

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ
ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ»

ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΦΡΑΓΜΑΤΩΝ
ΛΙΘΟΡΡΙΠΗΣ ΔΙΕΡΧΟΜΕΝΩΝ
ΑΠΟ ΕΝΕΡΓΟ ΤΕΚΤΟΝΙΚΟ
ΡΗΓΜΑ

Ιωάννης Ε. Βρόντζος

Επιβλέπων: Αν. καθηγητής Π. Ντακούλας



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ
ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ
ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Βόλος, Ιούνιος 2013

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

- 1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ
- 1.2 ΤΥΠΟΙ ΦΡΑΓΜΑΤΩΝ
 - 1.2.1 Σκυροδέματος
 - 1.2.2 Χωμάτινα
 - 1.2.3 Λιθόρριπτα με ανάντι πλάκα σκυροδέματος (CFRD)

2

ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΔΟΜΗΣ ΕΝΟΣ CFRD

- 2.1 ΔΟΜΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ
- 2.2 ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ ΚΑΙ ΑΡΜΟΙ
- 2.3 ΜΕΤΑΒΑΤΙΚΕΣ ΖΩΝΕΣ ΑΝΑΝΤΗ
- 2.4 ΛΙΘΟΡΡΙΠΗ

3

ΤΕΧΝΙΚΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΤΩΝ CFRD

- 3.1 ΓΕΝΙΚΑ
- 3.2 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΤΗΣ ΠΛΑΚΑΣ
- 3.3 ΕΝΟΡΓΑΝΩΣΗ ΤΩΝ ΦΡΑΓΜΑΤΩΝ

4

ΑΙΤΙΕΣ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΦΡΑΓΜΑΤΩΝ

- 4.1 ΚΙΝΔΥΝΟΣ ΚΑΙ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑ (Risk and Hazard)
- 4.2 Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΥΛΙΚΟΥ ΤΗΣ ΛΙΘΟΡΡΙΠΗΣ
- 4.3 ΑΙΤΙΕΣ ΑΣΤΟΧΙΩΝ ΕΝΟΣ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ
- 4.4 ΙΣΤΟΡΙΚΑ ΠΕΡΙΣΤΑΤΙΚΑ
- 4.5 ΑΣΤΟΧΙΑ ΛΟΓΩ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΔΙΕΓΕΡΣΗΣ

5

ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΥΝΙΣΤΩΣΩΝ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΟΥ ΣΩΜΑΤΟΣ (ROCKFILL)

- 5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ
 - 5.1.1 ΠΕΡΙΛΗΨΗ
 - 5.1.2 ΕΙΣΑΓΩΓΗ
- 5.2 ΣΤΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ
 - 5.2.1 ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ DUNCAN
 - 5.2.2 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

6

ΔΟΜΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΓΙΑ ΤΟ ΣΩΜΑ (ROCKFILL)

- 6.1 ΚΥΡΙΑ ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΟΥ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ
- 6.2 ΚΥΡΙΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΤΟΥ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ
- 6.3 ΤΥΠΙΚΕΣ ΖΩΝΕΣ ΣΤΗΝ CFRDs
- 6.4 ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΓΙΑ ΤΑ ΦΡΑΓΜΑΤΑ ΛΙΘΟΡΡΙΠΗΣ
- 6.5 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΥΛΙΚΩΝ ΛΙΘΟΡΡΙΠΗΣ
- 6.6 ΜΟΝΤΕΛΟ ΚΑΙ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΥΛΙΚΟΥ
- 6.7 Η ΣΤΑΔΙΑΚΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΚΑΙ ΠΛΗΡΩΣΗ ΤΗΣ ΛΕΚΑΝΗΣ

7

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

- 7.1 ΓΕΝΙΚΑ
- 7.2 ΣΤΑΔΙΟ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΕΠΙΧΩΜΑΤΟΣ
- 7.3 ΣΤΑΔΙΟ ΠΛΗΡΩΣΗΣ ΤΗΣ ΛΕΚΑΝΗΣ
- 7.4 ΣΤΑΔΙΟ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ ΤΗΣ ΒΑΣΗΣ
 - 7.4.1 Επιπτώσεις στο σώμα (dams) για c25
 - 7.4.2 Επιπτώσεις στην πλάκα (slab) για c25 - c37 - c45
- 7.5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

8

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Τα φράγματα είναι από τις μεγαλύτερες σε όγκο και σημασία ανθρώπινες κατασκευές. Ιστορικά έχουν προστατεύσει ολόκληρες περιοχές από πλημμύρες, έχουν αρδεύσει ολόκληρες πεδιάδες και έχουν παράξει τεράστιες ποσότητες καθαρής ηλεκτρικής ενέργειας.

Μετά το πρώτο φράγμα που κτίστηκε στην Αίγυπτο πριν περίπου 5.000 χρόνια, οι μηχανικοί συνέχεια κτίζουν νέους τύπους φραγμάτων για να δαμάσουν τις πραγματικά τεράστιες δυνάμεις που ασκούνται από το νερό. Η διαχείριση του νερού, αποτελεί για τους μηχανικούς ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα, καθώς πρόκειται για ένα αγαθό απαραίτητο για την επιβίωση και εξυπηρέτηση του ανθρώπου. Επιπλέον, τα υδατικά αποθέματα είναι εξαντλήσιμα και η γεωγραφική κατανομή αυτών σε τοπικό και παγκόσμιο επίπεδο άνιση.

Από τα παραπάνω είναι φανερό ότι, είναι απαραίτητη η ύπαρξη έργων ταμίευσης των επιφανειακών υδάτων, με σκοπό, τη διαχείρισή τους προς όφελος του ανθρώπου, την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και την παροχή άρδευσης ή ύδρευσης. Χωρίς τα φράγματα η μοντέρνα ζωή μας όπως την ξέρουμε απλά δεν θα ήταν η ίδια.

