για τον προσδιορισμό της, όπως οι δοκιμές εφελκυσμού σε διάρρηξη ή σε κάμψη. Στη δοκιμή διάρρηξης (γνωστή και ως "Brazilian test") κυλινδρικό δοκίμιο διαμέτρου 150 mm και μήκους περίπου 300 mm υποβάλλεται σε προοδευτικά αυξανόμενο θλιπτικό φορτίο P ομοιόμορφα κατανεμημένο κατά μήκος δύο αντιδιαμετρικών γενετειρών της παράπλευρης επιφάνειας. Τα αντιδιαμετρικά αυτά φορτία προκαλούν οριζόντιες εφελκυστικές τάσεις σ_h , ομοιόμορφα κατανεμημένες στο μεγαλύτερο τμήμα του κατακόρυφου επιπέδου του οριζόμενου από τις αντιδιαμετρικές γενέτειρες, με μέγεθος ίσο με $\sigma_h = 2P/\pi d l$. Με την αύξηση του θλιπτικού φορτίου οι τάσεις σ_h φθάνουν τη

μέγιστη τιμή τους και το δοκίμιο διαχωρίζεται («διαρρηγνύεται») κατά μήκος του επιπέδου αυτού. Η μέγιστη τιμή $f_{ct,sp}$ της εφελκυστικής αυτής τάσης, οριζόμενη ως εφελκυστική αντοχή σε διάρρηξη, δίνεται συναρτήσει του μέγιστου θλιπτικού φορτίου διάρρηξης PSP από τη σχέση:

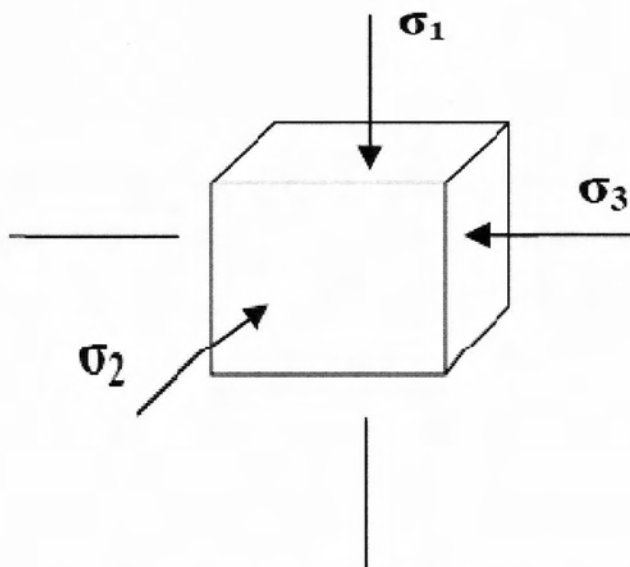
$$f_{ct,s} = 2 P / (\pi d l) \quad (2.1)$$

Από πειραματικά αποτελέσματα έχει βρεθεί ότι η εφελκυστική αντοχή $f_{ct,s}$ συνδέεται με την εφελκυστική αντοχή σε διάρρηξη με τη σχέση:

$$f_t \approx 0.9 f_{ct,s} \quad (2.2)$$

- **Αντοχή σε τριαξονική επιπόνηση**

Η εντατική κατάσταση που αναπτύσσεται στο εσωτερικό ενός δομικού στοιχείου από οπλισμένο σκυρόδεμα υπό φορτίο είναι πολύπλοκη. Εάν απομονωθεί από την κατασκευή ένας στοιχειώδης κύβος από σκυρόδεμα με έδρες κάθετες στη διεύθυνση των τροχιών των κυρίων τάσεων, τότε η εντατική κατάστασή του περιγράφεται από τις τρεις κύριες τάσεις, έστω θλιπτικές (Σχήμα 2.1). Ο συνδυασμός των τιμών των κυρίων τάσεων που προκαλούν αστοχία του κύβου ορίζει μια επιφάνεια στο χώρο των τάσεων. Οι τομές της επιφάνειας αυτής με οποιοδήποτε από τα επίπεδα που περιέχουν τους άξονες σ_1 , σ_2 , ή σ_2 , σ_3 , ή σ_3 , σ_1 περιγράφουν την αντοχή του σκυροδέματος σε διαξονική ένταση, ενώ οι τομές της με τα επίπεδα που σχηματίζουν έναν από τους άξονες σ_1 , ή σ_2 , ή σ_3 και η διαγώνιος $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$ περιγράφει την αντοχή του σκυροδέματος σε αξονοσυμμετρική ένταση. Η μονοαξονική αντοχή αντιστοιχεί στα σημεία τομής της επιφάνειας με τους άξονες σ_1 , σ_2 και σ_3 .



Σχήμα 2.1 Στοιχειώδης κύβος υπό τριαξονική ένταση.

ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ

Η ανθεκτικότητα εκφράζει τη δυνατότητα του σκυροδέματος να διατηρεί την αντοχή του και τη λειτουργικότητά του στην κατασκευή, στη μέγιστη δυνατή διάρκεια. Συγκεκριμένα αναφέρεται στην ικανότητα του υλικού να μη φθείρεται από το περιβάλλον (φυσικό ή μη) στο οποίο εκτίθεται. Η φθορά είναι το αποτέλεσμα των φυσικών και χημικών δράσεων που συμβαίνουν μεταξύ των συστατικών του σκυροδέματος και των συστατικών (διαβρωτικών μέσων) που συνιστούν το περιβάλλον όπου εκτίθεται. Εκδηλώνεται με ρωγμές και διογκώσεις στην επιφάνεια του σκυροδέματος αλλά και με μείωση της μηχανικής αντοχής του και απώλεια μάζας.

Οι βασικότερες αιτίες φθοράς που καταγράφονται στην πράξη είναι: η διάβρωση του σιδηροπλισμού, η ψύξη-απόψυξη στα ψυχρά κλίματα, οι χημικές αντιδράσεις μεταξύ του ενυδατωμένου τσιμέντου και των διαφόρων διαβρωτικών μέσων και οι φυσικοχημικές δράσεις που συμβαίνουν στο εσωτερικό του σκυροδέματος μεταξύ των συστατικών του. Η μελέτη των διαφόρων φυσικοχημικών δράσεων της φθοράς είναι σύνθετη και απαιτεί τη συνολική και πολύπλευρη εξέτασή τους. Η κατανόηση των φαινομένων που προκαλούν τη φθορά του σκυροδέματος επιτρέπει την αναγωγή τους σε παράγοντες ανθεκτικότητας.

ΣΥΝΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ

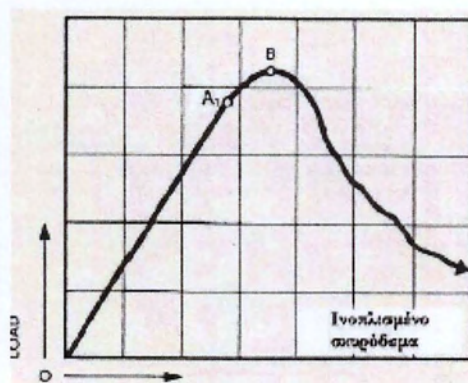
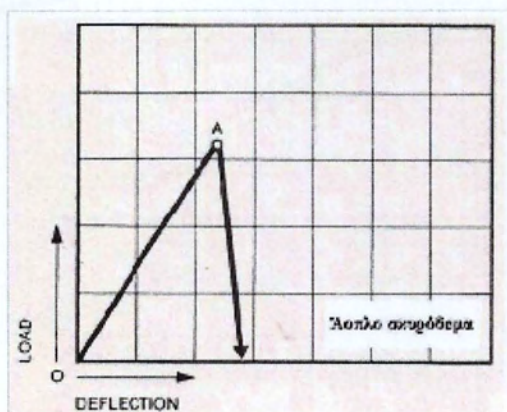
Η συνεκτικότητα είναι ένα μέτρο για το εργάσιμο και το βαθμό συμπίκνωσης του νωπού σκυροδέματος και εξαρτάται από την ποσότητα του τσιμεντοπολτού. Με τον όρο εργάσιμο νοείται το σύνολο των ρεολογικών ιδιοτήτων, όπως η ικανότητα μεταφοράς, διάστρωσης, επεξεργασίας κ.τ.λ., που έχει το νωπό σκυρόδεμα σε διαφορετικό γενικά βαθμό, σε σχέση με το έργο, το οποίο καταβάλλεται, ώστε το σκυρόδεμα να πάρει τη μορφή των καλουπιών χωρίς να δημιουργηθούν κενά ή να γίνει απόμιξη.

2.1.2 Σύγκριση Άοπλου με Οπλισμένο Σκυρόδεμα

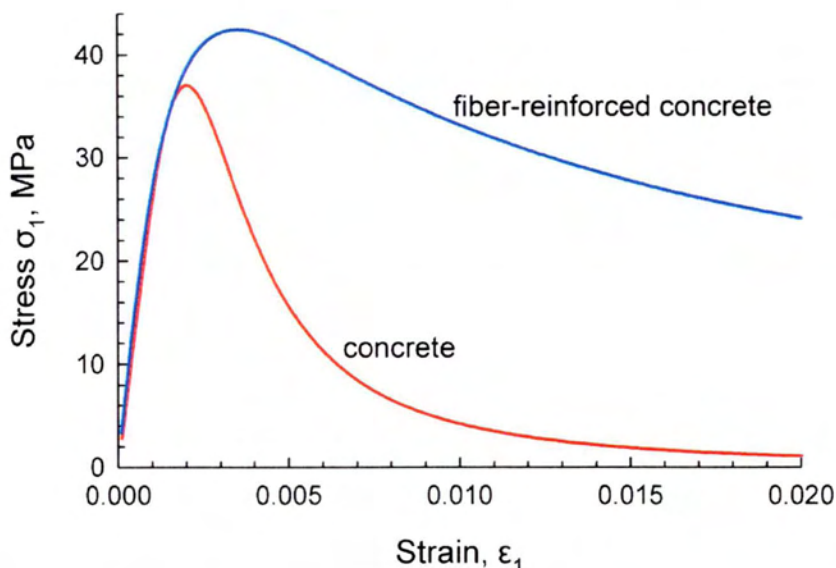
Άοπλο σκυρόδεμα: είναι το σκυρόδεμα που δεν είναι ενισχυμένο με ράβδους οπλισμού. Παρασκευάζεται από κοινό τσιμέντο πόρτλαντ και αδρανή υλικά. Όταν η περιεκτικότητα του σε τσιμέντο είναι χαμηλή γι αυτό και ονομάζεται ισχνό σκυρόδεμα ή γκρομπετόν. Χρησιμοποιείται συνήθως σε δάπεδα, σε υποστρώματα για τα δάπεδα και σε πρόχειρες κατασκευές. Είναι σχετικά ψαθυρό υλικό, ιδίως σε εφελκυσμό.

Οπλισμένο σκυρόδεμα: είναι το σκυρόδεμα που ενισχύεται από χαλύβδινες ράβδους. Παρουσιάζει πολύ υψηλή θλιπτική αντοχή, εφελκυστική και διατμητική αντοχή.

Παρακάτω παρουσιάζονται καμπύλες τάσεων – παραμορφώσεων για σκυρόδεμα σε κάμψη, θλίψη και σε εφελκυσμό, δίνονται στα σχήματα που ακολουθούν .



Σχήμα 2.2 Τυπικές καμπύλες τάσεων – παραμορφώσεων σκυροδέματος (macgregor 1972)



Σχήμα 2.3 Σύγκριση της συμπεριφοράς τάσης-παραμορφώσεως κυβικών δοκιμών σκυροδέματος ενισχυμένα με ίνες και άοπλα, τα οποία υπόκεινται σε μονοαξονική συμπίεση (Natarajia et al).

2.2 ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ

Το σκυρόδεμα είναι από την φύση του ψαθυρό υλικό με χαμηλή αντοχή σε εφελκυσμό. Για την βελτίωση των ιδιοτήτων του σε τέτοιες περιπτώσεις και ειδικά σε σκυροδέματα υψηλών και υπερυψηλών αντοχών συχνά προστίθενται στο μίγμα ίνες με διαφορετική γεωμετρία και από διαφορετικά υλικά. Το σκυρόδεμα που συντίθεται από υδραυλικά τσιμέντα, λεπτόκοκκα η/και χονδρόκοκκα αδρανή και ασυνεχείς διακριτές ίνες ορίζεται ως ινοπλισμένο σκυρόδεμα.

Οι κυριότερες μέθοδοι παρασκευής του ινοπλισμένου σκυροδέματος είναι:

- η εν ξηρώ ανάμιξη των ινών με την τσιμεντοκονία, που ακολουθείται από την προσθήκη των αδρανών και του νερού για την παρασκευή του τελικού προϊόντος και
- η διασπορά των ινών μέσα σε κάποιο καλούπι και η έγχυση, στη συνέχεια, υγρού σκυροδέματος.

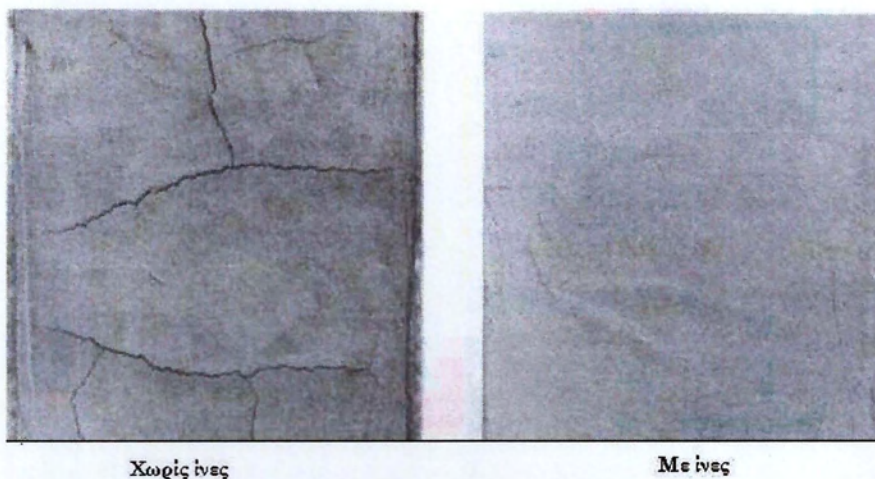
Η χρήση ινοπλισμένου σκυροδέματος για την κατασκευή τελικής επένδυσης προσφέρει ευελιξία κατά την κατασκευή με σημαντική μείωση του χρόνου

τοποθέτησης οπλισμού. Μειώνει σημαντικά τον κίνδυνο από την μακροχρόνια διάβρωση οπλισμού εξαιτίας της αντιμετώπισης της ρηγμάτωσης, και ταυτόχρονα αυξάνει την αντοχή στον χρόνο ιδιαίτερα σε περιπτώσεις δυσμενών περιβαλλοντικών συνθηκών.

2.2.1 Ρόλος των ινών

Οι ίνες συνήθως παρασκευάζονται από χάλυβα, πολυπροπυλένιο ή γυαλί, ενώ εφαρμογές βρίσκουν και ίνες από αλλά υλικά, όπως ο άνθρακας, η αραμιδη, ο πολυεστέρας, το νάιλον, και φυσικά υλικά, όπως το ξύλο. Η διαφορετική μορφή των ινών αντιστοιχεί σε διαφορετικό είδος εφαρμογής και διαφορετικής έντασης καταπόνηση. Ανάλογα με το είδος της καταπόνησης, σε ένα στοιχειώδη όγκο ινοπλισμένου σκυροδέματος προκύπτουν τα παρακάτω συμπεράσματα (Γεωργακοπούλου, 2006):

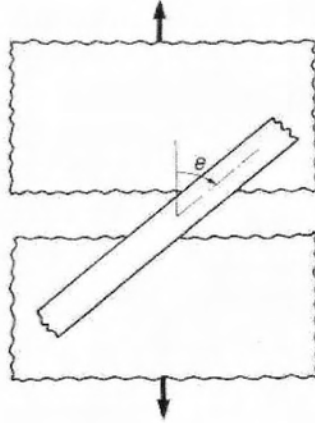
- Οι ίνες προσδίδουν στο σκυρόδεμα πλαστική συμπεριφορά έναντι της ψαθυρής που είχε χωρίς τον οπλισμό. Αυτό συμβαίνει διότι λαμβάνει χώρα η σταδιακή ενεργοποίηση των ινών λόγω της φόρτισης, με άμεσο αποτέλεσμα την απορρόφηση ενέργειας πριν το στάδιο της αστοχίας. Οι ίνες απορροφούν την ενέργεια, η οποία σε διαφορετική περίπτωση θα οδηγούσε σε αστοχία του δοκιμίου και παραμορφώνονται προφυλάσσοντας το δοκίμιο. Οι ίνες εξακολουθούν να παραλαμβάνουν εφελκυστικά φορτία ακόμα και μετά την αστοχία του δοκιμίου, ενισχύοντας την πλαστική πλέον φύση του.
- Επίσης οι ίνες εμποδίζουν τη διεύρυνση των ρωγμών λόγω της πρόσφυσης μεταξύ των ινών και του σκυροδέματος και της πυκνότητας των ινών. Λειτουργούν σαν «γέφυρες» που μεταβιβάζουν τις εφελκυστικές τάσεις από επιφάνεια σε επιφάνεια της ρωγμής.
- Οι ίνες λειτουργούν επίσης ως κινηματικός περιορισμός έναντι της διόγκωσης του υπό φόρτιση σκυροδέματος.
- Επί προσθέτως, βελτιώνουν την στρεπτική συμπεριφορά του σκυροδέματος
- Η τυχαία διάταξη των ινών στον όγκο του εκάστοτε δοκιμίου, του προσδίδει ομοιογένεια και ισοτροπία.



Σχήμα 2.4 Σύγκριση ρωγμών με και χωρίς ίνες, Fibermesh 1989

Προσανατολισμός ινών στο χώρο

Είναι γνωστό ότι στο ινοπλισμένο σκυρόδεμα η κατανομή και ο προσανατολισμός των ινών στο μίγμα επηρεάζει σημαντικά της μηχανικές ιδιότητες του τελικού προϊόντος (Kobayashi, 1983). Οι ίνες σε τριδιάστατη διασπορά μέσα στη μάζα του σκυροδέματος παρεμποδίζουν τη διεύρυνση και τη διάδοση των μικρορωγμών, επιτρέποντας ταυτόχρονα τη παραλαβή εφελκυστικών τάσεων από επιφάνεια σε επιφάνεια της ρωγμής, δρώντας έτσι ως γέφυρες “συρραφής”. Η φύση των ρωγμών εξαρτάται από τη φύση του φορτίου (εφελκυσμός, θλίψη, διάτμηση) και από τη γεωμετρία του στοιχείου. Οι ρωγμές αναπτύσσονται κάθετα στην κατεύθυνση της εφελκυστικής τάσης. Όπως και στη χρήση οπλισμών χάλυβα, οι ίνες είναι βέλτιστα τοποθετημένες εάν προσανατολίζονται προς την κατεύθυνση της εφελκυστικής τάσης και διασταυρώνονται κάθετα με τη ρωγμή. Επιπλέον, λογικό είναι ότι όσο οι ίνες είναι πιο κοντά μεταξύ τους, τόσο ευεργετικότερα αποτελέσματα θα έχουμε. Εάν η ίνα συναντήσει τη ρωγμή πλάγια, τότε είναι λιγότερο αποτελεσματική. Μία ίνα συμμετέχει εφόσον η κλίση της, ως προς τη διεύθυνση της δύναμης, δεν είναι μεγαλύτερη από 45°.



Σχήμα 2.5 Τομή μιας ίνας μέσα σε μια ρωγμή με γωνία θ (Bentur and Mindness, 1990)

Συνεχείς και Ασυνεχείς ίνες:

Τα σύνθετα υλικά είναι οπλισμένα είτε με συνεχείς ή με ασυνεχείς ίνες ή σωματίδια. Οι συνεχείς είναι επιμήκεις ίνες, οι οποίες συνήθως επιτυγχάνουν υψηλές τιμές των ιδιοτήτων όπως της αντοχής και της ακαμψίας λόγω της ελεγχόμενης ανισοτροπίας και του μικρού αριθμού - μεγέθους της επιφάνειας των ατελειών. Στα σύνθετα υλικά με ενισχύσεις από συνεχείς ίνες, το φορτίο θεωρείται ότι παραλαμβάνεται κυρίως από τις ίνες των οποίων η διεύθυνση είναι παράλληλη με αυτή του φορτίου.

Οι ασυνεχείς ίνες είναι κοντές, και προκύπτουν από συνεχείς ίνες με κοπή ή κατασκευάζονται απ' ευθείας κοντές με σκοπό τη μείωση του κόστους. Ο προσανατολισμός των κοντών ινών δεν μπορεί να διαχειριστεί εύκολα και βασικά υποτίθεται ότι είναι τυχαίος, εκτός αν έχουν γίνει ειδικές προβλέψεις για το χειρισμό του προσανατολισμού της ίνας. Τα σύνθετα υλικά με κοντές ίνες τυχαίου προσανατολισμού έχουν περίπου ισότροπες ιδιότητες στο επίπεδο της διαστρωμάτωσης. Τα κύρια μειονεκτήματα σε κατασκευαστικές εφαρμογές είναι ότι τα σύνθετα υλικά με κοντές ίνες δεν ελαττώνουν την παραμόρφωση των πολυμερών συνδετικών υλικών τόσο αποτελεσματικά όσο οι συνεχείς ίνες. Επιπλέον, τα σύνθετα υλικά με κοντές ίνες έχουν συνήθως μικρότερη αντοχή από αυτά με τις συνεχείς.

Ιδιότητες Ινοπλισμένου Σκυροδέματος

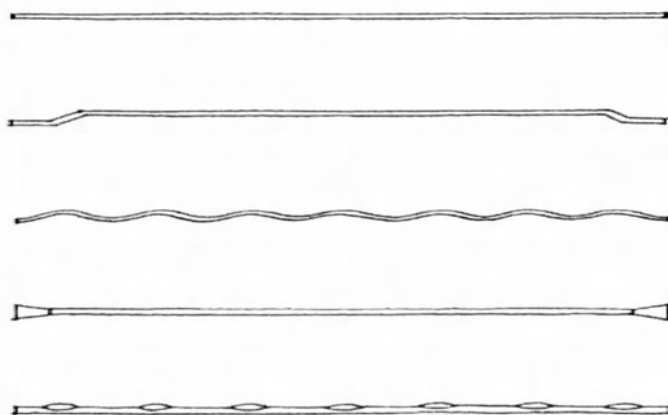
- Μεγαλύτερη αντοχή σε κάμψη
- Αντίσταση στη δημιουργία και στην εξάπλωση των ρωγμών
- Αυξημένη αντοχή στην κρούση
- Αυξημένη αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες.
- Αντίσταση στο φαινόμενο της αποφλοιώσης
- Μεγαλύτερη δυσθραυστότητα.
- Μεγαλύτερη αντοχή σε φορτία μετά την θραύση
- Οικονομία στη συντήρηση και μεγαλύτερη διάρκεια χρήσης του έργου

2.3 ΟΠΛΙΣΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ ΜΕ ΙΝΕΣ ΧΑΛΥΒΑ (Steel Fiber Reinforced Concrete)

Στις εφαρμογές οπλισμένου σκυροδέματος, ο χάλυβας εξακολουθεί να αποτελεί το περισσότερο αποτελεσματικό και το πλέον οικονομικά αποδεκτό υλικό οπλισμού. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι μηχανικές του ιδιότητες, η αντοχή και η ολκιμότητά του τον κάνουν να ταιριάζει καλά με το σκυρόδεμα. Εντούτοις, η χρήση του χάλυβα ως υλικό οπλισμού σε έντονα διαβρωτικό περιβάλλον καθίσταται προβληματική.

Ο παλαιότερος και ταυτόχρονα ο πιο βασικός τύπος ίνας που υπάρχει είναι από χάλυβα. Στην πιο απλοϊκή της μορφή μια τέτοιου είδους ίνα θα ήταν ένα ευθύγραμμο τμήμα ενός λείου σύρματος. Δυστυχώς όμως, τέτοιου είδους ίνες δεν εξασφαλίζουν την μέγιστη δυνατή αντοχή στο σκυρόδεμα διότι δεν επιτυγχάνεται ικανοποιητική συνάφεια μεταξύ αυτού και ίνας.

Οι χαλύβδινες ίνες επικράτησαν λόγω του λογικού κόστους κατασκευής τους, λόγω της διαθεσιμότητάς τους και λόγω της εμπειρίας που προϋπήρχε στον συμβατικό οπλισμό του σκυροδέματος με χάλυβα. Έτσι και οι πρώτες έρευνες στις δεκαετίες του 1950 και 1960 επικεντρώθηκαν στη συμπεριφορά του ινοπλισμένου σκυροδέματος με χάλυβα (Benturand Mindness, 1990). Οι ίνες αυτές αυξάνουν κατά πολύ τη δυσθραυστότητα του σκυροδέματος κι έτσι το μετατρέπουν από ένα ψαθυρό υλικό σε πλαστικό. Έχουν αντίσταση στα αλκαλικά πρόσμικτα του εκτοξευόμενου σκυροδέματος καθώς και μηχανικά χαρακτηριστικά που κρίνονται ως ικανοποιητικά. Η αντοχή τους σε εφελκυσμό κυμαίνεται από 400 έως 1500 MPa ενώ οι ανθρακούχοι χάλυβες, ειδικά σκληρυμένοι, μπορούν να φθάσουν μέχρι τα 4 GPa. Επίσης, έχουν μέτρο ελαστικότητας περίπου 200 GPa και ειδικό βάρος 8 g/cm^3 , όσο δηλαδή όλοι οι κοινοί χάλυβες (Maidl, 1995).



Σχήμα 2.6 Κύρια Προφίλ Ινών (κατά σειρά): Επίπεδο, με γαντζωτά άκρα, κυματοειδές, με κωνικά άκρα, μηχανικά παραμορφωμένο (Katzner, 2006).

Οι χαλύβδινες ίνες είναι επιρρεπείς στη διάβρωση, για το λόγο αυτό ενδιαφέρον έχει η μελέτη της συμπεριφοράς τους στο σκυρόδεμα. Στο συμβατικό οπλισμό του σκυροδέματος είναι γνωστό ότι αυτός απαιτεί μια ελάχιστη επικάλυψη ώστε να εξασφαλίζεται από τη διάβρωση. Στις ίνες όμως κάτι τέτοιο δεν είναι τεχνικά εφικτό διότι βρίσκονται διασκορπισμένες τυχαία στο μίγμα κι έτσι η διάβρωση μπορεί να επηρεάσει αυτές που βρίσκονται κοντά στην επιφάνεια. Για το ινοπλισμένο σκυρόδεμα ισχύει ότι ίνες που έχουν μια επικάλυψη πάνω από 1 mm δεν αλλοιώνονται. Έτσι, η διάβρωση των ινών θεωρείται ένα μη σοβαρό πρόβλημα καθώς δεν επηρεάζει σημαντικά τις μηχανικές ιδιότητες του ινοπλισμένου σκυροδέματος.

Συμπεριφορά Σκυροδέματος Οπλισμένου Με Ίνες Χάλυβα (SFRC) Υπό Φόρτιση

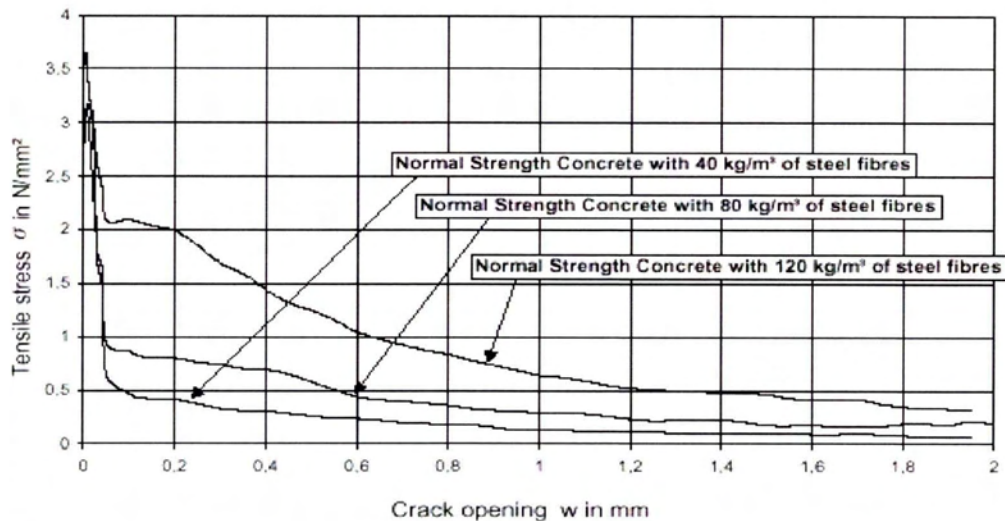
Συμπεριφορά του SFRC υπό φόρτιση

Η Μηχανική των θραύσεων μελετά την αστοχία των κατασκευών, η οποία προκαλείται από την ύπαρξη αρχικών ρωγμών. Εξετάζεται η εντατική κατάσταση στα άκρα της ρωγμής, τα κριτήρια διάδοσης της ρωγμής, η επίδραση της δυναμικής φόρτισης, της κόπωσης και οι μικροσχηματισμοί αστοχίας των υλικών.

Λόγω των ιδιοτήτων τους οι ίνες του χάλυβα δεν επηρεάζουν καθόλου τις διάφορες παραμέτρους της αντοχής του σκυροδέματος. Υπό θλιπτική φόρτιση, όταν εμφανίζονται μικρορωγμές εξαιτίας εγκάρσιων εφελκυστικών δυνάμεων, οι ίνες του χάλυβα προκαλούν δυνάμεις που τείνουν να κλείσουν τις ρωγμές. Αφ' ενός το γεγονός αυτό οδηγεί σε αύξηση της θλιπτικής αντοχής. Αφ' ετέρου όμως η ανάμιξη των ινών στο σκυρόδεμα προκαλεί αύξηση του πορώδους με αποτέλεσμα τη μείωση της θλιπτικής αντοχής. Κατά συνέπεια οι δύο αυτές δράσεις αλληλοαναιρούνται. Εξάλλου πειράματα έδειξαν ότι οι ίνες δεν επηρεάζουν και την άμεση εφελκυστική αντοχή. Μόνο η αντοχή σε λυγισμό αυξάνεται λίγο μετά την ανάμιξη των ινών του χάλυβα.

Σαν συμπέρασμα μπορεί να ειπωθεί ότι τα πλεονεκτήματα του SFRC δεν βρίσκονται σε ότι έχει να κάνει με την αντοχή του υλικού συγκριτικά με το απλό ενισχυμένο σκυρόδεμα. Ωστόσο οι ίνες του χάλυβα αυξάνουν σημαντικά την ολκιμότητα και την ικανότητα παραμόρφωσης του σκυροδέματος και κατ' επέκταση την πλαστιμότητα του.