Σταματώντας τη ροή του νερού και αποθηκεύοντας το πίσω από μεγάλα φράγματα, αμέσως δημιουργεί την ανάγκη για ύπαρξη αυξημένης ασφάλειας αλλά και μελέτης σεναρίων άμεσης δράσης σε περίπτωση αστοχίας. Τα αποτελέσματα μπορεί να είναι πραγματικά καταστροφικά τόσο σε απώλεια ανθρώπινων ζωών, όσο και σε περιουσίες και γενικά στην οικονομία του τόπου.

Συνεπώς η επιλογή του σχεδιασμού του φράγματος πρέπει να γίνεται μετά από μια σειρά μελετών, έτσι ώστε να επιλεγεί η βέλτιστη τεchnοοικονομική λύση του έργου. Στη γεωτεχνική και στατική μελέτη, με τελικό σκοπό την κατασκευή του φράγματος, λαμβάνονται υπόψη στοιχεία της τοπογραφίας και της γεωλογίας του περιβάλλοντος χώρου, της υδρολογίας και της σεισμικής επικινδυνότητας της περιοχής, καθώς και των περιβαλλοντικών επιπτώσεων.

1.2 ΤΥΠΟΙ ΦΡΑΓΜΑΤΩΝ

Οι τύποι φραγμάτων ομαδοποιούνται σύμφωνα με τον τύπο των υλικών από τα οποία κατασκευάζονται και με τον τρόπο που επιτυγχάνουν τη στεγανότητα και τη σταθερότητα τους ως εξής:

- Σκυροδέματος (concrete dams)
- Χωμάτινα (earth -fill dams)
- Λιθόρριπτα (rock -fill dams)

1.2.1 Σκυροδέματος

- **Φράγματα βαρύτητας (Concrete Gravity Dams)**

Στα φράγματα βαρύτητας σκυροδέματος το ίδιο το βάρος του φράγματος εξασφαλίζει την παραλαβή των δυνάμεων ολίσθησης και ανατροπής που εξασκεί σ' αυτά το νερό. Οι δυνάμεις που αναπτύσσονται είναι κυρίως οι υδροστατικές στην ανάντη και ενδεχόμενα στην κατάντη πλευρά, η δύναμη της άνωσης, το ίδιο βάρος του φράγματος και η δύναμη της τριβής με το έδαφος. Η χάραξη του φράγματος σε οριζοντιογραφία μπορεί να είναι ευθεία γραμμή ή καμπύλη, ανάλογα με την τοπογραφική διαμόρφωση της περιοχής και τις λειτουργικές ανάγκες



Εικ. 1: Φράγμα Μαραθιά Ν. Μυκόνου Κυκλάδων - τύπου βαρύτητας RCC (Rolled Compacted Concrete Dam)

- **Τοξοειδή (Concrete Arch Dams)**

Τα τοξωτά φράγματα κατασκευάζονται συνήθως σε χαράδρες στενού πλάτους των οποίων τα πλευρικά τοιχώματα αποτελούνται από στιβαρό βράχο έτσι ώστε να μεταφέρονται με ασφάλεια σε αυτά οι οριζόντιες δυνάμεις που ασκούνται από το νερό στο φράγμα. Τα φράγματα αυτά έχουν σε κάτοψη τοξοειδή μορφή και εργάζονται σαν αμφίπακτα τόξα.



Εικ. 2: Τοξωτό φράγμα βαρύτητας στην Ισπανία (Aldeadavila Dam)

- **Αντιρηδωτά (Concrete Buttress Dams)**

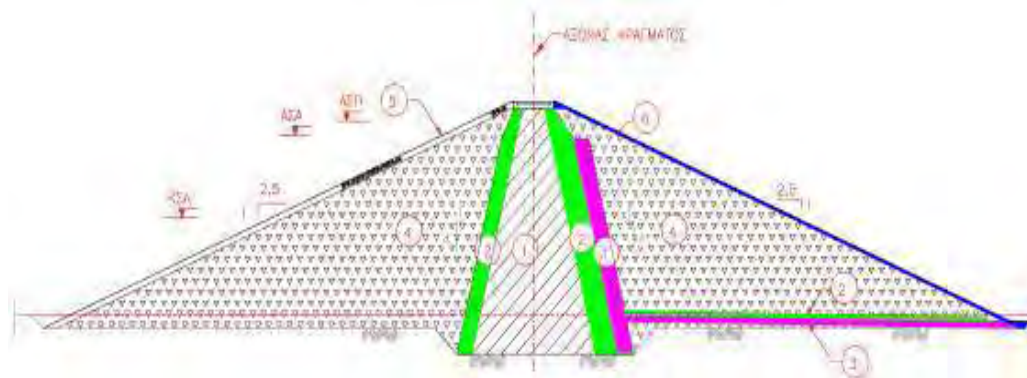
Τα αντιρηδωτά φράγματα είναι ουσιαστικά φράγματα βαρύτητας που αποτελούνται από πλάκες (επίπεδες ή τοξωτές) από σκυρόδεμα, κεκλιμένες ως προς την οριζόντιο, οι οποίες στηρίζονται στα δύο άκρα τους σε κατακόρυφες αντηρίδες, τοποθετημένες ανά 15 έως 35 m, και οι οποίες μεταφέρουν με την σειρά τους τις δυνάμεις στο έδαφος. Βασικό πλεονέκτημα τους, ότι απαιτούν περίπου 40% λιγότερο σκυρόδεμα από ένα αντίστοιχο συμπαγές φράγμα σκυροδέματος. Το μειονέκτημα είναι ότι απαιτούν σημαντικά υψηλότερο κόστος εργασίας.