Στο παρακάτω διάγραμμα (Σχήμα 2.6) φαίνονται τα πειραματικά αποτελέσματα για την ολκιμότητα σκυροδέματος Κανονικής Αντοχής (NSC) ενισχυμένου με ίνες χάλυβα που υπόκειται σε μονοαξονική φόρτιση.

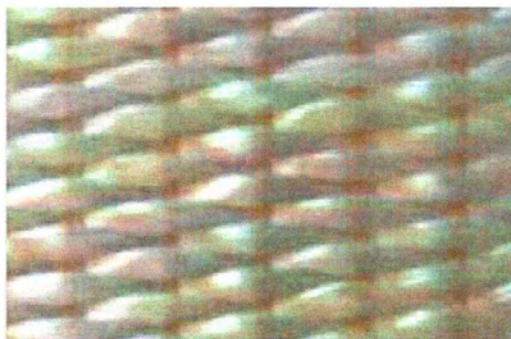


Σχήμα: 2.7 Ολκιμότητα Σκυροδέματος Κανονικής Αντοχής (NSC) ενισχυμένο με ίνες χάλυβα σε μονοαξονική φόρτιση.

2.4 ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ ΜΕ ΙΝΕΣ ΓΥΑΛΙΟΥ (Glass Fiber Reinforced Concrete)

Το GRC (Glass Fibre Reinforced Concrete) πρόκειται για ένα σκυρόδεμα ενισχυμένο με ειδικές υαλοΐνες (ανθεκτικές στα αλκάλια). Οι ίνες προσθέτουν αντοχή κάμψης, τάνυσης και κρούσης. Το προκύπτον υλικό επιτρέπει την παραγωγή ισχυρών, όμως ελαφριών, προϊόντων που χρησιμοποιούνται στην αρχιτεκτονική, στην μηχανική και σε πολλές άλλες εφαρμογές.

Το GRC είναι ένα μίγμα από υλικά διαφορετικών ιδιοτήτων το οποίο προσαρμόζεται στη επικείμενη χρήση και εφαρμογή του υλικού. Οι ιδιότητες του GRC ποικίλουν ανάλογα με τη μέθοδο παραγωγής, την ποσότητα και τον τύπο της υαλοΐνας, καθώς και της σύνθεση της μάζας του σκυροδέματος.

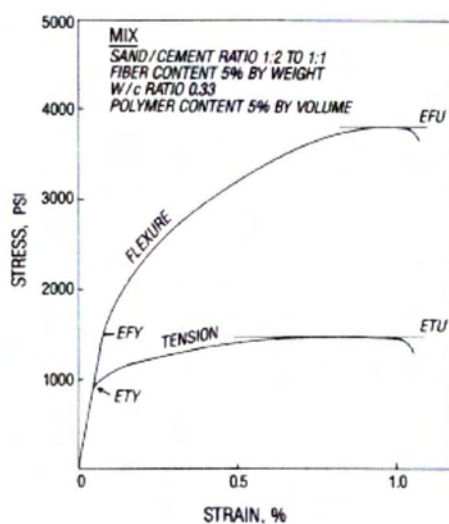


Σχήμα 2.8 Ύφασμα από ίνες γυαλιού

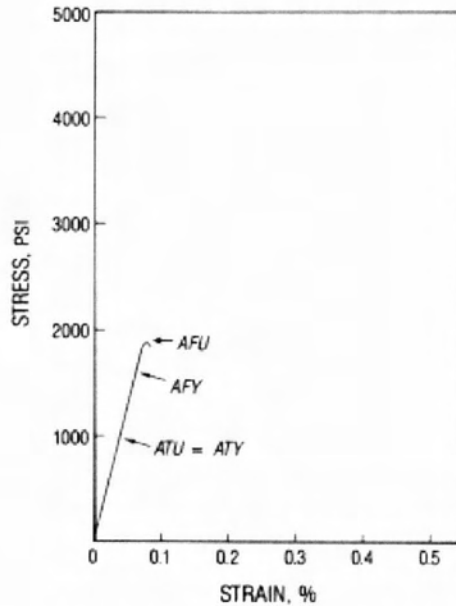


Σχήμα 2.9 Τεμαχισμένες ίνες γυαλιού

Επίσης το GRC έχει εξαιρετικά καλές ιδιότητες που διευκολύνουν την επεξεργασία του, μπορεί να διαμορφωθεί σε σχεδόν οποιοδήποτε σχήμα, έχει υψηλή αντοχή σε κάμψη, ανθεκτικότητα στις κρούσεις, ελαστικότητα, αντοχή στις ρωγμές, είναι αδιάβροχο και μπορεί να έχει μία διακοσμητικά φινιρισμένη επιφάνεια όταν αυτό είναι απαραίτητο. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την υλοποίηση περίτεχνων αρχιτεκτονικών σχεδίων γεγονός που το καθιστά εκτός συναγωνισμού σε σχέση με κάθε άλλο παρόμοιο υλικό όσον αφορά στη μορφοποίηση, στην ικανότητα αναπαραγωγής μιας γεωμετρικής επιφάνειας και στην ελαφρότητά του.



Σχήμα 2.10 Αντιπροσωπευτική καμπύλη τάσης – παραμόρφωσης για GFRC σε εφελευσμό και κάμψη με αντοχή σε 28 ημέρες



Σχήμα 2.11 Αντιπροσωπευτική καμπύλη τάσης – παραμόρφωσης για GFRC σε εφελκυσμό και κάμψη με χρόνο ζωής 50 χρόνια.

Πλεονεκτήματα του GRC:

Το GRC μπορεί να διαμορφωθεί σε ελαφριά τμηματοποιημένα τεμάχια και έτσι παρέχει στους σχεδιαστές, τους αρχιτέκτονες και τους μηχανικούς ουσιαστικά πλεονεκτήματα όταν συγκρίνεται με άλλα παραδοσιακά υλικά τσιμέντου:

- Μορφοποιείται εύκολα και ως εκ τούτου είναι ιδανικό για αναπαραγάγει μορφές, λεπτομέρειες και υφές.
- Συνδυάζει την υψηλή αντοχή με τις λεπτές επιφάνειες, οι οποίες είναι ελαφριές και εύκολες στο χειρισμό.
- Μπορεί να χρωματιστεί με χρωστικές ουσίες, χρώματα ή να αποδώσει το φυσικό χρώμα της πέτρας.

2.5 ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ ΜΕ ΙΝΕΣ ΠΟΛΥΠΡΟΠΥΛΕΝΙΟΥ (POLYPROPYLENE FIBER REINFORCED CONCRETE)

Λόγω της υψηλής αλκαλικής αντίστασής τους, οι ίνες πολυπροπυλενίου διευρύνουν συνεχώς τις εφαρμογές τους. Για το λόγο αυτό είναι το πιο δημοφιλές είδος συνθετικής ίνας. Οι σύγχρονες ίνες πολυπροπυλενίου έχουν μέτρο ελαστικότητας 18 GPa και αντοχή σε εφελκυσμό από 600 έως 700 MPa (Maidl, 1995). Είναι χημικά αδρανείς, υδρόφοβες (δηλαδή δεν απορροφούν νερό), ελαφριές ανθεκτικές στο χρόνο και στη χρήση. Επίσης, οι μηχανικές ιδιότητες τους είναι παρόμοιες με εκείνες του σκυροδέματος και επομένως δεν μπορούν να το βελτιώσουν ή να το κάνουν πιο ιξώδες. Αυτό καθιστά τις πλαστικές ίνες ακατάλληλες για χρήση στην υποστήριξη της βραχομάζας όπου πρέπει να παραληφθούν υψηλές πιέσεις. Εντούτοις, για εφαρμογές όπου απαιτείται μόνο ενίσχυση ενάντια στη συρρίκνωση, όπως στις επιδιορθώσεις με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, οι πλαστικές ίνες είναι ιδιαίτερα χρήσιμες. Είναι πολύ αποτελεσματικές στη διανομή μικρορωγμών κατά τη διάρκεια της πλαστικής παραμόρφωσης ή της σκλήρυνσης του σκυροδέματος και βοηθούν επίσης στη μείωση της αναπήδησης στην υγρή μίξη. Επιπρόσθετα, κάνουν το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα ανθεκτικό στη φωτιά.



Σχήμα 2.12 Ίνες προπυλενίου

Παράγονται είτε σαν επιμήκεις ίνες κυκλικής διατομής, που στη συνέχεια κόβονται στο κατάλληλο μήκος, είτε σαν ταινίες και κορδέλες που

διαμορφώνονται τελικά σε ινίδια ορθογωνικής διατομής. Μπορούν να συσκευάζονται και σε υδατοδιαλυτούς σάκους. Σε προσθήκη σε ποσοστό τουλάχιστον 0,1% κατ' όγκο στο σκυρόδεμα, οι ίνες πολυπροπυλενίου μειώνουν τις ρηγματώσεις λόγω συστολής ξήρανσης του σκυροδέματος (Suprenant and Malisch, 1999).

Πλεονεκτήματα:

- Λειτουργεί ως δευτερεύων οπλισμός που αποτρέπει την εμφάνιση ρωγμών που προέρχονται από τη συρρίκνωση του σκυροδέματος.
- Εξασφαλίζει ομοιόμορφη διασπορά των ινών πολυπροπυλενίου με αποτέλεσμα την καλύτερη ενσωμάτωσή τους στη μάζα του σκυροδέματος.
- Επιτυγχάνει αυξημένη αντοχή σε παράγοντες όπως διάβρωση, τριβή και κραδασμοί.
- Προσφέρει βελτιωμένη εργασιμότητα και ανθεκτικότητα στο σκυρόδεμα.
- Ελαχιστοποιεί τις τριχοειδείς ρωγμές κατά την εξίδρωση του σκυροδέματος.

Εφαρμογές και χρήσεις του PFRC :

- Για τη μείωση των ρωγμών πλαστικής συρρίκνωσης (συστολής).
- Για τη μείωση των ρωγμών πλαστικής κάθισης.
- Σαν δευτερεύοντα, τριαξονικό οπλισμό για τον περιορισμό της πρώιμης ρηγμάτωσης.
- Για την παραγωγή λεπτών διατομών από σκυρόδεμα ή τσιμεντοκονίαμα.
- Για βελτιωμένη αντοχή σε κρούση.
- Για καλύτερη συμπεριφορά σε περίπτωση θρυμματισμού (μείωση των εκτινασσόμενων κομματιών).
- Για την αύξηση της επιφανειακής αντοχής του (αντοχής σε τριβή) των δαπέδων από μπετόν.
- Για την αύξηση της αντοχής του μπετόν σε κύκλους τήξης – πήξης καθώς και στα αλάτια αποπαγοποίησης. Οι ίνες εδώ συνδυάζονται με αερακτικά πρόσμικτα.
- Για έξτρα προστασία του μπετόν έναντι ενανθράκωσης και δράσης χλωριόντων (μείωση ρωγμών).
- Για μεγαλύτερη αντοχή σε βάθος χρόνου.



Σχήμα 2.13 Ίνες προπυλενίου για μπετόν

Από έρευνες που έχουν διεξαχθεί για το PFRC, έχει διαπιστωθεί ότι στο υλικό αυτό το πολυπροπυλένιο από τις ίνες γεμίζει τα κενά του κονιάματος και αυτό έχει ως αποτέλεσμα να μειώνεται το πορώδες και να σταματά η διάδοση της μικρορηγμάτωσης με άμεση συνέπεια τη βελτίωση της εσωτερικής εφελκυστικής αντοχής και της αντοχής πρόσφυσης. Επιπροσθέτως, τα διάσπαρτα πολυμερή μέσα στο σκυρόδεμα μπορεί να συσσωματωθούν δημιουργώντας φιλμς, τα οποία δημιουργούν ένα δίκτυο με ενσωματωμένα αδρανή και περιορίζουν τη ροή ύδατος, τη γεφύρωση των μικρορωγμών, την ενίσχυση των μικροδομών και αυξάνουν την αντοχή των δεσμών του υλικού. Κάποια όμως πολυμερή, όπως το (PAM) μπορούν να τροποποιήσουν τις ιδιότητες του σκυροδέματος λόγω χημικών αντιδράσεων που πραγματοποιούνται μέσα στο μίγμα.

2.6 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

Η ραγδαία εξέλιξη στην τεχνολογία του FRC μεγάλωσε κατά πολύ μεγάλο βαθμό το εύρος των εφαρμογών. Στον επόμενο πίνακα συνοψίζονται μερικές από αυτές ανάλογα με το είδος των ινών.

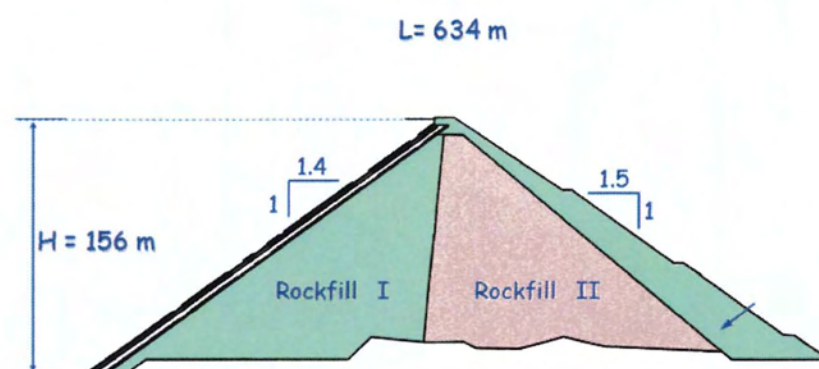
ΤΥΠΟΣ ΙΝΑΣ	ΕΦΑΡΜΟΓΗ
Γυαλί	Επίχριση τοίχων πληρώσεως, σωλήνες υπονόμων, κελύφη, κονιάματα, πλαίσια τύπου sandwich, συστήματα περίφραξης
Χάλυβας	Κυψελωτές μονάδες οροφής, επικάλυψη πεζοδρομίων, καταστρώματα γεφυρών, σωλήνες, διάδρομοι αεροδρομίων, δοχεία πίεσης, κατασκευές ανθεκτικές σε ανεμοριπές, επενδύσεις τούνελ, κατασκευή φλοιού πλοίου
Πολυπροπυλένιο	Πάσσαλοι θεμελίωσης, προεντεταμένοι πάσσαλοι, επίχριση πλασιών, επιράμματα δρόμων, μανδύες για υποβρύχιους σωλήνες
Αμιάντος	Πλέγματα, σωλήνες, μονωτικά υλικά, πυρίμαχα υλικά, ελάσματα οροφής, επένδυση τοίχων
Άνθρακας	Πτυχωτές μονάδες για κατασκευή ορόφων, μεμβρανοειδείς κατασκευές μονής και διπλής καμπυλότητας, σανίδες
Νιφάδες μαρμαρυγία	Μερική αντικατάσταση αμιάντου σε πλαίσια, σωλήνες από σκυρόδεμα, υλικά επιδιόρθωσης
Φυσικές ίνες (ίνα καρύδας, sisal, bamboo, ζαχαροκάλαμο)	Σε κατασκευές χαμηλού κόστους – αντιπαρέχεται στη μεγάλη ζήτηση κατοικίας σε τριτοκοσμικές χώρες, διαχωριστικοί τοίχοι
Συνδυασμοί περισσότερων από ένα τύπο ινών μπορούν να χρησιμοποιηθούν για ειδικούς σκοπούς.	

Κεφάλαιο 3^ο

3.1 ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΦΡΑΓΜΑΤΩΝ ΛΙΘΟΡΡΙΠΗΣ

Η σεισμική συμπεριφορά φραγμάτων λιθορριπής εξαρτάται από ένα μεγάλο αριθμό παραγόντων, όπως ο βαθμός συμπύκνωσης, η ποιότητα του υλικού της λιθορριπής, η γεωμετρία του φράγματος, η στενότητα της κοιλάδας, η ενδοσιμότητα του «βράχου» της κοιλάδας, η ποιότητα των αρμών μεταξύ των πλακών και των περιμετρικών αρμών της πλίνθου, η ένταση και τα χαρακτηριστικά της σεισμικής δόνησης, η χωρική μεταβλητότητα της σεισμικής διέγερσης, κλπ. (Gazetas & Dakoulas 1992, Dakoulas 1993a,b, Dakoulas & Hsu 1995, Dakoulas & Abouseeda 1997, Abouseeda & Dakoulas 1998).

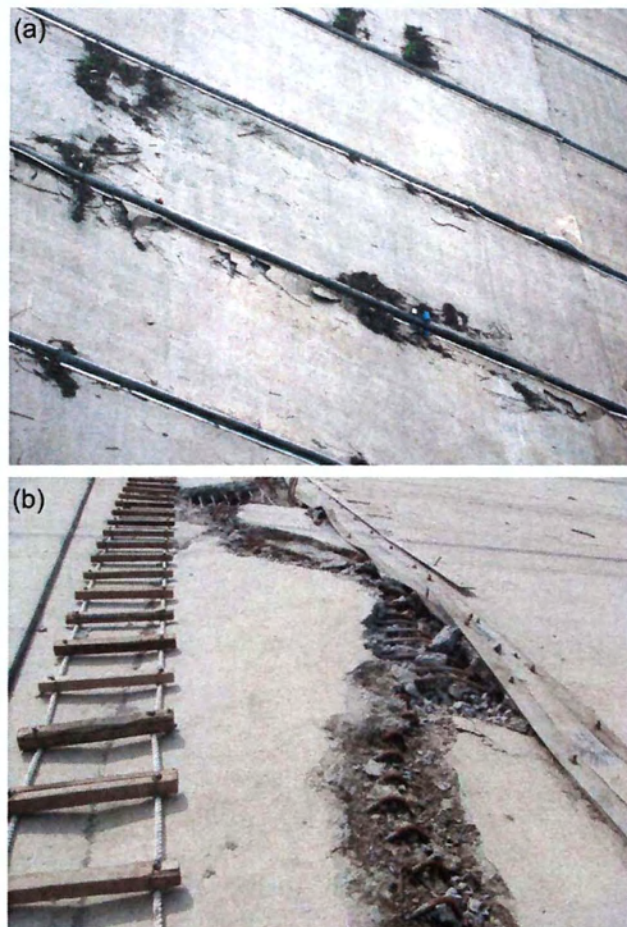
Παράδειγμα ζημίας της πλάκας σκυροδέματος φράγματος λιθορριπής αποτελεί το φράγμα Ziringru, στην Κίνα, το οποίο υπέστη σημαντικές ρωγμές και θλιπτικές αστοχίες στην ανάντη πλάκα σκυροδέματος όταν στις 12 Μαΐου 2008 επλήγη από τον ισχυρό σεισμό Wenchuan μεγέθους $M=8$, που δόνησε την περιοχή Sichuan της Κίνας. Το φράγμα, το οποίο λειτουργεί από το 2006, έχει ύψος 156 m, μήκος στέψης 635 m και κλίσεις πρανών 1:1.4 ανάντη και 1:1.5 κατόντη. Η θέση του φράγματος απείχε μόλις 17.17 km από το επίκεντρο του σεισμού, κατά τον οποίο καταγράφηκαν επιταχύνσεις στον βράχο της βάσης που ξεπέρασαν το 0.5g, ενώ η ένταση ήταν IX έως X (Guan 2009).



Σχήμα 3.1 Φράγμα Ziringru: μέγιστη διατομή και ζώνες υλικών.

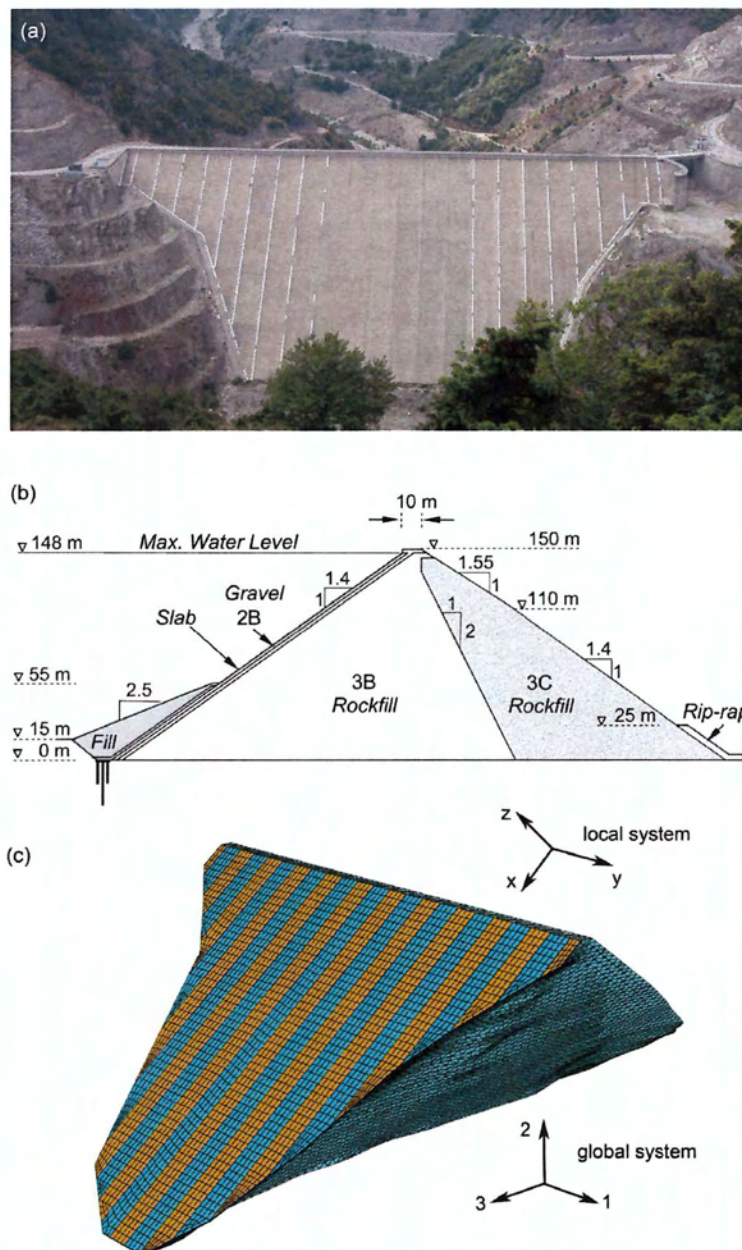
Το φράγμα Ziringru είχε σχεδιασθεί για μία αρκετά μικρότερη μέγιστη επιτάχυνση ίση προς 0.26g. Σημειώνεται ότι η κατεύθυνση της σεισμικής

διάρρηξης σχηματίζει σχετικά μικρή γωνία με τον διαμήκη άξονα το φράγματος. Το φράγμα υπέστη μέγιστη δυναμική συνίζηση στην στέψη ίση προς 0.76 m και κατάντη μετατόπιση ίση προς 0.21 m (Guan 2009). Στο Σχήμα 3.2 φαίνεται η αστοχία του σκυροδέματος λόγω ανάπτυξης σημαντικών θλιπτικών τάσεων στους κατακόρυφους αρμούς της πλάκας σκυροδέματος (Wieland 2009). Αξίζει να τονισθεί ότι παρά την πολύ ισχυρή δόνηση και τις ζημίες που υπέστη η πλάκα σκυροδέματος, το φράγμα επιτέλεσε με εξαιρετικό τρόπο τον βασικό στόχο σχεδιασμού και μετά από μερικές επιδιορθώσεις σε πολύ σύντομο χρονικό διάστημα τέθηκε πάλι σε λειτουργία.



Σχήμα 3.2 Φράγμα Zipingpu: θλιπτική αστοχία της ανάντη πλάκας σκυροδέματος κατά μήκος των κατακόρυφων αρμών κατά τον σεισμό της 12-05-2008.

Μια άλλη έρευνα σεισμικής συμπεριφοράς έγινε και στο φράγμα της Μεσοχώρας το οποίο είναι κατασκευασμένο σε μία στενή κοιλάδα του ποταμού Αχελώου στην βόριο-δυτική Ελλάδα. Έχει ύψος 150 m στη μέγιστη διατομή και μήκος στέψης 330 m. Στο Σχ. 3.3a δίδεται η γεωμετρία της μέγιστης διατομής και οι ζώνες των υλικών, ενώ στο Σχ. 3.3b δίδεται μία άποψη της διακριτοποίησης του φράγματος και της ανάντη πλάκας σκυροδέματος. Μία πιο λεπτομερής περιγραφή του φράγματος δίδεται σε ξεχωριστό άρθρο (Dakoulas et al. 2008).



Σχήμα 3.3 (a) Μέγιστη διατομή και ζώνες υλικών (b) Διακριτοποίηση της γεωμετρίας του αριθμητικού προσομιώματος

Η έρευνα σεισμικής συμπεριφοράς του φράγματος της Μεσοχώρας, του οποίου η μέθοδος ανάλυσης δίδεται αναλυτικά στη συνέχεια είναι αντίστοιχη της έρευνας για τη συμπεριφορά του φράγματος της παρούσας μελέτης. Επικεντρώνεται στην μελέτη σεισμικής απόκρισης του φράγματος και της εντατικής κατάστασης και πιθανής ρηγμάτωσης της πλάκας σκυροδέματος για διάφορα σενάρια.

3.2 ΜΕΘΟΔΟΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

Για την ρεαλιστική πρόβλεψη της συμπεριφοράς της λιθορριπής και των χαλίκων χρησιμοποιείται το καταστατικό προσομοίωμα Duncan et al (1970). Το προσομοίωμα θεωρεί μία υπερβολική σχέση τάσης-παραμόρφωσης, στην οποία το εφαπτομενικό μέτρο ελαστικότητας Young δίδεται από την σχέση

$$E_t = K p_a \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)^n \left[1 - \frac{R_f (\sigma_1 - \sigma_3)(1 - \sin \phi)}{2\sigma_3 \sin \phi + 2c \cos \phi} \right]^2 \quad (3.1)$$

όπου σ_1, σ_3 = κύριες τάσεις, K, R_f, n = σταθερές του υλικού, ϕ = γωνία διατμητικής αντοχής, c = συνοχή, και p_a = ατμοσφαιρική πίεση. Η γωνία διατμητικής αντοχής εξαρτάται από την περιβάλλουσα τάση ως εξής

$$\phi = \phi_o - \Delta\phi \log \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right) \quad (3.2)$$

όπου ϕ_o και $\Delta\phi$ = σταθερές του υλικού. Το μέτρο Young κατά την αποφόρτιση δίδεται από την σχέση

$$E_{ur} = K_{ur} p_a \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)^n \quad (3.3)$$

όπου K_{ur} = σταθερά η οποία λαμβάνει τιμές μεταξύ $1.2K \leq K_{ur} \leq 3K$. Επίσης το μέτρο διόγκωσης δίδεται από την σχέση

$$B = K_b p_a \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)^m \quad (3.4)$$

όπου K_b , m = σταθερές. Τα όρια της τιμής του B καθορίζονται από την σχέση $B = E_t / 3(1 - 2\nu)$, όπου ν είναι ο λόγος Poisson. Η μέγιστη τιμή είναι $B_{max} = 17E_t$ ($\nu = 0.49$), ενώ η ελάχιστη τιμή αντιστοιχεί σε γεωστατικές συνθήκες

$$B_{min} = \frac{E_t}{3} \left(\frac{2 - \sin \phi}{\sin \phi} \right) \quad (3.5)$$

Το κριτήριο φόρτισης / αποφόρτισης καθορίζεται από την σχέση (Clough 1984, Ebeling et al. 1992)

$$S = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_{1f} - \sigma_{3f}} \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)^{1/4} \quad (3.6)$$

όπου σ_{1f}, σ_{3f} = κύριες τάσεις στην αστοχία. Αν $S \geq S_{max}$ τότε χρησιμοποιούνται τα μέτρα φόρτισης, ενώ διαφορετικά τα μέτρα αποφόρτισης. Το καταστατικό προσομοίωμα ενσωματώθηκε στο κώδικα ABAQUS (2011) και επιβεβαιώθηκε εκτενώς (Dakoulas 2007).

Υστερητικό Προσομοίωμα

Για την ρεαλιστική πρόβλεψη της υστερητικής συμπεριφοράς της λιθορριπής και των χαλίκων δημιουργήθηκε ένα υστερητικό προσομοίωμα το οποίο ενσωματώθηκε με το στατικό προσομοίωμα σε ένα ενιαίο αριθμητικό κώδικα. Το μέτρο διάτμησης σε πολύ μικρές παραμορφώσεις ($\gamma < 10^{-6}$) δίδεται από την σχέση

$$G_0 = 1000 A \frac{(2.17 - e)^2}{1 + e} (p'_0)^r \quad (3.8)$$

όπου p'_0 = η μέση ενεργός τάση, e = λόγος κενών, A , r = σταθερές του υλικού.

Κατά την μονοτονική φόρτιση του υστερητικού προσομοιώματος, το τέμνον μέτρο διάτμησης G_s μεταβάλλεται ως προς το πλάτος της γενικευμένης διατμητικής παραμόρφωσης ως εξής

$$G_s / G_0 = \frac{a}{1 + \exp(-(\log \gamma_e - c) / b)} \quad (3.9)$$

όπου a, b, c = σταθερές του υλικού. Καθόσον η ανάλυση γίνεται στον χώρο των 3 διαστάσεων, χρησιμοποιείται η γενικευμένη διατμητική παραμόρφωση γ_e η οποία λαμβάνεται ίση προς

$$g_e = \sqrt{\frac{2}{3}} \sqrt{(e_{11} - e_{22})^2 + (e_{22} - e_{33})^2 + (e_{33} - e_{11})^2 + 3(g_{12}^2 + g_{23}^2 + g_{31}^2) / 2} \quad (3.10)$$

Για την ειδική περίπτωση της απλής διάτμησης, όπου $e_{11} = e_{22} = e_{33} = g_{23} = g_{13} = 0$, η ανωτέρω σχέση δίδει ότι $g_e = g_{12}$, οπότε είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν τα δημοσιευμένα πειραματικά δεδομένα για τον προσδιορισμό των σταθερών με βάση την συμφωνία του μέτρου διάτμησης και του λόγου απόσβεσης για διάφορες τιμές της διατμητικής παραμόρφωσης. Το εφαπτομενικό μέτρο διάτμησης δίδεται από τη σχέση

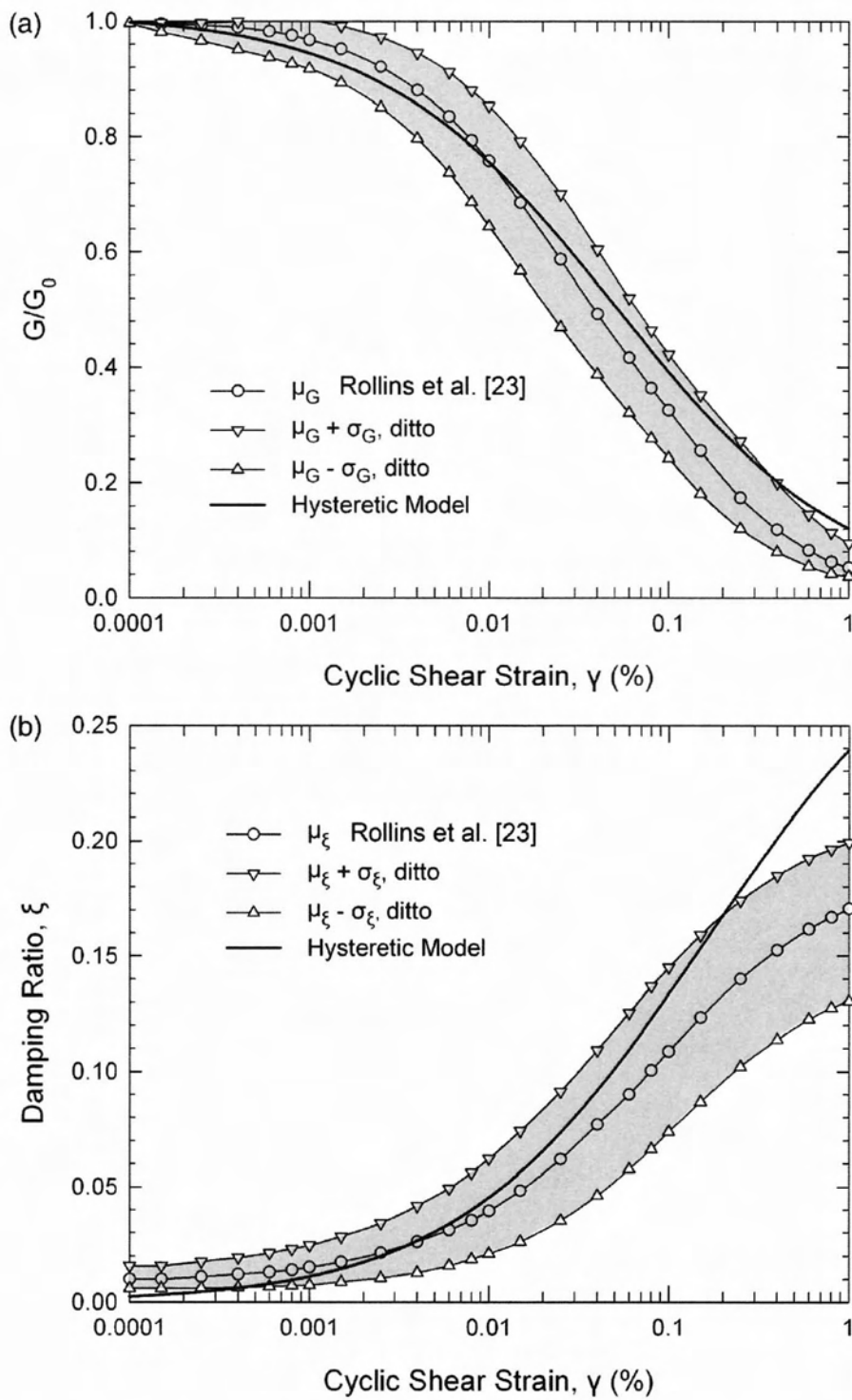
$$G_t / G_0 = \frac{a}{1 + \exp(-(\log \gamma_e - c) / b)} + \frac{a \exp(-(\log \gamma_e - c) / b)}{b (1 + \exp(-(\log \gamma_e - c) / b))^2 \ln 10} \quad (3.11)$$

Κατά την ανακυκλική φόρτιση χρησιμοποιείται το κριτήριο Masing για την δημιουργία των βρόγχων υστέρησης, οπότε η νέα σχέση του εφαπτομενικού μέτρου διάτμησης γίνεται ίση προς

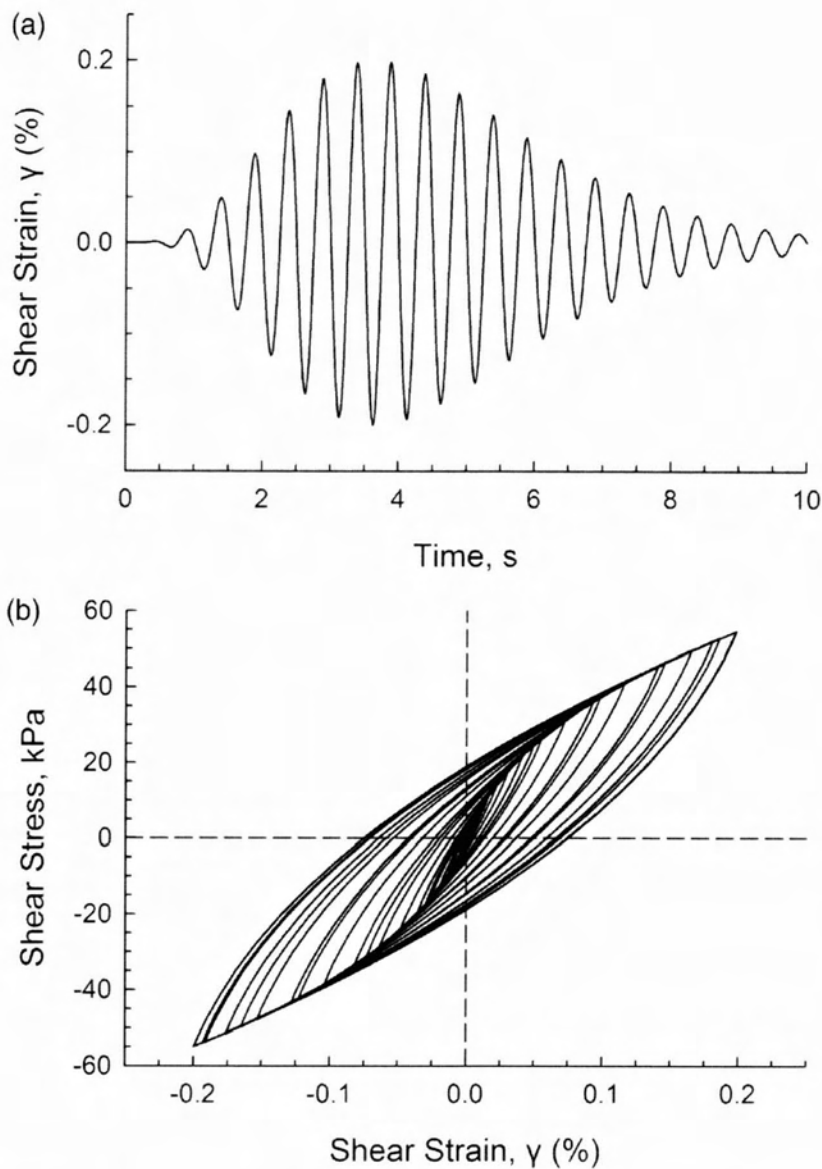
$$G_t / G_0 = \frac{a}{1 + \exp(-(\log(|\gamma - \gamma_{ref}| / 2) - c) / b)} + \frac{a \exp(-(\log(|\gamma - \gamma_{ref}| / 2) - c) / b)}{b (1 + \exp(-(\log(|\gamma - \gamma_{ref}| / 2) - c) / b))^2 \ln 10} \quad (3.12)$$

όπου γ = το διάνυσμα των παραμορφώσεων, γ_{ref} = το διάνυσμα των παραμορφώσεων από τις οποίες έγινε η αποφόρτιση και $|\gamma - \gamma_{ref}|$ το μέτρο της διαφοράς των διανυσμάτων γ και γ_{ref} .

Στο Σχ. 3.5 παρουσιάζεται η μέση τιμή και μία τυπική απόκλιση του τέμνοντος μέτρου διάτμησης και του λόγου υστερητικής απόσβεσης χαλίκων από την αξιόλογη μελέτη των Rollins et al. (1998). Στο Σχ. 3.6 δίδεται η προσομοίωση μίας δοκιμής απλής διάτμησης κατά την οποία επιβάλλεται η δυναμική διατμητική παραμόρφωση του Σχ. 3.6a. Η σχέση τάσης – παραμόρφωσης που προβλέπεται από το καταστατικό προσομοίωμα για διάφορα πλάτη διατμητικής παραμόρφωσης κατά την φόρτιση/αποφόρτιση δίδεται στο Σχ. 3.6b.

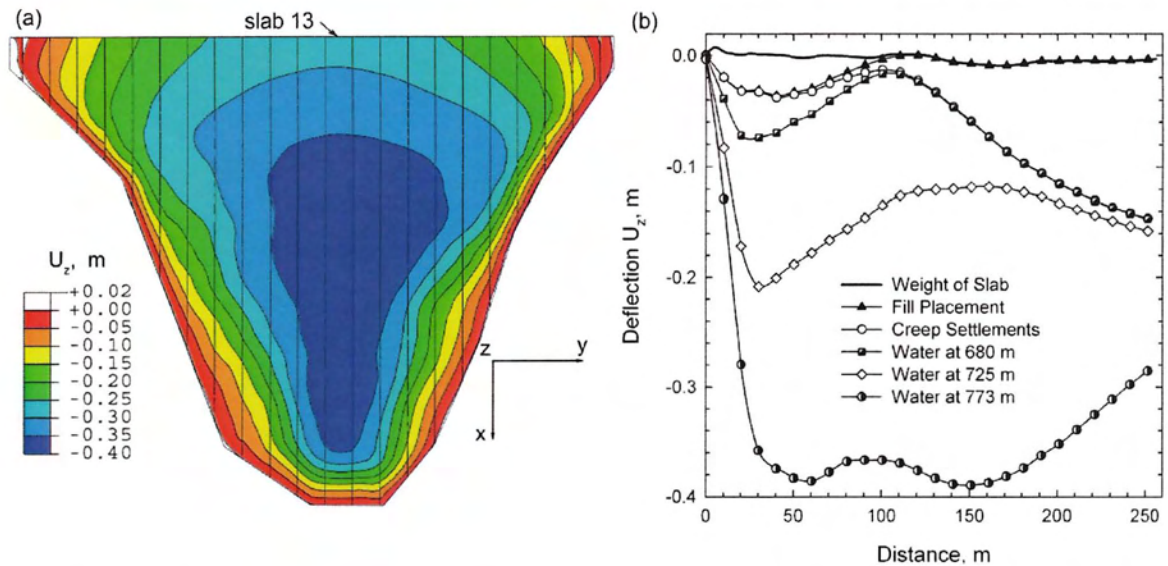


Σχήμα 3.5 Υστερητικό μοντέλο λιθορριπής: Μεταβολή του (α) μέτρου διάτμησης και (β) λόγου απόσβεσης ως προς το πλάτος της ανακυκλικής παραμόρφωσης



Σχήμα 3.6 Προσομοίωση δοκιμής απλής διάτμησης (α) επιβαλλόμενη παραμόρφωση και (β) βρόγχος υστέρησης

Το Σχ. 3.7.α δίδει την βύθιση της πλάκας μετά την πλήρωση της λεκάνης στην στάθμη 773 m, ενώ το Σχ. 3.7b δίδει την κατανομή της βύθισης στην κεντρική πλάκα 13 ως προς την απόσταση από τον πόδα για διάφορα στάδια της φόρτισης. Μετά το τέλος του ερπυσμού η βύθιση στην στέψη είναι ≈ 15 cm. Μετά την τελική πλήρωση η μέγιστη βύθιση είναι 39 cm σε απόσταση 50 m και 150 m από τον πόδα της πλάκας.

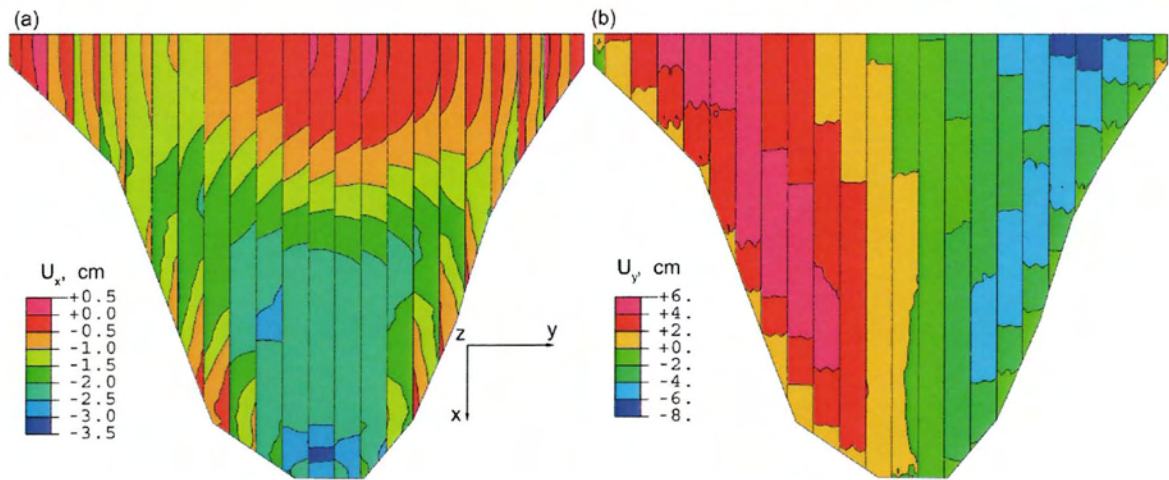


Σχήμα 3.7. (a) Βύθιση της πλάκας μετά την πλήρωση της λεκάνης στην στάθμη 773 m. (b) Βύθιση της πλάκας 13 ως προς την απόσταση από τον πόδα για διάφορα στάδια φόρτισης.

Το Σχ. 3.8α παρουσιάζει την μετατόπιση της πλάκας στην κατεύθυνση X στο τοπικό σύστημα συντεταγμένων XYZ, μετά την πλήρωση της λεκάνης. Η μέγιστη μετατόπιση είναι ≈ 3.2 cm και λαμβάνει χώρα στον πόδα της πλάκας. Επομένως, το άνοιγμα του αρμού είναι μικρότερο του ορίου των 10 cm για διατήρηση της στεγανότητας κατά μήκος της πλίνθου.

Κατά την διάρκεια της πλήρωσης η πλάκα τείνει να κινηθεί προς την στέψη λόγω παραμόρφωσης της λιθορριπής. Στο τελικό στάδιο η πλάκα 13 υφίσταται βράχυνση κατά 3 cm στην κατεύθυνση X με μέση θλιπτική παραμόρφωση $\varepsilon \approx 0.01\%$.

Το Σχ. 3.8b παρουσιάζει την μετατόπιση της πλάκας στην κατεύθυνση Y. Λόγω της παραμόρφωσης της υποκείμενης λιθορριπής, οι πλάκες μετατοπίζονται προς την κεντρική διατομή με μέγιστη μετατόπιση ≈ 7.2 cm. Η μετατόπιση αυτή δημιουργεί θλιπτικές τάσεις στα κατακόρυφα τοιχώματα γειτονικών πλακών στην κεντρική περιοχή.



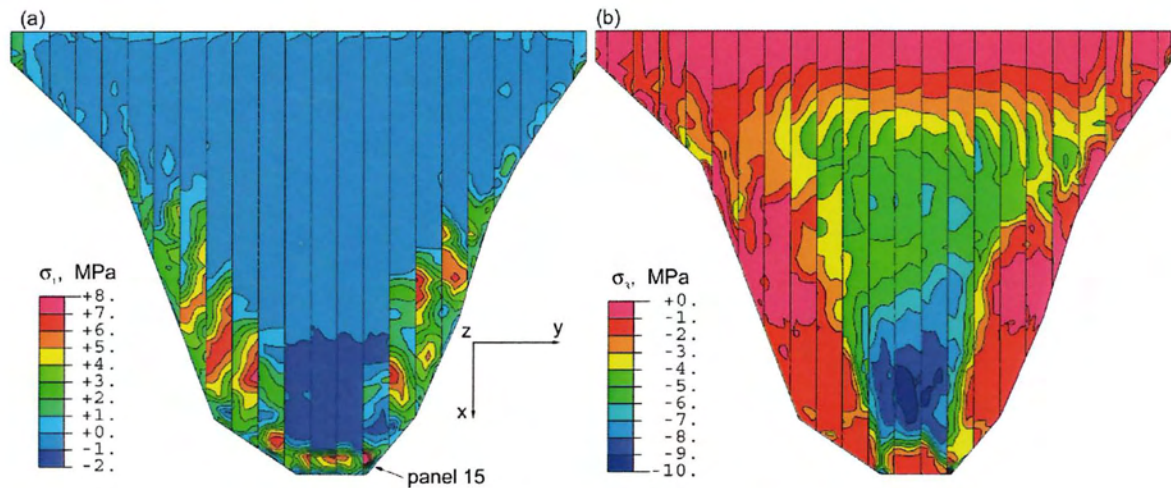
Σχήμα 3.8. Μετατόπιση της πλάκας μετά την πλήρωση της λεκάνης στην στάθμη 773 m: (a) στην κατεύθυνση X και (b) στην κατεύθυνση Y.

Το Σχ. 3.9α παρουσιάζει την κατανομή της μέγιστης κύριας τάσης σ_1 στην άνω επιφάνεια της πλάκας μετά την πλήρωση της λεκάνης (η σ_1 επηρεάζεται κυρίως από την τάση σ_x). Όπως φαίνεται στο σχήμα, δημιουργούνται δύο ζώνες εφελκυσμού πλάτους περίπου 35 m παράλληλα με την πλίνθο με μέγιστες εφελκυστικές τάσεις ≈ 8 MPa, δηλ. μεγαλύτερες από την αντοχή του σκυροδέματος σε εφελκυσμό ($\approx 3-4$ MPa). Η παρουσία των ζωνών εφελκυσμού συμφωνεί με τις καταγραφές παρόμοιων ζωνών πλάτους 10–20 m στις οποίες παρουσιάζονται ρωγμές, όπως π.χ. στα φράγματα Xingó, Itá και Itarebi (Marques Filho & Pinto 2005). Επίσης, οι κατευθύνσεις της μέγιστης κύριας τάσης είναι σε ποιοτική συμφωνία (δηλαδή κάθετες) με τις κατευθύνσεις των ρωγμών που παρατηρήθηκαν στην ζώνη εφελκυσμού των φραγμάτων Xingó, Itá, Itarebi, κλπ. Η εμφάνιση της ζώνης εφελκυσμού συνδέεται κυρίως με την απότομη αλλαγής κλίσης της επιφάνειας του αντερείσματος, αλλά μπορεί να επιδεινωθεί στην περίπτωση λιθορριπής με μικρή δυσκαμψία στην ανάντη ζώνη.

Σημειώνεται ότι η σ_1 ξεπερνά την τιμή των 8 MPa σε ένα σημείο κοντά στον πόδα της πλάκας 15. Στην περίπτωση αυτή, η αυξημένη τιμή της σ_1 οφείλεται σε τοπική ανωμαλία της επιφάνειας του υποκείμενου βράχου που δημιουργεί πρόσθετη κάμψη στην πλάκα. Για τις περιπτώσεις αυτές οι Marques Filho & Pinto (2005) συνιστούν κάποια διαμόρφωση της επιφάνειας του βράχου ή αλλαγές στις ζώνες του υλικού ώστε να μειωθούν οι τοπικά αυξημένες εφελκυστικές τάσεις.

Το Σχ. 3.9b παρουσιάζει τη κατανομή της ελάχιστης κύριας τάσης σ_3 , η οποία επηρεάζεται κυρίως από την τάση σ_y . Η μέγιστη θλίψη αναπτύσσεται σε μία περιοχή με κέντρο περίπου στο 1/5 του ύψους του φράγματος από τον πόδα. Στην

περιοχή αυτή η μέγιστη τάση σ_y μεταξύ των γειτονικών πλακών είναι ≈ -10 MPa, δηλαδή αρκετά μικρότερη της αντοχής σε θλίψη (≈ -21 MPa).



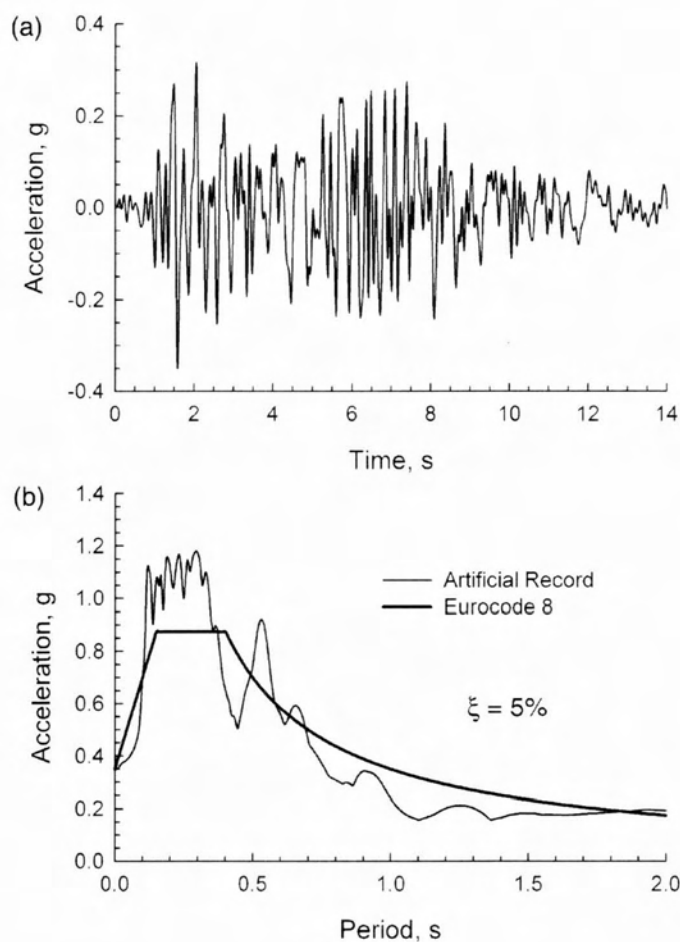
Σχήμα 3.9. (α) Μέγιστη κύρια τάση σ_1 και (β) ελάχιστη κύρια τάση σ_3 της πλάκας μετά την πλήρωση της λεκάνης στην στάθμη 773 m.

Αξίζει να σημειωθεί ότι η παρουσία της αρκετά στενής κοιλάδας έχει ιδιαίτερα θετικό αποτέλεσμα στην αύξηση της δυσκαμψίας του φράγματος, και συνεπώς την μείωση των καθιζήσεων και της προς κατάντη μετατόπισης της λιθορριπής και της πλάκας. Όμως οι διαφορικές καθιζήσεις της λιθορριπής κατά μήκος του άξονα του φράγματος δημιουργούν αυξημένες θλιπτικές τάσεις μεταξύ των κατακόρυφων τοιχωμάτων των πλακών, όπως φαίνεται στο Σχ. 3.9b, κάτι που δεν παρουσιάζεται σε φράγματα κατασκευασμένα σε ευρείες κοιλάδες. Σε περίπτωση αυξημένης συμπίεσής της λιθορριπής, οι θλιπτικές αυτές τάσεις είναι δυνατόν να είναι πολύ σημαντικές.

Λόγω της έλλειψης πραγματικών μετρήσεων της ταχύτητας των διατμητικών κυμάτων V_{s0} καθ' ύψος του φράγματος, χρησιμοποιούνται τρία υποθετικά σενάρια με σκοπό την παραμετρική διερεύνηση της απόκρισης. Το Σενάριο 1 αντιπροσωπεύει ένα φράγμα μέτριας συμπύκνωσης της λιθορριπής, το Σενάριο 2 ένα φράγμα καλής συμπύκνωσης και το Σενάριο 3 ένα φράγμα πολύ καλής συμπύκνωσης. Εκτιμάται ότι το φράγμα της Μεσοχώρας έχει μία κατανομή της V_{s0} που πλησιάζει το Σενάριο 2.

Η εργασία αυτή θεωρεί ότι ο σεισμός σχεδιασμού έχει μέγεθος $M = 6.5$ και η μέγιστη επιτάχυνση στην ελεύθερη επιφάνεια του βράχου ίση προς $0.35g$. Η διέγερση επιβάλλεται μόνο στη οριζόντια ανάντη – κατάντη κατεύθυνση. Το Σχ.

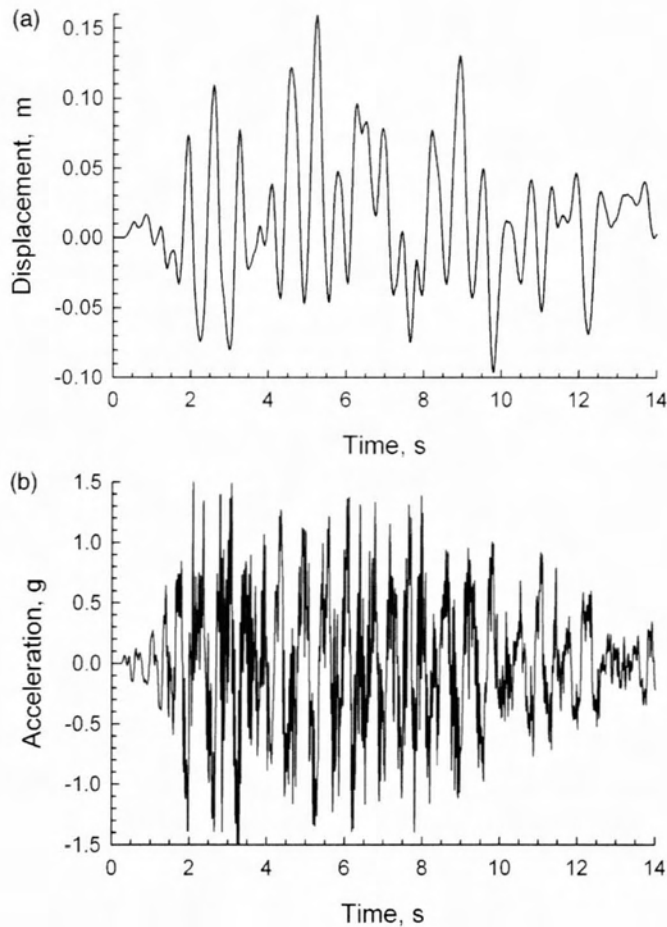
3.10α παρουσιάζει την σεισμική διέγερση και το Σχ. 3.10β το φάσμα απόκρισης και το φάσμα του σεισμού σχεδιασμού για βραχώδες έδαφος τον Ευροκώδικα 8 για λόγο απόσβεσης $\xi = 5\%$



Σχήμα 3.10 (α) Τεχνητή σεισμική διέγερση (β) Φάσματα επιτάχυνσης της διέγερσης και του Ευροκώδικα 8 για βράχο.

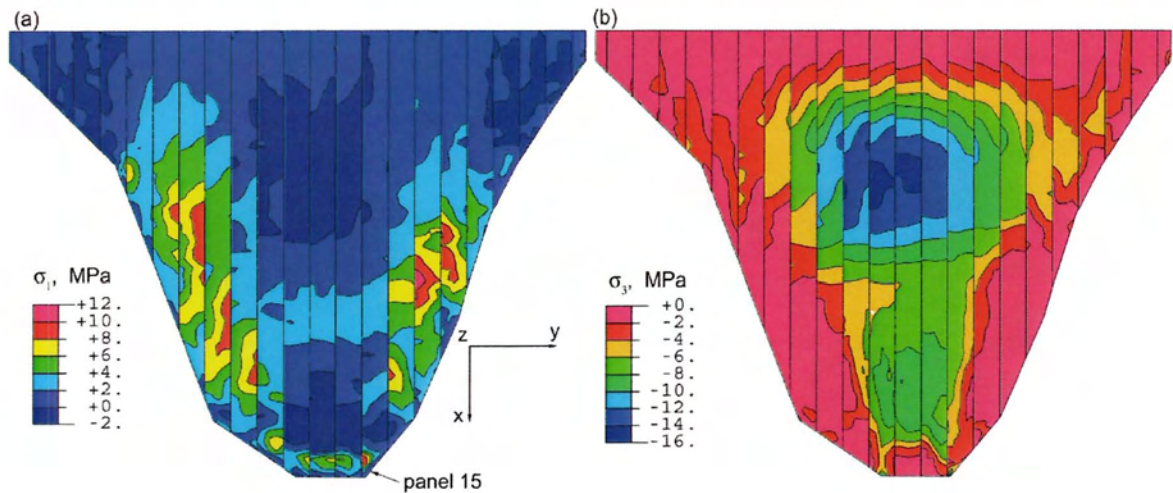
Το Σχ. 3.11 παρουσιάζει την οριζόντια μετατόπιση και επιτάχυνση στο μέσο της στέψης για το Σενάριο 2. Η μέγιστη μετατόπιση είναι ≈ 16 cm και η μέγιστη επιτάχυνση ≈ 1.54 g. Οι μέγιστες επιταχύνσεις για τα Σενάρια 1 και 3 είναι 1.50 g και 1.63 g αντίστοιχα. Αυτές οι αρκετά υψηλές επιταχύνσεις στο μέσο της στέψης δημιουργούνται από την «εστίαση» των σεισμικών κυμάτων στην περιοχή αυτή (Gazetas & Dakoulas 1992, Dakoulas 1993, 1995, Mejia & Seed 1982). Παρά την υψηλή τιμή, οι επιταχύνσεις αυτές όταν ενεργούν για ένα πάρα πολύ μικρό χρονικό διάστημα δεν επηρεάζουν την ευστάθεια του φράγματος. Αποτελέσματα από άλλες σεισμικές διεγέρσεις με ιστορικές καταγραφές από βραχώδεις περιοχές

έδωσαν μετατοπίσεις μεταξύ 0.1-0.16 m, διατμητικές παραμορφώσεις μεταξύ 0.1% - 0.15% και μέγιστες επιταχύνσεις μεταξύ 1g-1.7g



Σχήμα 3.11 Σενάριο λιθορριπής 2: (a) Οριζόντια μετατόπιση και (b) επιτάχυνση στο μέσο της στέψης του φράγματος

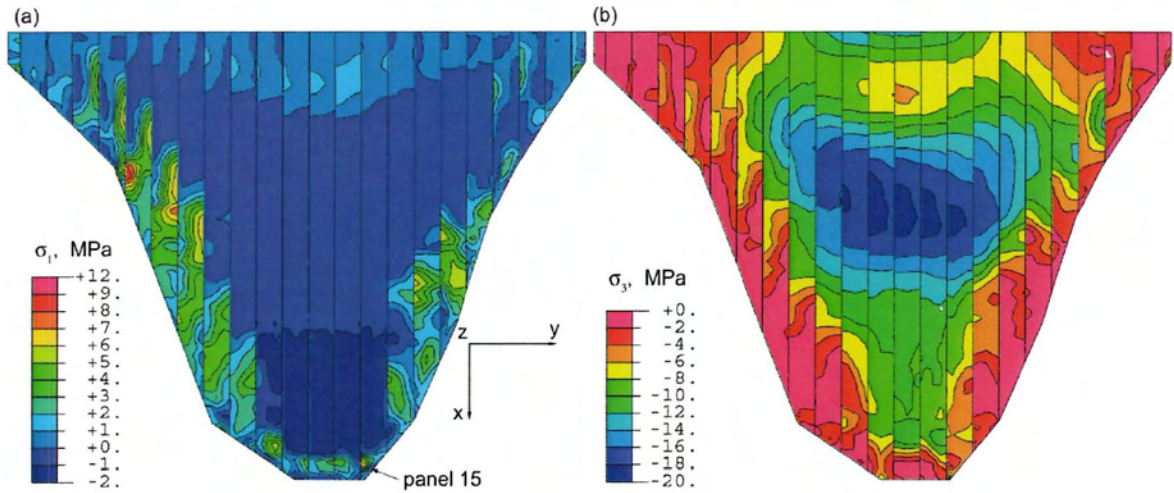
Το Σχ. 3.12 παρουσιάζει την μέγιστη κύρια τάση της πλάκας σκυροδέματος για το Σενάριο 2 την χρονική στιγμή ($t = 2.90$ s) κατά την οποία η πλάκα υφίσταται μέγιστο εφελκυσμό. Σημειώνεται ότι με αύξηση της δυσκαμψίας της λιθορριπής (Σενάριο 3) οι εφελκυστικές τάσεις μειώνονται. Το Σχ. 3.12b παρουσιάζει την ελάχιστη κύρια τάση της πλάκας για το Σενάριο 2 την χρονική στιγμή ($t = 2.54$ s) κατά την οποία η πλάκα υφίσταται μέγιστη θλίψη. Η μέγιστη θλίψη έχει τιμή -16 MPa και αναπτύσσεται σε μία ζώνη με κέντρο στα 2/3 του ύψους του φράγματος.