Εικ. 3: Αντιρηδωτό φράγμα βαρύτητας στον Καναδά (Daniel - Johnson dam)

1.2.2 Χωμάτινα

Τα χωμάτινα φράγματα θεωρούνται πιο εύκολα στην κατασκευή τους και είναι οικονομικά. Μπορούν να κατασκευαστούν σε οποιαδήποτε μορφή κοιλάδας και δεν απαιτούν εξαιρετικής ποιότητας εδάφη θεμελίωσης.



Σχ. 1: Διατομή χωμάτινου διαζωνισμένου φράγματος (Πηγή: Μουτάφης, 2009)

Περιγραφή ζωνών φράγματος:

1. Πυρήνας - Αδιαπέρατα υλικά
2. Φίλτρο - διαβαθμισμένο αμμώδες υλικό
3. Στραγγιστήριο - διαβαθμισμένο χαλικώδες υλικό
4. Κελύφη - Αμμοχάλικα, κορήματα, διαβαθμισμένος βράχος
5. Ανάντη ζώνη προστασίας - Ογκόλιθοι, Τρόχαλοι
6. Κατάντη ζώνη προστασίας - Λίθοι, κροκάλες

Κατασκευάζονται από γαιώδη υλικά της περιοχής, τα οποία διαστρώνονται κατά ζώνες από διαβαθμισμένο υλικό. Στο κέντρο κατασκευάζεται από αργιλικό υλικό ένας αδιαπέρατος πυρήνας και ακολουθούν οι εξωτερικές ζώνες, που εξασφαλίζουν την ευστάθεια του έργου και συνιστούν το κύριο σώμα του φράγματος. Οι ζώνες αυτές είναι:

A. η μεταβατική, πάχους 2.5-4 m, αμέσως μετά τον πυρήνα, που συνίσταται από φίλτρο διαβαθμισμένου αμμοχάλικου και

B. η ζώνη από χονδρόκοκκα υλικά (κροκάλες, χαλίκια) με κλίση πρανών που εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του υλικού, τις συνθήκες ροής, την ποιότητα του εδάφους, τη θέση του αδιαπέρατου πυρήνα και τη σεισμικότητα της περιοχής. Τέλος, πάνω από τη ζώνη αυτή τοποθετείται λιθορριπή προστασίας από ευμεγέθη τεμάχια βράχων.

• Χωμάτινα με αργιλικό πυρήνα

Σαν χωμάτινα χαρακτηρίζονται τα φράγματα που κατασκευάζονται από γαιώδη υλικά. Η μορφή των φραγμάτων αυτών έχει τραπεζοειδή διατομή και στέψη διαμορφωμένη σε δρόμο. Στο κέντρο της διατομής του φράγματος και κατά μήκος του άξονα κατασκευάζεται ένα στρώμα αδιαπέρατο, αποτελούμενο από συμπυκνωμένη καλής ποιότητας άργιλο, που αποτελεί τον λεγόμενο πυρήνα της διατομής. Από τον πυρήνα και μέχρι ορισμένο βάθος κατασκευάζεται διάφραγμα για την ανακοπή της υπόγειας ροής του νερού. Γύρω από τον πυρήνα τοποθετούνται υλικά όχι απαραίτητα αδιαπέρατα, που διαμορφώνουν το σώμα του φράγματος.



Εικ. 4: Φράγμα Φανερωμένη Μεσσαρά Ηρακλείου Κρήτης Χωμάτινο με αργιλικό πυρήνα

- *Χωμάτινα- λιθόρριπτα με αργιλικό πυρήνα*

Κατασκευάζονται από βραχώδη υλικά, τα οποία είναι προϊόντα εκσκαφών βράχου ή προϊόντα λατομείου. Συνεπώς η διαφορά βρίσκεται στην ύπαρξη της λιθορριπής στις ζώνες εκατέρωθεν του κεντρικού αργιλικού πυρήνα (ζώνη 4).



Εικ. 5: Φράγμα Gathright, Virginia, Λιθόρριπτο με αργιλικό πυρήνα

1.2.3 Λιθόρριπτα με ανάντη πλάκα σκυροδέματος (CFRD)

Ένα λιθόρριπτο φράγμα κατασκευάζεται ως ένα ανάχωμα με λίθους διαφόρων μεγεθών που εξασφαλίζουν την σταθερότητα της ανάντη αδιαπέρατης ζώνης. Στην ίδια κατηγορία κατατάσσονται και τα φράγματα με κεντρικό χωμάτινο αδιαπέρατο πυρήνα με την κύρια διαφορά ότι η κύρια μάζα της επιχωμάτωσης αποτελείται από λίθους. Οι λίθοι που απαρτίζουν το σώμα στήριξης του φράγματος πρέπει να έχουν γωνίες (ακανόνιστο σχήμα), δηλ. να προέρχονται από λατομείο. Στην ιδανική περίπτωση οι λίθοι πρέπει να είναι ομοιόμορφου μεγέθους και να μη περιέχονται χαλίκια ή λεπτότεροι κόκκοι γιατί τα υλικά αυτά θα υποχωρήσουν μεταξύ των λίθων μεγαλύτερου μεγέθους με αποτέλεσμα σημαντικές καθιζήσεις. Συνήθως η λιθορριπή τοποθετείται κατά στρώσεις, κάθε μία πάχους της τάξεως του 1m, και συμπιέζεται με δονητή.

Τα λιθόρριπτα φράγματα είναι απλουστευμένης μορφής χωμάτινα φράγματα. Για την κατασκευή τους δεν χρειάζεται ζωνώδης διάταξη διαβαθμισμένων υλικών. Το αδιαπέρατο στοιχείο του φράγματος είναι πλάκα από οπλισμένο σκυρόδεμα.