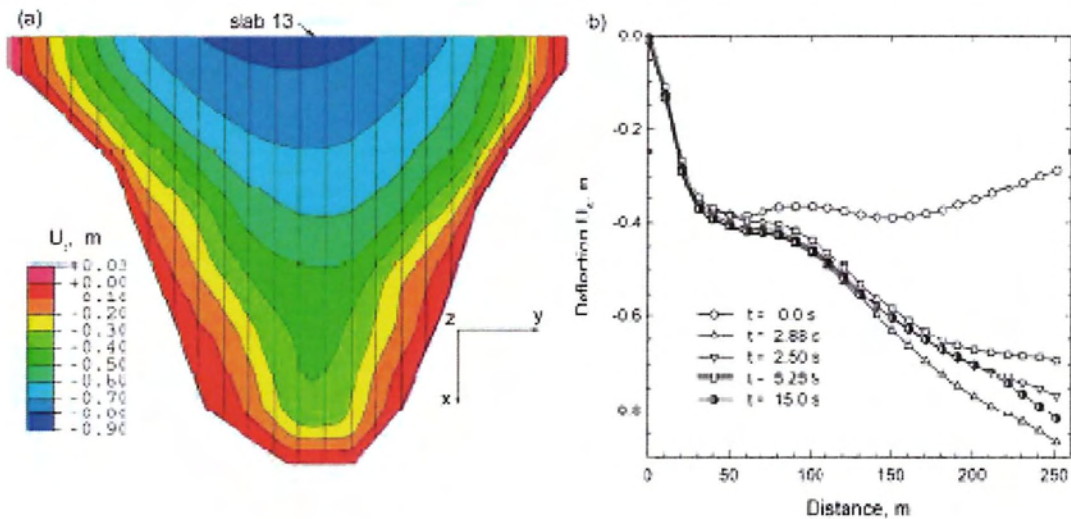
Σχήμα 3.12 Σενάριο λιθορριπής 2 – Κύριες τάσεις της πλάκας σκυροδέματος: (α) Μέγιστη κύρια τάση σ_1 την χρονική στιγμή $t = 2.90$ s και (β) ελάχιστη κύρια τάση σ_3 σ την χρονική στιγμή $t = 2.54$ s

Τα αποτελέσματα του Σχ. 3.12 υπολογίσθηκαν θεωρώντας ότι κατά τον σεισμό δεν δημιουργείται δυναμική συνίζηση. Γενικά εκτιμάται ότι ένα υψηλό φράγμα λιθορριπής με ανάντη πλάκα σκυροδέματος είναι πιθανό να υποστεί μέγιστη δυναμική συνίζηση μεταξύ 0.5 m και 1m. (Wieland 2007).

Το Σχ. 3.13a παρουσιάζει την μέγιστη κύρια τάση στην πλάκα την χρονική στιγμή ($t = 2.88$ s) κατά την οποία η πλάκα υφίσταται μέγιστο εφελκυσμό. Σε σύγκριση με τα αποτελέσματα του Σχ. 3.12a όπου δεν θεωρείται δυναμική συνίζηση, τα αποτελέσματα με συνίζηση 50 cm οδηγούν σε μείωση των εφελκυστικών τάσεων. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η αύξηση της καθίζησης της λιθορριπής όλης της διατομής του φράγματος, μέσω των σημαντικών δυνάμεων τριβής μεταξύ πλάκας και χαλικιού, μεταφέρει θλιπτικές τάσεις ή μειώνει τις εφελκυστικές τάσεις στην πλάκα. (Σημειώνεται ότι αν, παράλληλα με την καθίζηση, υπάρχει και σημαντική κατάντη μετατόπιση της λιθορριπής, τότε ο εφελκυσμός στην πλάκα είναι δυνατόν να αυξηθεί). Το Σχ. 3.13b παρουσιάζει την ελάχιστη κύρια τάση σ_3 την χρονική στιγμή ($t = 2.50$ s) της μέγιστης θλίψης. Οι μέγιστες θλιπτικές τάσεις πλησιάζουν την τιμή των -20 MPa στην κεντρική περιοχή της πλάκας. Η μεγάλη τιμή των θλιπτικών τάσεων οφείλεται το γεγονός ότι το φράγμα διεγείρεται με μία αρκετά ισχυρή σεισμική δόνηση, όπως φαίνεται από το φάσμα απόκρισης, σε συνδυασμό με μία αρκετά δυσμενή παραδοχή δυναμικής συνίζησης.



Σχήμα 3.13 Σενάριο λιθορριπής 2 με δυναμική συνίζηση 50 cm: Κύριες τάσεις της πλάκας σκυροδέματος: (α) Μέγιστη κύρια τάση 1σ την χρονική στιγμή $t = 2.88 \text{ s}$ και (β) ελάχιστη κύρια τάση 3σ την χρονική στιγμή $t = 2.50 \text{ s}$

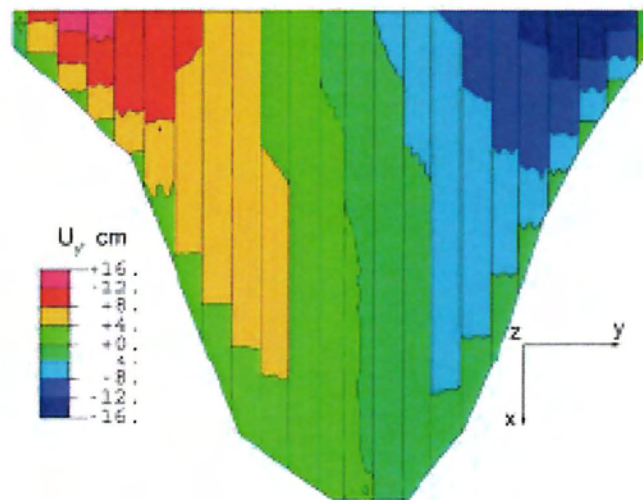


Σχήμα 3.14 Σενάριο λιθορριπής 2 με δυναμική συνίζηση 50 cm: (α) Βύθιση της πλάκας μετά την σεισμική δόνηση. (β) Βύθιση της πλάκας 13 ως προς την απόσταση από τον πόδα κατά την διάρκεια του σεισμού στις χρονικές στιγμές $t = 0, 2.88, 2.50, 5.25$ και 15 s .

Το Σχ. 3.14α παρουσιάζει την κατανομή της βύθισης της πλάκας σκυροδέματος κατά το τέλος της σεισμικής δόνησης. Η βύθιση της πλάκας 13 σε διάφορες χρονικές στιγμές κατά την διάρκεια της δόνησης δίδεται στο Σχ. 3.14β.

Παρατηρείται ότι η βύθιση στην στέψη είναι 0.28 m πριν την δόνηση και 0.82 m μετά την δόνηση.

Τέλος το Σχ.3.15 παρουσιάζει την μετατόπιση των πλακών στην κατεύθυνση Y, η οποία αυξάνει σημαντικά από περίπου 7 cm πριν την δόνηση σε 16 cm μετά την δόνηση. Λόγω της κατανομής αυτών των μετατοπίσεων σε αρκετές πλάκες, αλλά και της μετατόπισης της υποκείμενης λιθορριπής και του προστατευτικού συστήματος στεγανότητας του αρμού, δεν αναμένονται απώλειες ύδατος μέσω των αρμών. Τέλος, σημειώνεται ότι οι μετατοπίσεις των πλακών στη κατεύθυνση X παραμένουν μικρότερες των 5 cm σε κάθε περίπτωση, και συνεπώς δεν αναμένονται διαρροές στον περιμετρικό αρμό της πλίνθου.



Σχήμα 3.15 Σενάριο λιθορριπής 2 με δυναμική συνίζηση 50 cm: Μετατόπιση της πλάκας στην κατεύθυνση Y μετά την σεισμική δόνηση.

Τα ακόλουθα συμπεράσματα προκύπτουν από την εργασία αυτή:

- Η μεθοδολογία για 3D μη-γραμμική αριθμητική ανάλυση φραγμάτων λιθορριπής με ανάντη πλάκα σκυροδέματος παρέχει ένα ισχυρό υπολογιστικό εργαλείο για την ολοκληρωμένη προσομοίωση της σταδιακής κατασκευής, των φαινομένων ερπυσμού, της πλήρωσης της λεκάνης, και της σεισμικής απόκρισης του φράγματος, λαμβάνοντας υπόψη το φαινόμενο της δυναμικής συνίζησης. Πέραν της συνολικής σεισμικής συμπεριφοράς του φράγματος, η μέθοδος παρέχει την δυνατότητα της λεπτομερούς εκτίμησης (α) των εφελκυστικών τάσεων στις πλάκες σκυροδέματος (β) των θλιπτικών

τάσεων στις κατακόρυφες διεπιφάνειες επαφής μεταξύ των γειτονικών πλακών (γ) το άνοιγμα των αρμών.

- Για το φράγμα που εξετάστηκε, αναπτύσσεται μία ζώνη εφελκυσμού παράλληλη με την πλίνθο περίπου πλάτους περίπου 35 m κατά την πλήρωση της λεκάνης. Η ζώνη εφελκυσμού συνδέεται με την απότομη αλλαγή της κλίσης του αντερείσματος, και μπορεί να επιδεινωθεί από την χαμηλή δυσκαμψία της λιθορριπής στην ανάντη ζώνη. Παρόμοια ζώνη εφελκυσμού σε φράγματα με χαμηλή δυσκαμψία της λιθορριπής στην ανάντη ζώνη καταγράφηκε στα φράγματα Xingó, Itá και Itarebí. Η μέγιστη εφελκυστική τάση υπό στατικές συνθήκες φόρτισης είναι 8 MPa και υπό σεισμική δόνηση 12 MPa.
- Κατά την πλήρωση της λεκάνης, αναπτύσσεται μία ζώνη θλίψης στις κεντρικές πλάκες με μέγιστη τιμή ίση προς -10 MPa, σε ύψος ίσο περίπου με το 1/5 του ύψους του φράγματος (από τον πόδα της πλάκας). Κατά την σεισμική δόνηση, αν δεν υπάρξει δυναμική συνίζηση, η μέγιστη θλιπτική τάση είναι -16 MPa. Για δυναμική συνίζηση 50 cm στην στέψη, η μέγιστη θλίψη προσεγγίζει την τιμή των -20 MPa.
- Η μέγιστη οριζόντια μετατόπιση των πλακών στην κατά μήκος του φράγματος κατεύθυνση είναι 7 cm κατά την πλήρωση της λεκάνης και 16 cm μετά την σεισμική δόνηση με συνίζηση 50 cm. Λόγω της κατανομής των μετατοπίσεων αυτών, δεν αναμένονται διαρροές ύδατος από τους κατακόρυφους αρμούς. Η μέγιστη μετατόπιση των πλακών στην ανάντη – κατάντη κατεύθυνση είναι <5 cm, και συνεπώς δεν αναμένονται διαρροές ύδατος στον περιμετρικό αρμό της πλίνθου.
- Παραμετρικές αναλύσεις κατέδειξαν ότι ο πλέον σημαντικός παράγοντας για την άριστη συμπεριφορά φράγματος υπό στατικές και δυναμικές συνθήκες είναι η εξαιρετικής ποιότητας συμπύκνωση της λιθορριπής, η οποία εξασφαλίζει υψηλή δυσκαμψία.
- Η στενότητα της κοιλάδας αυξάνει σημαντικά την δυσκαμψία του φράγματος για στατικές και δυναμικές συνθήκες. Συστηματικές συγκρίσεις αποτελεσμάτων από 2D και 3D αναλύσεις φραγμάτων σε στενές κοιλάδες κατέδειξαν ότι οι 2D αναλύσεις οδηγούν σε σημαντικά μεγαλύτερες βυθίσεις

και εφελκυστικές τάσεις στην πλάκα σε σχέση με τις 3D αναλύσεις. Επίσης, η 2D ανάλυση αγνοεί πλήρως τις σημαντικές θλιπτικές τάσεις που είναι δυνατόν να αναπτυχθούν μεταξύ γειτονικών πλακών λόγω της 3D γεωμετρίας, η οποία επιβάλλει σημαντικές διαφορικές καθιζήσεις κατά μήκος του φράγματος. Επομένως, η χρήση 2D αναλύσεων σε στενές κοιλάδες είναι εντελώς ακατάλληλη και οδηγεί σε εσφαλμένο σχεδιασμό.

Τα αποτελέσματα των προηγούμενων ερευνών καταδεικνύουν ότι, η σεισμική ασφάλεια φραγμάτων λιθορριπής με ανάντη πλάκα σκυροδέματος επηρεάζεται σημαντικά από:

- την συμπεριφορά των περιμετρικών αρμών της πλίνθου και των αρμών μεταξύ των πλακών
- την ανάπτυξη ρωγμών στην πλάκα σκυροδέματος λόγω της σεισμικής απόκρισης του φράγματος και
- την δυναμική συνίζηση της λιθορριπής κατά τη σεισμική δόνηση η οποία είναι δυνατόν να επηρεάσει την ανάπτυξη ρωγμών στην πλάκα και το άνοιγμα των αρμών.

Η εξέλιξη του σχεδιασμού των CFRDs μέχρι τώρα βασίσθηκε κυρίως στην εμπειρία από την συμπεριφορά των ήδη κατασκευασμένων φραγμάτων. Όμως η επέκταση της εμπειρίας αυτής σε νέες κατασκευές με συνεχώς αυξανόμενα ύψη οδήγησε πρόσφατα σε προβλήματα (Marques Filho et al. 2005). Οι πρόσφατες αυτές εμπειρίες καθιστούν εμφανή την ανάγκη ο σχεδιασμός των CFRD να ξεφύγει από τον έντονο εμπειρισμό και να συμπεριλάβει νέες μεθοδολογίες αριθμητικής προσομοίωσης που σε συνδυασμό με τις εργαστηριακές δοκιμές και τις επιτόπου μετρήσεις, θα επιτρέπουν την καλύτερη κατανόηση.

Κεφάλαιο 4^ο

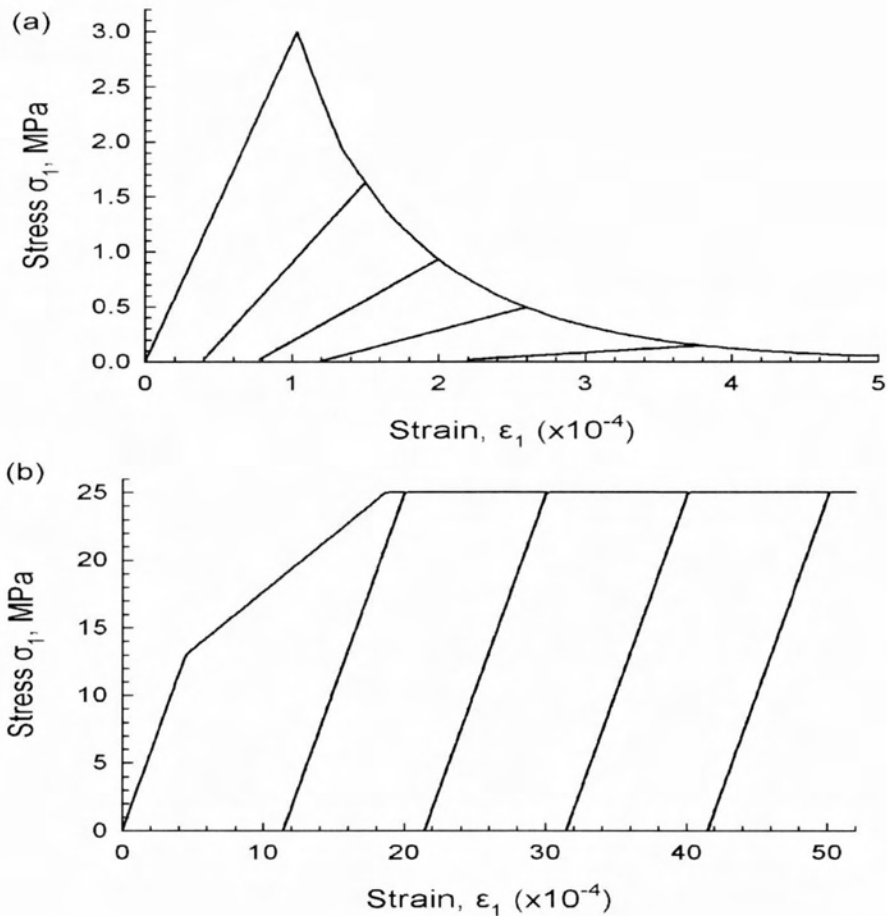
4.1 ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ ΤΟΥ ΙΝΟΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΤΗΣ ΑΝΑΝΤΗ ΠΛΑΚΑΣ ΤΟΥ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ ΛΙΘΟΡΡΙΠΗΣ

Οι Stavrotheodorou and Dakoulas (2012) παρουσίασαν μία προχωρημένη μεθοδολογία σεισμικής ανάλυσης φραγμάτων λιθορριπής με ανάντη πλάκα σκυροδέματος με χρήση ινοπλισμένου σκυροδέματος. Η χρήση ινοπλισμένου σκυροδέματος για την κατασκευή της πλάκας αποτελεί μία σχετικά νέα ιδέα η οποία δεν έχει υλοποιηθεί και αποτελεί το αντικείμενο διερεύνησης της διπλωματικής αυτής εργασίας.

Για την προσομοίωση του ινοπλισμένου σκυροδέματος της ανάντη πλάκας του φράγματος λιθορριπής, χρησιμοποιήθηκε το ελαστο - πλαστικό καταστατικό μοντέλο που προτάθηκε από τους Lee και Fenves (1998) το οποίο είναι κατάλληλο για ανακυκλική φόρτιση σκυροδέματος. Το μοντέλο αυτό αφορά στο απλό σκυρόδεμα και αποτελεί επέκταση του πλαστικού μοντέλου των Lubliner et al (1989) και περιλαμβάνει δύο μεταβλητές βλάβης του σκυροδέματος, μία σε εφελκυσμό και μία σε θλίψη.

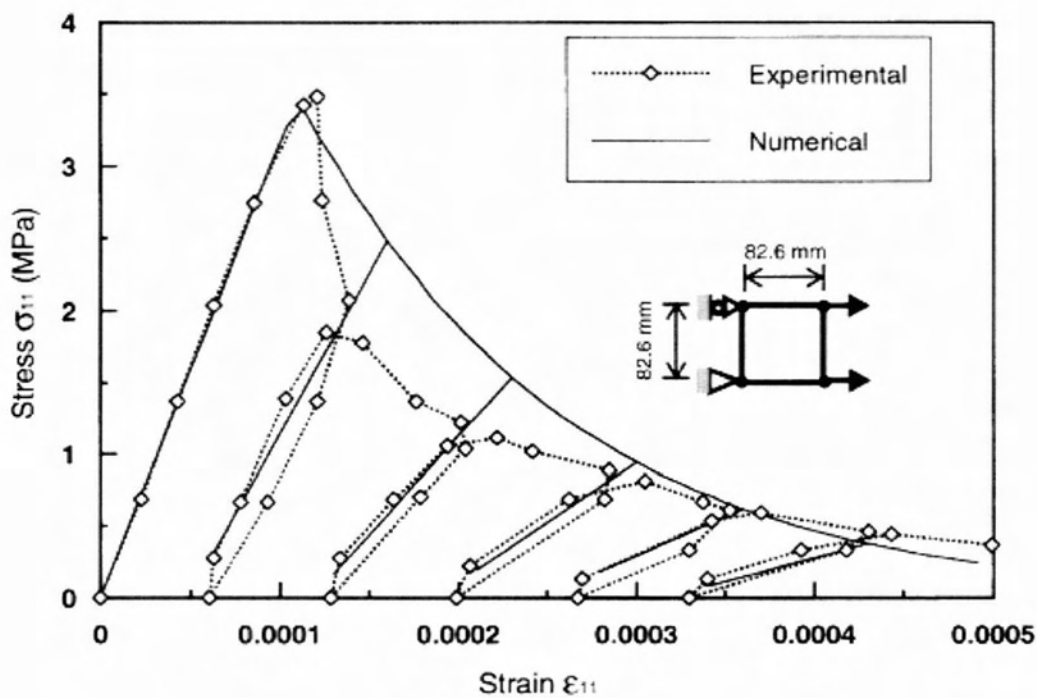
Το μοντέλο των Lee και Fenves (1998) αποτελεί ένα απλό μοντέλο το οποίο προσομοιώνει την επίδραση της ζημίας του σκυροδέματος στην αντοχή και στην ελαστική ακαμψία του υλικού. Με άλλα λόγια, ανάλογα με το βαθμό της βλάβης στο σκυρόδεμα, λαμβάνεται υπόψη η απομείωση της αντοχής και της δυσκαμψίας του σκυροδέματος, αλλά η ανάκτηση της δυσκαμψίας του μετά το κλείσιμο των ρωγμών, σε θλίψη και εφελκυσμό.

Στα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζονται οι σχέσεις τάσης – παραμόρφωσης, σε ανακυκλική φόρτιση δοκιμής εφελκυσμού και θλίψης δίδονται στο Σχήμα 4.1. Στη δοκιμή αυτή η αντοχή του σκυροδέματος σε θλίψη λαμβάνεται 25 MPa, η αντοχή σε εφελκυσμό 3 MPa, το μέτρο Young $E = 29 \text{ GPa}$, ο λόγος Poisson $\nu = 0.2$ και η πυκνότητα $\rho = 2350 \text{ kg/m}^3$ (Dakoulas 2009).

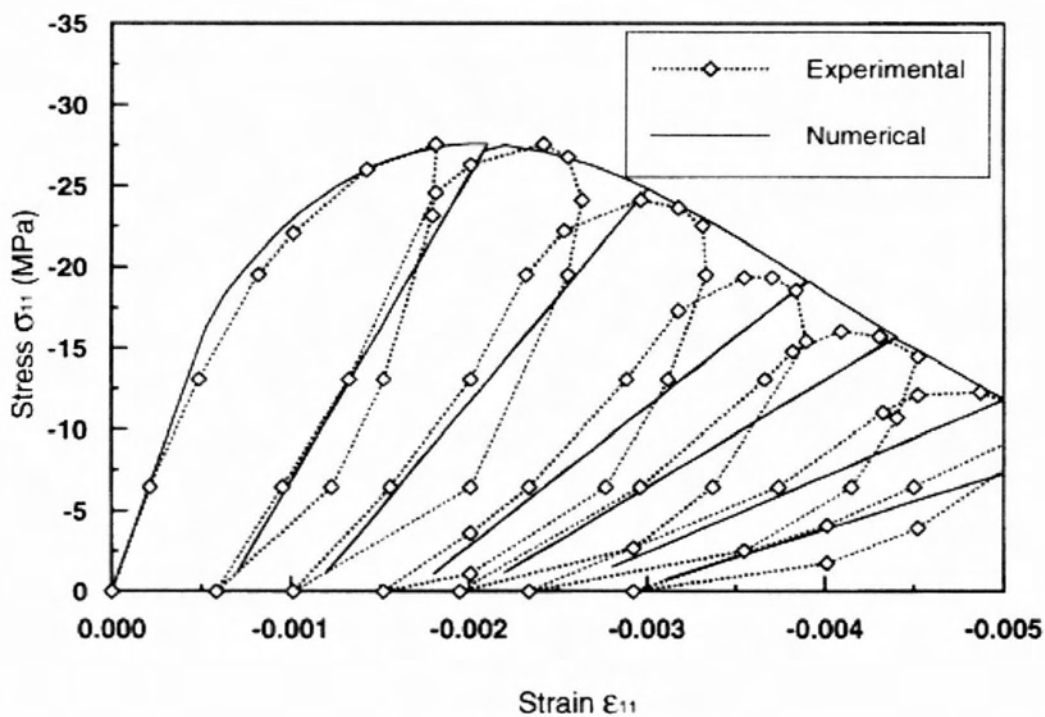


Σχήμα 4.1 Προσομοίωση της σχέσης τάσης-παραμορφωσης σκυροδέματος σε ανακυκλική φόρτιση (a) εφελκυσμός (b) θλίψη

Αντίστοιχες καμπύλες προσομοίωσης της σχέσης τάσης-παραμόρφωσης με πειραματικά δεδομένα δοκιμίων σκυροδέματος σε ανακυκλική φόρτιση (βλέπε Σχήμα 4.2 παρακάτω) δείχνουν μία αρκετά καλή συμφωνία μεταξύ προσομοιώματος και πειραματικών μετρήσεων, όπως παρουσιάζεται από τους Lee & Fenves. Οι καμπύλες αυτές αφορούν σε υλικό με αντοχή σε θλίψη $f_c = 27.6$ MPa, αντοχή σε εφελκυσμό $f_t = 3.48$ MPa, λόγο Poisson $\nu = 0.2$, μέτρο ελαστικότητας $E_t = 31.7$ GPa και $E_c = 31$ GPa (Lee & Fenves 1998).



(a) Tensile Loading



(b) Compressive Loading

Σχήμα 4.2 Σύγκριση αριθμητικής προσομοίωσης με πειραματικά δεδομένα για μονοαξονική κυκλική φόρτιση (Lee & Fenves 1998)

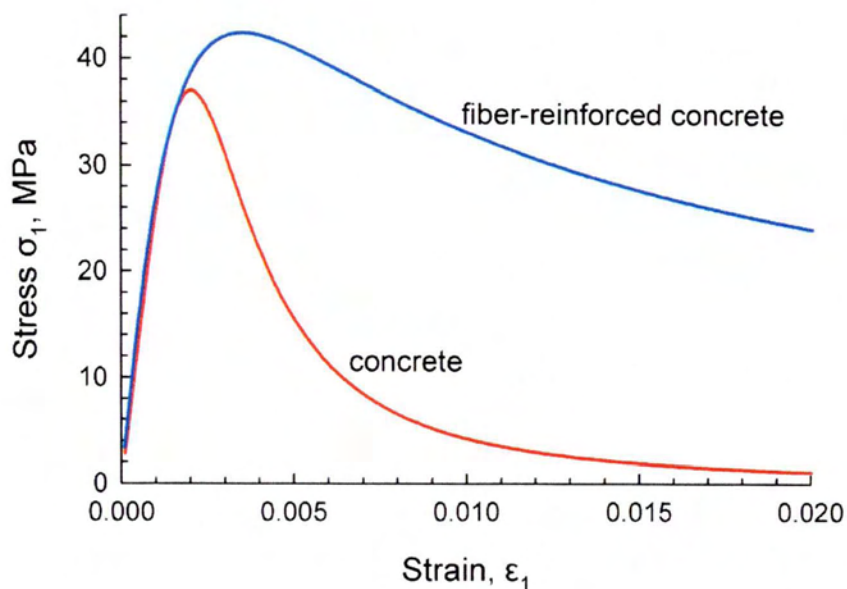
Είναι ενδιαφέρον να αναφερθεί ότι, η παραπάνω συμπεριφορά για τα εξαιρετικά υψηλά φράγματα με ανάντη πλάκα σκυροδέματος, μπορεί να βελτιωθεί αυξάνοντας την αντοχή και την ολκιμότητά τους, έτσι ώστε να μπορούν να εξυπηρετήσουν μεγαλύτερα ποσοστά εφελκυσμού χωρίς σημαντικές ρωγμές και μεγαλύτερες παραμορφώσεις λόγω συμπίεσης χωρίς θρυμματισμό. Για το σκοπό αυτό, η προσθήκη χαλύβδινων ινών βελτιώνει σημαντικά πολλές από τις μηχανικές ιδιότητες του κονιάματος και του σκυροδέματος, όπως αντοχή σε κρούση και σκληρότητα, αντοχή σε κάμψη, αντοχή εφελκυσμού και ικανότητα αντίστασης σε θραύση και ρήξη.

Η σχέση τάσεων-παραμορφώσεων του ινοπλισμένου σκυροδέματος εξαρτάται από την αντοχή σε θλίψη του χρησιμοποιημένου σκυροδέματος και του δείκτη όπλισης R_I , που δίνεται από τον τύπο:

$$R_I = w_f * l/d \quad (4.1)$$

όπου w_f είναι το βάρος ινών χάλυβα, l είναι το μήκος και d η διάμετρος

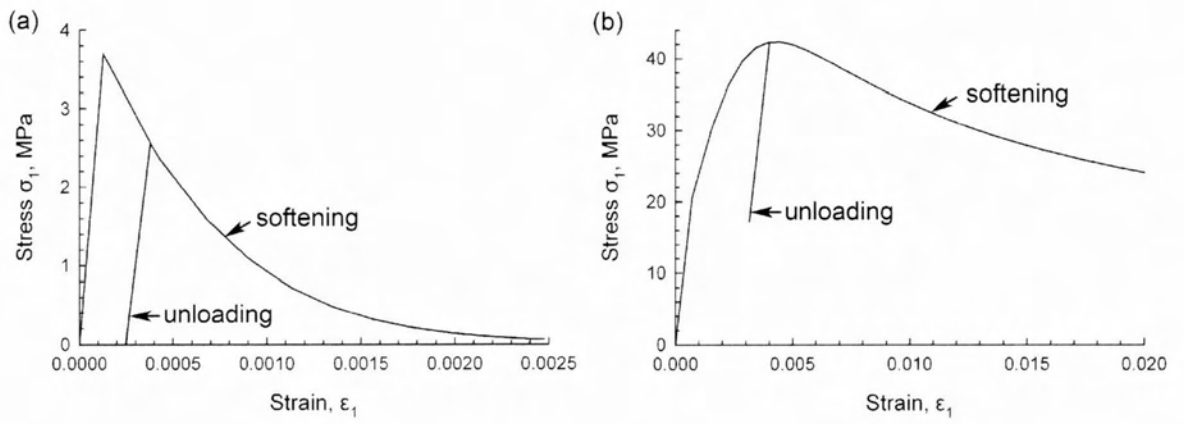
Στο Σχήμα 4.3 έχουμε το διάγραμμα της συμπεριφοράς τάσεων-παραμορφώσεων ενός κυβικού στοιχείου από ινοπλισμένο σκυρόδεμα και από άοπλο σκυρόδεμα σε μονοαξονική συμπίεση βασισμένο σε μια εκτενή πειραματικά δεδομένα από τον Nataraja (1999). Το άοπλο σκυρόδεμα έχει αντοχή σε θλίψη 37 MPa, ενώ το ινοπλισμένο έχει ενισχυτικό δεόκτη $R_I = 2.5\%$. Στην εικόνα 4.3, είναι προφανές ότι το ινοπλισμένο σκυρόδεμα έχει υψηλότερη ολκιμότητα σε σχέση με το άοπλο και ως εκ τούτου μπορεί να παραλάβει μεγαλύτερες παραμορφώσεις λόγω θλίψης που μπορούν να προκύψουν στην πλάκα. Αυτή η υψηλή πλαστιμότητα εμφανίζεται και στην περίπτωση του εφελκυσμού στην μονοαξονική δοκιμή.



Σχήμα 4.3 Σύγκριση συμπεριφοράς τάσεων- παραμορφώσεων ινοπλισμένου και άοπλου σκυροδέματος χρησιμοποιώντας κυβικά δοκίμια σε μονοαξονική συμπίεση με βάση το μοντέλο του Nataraja (1999).

Στην παρούσα ανάλυση, η πλάκα του σκυροδέματος του φράγματος έχει πυκνότητα $\rho=2350 \text{ kg/m}^3$, ινοπλισμένο σκυρόδεμα θλιπτικής αντοχής 42,4 MPa, αντοχή σε εφελκυσμό 3,7 MPa, συντελεστή ελαστικότητας Young = 29 GPa και λόγο Poisson =0.2.

Στο Σχήμα 4.4 δίδεται η προσομοίωση της συμπεριφοράς τάσεων-παραμορφώσεων των δύο κυβικών δοκιμίων σκυροδέματος σε μονοαξονική φόρτιση χρησιμοποιώντας το μοντέλο των Lee και Fenves για πλαστικές ζημιές, που αναφέρθηκε και πιο πάνω.



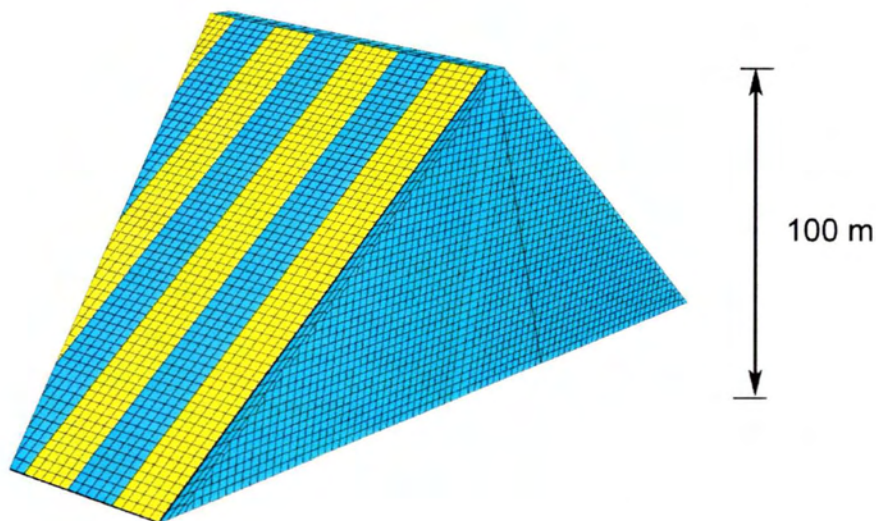
Σχήμα 4.4 Συμπεριφορά τάσεων-παραμορφώσεων ινοπλισμένου σκυροδέματος που λαμβάνονται από αριθμητικές προσομοιώσεις στην μονοαξονική δοκιμή.

Κεφάλαιο 5^ο

ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ ΛΙΘΟΡΡΙΠΗΣ ΜΕ ΑΝΑΝΤΗ ΠΛΑΚΑ ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

5.1 ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

Χρησιμοποιείται η γεωμετρία και οι ιδιότητες ενός φράγματος που έχει ύψος 100 m και μήκος στέψης 200 m. Στην Σχήμα 5.1 απεικονίζεται η αριθμητική διακριτοποίηση του φράγματος. Μόνο το ήμισυ του σώματος του φράγματος διακριτοποιείται εκμεταλλευόμενοι τη συμμετρία σε σχέση με την κεντρική διατομή. Η διατομή του επιχώματος χωρίζεται σε 3 κύριες ζώνες: **(α)** η λιθόρριπτη ζώνη 3B, **(β)** η λιθόρριπτη ζώνη 3C και **(γ)** η χαλικώδης ζώνη 2B. Η εργασία επικεντρώνεται στην μελέτη σεισμικής απόκρισης του φράγματος και της εντατικής κατάστασης και πιθανής ρηγμάτωσης της πλάκας σκυροδέματος για διάφορα σενάρια.



Σχήμα 5.1 Γεωμετρία των πεπερασμένων στοιχείων του φράγματος και της πλάκας.

5.2 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΚΑΙ ΠΛΗΡΩΣΗΣ ΤΗΣ ΛΕΚΑΝΗΣ

Για την ρεαλιστική πρόβλεψη της συμπεριφοράς της λιθορριπής και των χαλίκων χρησιμοποιείται το καταστατικό προσομοίωμα Duncan et al. (1970), το οποίο έχει προαναφερθεί στην περίπτωση του φράγματος της Μεσοχώρας. Οι ιδιότητες της λιθορριπής και παράμετροι του μοντέλου δίδονται στον Πίνακα 5.1. Για την δυναμική συμπεριφορά της λιθορριπής χρησιμοποιείται το υστερητικό προσομοίωμα που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 3.

Το ινοπλισμένο σκυρόδεμα της ανάντη πλάκας προσομοιώνεται με προσομοίωμα των Lee and Fenves (1998), που παρουσιάστηκε συνοπτικά στο Κεφάλαιο 4. Οι ιδιότητες του σκυροδέματος δίδονται στον Πίνακα 5.2.

Η αριθμητική ανάλυση διεξάγεται με τη χρήση του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS. Το σώμα επιχώματος διαιρείται σε 40 στρώματα για την προσομοίωση της σταδιακής κατασκευής. Τα κομμάτια της πλάκας διακριτοποιούνται χρησιμοποιώντας εξαεδρικά στερεά στοιχεία (C3D8). Ο οπλισμός τοποθετείται στο μέσο του πάχους της πλάκας και αποτελείται από ράβδους χάλυβα με διάμετρο 25 mm και σε απόσταση 20 cm κατά τις δύο κατευθύνσεις της πλάκας του σκυροδέματος. Κάθε κομμάτι της πλάκας παρουσιάζει τριβή μεταξύ της βάσης της και του στρώματος του χαλικιού, καθώς και μεταξύ των κατακόρυφων τοιχωμάτων των γειτονικών πλακών. Ο συντελεστής τριβής μεταξύ του σκυροδέματος και του χαλικιού είναι $\mu = 0,8$ και ο συντελεστής τριβής του σκυροδέματος είναι $\mu_c = 0,5$.

Η αριθμητική προσομοίωση της σταδιακής κατασκευής, πλήρωσης της λεκάνης και επιβολής της σεισμικής δόνησης πραγματοποιείται στα εξής 4 στάδια:

Στάδιο 1: Το επίχωμα κατασκευάζεται σταδιακά με 40 στρώσεις.

Στάδιο 2: Κατασκευάζεται η πλάκα ινοσκυροδέματος στην ανάντη πλευρά.

Στάδιο 3: Η στάθμη του νερού ανέρχεται σε υψόμετρο 98 m.

Στάδιο 4: Επιβάλλεται (δυναμική) καθίζηση στη στέψη του φράγματος της τάξεως του 1 m.

ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ	ΖΩΝΗ 3B	ΖΩΝΗ 3C	ΖΩΝΗ 2B
Πυκνότητα, ρ (kg / m^3)	2150	2150	2150
K	502	1004	377
K_{ur}	1255	2510	942
K_b	125	251	94
N	0.45	0.45	0.45
M	0.22	0.22	0.22
R_f	0.59	0.59	0.59
ϕ_0	51°	51°	51°
$\Delta\phi$	9°	9°	9°

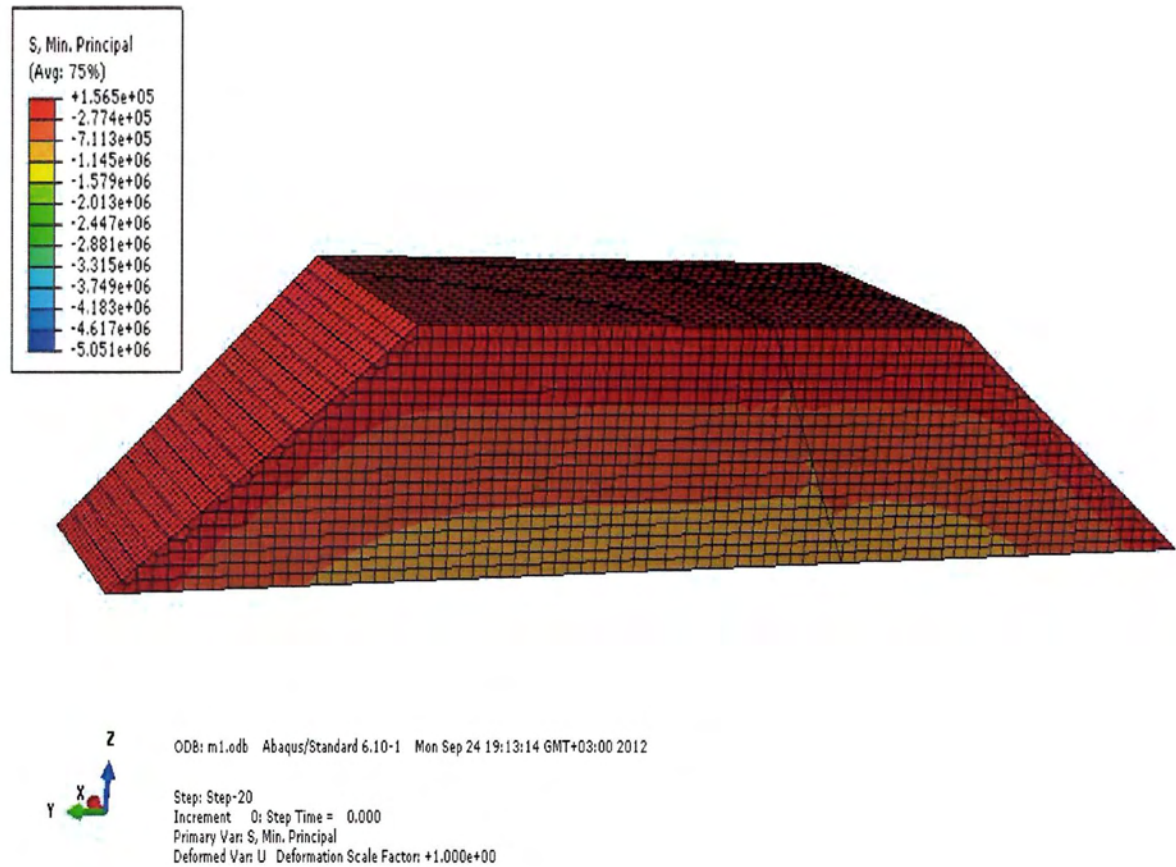
Πίνακας 5.1: Ιδιότητες και παράμετροι των υλικών του φράγματος της βασικής ανάλυσης

ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ	ΤΙΜΕΣ
Πυκνότητα ρ , (kg / m^3)	2350
Μέτρο ελαστικότητας Young, E , (GPa)	29
Λόγος Poisson , ν	0.2
Θλιπτική Αντοχή (MPa)	42.5
Εφελκυστική αντοχή (MPa)	3.7
Συντελεστής τριβής σκυροδέματος-σκυροδέματος, μ_c	0.5
Συντελεστής τριβής σκυροδέματος-χαλίκων, μ_c	0.7

Πίνακας 5.2 Ιδιότητες σκυροδέματος.

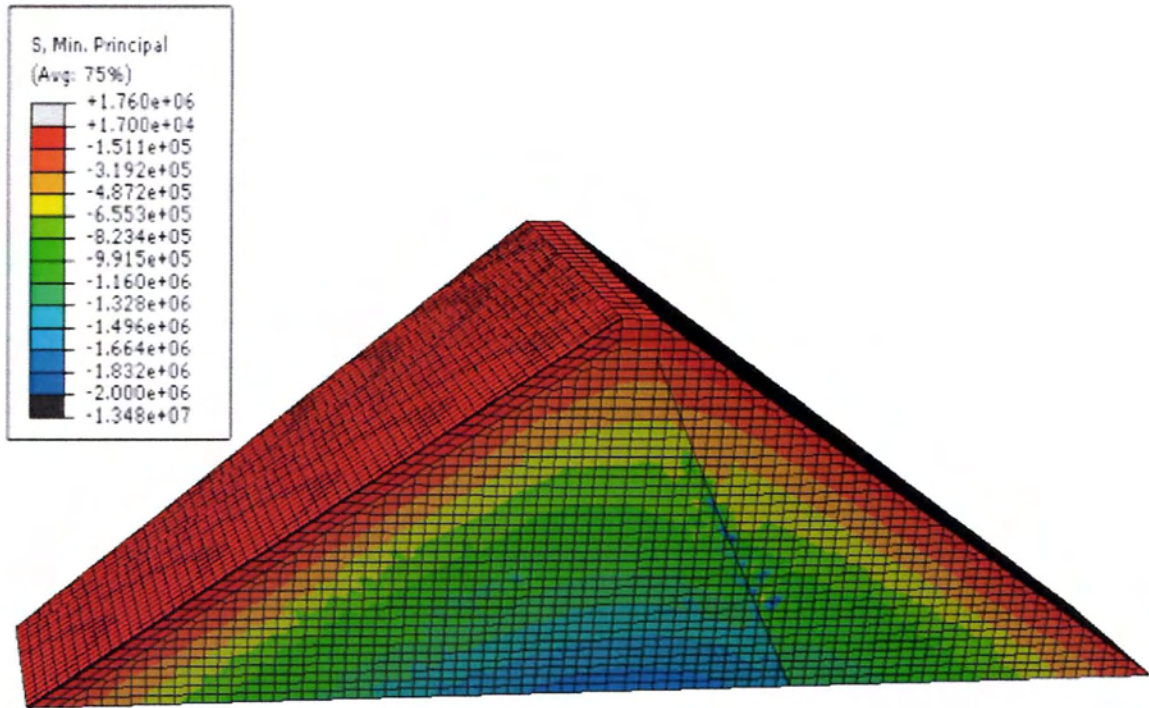
5.2.1 ΣΤΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

ΦΑΣΗ ΤΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΤΟΥ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ.



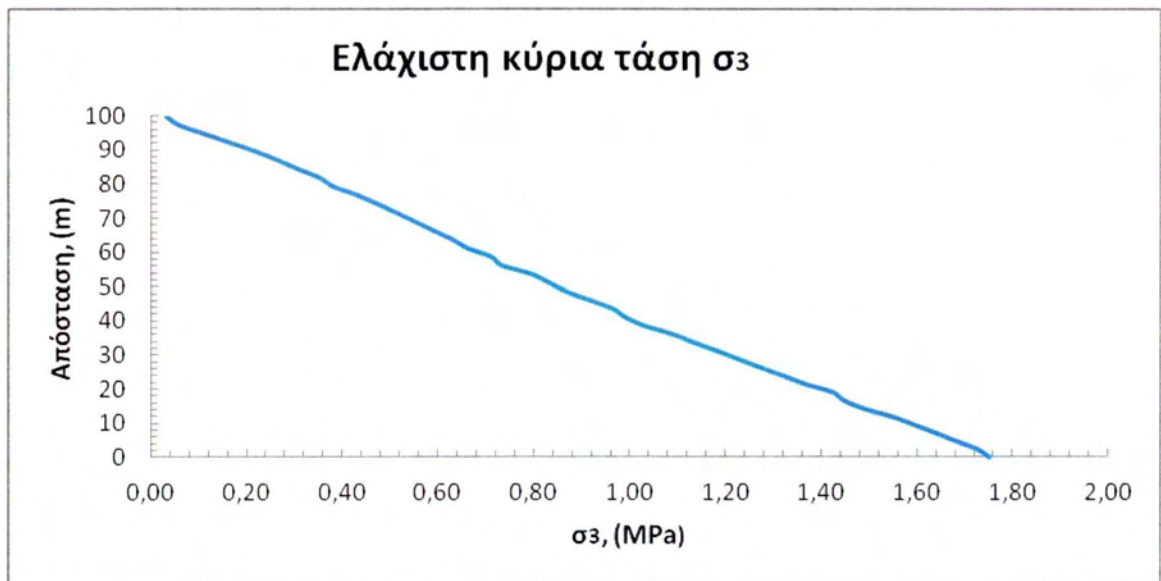
Σχήμα 5.2.1: Κατανομή ελάχιστης κύριας τάσης κατά την φάση κατασκευής.

Το Σχήμα 5.2.1 του σχήματος εκφράζει την φάση κατασκευής του φράγματος κατά την οποία το ύψος του επιχώματος είναι $h = 50$ m. Στην εικόνα αναπτύσσονται θλιπτικές τάσεις λόγω του ιδίου βάρους των στρώσεων του επιχώματος, που προκαλούν καθιζήσεις. Σημειώνεται ότι η θλίψη στο πρόγραμμα ABAQUS είναι αρνητική, οπότε η ελάχιστη κύρια τάση είναι η μέγιστη θλίψη. Το Σχήμα 5.2.2 παρουσιάζει την κατανομή των θλιπτικών τάσεων ως προς το ύψος του φράγματος για $h = 100$ m. Η μέγιστη τιμή της θλίψης εμφανίζεται στο μέσο της βάσης του φράγματος.



Σχήμα 5.2.2: Κατανομή ελάχιστης κύριας τάσης μετά την ολοκλήρωση της κατασκευής του φράγματος.

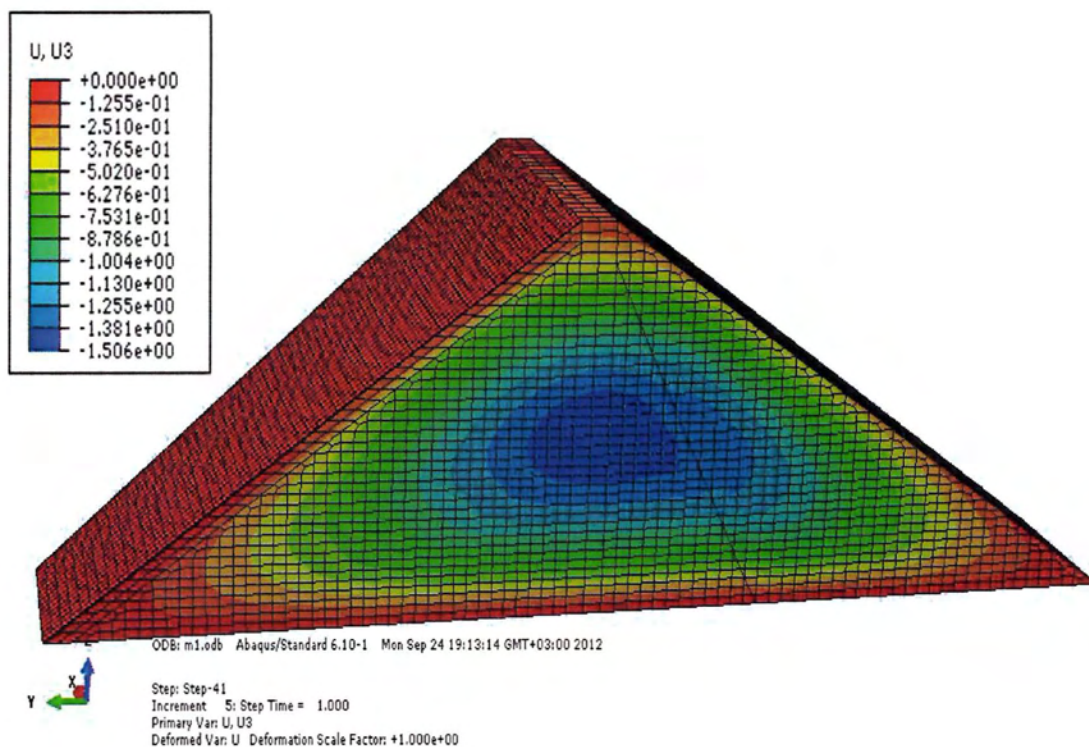
Στο σχήμα 5.2.2 δίδεται η κατανομή της ελάχιστης κύριας τάσης σ_3 μετά την ολοκλήρωση της κατασκευής του επιχώματος. Με βάση το μοντέλο του Duncan, η δυσκαμψία (που εκφράζεται με τα μέτρα διάτμησης και ελαστικότητας) μεταβάλλεται σαν συνάρτηση της περιβάλλουσας τάσης. Στο διάγραμμα του σχήματος 5.2.3 δίδεται η κατανομή της ελάχιστης κύριας τάσης σ_3 στο μέσο της κεντρικής διατομής. Η μέγιστη τιμή της θλίψης εμφανίζεται στον πόδα του φράγματος και η ελάχιστη τιμή στη στέψη.



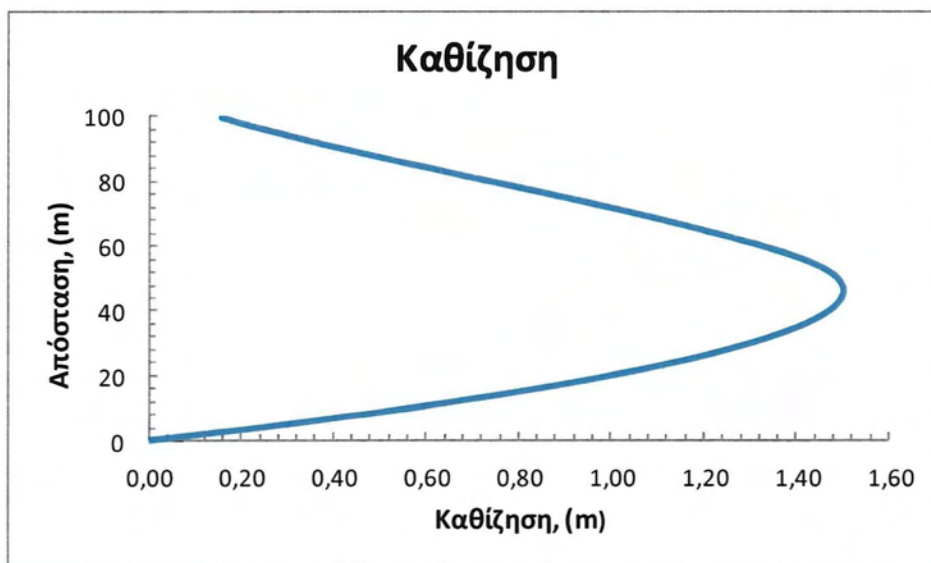
Σχήμα 5.2.3: Διάγραμμα ελάχιστης κύριας τάσης καθ' ύψος του φράγματος.

Στο σχήμα της εικόνας 5.2.4 οι μεγαλύτερες καθιζήσεις εμφανίζονται εσωτερικά στο κεντρο του φράγματος και είναι ίση προς περίπου 1.5 m.

Στο σχήμα 5.2.5 παρατηρείται μια αύξηση των τιμών των καθιζήσεων στο μέσο του ύψους του φράγματος. Η τιμή της μέγιστης καθιζησης θεωρείται ικανοποιητική.

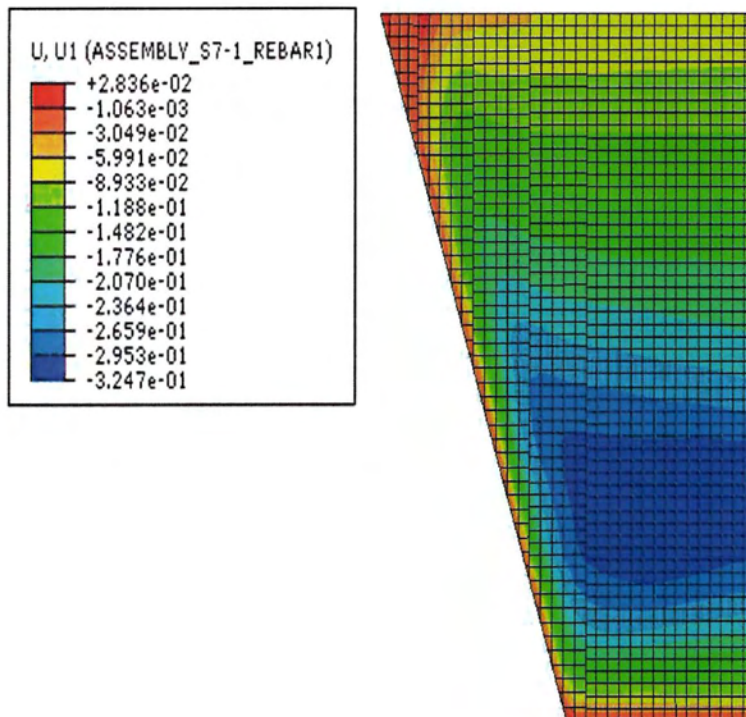


Σχήμα 5.2.4: Κατανομή της καθίζησης καθ' ύψος του φράγματος.

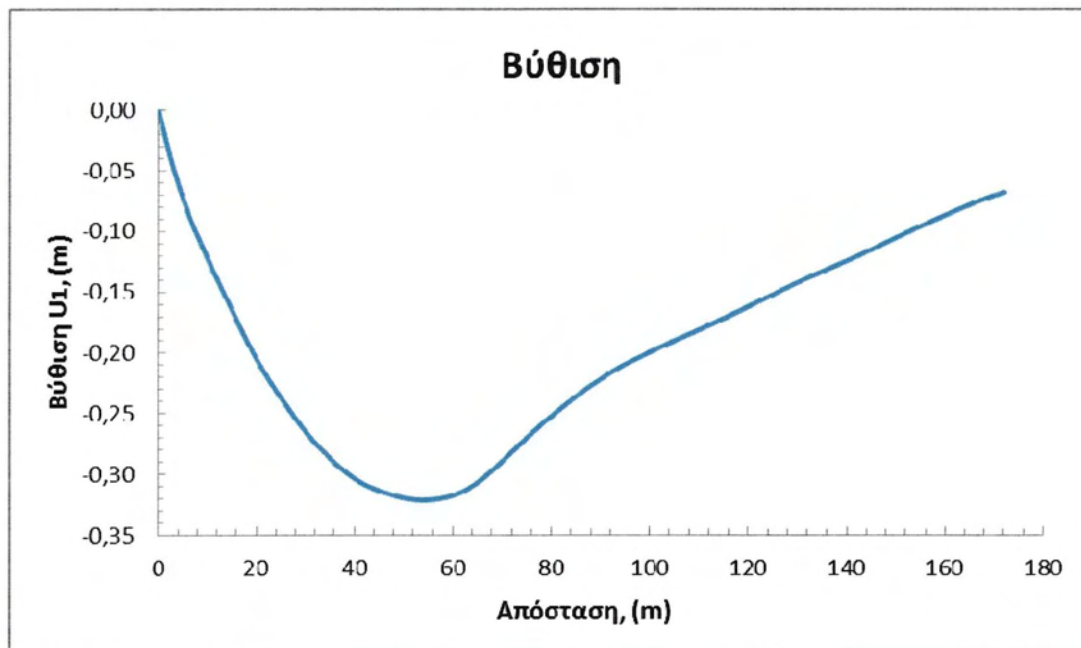


Σχήμα 5.2.5: Διάγραμμα κατανομής καθιζήσεων καθ' ύψος του φράγματος στο μέσο της κεντρικής διατομής.

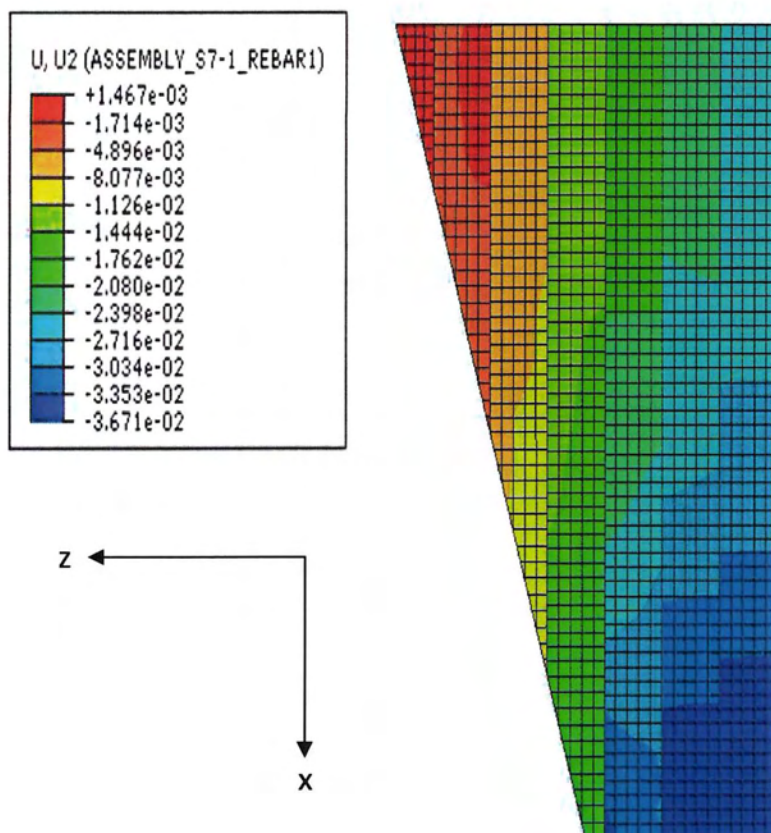
ΜΕΤΑ ΤΗΝ ΠΛΗΡΩΣΗ ΤΗΣ ΛΕΚΑΝΗΣ ΜΕ ΝΕΡΟ.