Εικ. 6: Λιθόρριπτο φράγμα με ανάντη πλάκα από σκυρόδεμα – Λειβάδι Πάτμου Λωδ/σου



Εικ. 7: Φράγμα Shuibuya , Κίνα, Λιθόρριπτο με ανάντη πλάκα σκυροδέματος

2

ΦΡΑΓΜΑΤΑ ΛΙΘΟΡΡΙΠΗΣ ΜΕ ΑΝΑΝΤΗ ΠΛΑΚΑ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

2.1 ΔΟΜΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

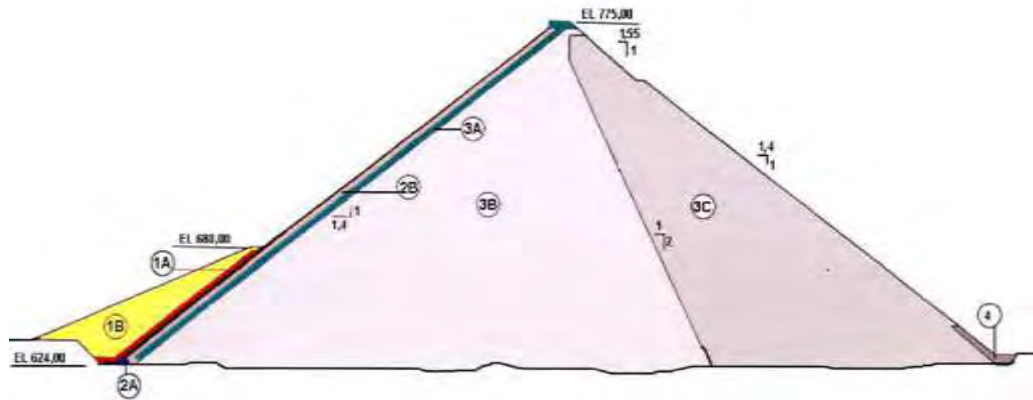
Παρακάτω παρουσιάζονται τα κύρια σημεία των σύγχρονων αρχών σχεδιασμού λιθόρριπτων φραγμάτων με ανάντη πλάκα σκυροδέματος (CFRD), σύμφωνα με την διεθνή πρακτική και τις αρχές σχεδιασμού της εποχής.

Η αντιπροσωπευτική κατασκευή αυτού του τύπου φράγματος για την Ελλάδα, είναι το φράγμα της Μεσοχώρας (150m), το οποίο κατασκευάστηκε στις αρχές της δεκαετίας του '90. Στηριζόμενοι στον σχεδιασμό αυτού του έργου, συναντούμε τα βασικά χαρακτηριστικά των CFRD όπως αυτά καθορίστηκαν από την εμπειρία των B. Cooke & J. Sherard (Fitzpatrick & al. 1985):

- Το συμπυκνωμένο λιθόρριπτο επίχωμα με τις μεταβατικές ζώνες, ικανό να παροχετεύσει χωρίς προβλήματα μεγάλες ροές διαμέσου του σώματος του χωρίς την ανάπτυξη πίεσης πόρων,
- Την πλάκα σκυροδέματος, πάχους μεταβαλλόμενου ανάλογα με το ύψος νερού, με ειδικά σχεδιασμένους κατακόρυφους αρμούς,
- Την πλίνθο, εδραζόμενη σε υγρή βράχο, με πλάτος υπολογισμένο ανάλογα με το υδραυλικό φορτίο και τον αρμό πλίνθου-πλάκας ικανό να παραλάβει τις παραμορφώσεις

Βασικό έργο των φραγμάτων είναι ο υπερχειλιστής, που κατασκευάζεται με ισχυρά οπλισμένο σκυρόδεμα και απαιτείται στις περιπτώσεις χωμάτων και λιθόρριπτων

φραγμάτων, ενώ όταν πρόκειται για φράγματα βαρύτητας από τσιμέντο ή λιθοδομή ενσωματώνεται στην κατασκευή του σώματος του φράγματος και δεν αποτελεί ξεχωριστό έργο. Δύο βασικές δομές φραγμάτων CFRD φαίνονται στα παρακάτω σχήματα:

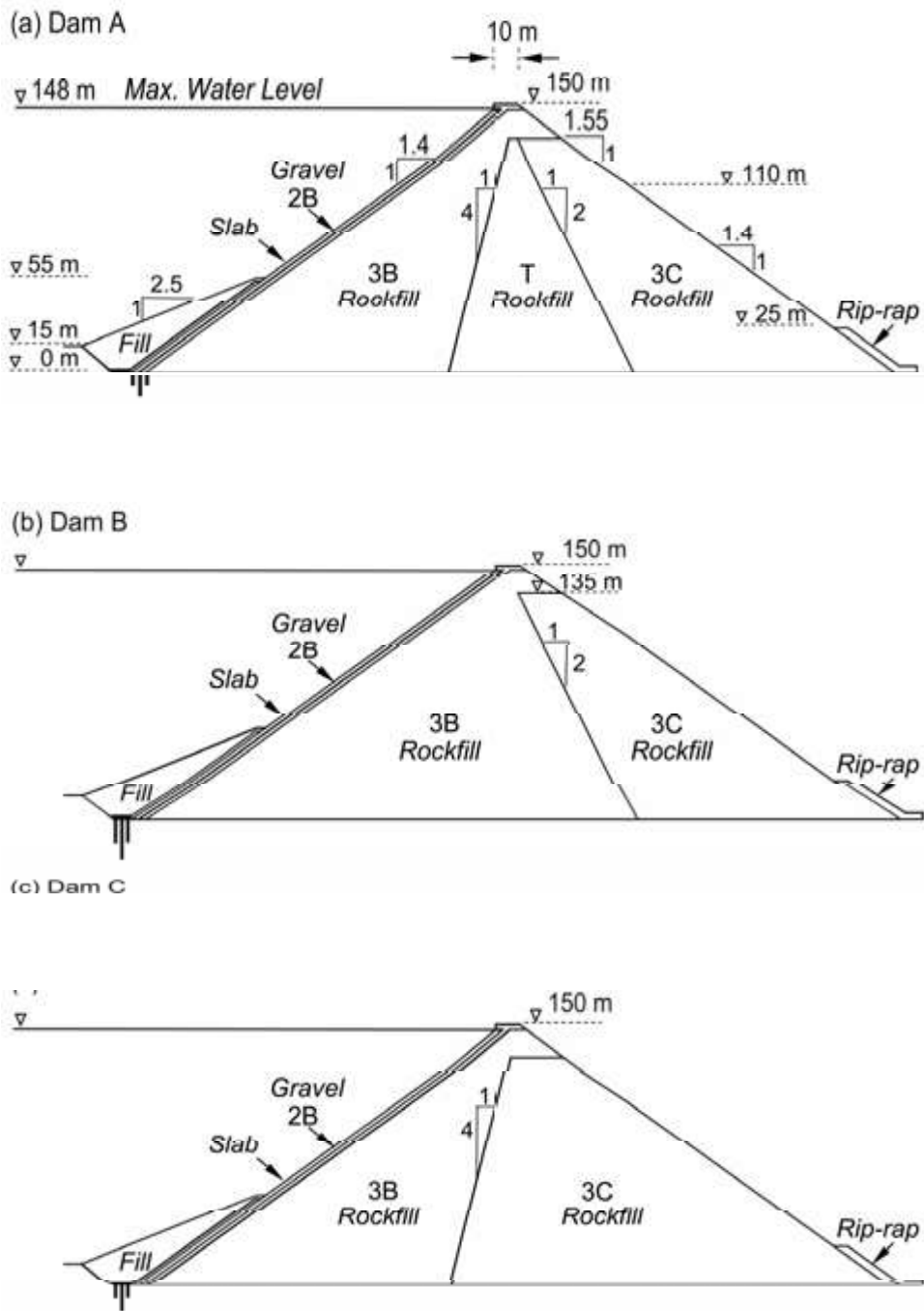


1A	Αδιαπέρατα υλικά από δανειοθαλάμους	1B	Τυχαία υλικά . Προϊόντα εκσκαφών η υλικά από δανειοθαλάμους.
2A	Ειδικό υλικό φίλτρου διαβαθμισμένο από αμμοχάλικα ποταμού	2B	Αμμοχάλικα ποταμού διαβαθμισμένα και εμπλουτισμένα.
3A	Επιλεγμένο υλικό λιθορριπής από λατομεία η απαιτούμενες εκσκαφές.	3B	Υλικό λιθορριπής από λατομεία η απαιτούμενες εκσκαφές.
3C	Υλικό λιθορριπής από λατομεία η απαιτούμενες εκσκαφές.	4	Επιλεγμένο υλικό λιθορριπής από λατομεία η απαιτούμενες εκσκαφές.

Σχ. 2: Κεντρική διατομή και διαζώνιση του (CFRD) φράγματος της Μεσοχώρας, Ντακούλας (2010)



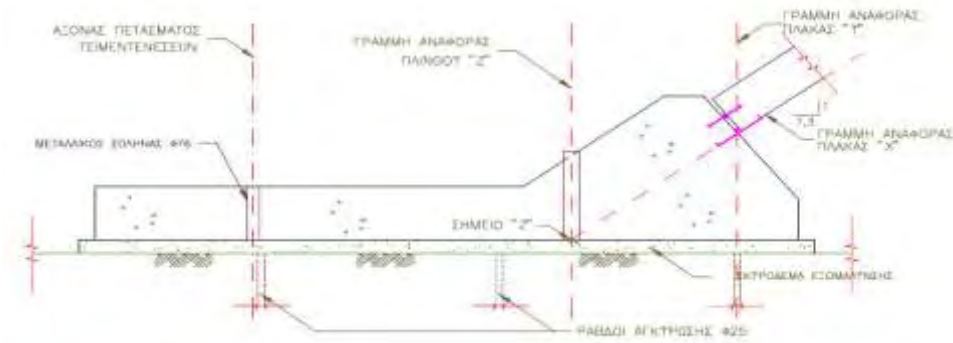
Σχ. 3: Προσαρμοσμένες ζώνες φράγματος CFRD



Σχ. 4: Τυπικές διατομές φραγμάτων με ανάντη πλάκα σκυροδέματος (α) φράγμα με μεταβατική ζώνη T (b) φράγμα με εκτεταμένη ζώνη 3B (c) φράγμα με εκτεταμένη ζώνη 3C (Ντακούλας 2010)

2.2 ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ ΚΑΙ ΑΡΜΟΙ

Η πλάκα οπλισμένου σκυροδέματος στην ανάντη πλευρά, η οποία μας εξασφαλίζει τη στεγανότητα του φράγματος, συνδέεται με τη ζώνη θεμελίωσης με την πλίνθο, η οποία συνίσταται επίσης από οπλισμένο σκυροδέμα αγκυρωμένο με ράβδους στο πέτρωμα θεμελίωσης όπως φαίνεται στο σχήμα:



Σχ. 5: Τυπική διατομή σκυροδέματος CFRD

Η σύνδεση υλοποιείται χωρίς να εφάπτονται μέσω του περιμετρικού αρμού. Μεσολαβεί διάκενο 2-3 cm και η στεγανοποίηση επιτυγχάνεται με τοποθέτηση στεγανωτικών ταινιών από χαλκό και πλαστικό. Η πλίνθος πρέπει να εδράζεται σε σκληρό, μη διαβρώσιμο και ενέσιμο βράχο. Το πλάτος της πλίνθου σε ένα CFRD σχεδιάζεται λαμβάνοντας υπόψη τις εμπειρικές σχέσεις μεταξύ του ύψους της δεξαμενής και της υπάρχουσας γεωλογίας.

$$B = K * H$$

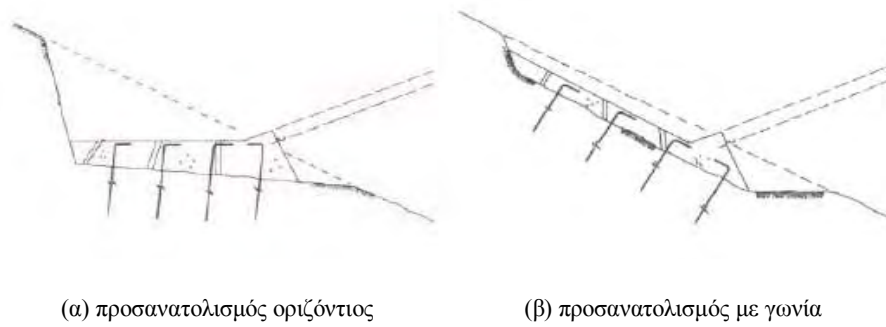
όπου:

B= το πλάτος της πλίνθου σε m.

K= εμπειρική τιμή που εξαρτάται από την ποιότητα του βράχου θεμελίωσης της πλίνθου και κυμαίνεται μεταξύ 0.05 και 0.1 για φρέσκο και αποσαθρωμένο βράχο αντίστοιχα.

H= υδραυλικό φορτίο σε m.

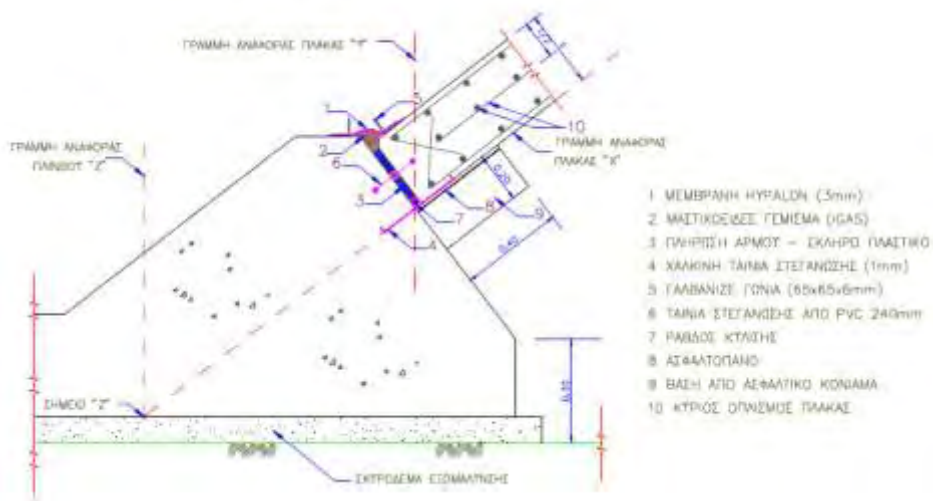
Στις περιπτώσεις, υγιούς θεμελίωσης της πλίνθου, το πλάτος της, είναι της τάξης του 1/20 του υδραυλικού φορτίου H. Το ελάχιστο πλάτος που χρησιμοποιείται για την πλίνθο είναι 3 m. Για πολύ χαμηλά φράγματα όμως, θεμελιωμένα σε σκληρό βράχο, το πλάτος της πλίνθου μπορεί μειωθεί ως τα 2m. Στα αντερείσματα το πλάτος της πλίνθου μεταβάλλεται σε ορισμένα βήματα, ανάλογα με το υδραυλικό φορτίο. Η πλίνθος στα αντερείσματα μπορεί να τοποθετηθεί είτε οριζόντια, είτε με γωνία, όπως φαίνεται στο κατωτέρω σχήμα.



Σχ. 6: Τυπική τομή της γραμμής πλίνθου στα αντερείσματα

Η πλίνθος, όπως φαίνεται στο σχήμα δέχεται την οριζόντια ώθηση του νερού, η οποία μπορεί να μηδενιστεί με την τριβή. Αυτό δεν ισχύει όμως σε πλίνθο μεγάλου πάχους όπου αναπτύσσονται μεγάλες ωθήσεις του νερού και ο έλεγχος αυτής κρίνεται απαραίτητος. Περιλαμβάνει δε έλεγχο σε ολίσθηση και ανατροπή. Η ώθηση της λιθορριπής δεν λαμβάνεται υπόψη και δεν υπάρχει αλληλεπίδραση μεταξύ πλίνθου και πλάκας σκυροδέματος, καθώς όπως αναφέραμε μεσολαβεί ο περιμετρικός αρμός. Η άνωση που ασκείται στην πλίνθο μεταβάλλεται γραμμικά με το πλάτος και αντισταθμίζεται με το κατακόρυφο υδροστατικό φορτίο και το ίδιο βάρος του σκυροδέματος.