Σχήμα 5.2.6: Κατανομή της βύθισης της πλάκας μετά την πλήρωση της λεκάνης.



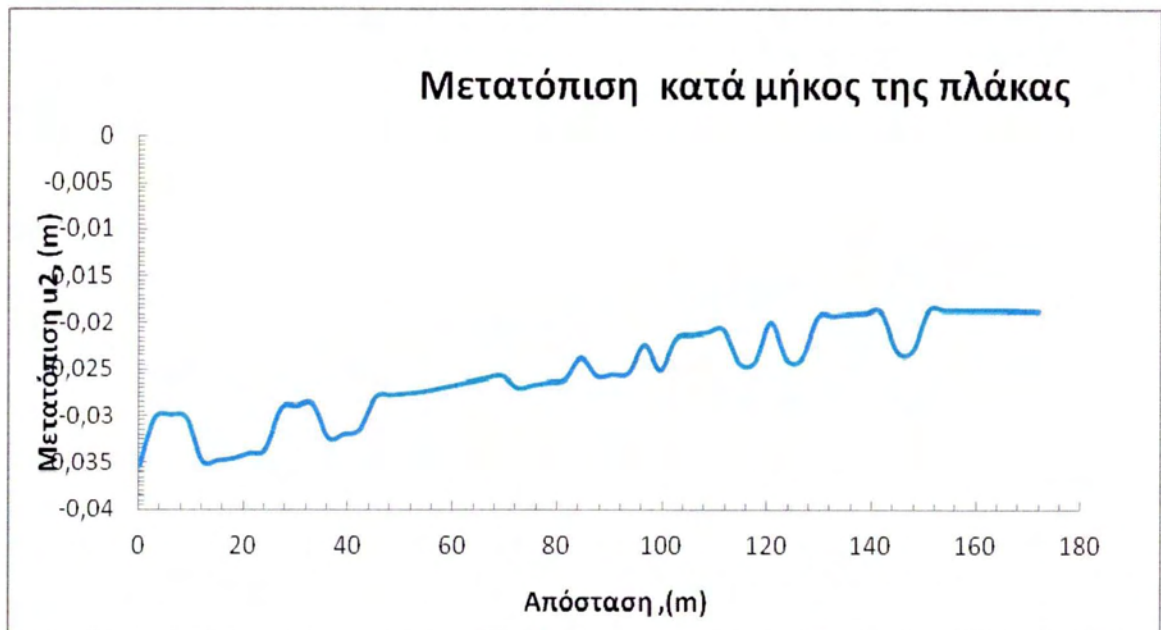
Σχήμα 5.2.7: Διάγραμμα βύθισης κατά μήκος της πλάκας 7 (κεντρική διατομή) μετά την πλήρωση της λεκάνης.



Σχήμα 5.2.8: Κατανομή των μετακινήσεων κατά μήκος των πλακών (κατεύθυνση x).

Στο Σχήμα 5.2.6 παρουσιάζεται η μέγιστη τιμή βύθισης στο κέντρο των πλακών, αφού η συγκεκριμένη περιοχή συνδυάζει σημαντικό φορτίο νερού και κάπως πιο μειωμένη δυσκαμψία της υποκείμενης στρώσης σε σχέση με την δυσκαμψία κοντά στον πόδα. Η κατανομή της βύθισης στην πλάκα 7 δίδεται στο διάγραμμα 5.2.7. Η μέγιστη βύθιση είναι 30 cm, μια τιμή που συμφωνεί με εμπειρικές μετρήσεις.

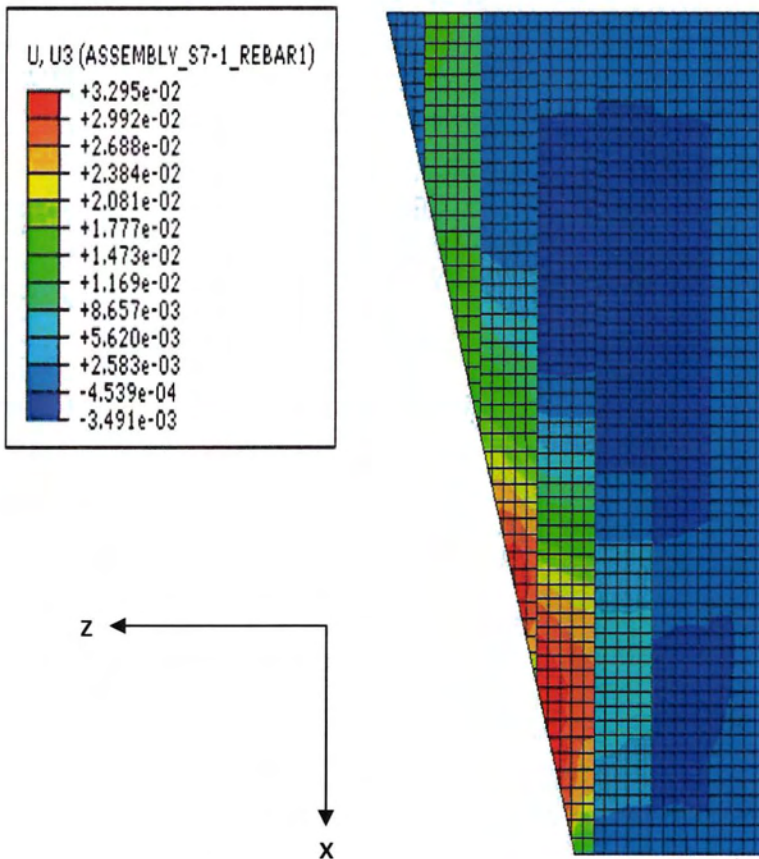
Στο Σχήμα 5.2.8 παρατηρείται ότι δεν υπάρχουν σημαντικές μετατοπίσεις των πλακών στο αντέρεισμα και στο μέσο του φράγματος. Οι μέγιστες μετακινήσεις των πλακών είναι στον πόδα της πλάκας 7 και είναι περίπου 3.7 cm προς την στέψη. Παρατηρήσεις σε πραγματικά φράγματα επιβεβαιώνουν ότι οι μετατοπίσεις στην κατεύθυνση x (βλέπε Σχήμα 5.2.8) λόγω πλήρωσης της λεκάνης γίνονται προς την στέψη.



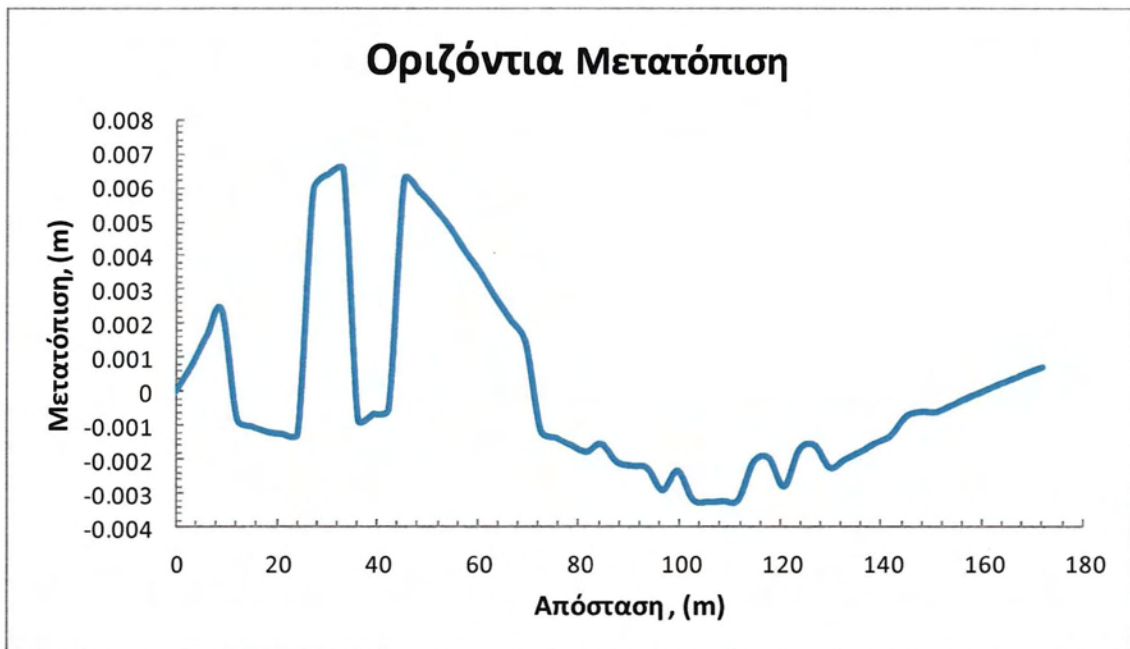
Σχήμα 5.2.9: Διάγραμμα μετατόπισης κατά μήκος της πλάκας 7 μετά την πλήρωση της λεκάνης.

Στο σχήμα 5.2.9 δίδεται η μεταβολή της μετακίνησης στην κατεύθυνση x κατά μήκος της πλάκας 7. Λόγω του φορτίου που ασκείται και της μεγάλης τριβής στη βάση της πλάκας, η λιθορριπή τραβά την πλάκα προς τα κατάντη, με αποτέλεσμα να ανοίγει στο κάτω μέρος ο αρμός με μέγεθος ανοίγματος 3.7 cm. Το μέγεθος του ανοίγματος δεν είναι υπερβολικό αφού επιτρέπεται να φτάσει μέχρι 10 cm. Μετά από την τιμή αυτή υπάρχει διαρροή στο εσωτερικό του φράγματος.

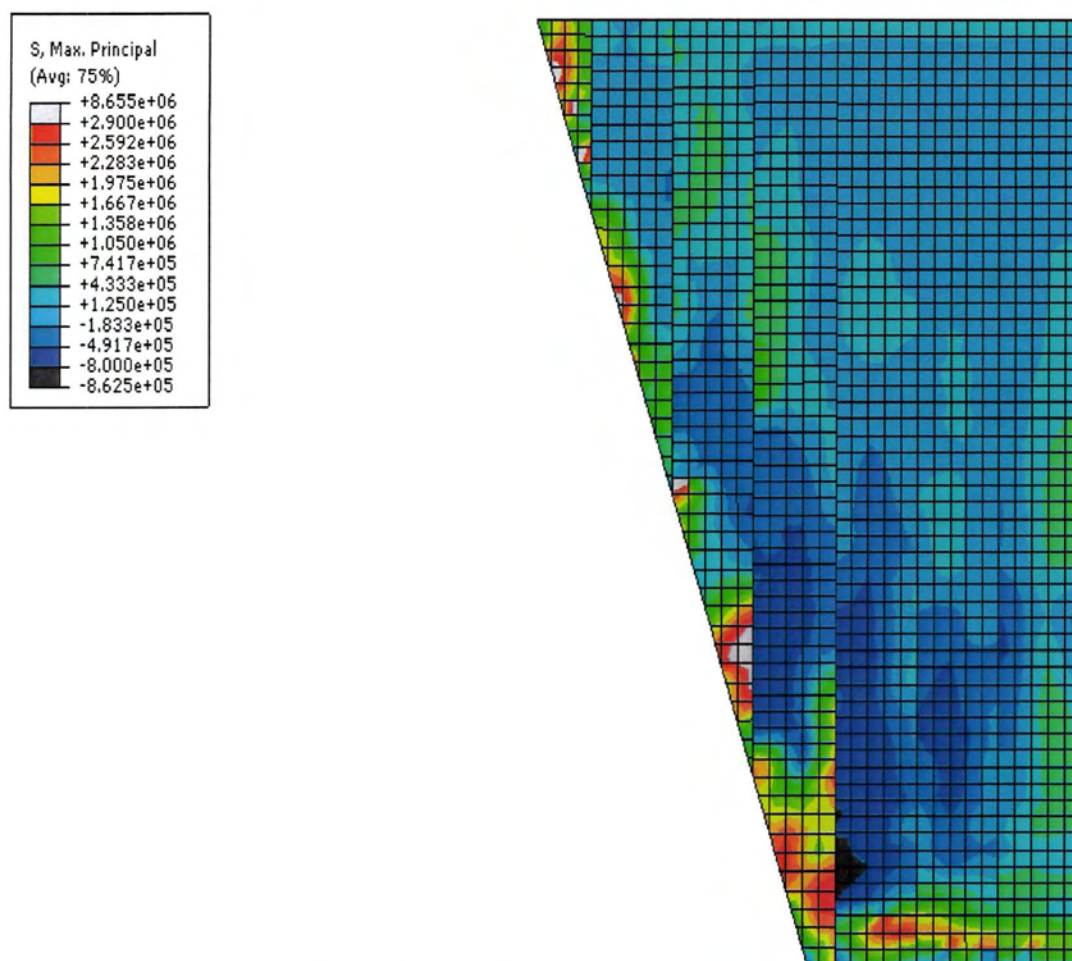
Το σχήμα 5.2.10 δίδει την κατανομή των μετατοπίσεων στην κατεύθυνση z στο επίπεδο της πλάκας μετά την πλήρωση της λεκάνης. Οι τιμές των μετατοπίσεων υποδηλώνουν στροφή των πλακών προς τα μέσα. Στο κέντρο οι μετατοπίσεις είναι αμελητέες λόγω συμμετρίας της πλάκας, στα άκρα λίγο μεγαλύτερες (έως 3.3 cm) χωρίς όμως να επηρεάζουν σημαντικά τη συμπεριφορά των πλακών. Στο σχήμα 5.2.11 δίδεται η μεταβολή της οριζόντιας μετακίνησης της πλάκας 7 (κεντρική διατομή). Η μετακίνηση είναι αμελητέα λόγω συμμετρίας ως προς την κεντρική διατομή.



Σχήμα 5.2.10: Κατανομή των οριζόντιων μετατοπίσεων της πλάκας (κατευθ. z).

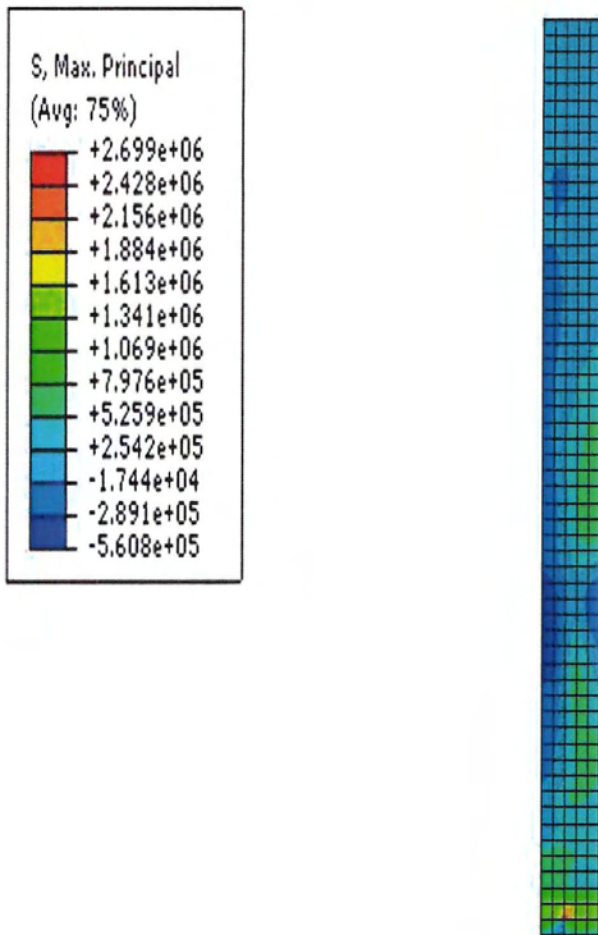


Σχήμα 5.2.11: Οριζόντια μετατόπιση στην πλάκα 7 μετά την πλήρωση της λεκάνης.

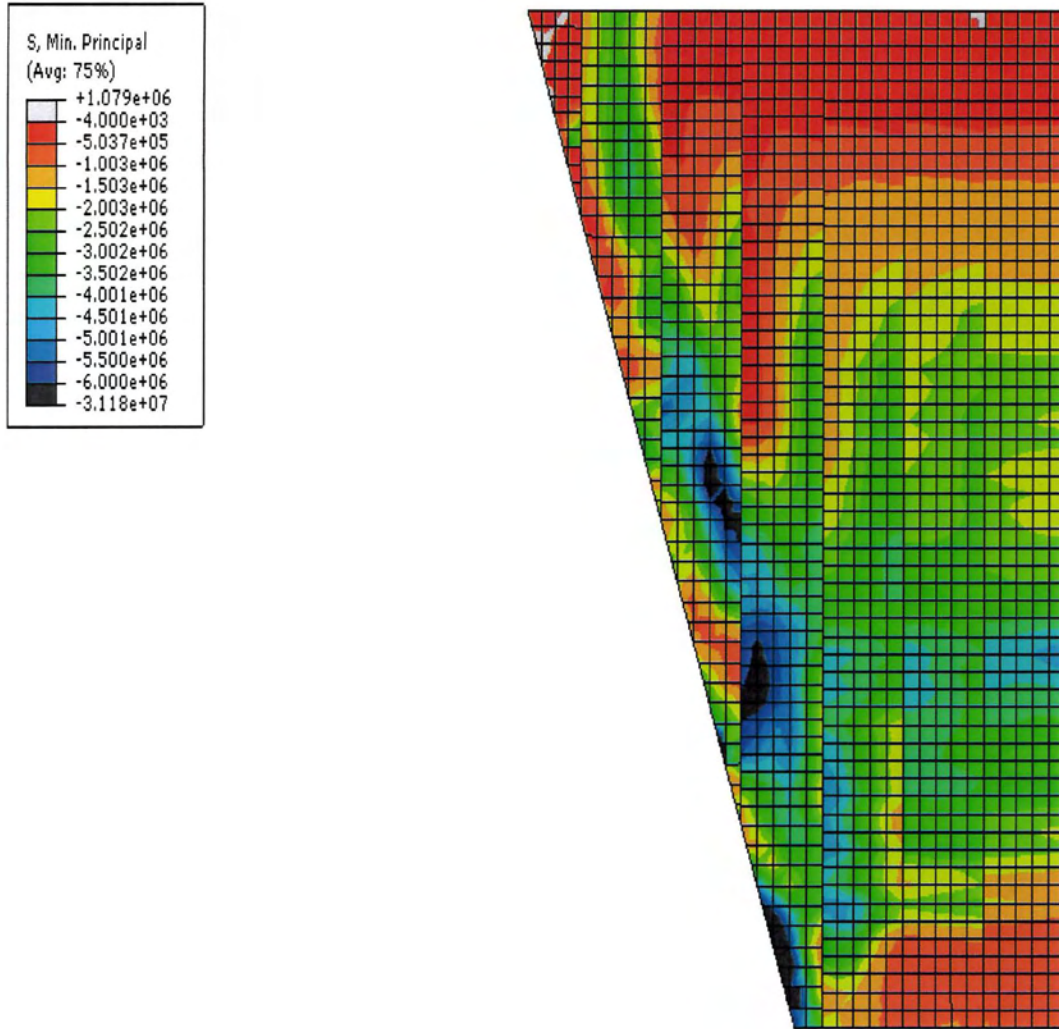


Σχήμα 5.2.12 Κατανομή της μέγιστης κύριας τάσης στην πλάκα μετά την πλήρωση της λεκάνης.

Στο σχήμα 5.2.12 δίδεται η κατανομή της μέγιστης κύριας τάσης στην πλάκα. Εμφανίζονται σημαντικές εφελκυστικές τάσεις στη βάση και κοντά στο αριστερό αντέρεισμα, με μέγιστες τιμές από 2,9 MPa έως 3,7 MPa. Εκεί όπου υπερβαίνεται η εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος δημιουργείται πλαστική παραμόρφωση. Στην υπόλοιπη επιφάνεια αναπτύσσονται θλιπτικές τάσεις των οποίων το μέγεθος δεν είναι σημαντικό. Στο Σχήμα 5.2.13 δίδεται η κατανομή της μέγιστης κύριας τάσης στην πλάκα 7.



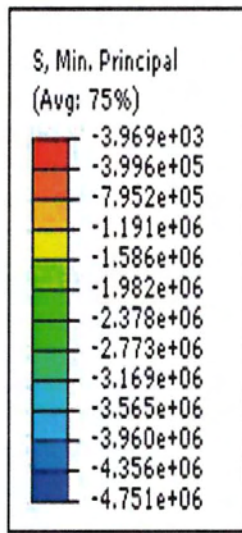
Σχήμα 5.2.13: Κατανομή μέγιστης κύριας τάσης σ_1 κατά μήκος της πλάκας 7 μετά την πλήρωση της λεκάνης.



Σχήμα 5.2.14: Κατανομή ελάχιστης κύριας τάσης στην πλάκα σκυροδέματος μετά την πλήρωση της λεκάνης

Στο σχήμα 5.2.14 δίδεται η κατανομή της ελάχιστης κύριας τάσης στην πλάκα. Η μέγιστες θλιπτικές τάσεις (μπλε και μαύρο χρώμα) εμφανίζονται κοντά στο αντέρεισμα και στο μέσο της πλάκας. Η μέγιστη τιμή είναι μικρότερη από 8 MPa (αν και σε κάποιους ελάχιστους κόμβους λαμβάνει μεγαλύτερες τιμές λόγω τοπικών αριθμητικών σφαλμάτων άνευ σημασίας).

Στο σχήμα 5.2.15 η μέγιστη τιμή της ελάχιστης κύριας τάσης εμφανίζεται περίπου στο μέσο του μήκους της πλάκας 7. Η πλάκα 7 εμφανίζει μέγιστη τιμή θλίψης στην περιοχή που αντιστοιχεί σε ύψος περίπου $0.4H$, όπου H είναι το ύψος του φράγματος. Οι τιμές των θλιπτικών τάσεων που αναπτύσσονται δεν είναι σημαντικές.

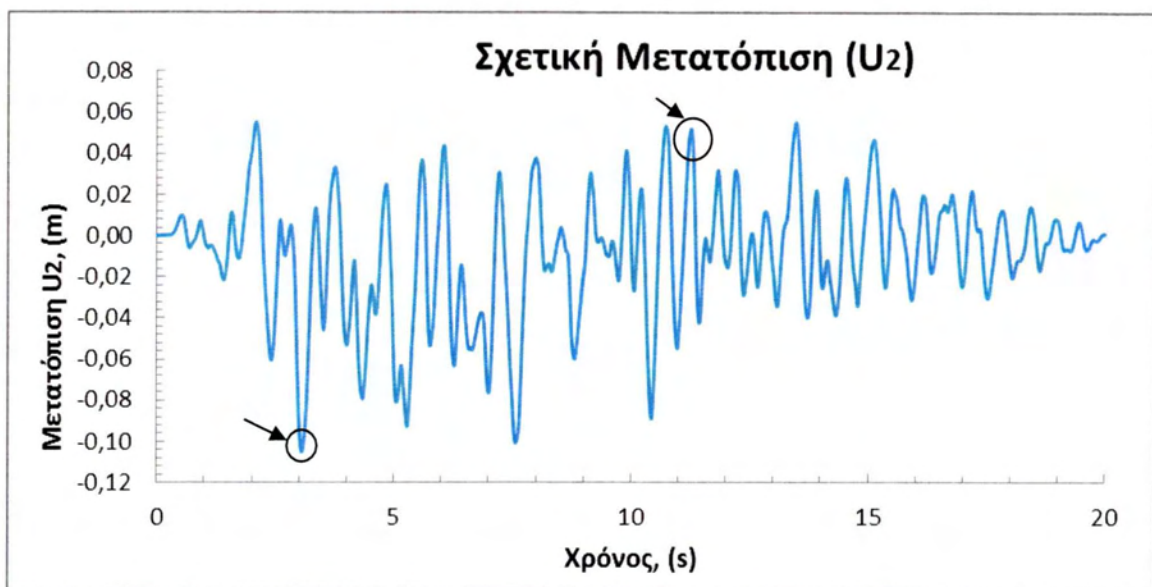


Σχήμα 5.2.15: Κατανομή ελάχιστης κύριας τάσης σ_3 κατά μήκος της πλάκας 7 μετά την πλήρωση της λεκάνης.

5.3 ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ – ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία έγιναν δύο σεισμικές αναλύσεις με την ίδια σεισμική διέγερση. Η πρώτη έγινε θεωρώντας ότι δεν υπάρχει δυναμική καθίζηση και η δεύτερη θεωρώντας μία δυναμική καθίζηση με μέγιστη τιμή ίση προς 1 m στο μέσο της στέψης.

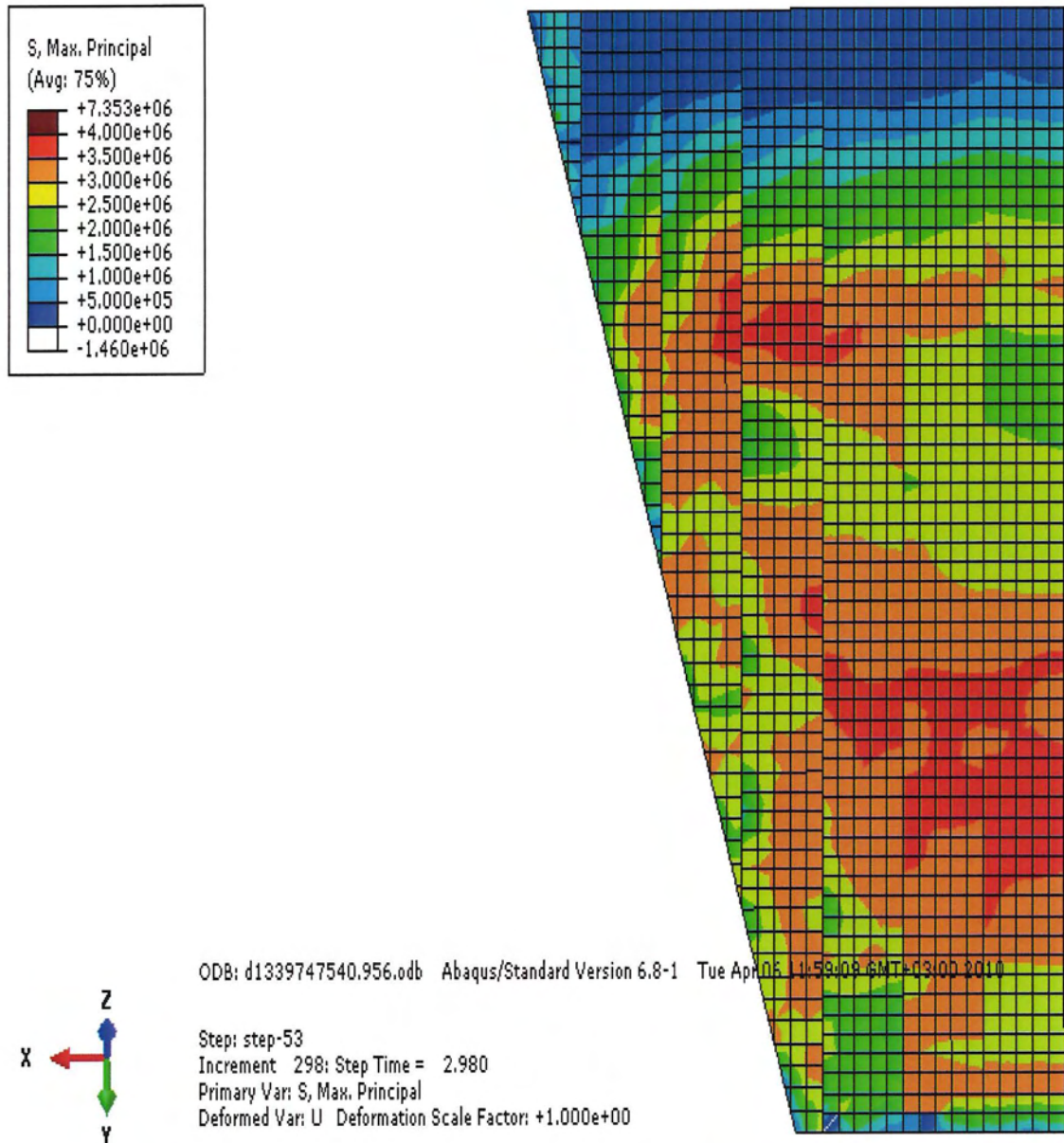
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΧΩΡΙΣ ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΚΑΘΙΖΗΣΗ



Σχήμα 5.3.1: Διάγραμμα σχετικής μετατόπισης (μέσου στέψης ως προς τη βάση) σε σχέση με το χρόνο για σεισμική διέγερση χωρίς δυναμική καθίζηση.

Η σχετική μετατόπιση του μέσου της στέψης ως προς τη βάση του φράγματος δίδεται στο σχήμα 5.3.1. Τα σημεία που υποδεικνύονται στο παραπάνω διάγραμμα εκφράζουν την χρονική στιγμή που μπορεί να εμφανιστούν η μέγιστη θλίψη και αντίστοιχα ο μέγιστος εφελκυσμός. Επίσης τα πρόσημα των σχετικών μετατοπίσεων εκφράζουν την κατεύθυνση κίνησης του φράγματος. Οι αρνητικές τιμές δηλώνουν κίνηση προς τα κατόντη (που οδηγούν σε μέγιστο εφελκυσμό) και οι θετικές τιμές της σχετικής μετατόπισης κίνηση προς τα ανάντη (που οδηγούν σε μέγιστη θλίψη).