Οι οργανομετρήσεις στα CFRDs έχουν δείξει ότι οι θλιπτικές παραμορφώσεις αναπτύσσονται σε ποσοστό μεγαλύτερο του 90% της επιφάνειας της πλάκας σκυροδέματος, εξαιτίας της καθίζησης της λιθορριπής. Μετά την πλήρωση του ταμιευτήρα παρατηρείται επιπλέον συμπίεση των περισσότερων κατακόρυφων αρμών στην κεντρική περιοχή της πλάκας καθώς αυτή υπόκειται σε θλίψη. Όμως, τόσο οι κατακόρυφοι αρμοί της πλάκας κοντά στα αντερείσματα όσο και οι περιμετρικοί αρμοί αναμένεται να μπορούν να παραλάβουν τις αναμενόμενες μετακινήσεις και στις τρεις διευθύνσεις χωρίς να καταστρέφονται τα στεγανωτικά υλικά. Μετά την πλήρωση του ταμιευτήρα είναι δυνατόν να παρατηρηθούν περιορισμένα ανοίγματα αρμών λόγω εφελκυστικών τάσεων. Συνεπώς, ο περιμετρικός αρμός μεταξύ πλίνθου και πλάκας σκυροδέματος αποτελεί μια πιθανή πηγή διαρροής εάν δεν έχει κατασκευαστεί σωστά. Το όριο ανοίγματος για τυπικούς κατακόρυφους στεγανωτικούς αρμούς είναι περίπου 10 cm.



Σχ. 7: Περιμετρικός αρμός

Από τις αρχές της δεκαετίας του 1980, σε όλα τα ψηλά φράγματα ο περιμετρικός αρμός αποτελούνταν από 3 στεγανωτικά υλικά, ώστε να φράσσουν την εισροή και να λειτουργούν συμπληρωματικά. Όμως, μετέπειτα η πράξη έδειξε ότι η παρουσία του κεντρικού στεγανωτικού υλικού (πλαστικό ή καουτσούκ) δυσκόλευε τη σωστή τοποθέτηση σκυροδέματος με σωστό και συνεχή τρόπο γύρω από αυτό. Οι άλλες στεγανωτικές διατάξεις όμως παρουσίασαν ικανοποιητική συμπεριφορά. Το γεγονός αυτό οδήγησε στην εξάλειψη του κεντρικού στεγανωτικού υλικού στα επόμενα χρόνια, ακόμα και στα πολύ ψηλά φράγματα. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η διατομή του περιμετρικού αρμού που χρησιμοποιήθηκε στο φράγμα της Μεσοχώρας. Ακόμα, μια σειρά από διπλές μπάρες οπλισμού τοποθετείται στον περιμετρικό αρμό.



Σχ. 8: Τυπική τομή του περιμετρικού αρμού στο φράγμα της Μεσοχώρας. (Αρχείο ΔΕΗ)

Η πλάκα σκυροδέματος αποτελεί το αδιαπέρατο σύνορο για το φράγμα. Κατασκευάζεται σε λωρίδες με ολισθαίνοντα μεταλλότυπο και εδράζεται στην ανάντη παρειά του φράγματος. Η κλίση της ανάντη παρειάς του φράγματος διαμορφώνεται έτσι ώστε να συγκρατείται μέσω της τριβής που αναπτύσσεται. Πολύ σημαντικό ρόλο έχουν η αντοχή του σκυροδέματος και η ακεραιότητα των υλικών στεγάνωσης της πλάκας για την ικανοποιητική απόκριση και την ανθεκτικότητα του φράγματος στο χρόνο.

Οι παράγοντες που λαμβάνονται υπόψη για την επιλογή του πάχους της πλάκας σκυροδέματος είναι το ύψος του φράγματος, η καλή προσαρμογή των στεγανωτικών υλικών στους αρμούς κυρίως στον περιμετρικό αρμό, και οι κατασκευαστικές δυνατότητες που υπάρχουν. Για να καλυφθούν επαρκώς οι οπλισμοί και να ελαχιστοποιηθούν οι ρωγμές λόγω συστολής ξήρανσης, το ελάχιστο απαιτούμενο πάχος πλάκας είναι 0.25-0.30m. Συνηθίζεται, το πάχος της πλάκας σκυροδέματος να αυξάνεται προοδευτικά από την ελάχιστη τιμή του στη στέψη του φράγματος ανάλογα με το υδροστατικό φορτίο H.

Για τα CFRDs η εισροή είναι συνυφασμένη με προβλήματα στην πλάκα. Αυτό που πρέπει να αποτραπεί είναι οποιοδήποτε πρόβλημα στην ανάντη πλάκα του σκυροδέματος. Η σταδιακή αύξηση του πάχους της πλάκας σκυροδέματος αποσκοπεί

στον περιορισμό της υδραυλικής κλίσης διαμέσου της πλάκας σε αποδεκτά όρια. Η κλίση αυτή είναι ιδιαίτερα κρίσιμη στους αρμούς και στις τριχοειδείς ρωγμές που αναπτύσσονται στην πλάκα. Σύμφωνα με τις μελέτες πάνω στη διαρροή διαμέσου λεπτών ρωγμών, συνιστάται ως μέγιστη αποδεκτή τιμή υδραυλικής κλίσης δια μέσου της πλάκας το 200.

Η εμπειρική σχέση $0.3+0.002H$ m καλύπτει την παραπάνω απαίτηση μέχρι ενός ορίου. Στα CFRDs με ύψος μικρότερο των 125 m η εφαρμογή του εμπειρικού τύπου δεν δημιουργεί προβλήματα. Σε πάρα πολλά φράγματα άνω των 125 m, η υδραυλική κλίση δια μέσου της πλάκας σκυροδέματος αυξάνει με έναν πιο γρήγορο ρυθμό σε σχέση με το ρυθμό αύξησης του πάχους της που υπολογίζεται με βάση τον παραπάνω εμπειρικό τύπο. Παράλληλα όμως, η παρουσία ρωγμών σε μερικά νέα πολύ ψηλά CFRDs υποδεικνύει το γεγονός ότι η εφελκυστική παραμόρφωση του σκυροδέματος έχει ξεπεράσει την αποδεκτή τιμή ($\epsilon > 0.0001$).