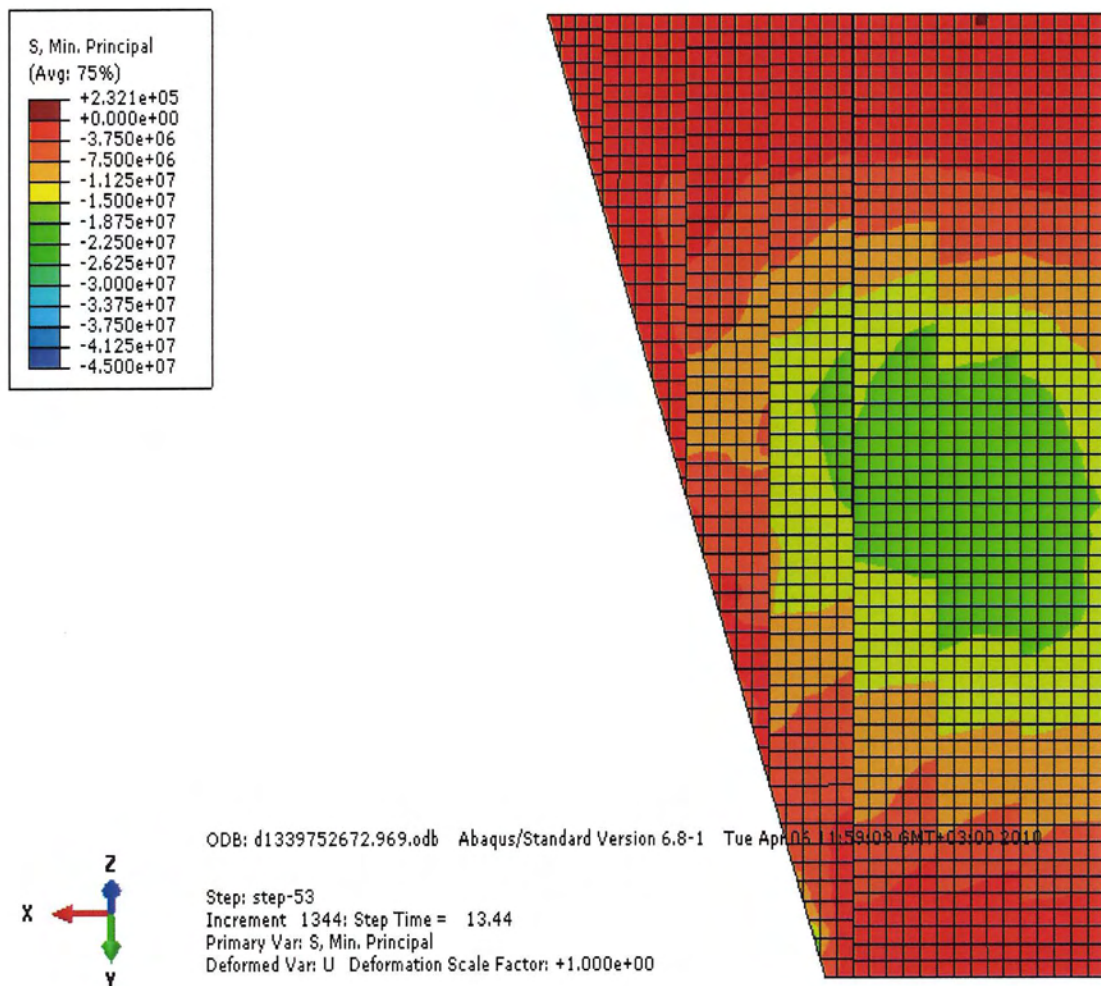
Μέγιστη κύρια εφελκυστική τάση σ_1



Σχήμα 5.3.2: Κατανομή της μέγιστης κύριας τάσης (μέγιστος εφελκυσμός) για χρόνο $t = 2.98\text{sec}$.

Στο σχήμα 5.3.2 δίδεται η κατανομή της μέγιστης κύριας τάσης (μέγιστος εφελκυσμός) για χρόνο $t = 2.98\text{ sec}$. Η μέγιστη τιμή της σ_1 εμφανίζεται κυρίως στην κέντρο των πλακών. Στη στέψη οι εφελκυστικές τάσεις είναι αμελητέες.

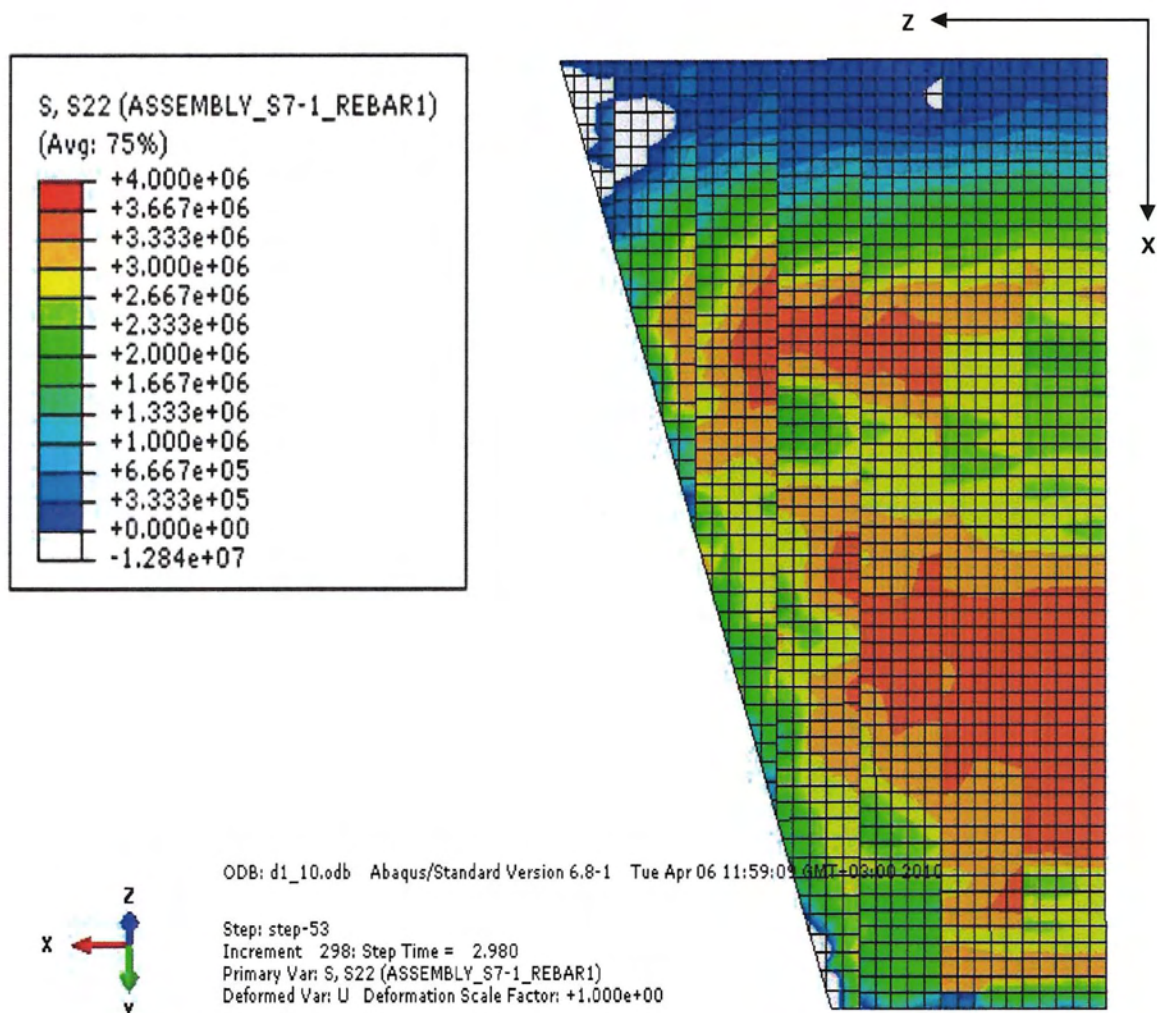
Ελάχιστη κύρια θλιπτική τάση σ_3



Σχήμα 5.3.3: κατανομή της ελάχιστης κύριας τάσης (μέγιστη θλίψη) για $t = 13.44$ sec

Στο σχήμα 5.3.3 δίδεται η κατανομή της ελάχιστης κύριας τάσης (μέγιστη θλίψη) για χρόνο $t = 2.98$ sec. Παρατηρούνται θλιπτικές τάσεις σε όλη την επιφάνεια κατά μήκος των πλακών, με τις μέγιστες τιμές να εμφανίζονται στο κέντρο. Η μέγιστη τιμή είναι περίπου 27 MPa, πολύ πιο κάτω από την αντοχή σε θλίψη.

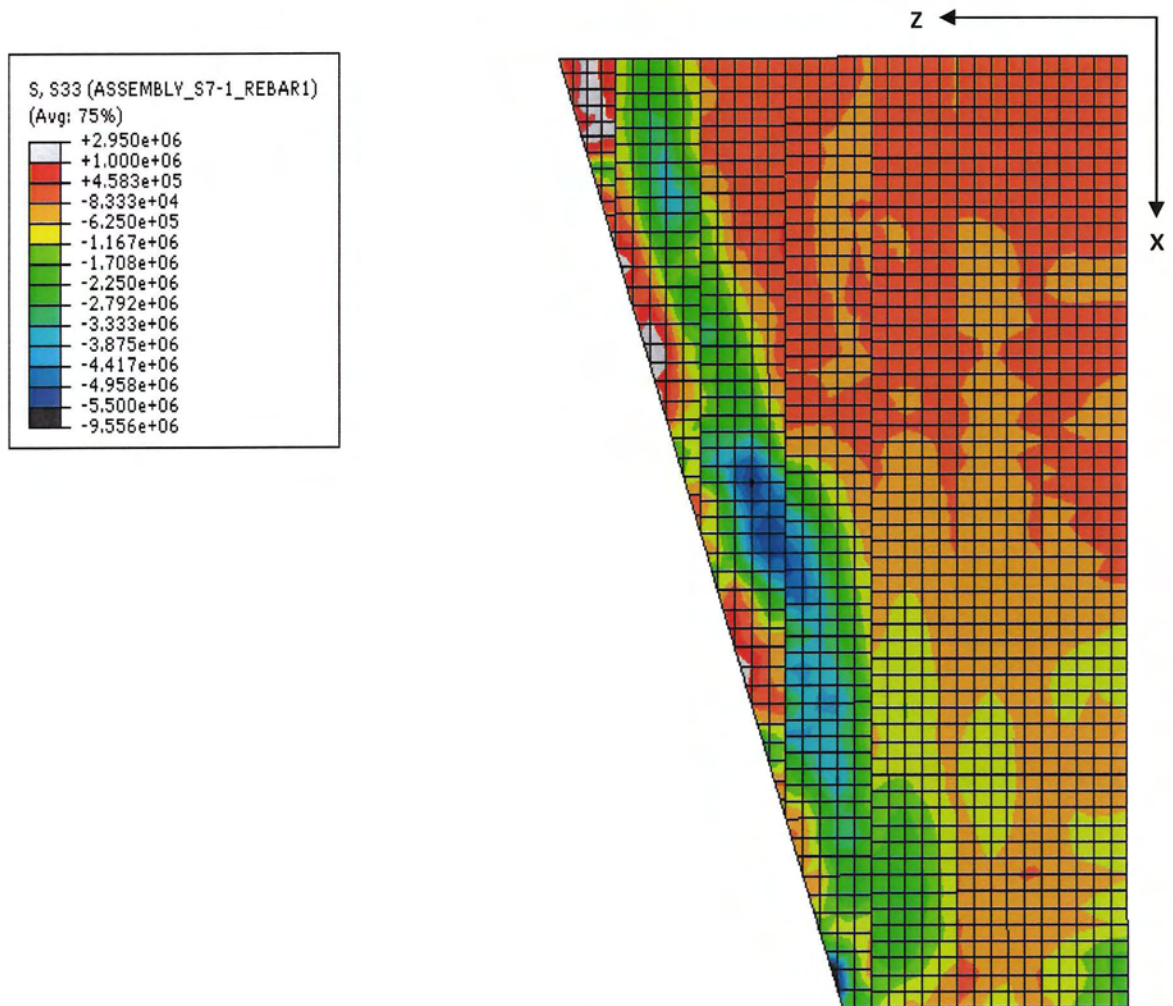
σ_{22} (για το χρόνο που εμφανίζεται max σ_1)



Σχήμα 5.3.4: Κατανομή τάσεων σ_{22} κατά μήκος των πλακών για χρόνο $t = 2.98\text{sec}$.

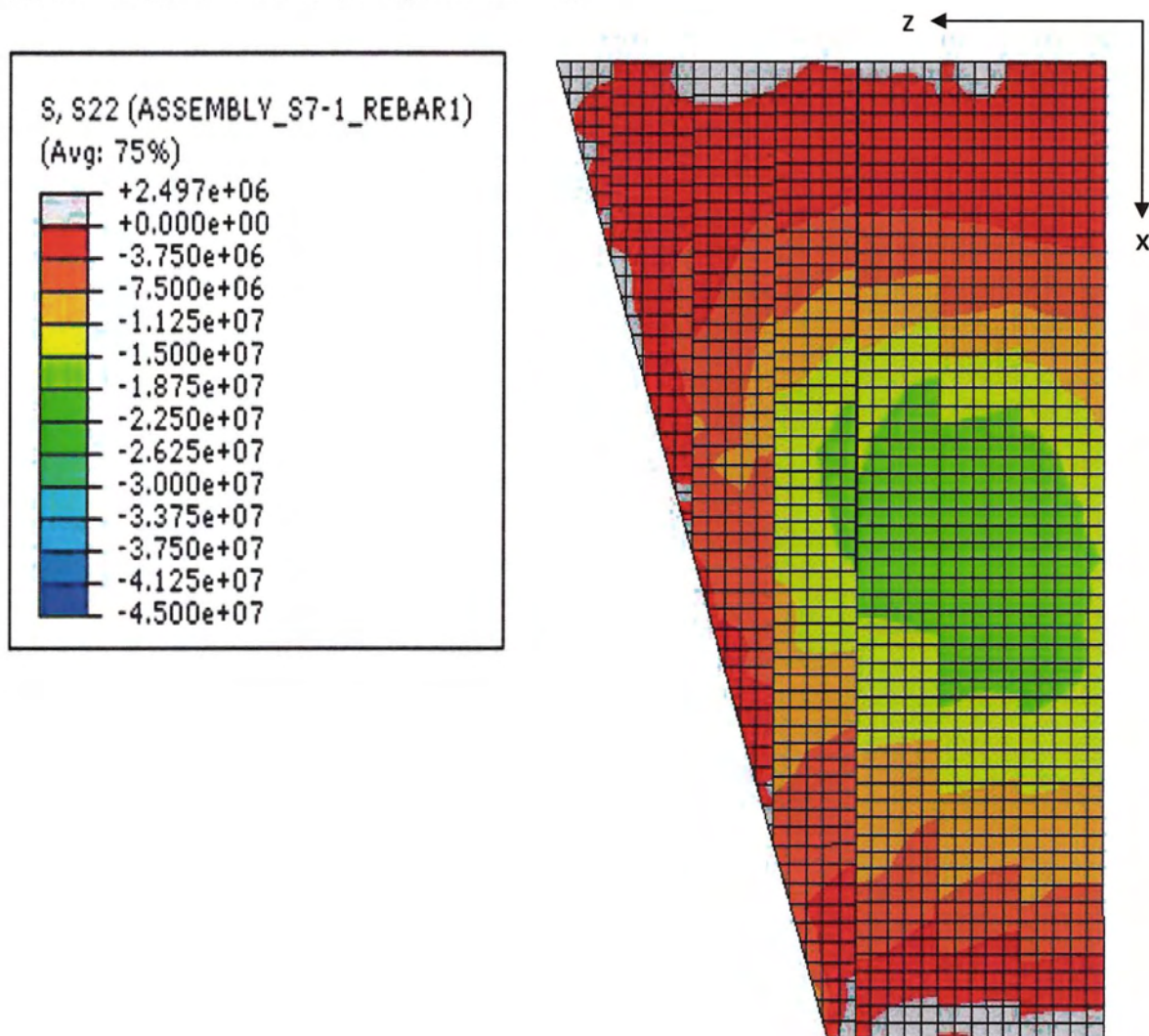
Τα Σχήματα 5.3.4 και 5.3.5 δίδουν η κατανομή της ορθής τάσης σ_{22} και σ_{33} στις κατευθύνσεις x και z , αντίστοιχα (βλέπε Σχήμα 5.3.4) την στιγμή του μέγιστου εφελκυσμού, δηλαδή $t = 2.98 \text{ sec}$. Από την εξέταση των δύο σχημάτων, σε σχέση με το σχήμα το Σχήμα 5.3.2 προκύπτει ότι ο μέγιστος εφελκυσμός προκύπτει με μεγάλη συμβολή της σ_{22} λόγω μέγιστης επιμήκυνσης και κάμψης της πλάκας για την στιγμή $t = 2.98 \text{ sec}$.

σ_{33} (για το χρόνο που εμφανίζεται max σ_1)



Σχήμα 5.3.5: Κατανομή των τάσεων σ_{33} κατά μήκος των πλακών για χρόνο $t = 2.98\text{sec}$.

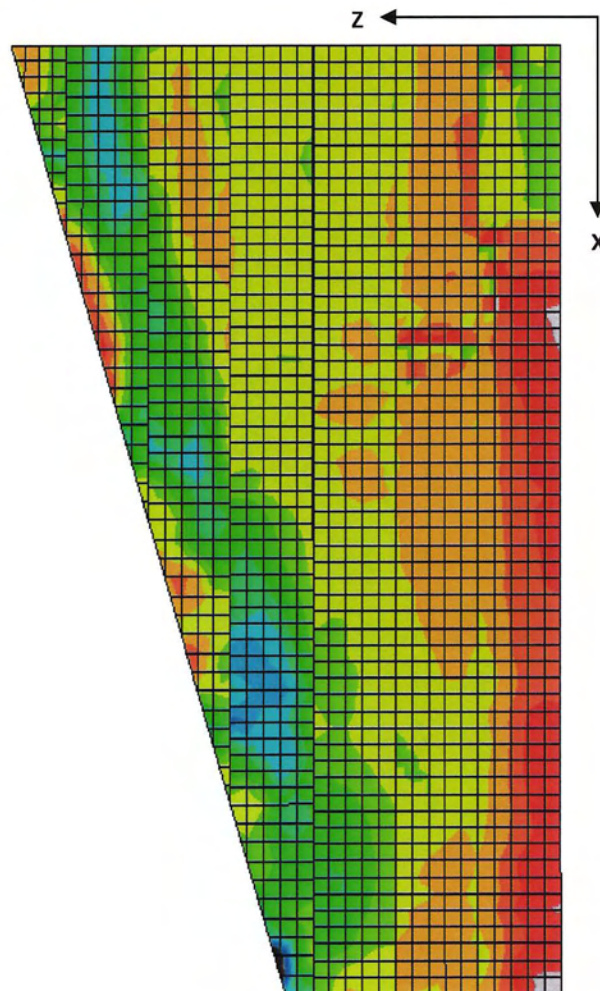
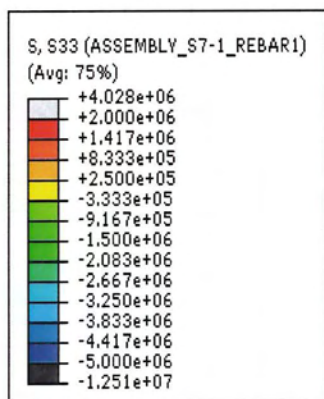
σ_{22} (για το χρόνο που εμφανίζεται $\min \sigma_3$)



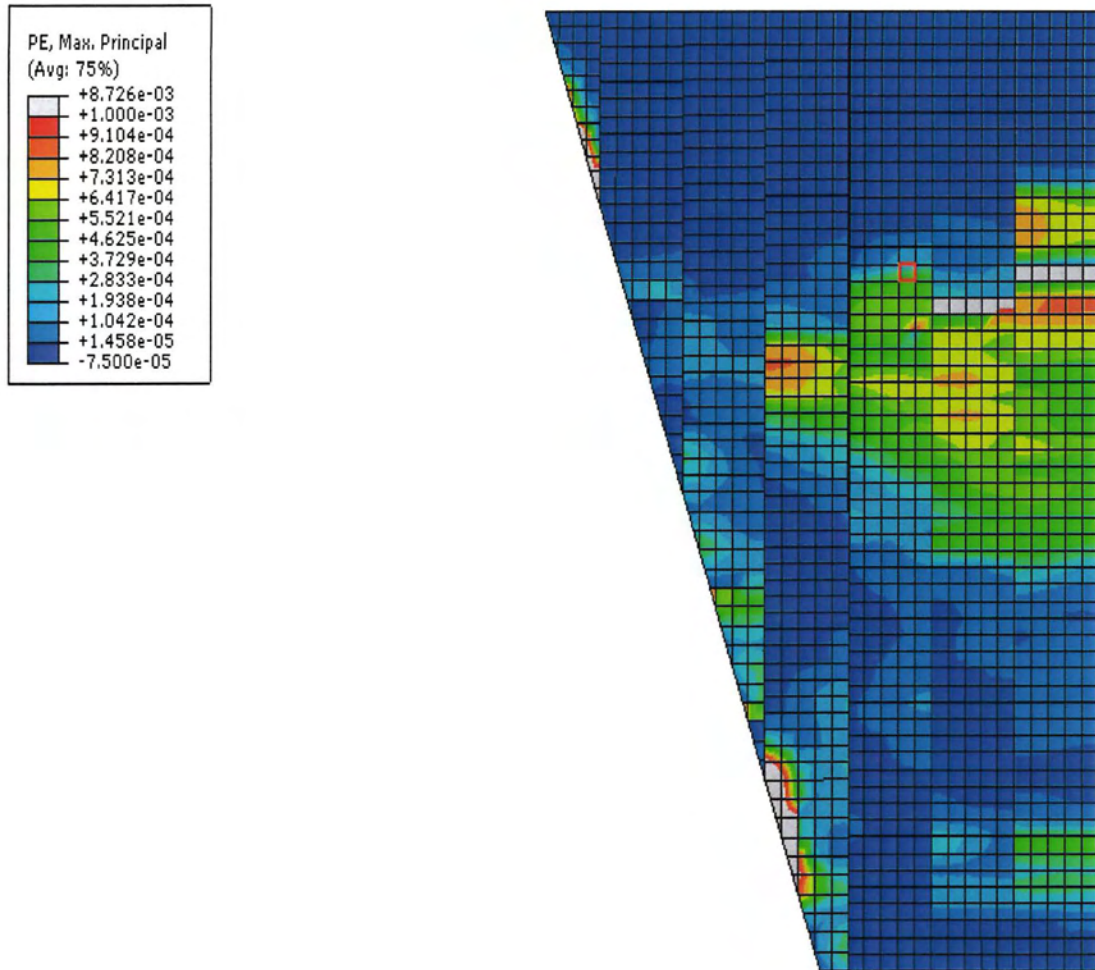
Σχήμα 5.3.6 Κατανομή τάσεων σ_{22} κατά μήκος των πλακών για $t=13.44$ sec

Στο Σχήμα 5.3.6 δίδεται η κατανομή της σ_{22} στην άνω επιφάνεια της πλάκας για $t=13.44$ sec. Οι θλιπτικές τάσεις παίρνουν μεγαλύτερες τιμές κοντά στη κεντρική περιοχή με μέγιστη τιμή ίση προς περίπου 22 MPa. Αντίστοιχα, στο Σχήμα 5.3.7 δίδεται η κατανομή της σ_{33} για $t=13.44$ sec. Σύγκριση των δύο σχημάτων με το Σχήμα 5.3.3 δείχνει ότι η μέγιστη θλίψη προκύπτει με μεγάλη συμβολή της σ_{22} λόγω μέγιστης συμπίεσης και κάμψης της πλάκας για την στιγμή $t = 13.44$ sec.

σ_{33} (για το χρόνο που εμφανίζεται $\min \sigma_3$)



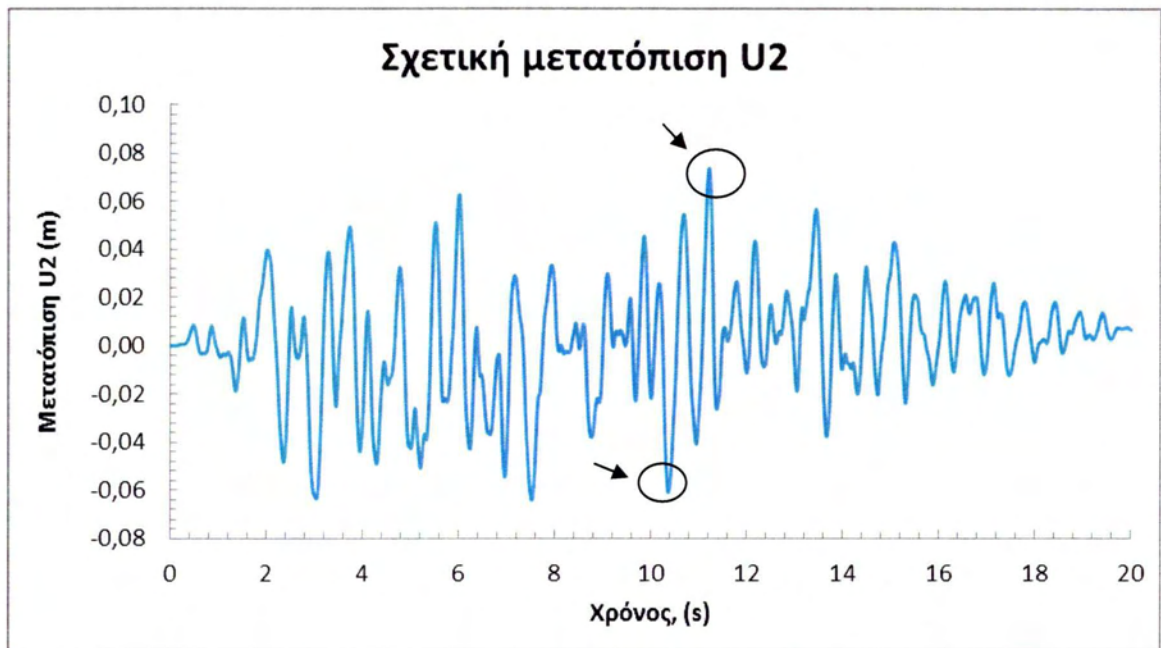
Σχήμα 5.3.7: Κατανομή τάσεων σ_{33} κατά μήκος των πλακών για $t=13.44$ sec



Σχήμα 5.3.8 Κατανομή της μέγιστης κύριας πλαστικής παραμόρφωσης της πλάκας μετά το πέρας της σεισμικής διέγερσης.

Στο Σχήμα 5.3.8 δίδεται η κατανομή της μέγιστης κύριας πλαστικής παραμόρφωσης της πλάκας μετά το πέρας της σεισμικής διέγερσης. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η μέγιστη τιμή της πλαστικής παραμόρφωσης είναι κοντά στο κέντρο και στο αριστερό κάτω άκρο της πλάκας. Αυτή η παραμόρφωση οφείλεται στην παρουσία σημαντικών εφελκυστικών τάσεων οι οποίες προκαλούν ρηγμάτωση του σκυροδέματος των πλακών.

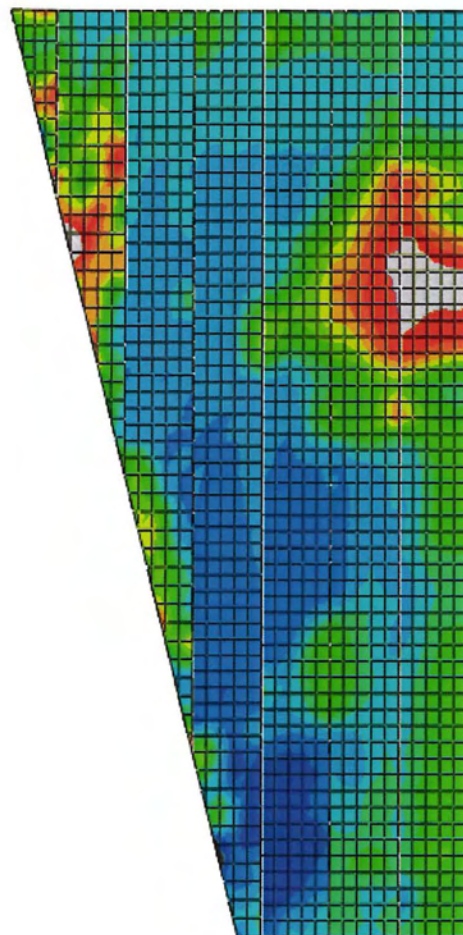
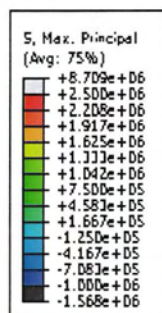
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΜΕ ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΚΑΘΙΖΗΣΗ



Σχήμα 5.3.9: Διάγραμμα σχετικής μετατόπισης στο μέσο της στέψης σε σχέση με το χρόνο για σεισμική διέγερση με δυναμική καθίζηση.

Στο Σχήμα 5.3.9 δίδεται η σχετική μετατόπιση στο μέσο της στέψης ως προς το χρόνο για την περίπτωση στην οποία λαμβάνει χώρα δυναμική καθίζηση της λιθορριπής κατά την διάρκεια κατά του σεισμού. Τα σημεία που υποδεικνύονται στο διάγραμμα εκφράζουν τις χρονικές στιγμές που εμφανίζονται η μέγιστη θλίψη και ο μέγιστος εφελκυσμός.

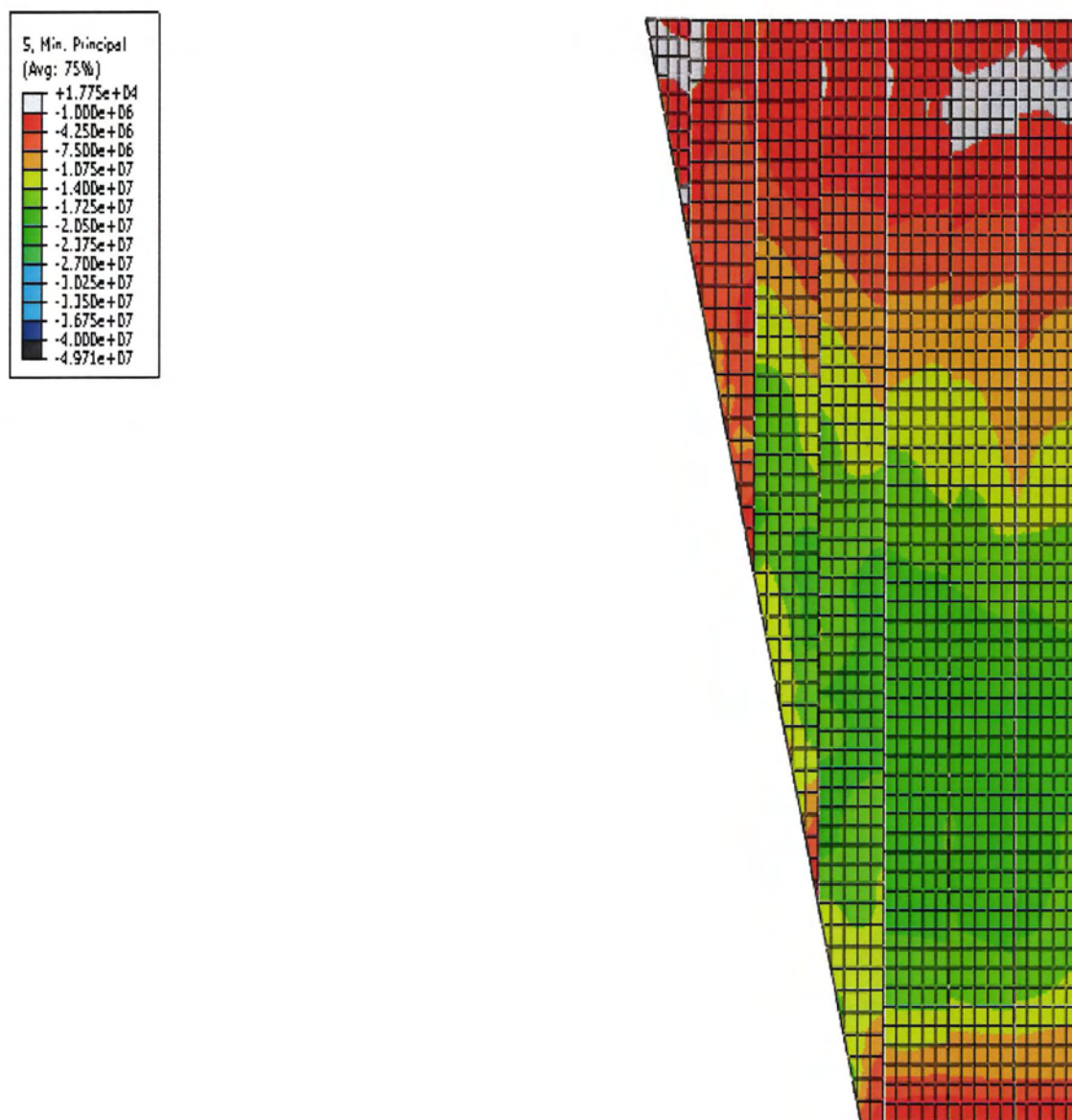
$\max \sigma_1$



Σχήμα 5.3.10 Κατανομή της μέγιστης κύριας τάση σ_1 στην άνω επιφάνεια της πλάκας την στιγμή του μέγιστου εφελκυσμού.

Στο Σχήμα 5.3.10 δίδεται η κατανομή της μέγιστης κύριας τάση σ_1 στην άνω επιφάνεια της πλάκας για $t=11.16$ sec. Παρατηρείται ότι οι τιμές του εφελκυσμού στην περίπτωση που λαμβάνει χώρα δυναμική καθίζηση είναι αρκετά μικρότερες σε σύγκριση με εκείνες του Σχήματος 5.3.2 (χωρίς δυναμική καθίζηση). Αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι η καθίζηση της λιθορριπής, λόγω της μεγάλης τριβής στην βάση της πλάκας, σπρώχνει τις πλάκες προς την πλίνθο με αποτέλεσμα να αυξάνει τις θλίψεις και να μειώνει τον εφελκυσμό.

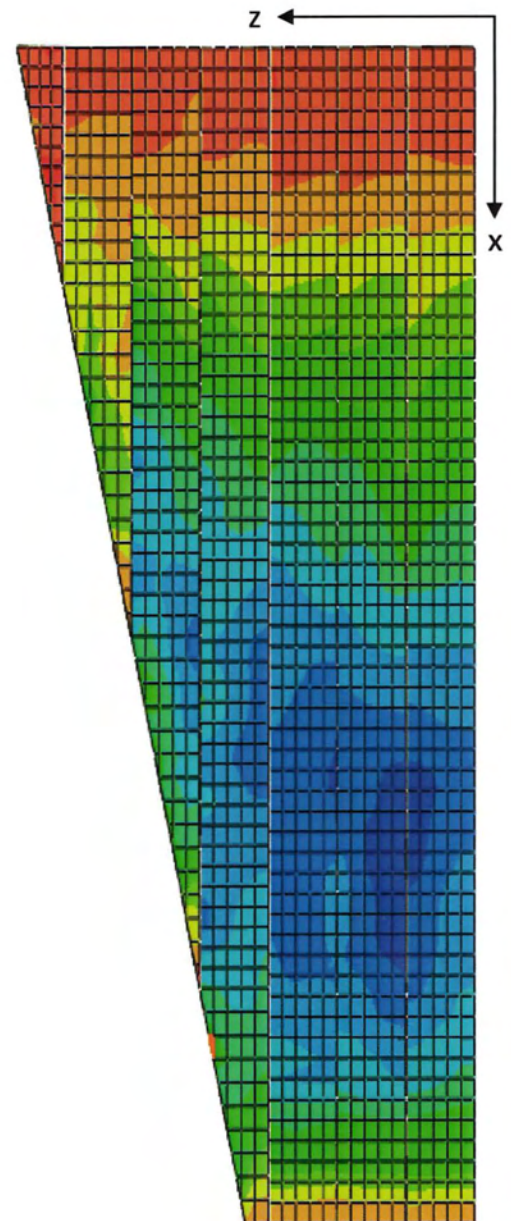
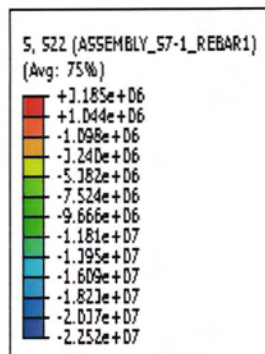
$\min \sigma_3$



Σχήμα 5.3.11 Κατανομή της ελάχιστης κύριας τάσης σ_3 στο άνω μέρος της πλάκας την στιγμή της μέγιστης θλίψης.

Στο Σχήμα 5.3.11 δίδεται η κατανομή της ελάχιστης κύριας τάσης σ_3 στο άνω μέρος της πλάκας για $t=11.16$ sec. Όπως αναφέρθηκε ανωτέρω, στην περίπτωση δυναμικής καθίζησης οι θλιπτικές τάσεις της πλάκας αυξάνουν σε σχέση με την περίπτωση στην οποία δεν υπάρχει δυναμική καθίζηση (βλέπε Σχήμα 5.3.3). Συγκρίνοντας τα σχήματα 5.3.11 και 5.3.3 διαπιστώνεται ότι οι μέγιστες τιμές είναι περίπου ίδιες αλλά στο Σχήμα 5.3.11, εκτείνονται σε αρκετά μεγαλύτερη περιοχή.

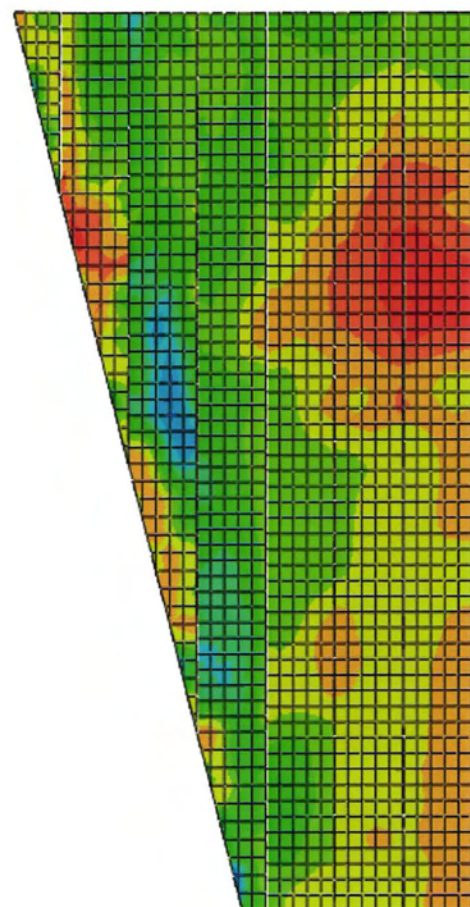
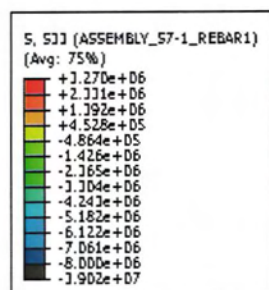
σ_{22} (για το χρόνο που εμφανίζεται $\max \sigma_1$)



Σχήμα 5.3.12 Κατανομή της ορθής τάσης σ_{22} στο άνω μέρος της πλάκας την στιγμή του μέγιστου εφελκυσμού.

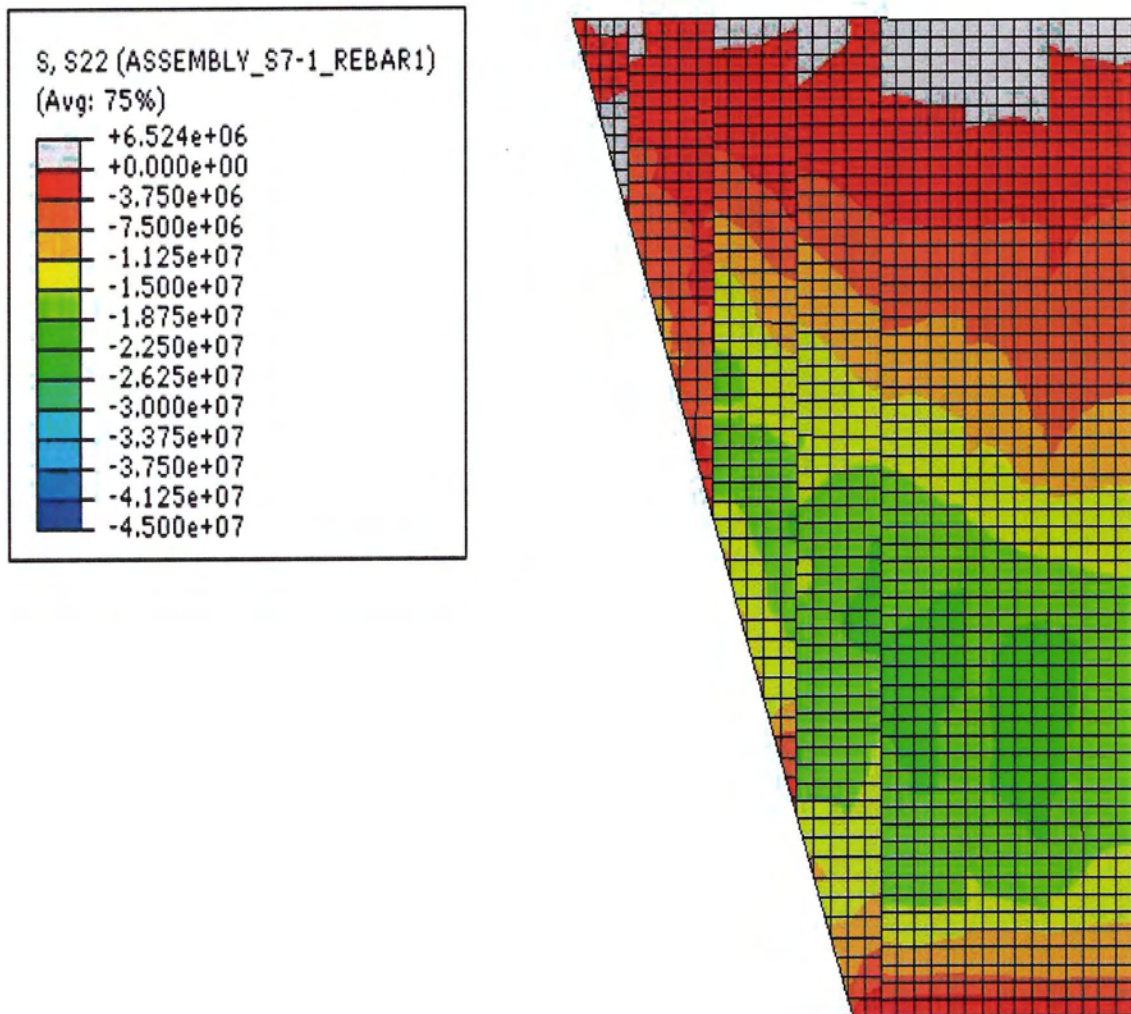
Στα Σχήματα 5.3.12 και 5.3.13 δίδεται η κατανομή των τάσεων σ_{22} και σ_{33} στις κατευθύνσεις x και z, αντίστοιχα την στιγμή του μέγιστου εφελκυσμού.

σ_{33} (για το χρόνο που εμφανίζεται $\max \sigma_1$)



Σχήμα 5.3.13 Κατανομή της τάσης σ_{33} στο άνω μέρος της πλάκας την στιγμή του μέγιστου εφελκυσμού.

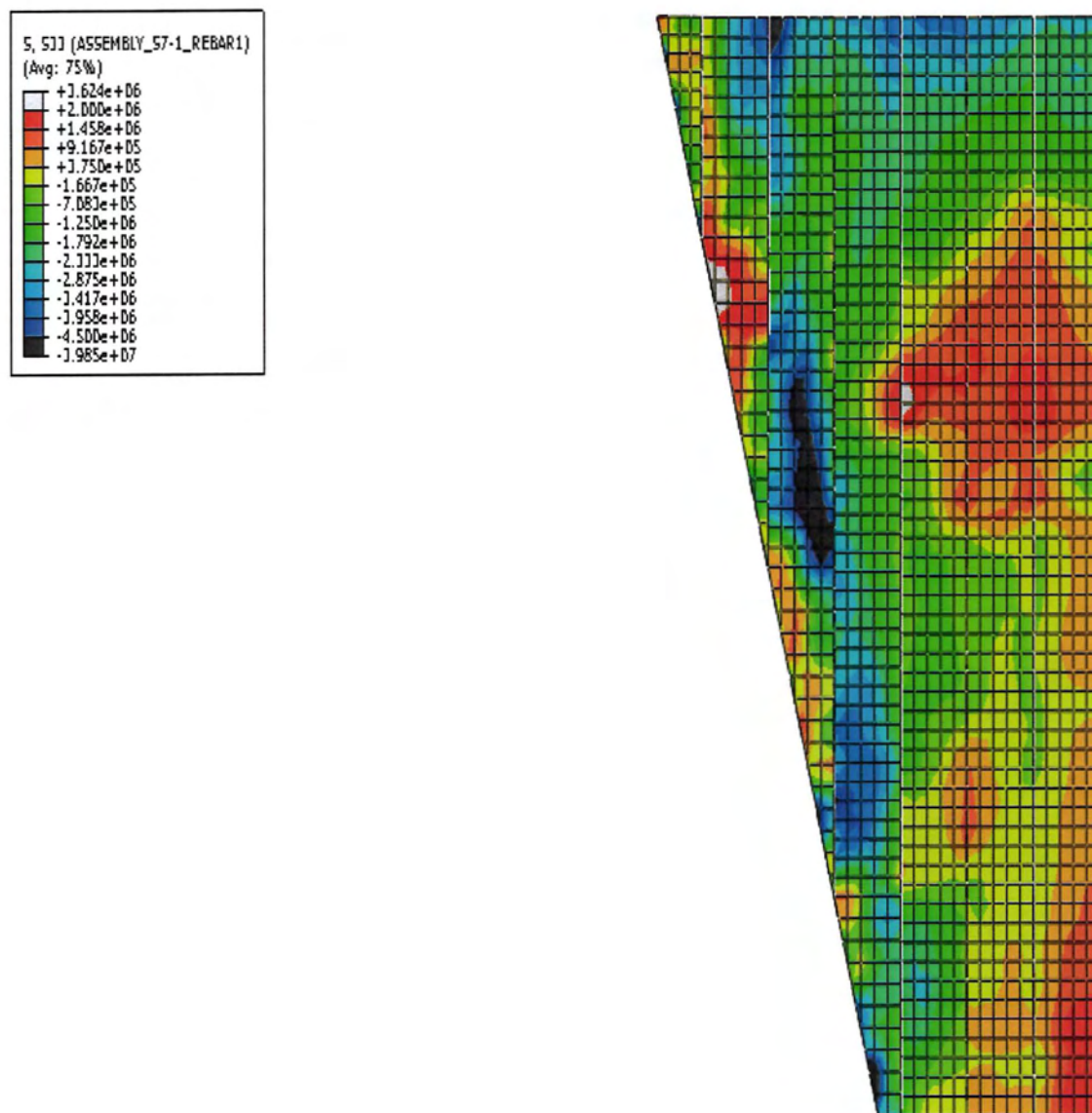
σ_{22} (για το χρόνο που εμφανίζεται $\min \sigma_3$)



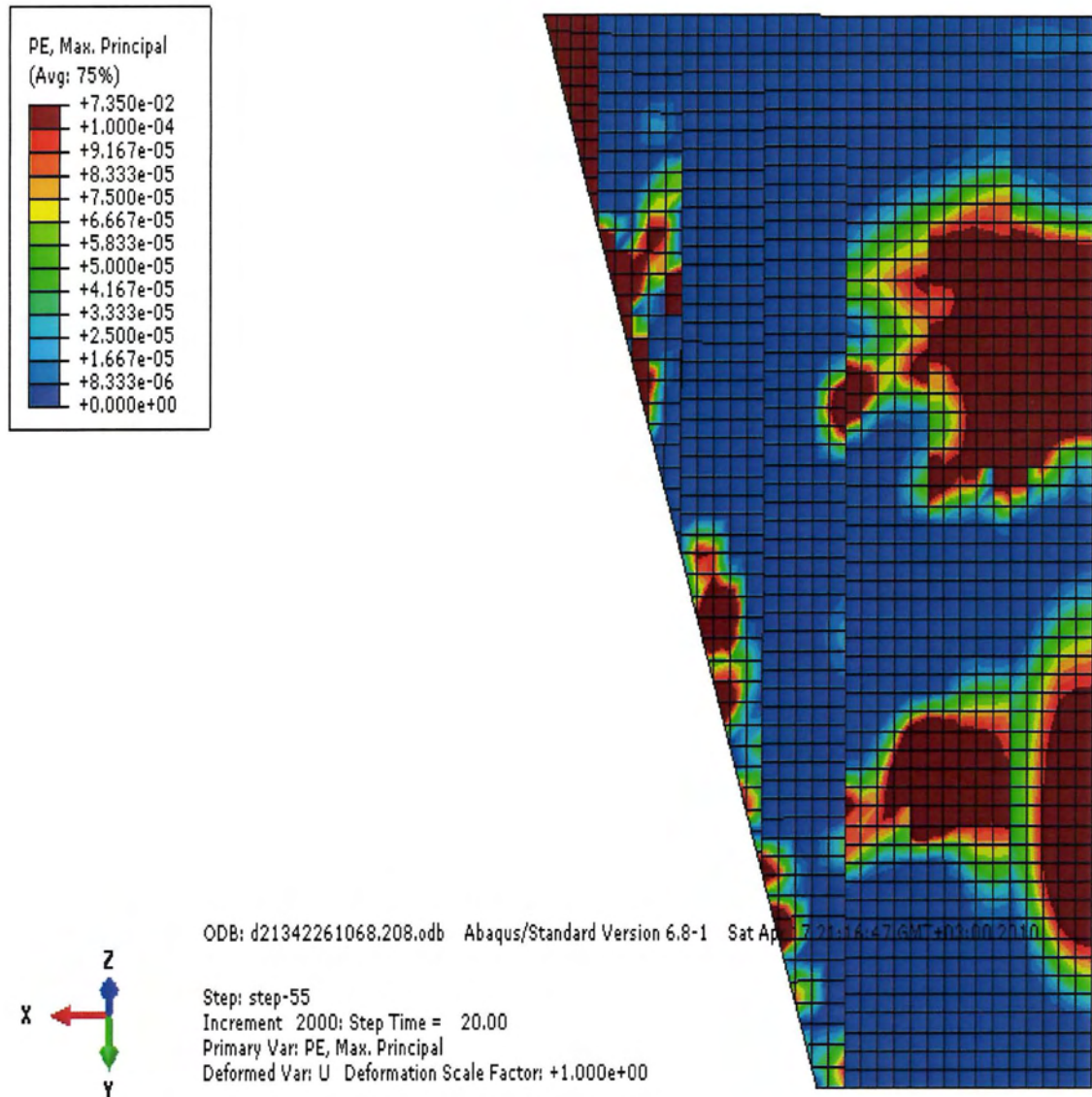
Σχήμα 5.3.14 : Κατανομή τάσεων σ_{22} κατά μήκος των πλακών την στιγμή της μέγιστης θλίψης.

Τα Σχήματα 5.3.14 και 5.3.15 δίδουν την κατανομή των τάσεων σ_{22} και σ_{33} στις κατευθύνσεις x και z, αντίστοιχα, την στιγμή της μέγιστης θλίψης. Από την εξέταση των δύο σχημάτων, σε σχέση με το σχήμα το Σχήμα 5.3.2 προκύπτει ότι η μέγιστη θλίψη προκύπτει με μεγάλη συμβολή της σ_{22} λόγω μέγιστης συμπίεσης και κάμψης της πλάκας.

σ_{33} (για το χρόνο που εμφανίζεται $\min \sigma_3$)



Σχήμα 5.3.15: Κατανομή τάσεων σ_{33} κατά μήκος των πλακών την στιγμή της μέγιστης θλίψης.



Σχήμα 5.3.16: Κατανομή μέγιστης κύριας πλαστικής παραμόρφωσης μετά το τέλος της σεισμικής διέγερσης.

Στο Σχήμα 5.3.16 δίδεται η κατανομή της μέγιστης κύριας πλαστικής παραμόρφωσης της πλάκας μετά το πέρας της σεισμικής διέγερσης. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η μέγιστη τιμή της πλαστικής παραμόρφωσης είναι το κοντά στο κέντρο και στο αριστερό κάτω άκρο της πλάκας. Η κύρια πλαστική παραμόρφωση στο Σχήμα 5.3.16 είναι μικρότερη από εκείνη του σχήματος 5.3.8 καθόσον η παρουσία δυναμικής καθίζησης μειώνει τον εφελκυσμό της πλάκας.

Κεφάλαιο 6^ο

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η παρούσα διπλωματική εργασία ερευνά τη συμπεριφορά ενός λιθορριπτού φράγματος με ανάντη πλάκα σκυροδέματος, ύψους 100 m, κατά την διάρκεια σεισμικής δόνησης. Το φράγμα έχει κατασκευαστεί σε μια στενή κοιλάδα με αναλογία μήκους στέψης προς ύψος ίση με $L / H = 2$. Σκοπός εργασίας είναι η διερεύνηση της συμπεριφοράς του ενισχυμένου σκυροδέματος με ίνες χάλυβα (SFRC) υπό την επιρροή σεισμικής διέγερσης. Η λιθορριπή προσομοιώνεται με το μοντέλο Duncan and Chang (1970) για στατική ανάλυση και με ένα υστερητικό μοντέλο για σεισμική ανάλυση (Ντακούλας 2008). Το ινοπλισμένο σκυρόδεμα προσομοιώνεται με το μοντέλο Lee and Fenves (1998) τόσο για στατική όσο και για δυναμική ανάλυση. Αρχικά, προσομοιώνεται η σταδιακή κατασκευή και η πλήρωση της λεκάνης. Εν συνεχεία επιβάλλεται σεισμική διέγερση κατά δύο διαφορετικούς τρόπους: (α) χωρίς δυναμική καθίζηση και (β) με μέγιστη δυναμική καθίζηση στην στέψη του φράγματος ίση προς 1 m. Τα συμπεράσματα της διπλωματικής εργασίας είναι τα εξής:

1. Η χρήση σκυροδέματος οπλισμένου με ίνες χάλυβα αυξάνει σημαντικά την πλαστιμότητα (κατά ένα συντελεστή περίπου 5) και μειώνει την ανάπτυξη ρωγμών σε δοκίμια σκυροδέματος που υφίστανται εφελκυσμό ή θλίψη.
2. Κατά την πλήρωση της λεκάνης η μέγιστη βύθιση της πλάκας γίνεται σε ύψος περίπου $1/3H$ από τον πόδα. Οι οριζόντιες και κατά μήκος μετατοπίσεις των πάνελ της πλάκας είναι μικρές (μερικά εκατοστά). Ο μέγιστος εφελκυσμός παρουσιάζεται στην περιοχή κοντά στο αντέρεισμα και στον πόδα της πλάκας, ενώ η μέγιστη θλίψη δεν είναι σημαντική.
3. Κατά την σεισμική διέγερση χωρίς δυναμική καθίζηση αναπτύσσονται εφελκυστικές τάσεις που φθάνουν οριακά την αντοχή του σκυροδέματος σε εφελκυσμό σχεδόν στο μεγαλύτερο μέρος της πλάκας κατά την στιγμή που η σχετική μετατόπιση της στέψης κατάντη γίνεται μέγιστη. Η παρουσία της δυναμικής καθίζησης της λιθορριπής είναι ευνοϊκή καθώς μειώνει τις εφελκυστικές τάσεις και τις πιθανές ρηγματώσεις λόγω εφελκυσμού.

4. Οι πλαστικές παραμορφώσεις (και ρηγματώσεις) λόγω εφελκυσμού του ινοπλισμένου σκυροδέματος στο τέλος του σεισμού συγκεντρώνονται κυρίως σε δύο περιοχές της πλάκας: (α) σε μία κεντρική περιοχή σε ύψος $2/3 H$ και (β) σε μία ζώνη κοντά και παράλληλα στο αντέρεισμα.
5. Η σημαντικά αυξημένη πλαστιμότητα του ινοπλισμένου με χάλυβα σκυροδέματος μειώνει σημαντικά την ανάπτυξη ρωγμών λόγω εφελκυσμού και βελτιώνει την γενική συμπεριφορά της ανάντη πλάκας σκυροδέματος.
6. Κατά την σεισμική διέγερση χωρίς δυναμική καθίζηση αναπτύσσονται θλιπτικές τάσεις αρκετά μικρότερες από την αντοχή του σκυροδέματος σε θλίψη στο κέντρο της πλάκας κατά την στιγμή που η σχετική μετατόπιση της στέψης ανάντη γίνεται μέγιστη. Η παρουσία δυναμικής καθίζησης της λιθορριπής αυξάνει σημαντικά την περιοχή της πλάκας όπου αναπτύσσονται θλιπτικές τάσεις.
7. Η χρήση ινοπλισμένου σκυροδέματος στην ανάντη πλάκα σκυροδέματος φραγμάτων λιθορριπής είναι δυνατόν να αποτελέσει ένα σημαντικό τρόπο ελέγχου των ρηγματώσεων και διαρροών κατά τον σεισμό σχεδιασμού. Επίσης είναι δυνατόν να μειώσει την ρηγματώσεις από θλιπτική αστοχία στους κατακόρυφους αρμούς σε φράγματα με μικρότερη θλιπτική αντοχή, όπως στην περίπτωση του φράγματος Ziripgru.

Βιβλιογραφία

ABAQUS (2012): Users' Manual, Simulia, Providence, RI, USA.

Abouseeda, H. and Dakoulas, P. (1998), Nonlinear Earth Dam - Foundation Interaction Using a BE-FE Method, *J. of Earthq. Engineering & Struct. Dynamics*, Vol. 27(12), 917-936.

Dakoulas, P. (2011), "Nonlinear seismic response of tall concrete faced rockfill dams in narrow canyons" *Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 34, 11-24.

Dakoulas, P. (2011), "Longitudinal vibrations of tall concrete faced rockfill dams in narrow canyons", *Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 41, 44-58.

Dakoulas, P., Thanopoulos, Y., and Anastassopoulos, K. (2008), "Nonlinear 3D simulation of CFR dam construction and reservoir filling", *Int. Journal of Hydropower & Dams*, 2, 95-101.

Dakoulas, P. (1993), "Response of Earth Dams in Semi-Cylindrical Valleys Subjected to Oblique SH Waves", *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol. 119, No. 1, pp. 74-90.

Dakoulas, P., and Hsu (1995), "Response of Earth Dams in Semi-Elliptical Canyons to Oblique SH Waves", *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol. 120, 3, pp. 379-391.

Dakoulas, P. and Abouseeda, H. (1997), "Response of Earth Dams to Rayleigh Waves Using a Coupled Finite Element - Boundary Element Method", *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol. 123, No. 12, 1311-1320.

Dakoulas, P., (2007). Messochora CFR Dam: slab and dam performance during reservoir filling based on 3D nonlinear analysis, Research Report, Dept. of Civil Engineering, University of Thessaly, Volos, Greece.

Duncan J. M. and C. Y. Chang, 1970. Nonlinear analysis of stress and strain in soils, *J. of Soil Mech. And Found. Engineering*, ASCE, 96(5), 1629-1653.

Duncan J. M. and Byrne, P, Wong, K. and Mabry P. (1980). Strength, stress-strain and bulk modulus parameters for finite element analyses of stresses and movements in soil masses, Report UCB/GT/80-01, University of California, Berkeley, CA, USA.

Ebeling, R. M., Peters, R. F. and Clough G. (1992). User's guide for the incremental construction soil-structure interaction program SOILSTRUCT, Waterways Experiment Station, US Corps of Engineers, Technical Report ITL-90-6, 1992.

Uddin, N. and Gazetas, G. (1995), Dynamic response of concrete-faced rockfill dams to strong seismic excitation, *Journal of Geotechnical Engineering*, 121(2), 185-197.

Gazetas, G. and Dakoulas, P. (1992), "Seismic Analysis and Design of Rockfill Dams: State of the Art", *Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 11(1), pp. 27-61.

Guan, Z. (2009), "Investigation of the 5.12 Wenchuan Earthquake damages to Zipingpu Water Control Project and an assessment of its safety state", *Science in China, Series E-Tech Sc.*, 52(4), 820-834.

Lee J. & Fenves, G.L. (1998), "A plastic-damage concrete model for earthquake analysis of dams", *Journal of Earthq. Eng. & Struct. Dynamics*, 27, 937-596.

Lubliner et al. (1989) A damage plasticity model, *Solids and Structures*, 25(3), 299-326

Marques Filho, F. and Pinto N. de S., (2005). CFRD dam characteristics learned from experience, *Hydropower & Dams*, Issue 1, 72-78.

Mejia, L.H. & Seed, H.B. (1983), Comparison of 2D and 3D analyses of earth dams, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, 109(11), 1383-1398.

M.C. Nataraja, N. Dhang, A.P. Gupta (1999) « Stress – strain curves for steel – fiber reinforced concrete under compression », *Cement & Concrete Composites*, 21, 383 – 390.

Rollins, K., Evans, M., Diehl, N.B., Daily, W.D. (1998), Shear modulus and damping relations for gravel, *J. Geotechn. and Geoenvironm. Engineering*, ASCE, 124(5), 396-405

Sherard, J.L. & Cooke, J.B. (1987), Concrete face rockfill dams: Assessment. *J. Geotechnical Engineering*, ASCE, 113(10), 1096-1112.

Stavrotheodorou, E. and Dakoulas, P. (2012), "Behavior of very tall concrete faced rockfill dams during impoundment, *International Journal of Hydropower and Dams: Hydro 2012 Conference*, 29-31 Oct., Bilbao, Spain.

Wieland, M. (2007), Seismic Performance of CFRDs, Water Power & Dam Construction, March.

Wieland, M. (2009), "Concrete face rockfill dams in highly seismic regions", 1st International Symposium on Rockfill Dams, 18-21 October, Chengdu, China.

Ντακούλας, Π., (2008), «Μη γραμμική 3Δ προσομοίωση της κατασκευής, πλήρωσης και σεισμικής απόκρισης φράγματος λιθορριπής με ανάντη πλάκα σκυροδέματος», 3ο Πανελλήνιο Συνέδριο Αντισεισμικής Μηχανικής και Τεχνικής Σεισμολογίας, Αθήνα 2008.



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ



004000118293