Για τον περιορισμό της εφελκυστικής παραμόρφωσης στο χαμηλότερο κομμάτι της πλάκας μπορούμε είτε να αυξήσουμε το πάχος της πλάκας είτε την αντοχή του σκυροδέματος και τον οπλισμό στις περιοχές όπου αναπτύσσονται υψηλές πιέσεις. Η χρήση ποζολάνης ως πρόσθετο ή ποζολανικού τσιμέντου βελτιώνει την αντοχή και αυξάνει έτσι το μέτρο ελαστικότητας με οικονομικό τρόπο. Η πείρα έχει αποδείξει ότι το ποζολανικό τσιμέντο έχει αυξήσει κατά 20% σε 60 ημέρες, την αντοχή των 28 ημερών. Συνεπώς, η χρήση ποζολανικού τσιμέντου συνιστά τα εξής κριτήρια για το πάχος σχεδιασμού της πλάκας σκυροδέματος:

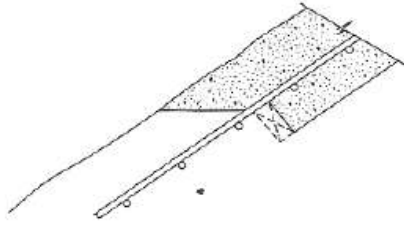
- Για φράγματα ύψους μέχρι 125m: $t = 0.3+0.002H$ (m), $f_c = 20$ MPa στις 60 μέρες
- Για φράγματα ύψους μεγαλύτερου των 125m: $t = 0.3+0.0045H$ (m), $f_c = 25$ MPa στις 60 μέρες.

Αυτός ο σχεδιασμός είναι οικονομικός και αποτρέπει τη δημιουργία ανεπιθύμητων ρωγμών.

Στην πλάκα των CFRDs αναπτύσσονται κυρίως ορθές τάσεις και σύμφωνα με τις παρατηρήσεις είναι θλιπτικές στην κεντρική ζώνη της πλάκας και εφελκυστικές μόνο κοντά στην πλίνθο. Παρά το γεγονός αυτό, είναι σκόπιμο να τοποθετείται ο οπλισμός σε όλο το εύρος της πλάκας, για να αντιμετωπιστούν τυχόν απρόβλεπτες εφελκυστικές τάσεις λόγω μεγάλων θερμοκρασιακών μεταβολών ή κατασκευαστικών ατελειών (π.χ. ανομοιόμορφη στήριξη της πλάκας, κλπ). Ο κύριος ρόλος του οπλισμού είναι η κατανομή και ο περιορισμός του εύρους των ρωγμών που αναπτύσσονται στις περιοχές της πλάκας που εφελκύνονται. Για ικανοποιητική συμπεριφορά της πλάκας έναντι εφελκυσμού, επαρκούν οι συνήθεις δομικοί χάλυβες, αλλά κάποιες φορές λόγω χαμηλού κόστους του, χρησιμοποιείται και χάλυβας υψηλότερης αντοχής.

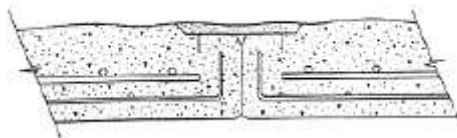
Το ποσοστό οπλισμού για την πλάκα δεν είναι καθορισμένο. Στα πρώτα CFRDs που σχεδιάστηκαν, τοποθετούνταν ποσοστό οπλισμού 0.5% στις 2 διευθύνσεις της πλάκας. Σήμερα το ποσοστό οπλισμού της πλάκας, έχει περιοριστεί στο 0.4%, συμβάλλοντας στην οικονομία της κατασκευής. Περαιτέρω μείωση του ποσοστού οπλισμού που επιχειρήθηκε πρόσφατα είχε ως αποτέλεσμα εμφάνιση ρωγμών κοντά στην πλίνθο. Επιτρέπεται επομένως, μια μικρή μείωση του οπλισμού μόνο στις θλιβόμενες περιοχές της πλάκας (ποσοστό 0.3-0.35%).

Όλος ο οπλισμός τοποθετείται στο κέντρο της διατομής της πλάκας σε μια στρώση, καθώς η πλάκα καταπονείται από ορθές κυρίως τάσεις και όχι καμπτικές. Η τοποθέτηση του οπλισμού στο κέντρο εξυπηρετεί και τον έλεγχο ρηγμάτωσης της πλάκας λόγω συστολής. Η απόσταση μεταξύ των ράβδων θα πρέπει να είναι μικρότερη του πάχους της πλάκας ($15 \leq d \leq 30$ cm). Αύξηση οπλισμού θα πρέπει να γίνεται με αύξηση της διαμέτρου των ράβδων, και όχι με μείωση της απόστασης για λόγους πρακτικούς.



Σχ. 9: Οριζόντιος κατασκευαστικός αρμός

Επίσης, συνηθίζεται η τοποθέτηση ενός δευτερεύοντα επιφανειακού οπλισμού μόνο για την κεντρική περιοχή της πλάκας, για την προστασία των κεντρικών πλακών από θρυμματισμό λόγω της μεγάλης θλίψης των γωνιών τους. Η λεπτομέρεια του δευτερεύοντος οπλισμού φαίνεται στο σχήμα:



Σχ. 10: Τυπική τομή κεντρικού κατακόρυφου αρμού συστολής. Διακρίνεται ο δευτερεύον επιφανειακός οπλισμός έναντι θρυμματισμού των γωνιών της πλάκας

Για το φράγμα της Μεσοχώρας, ως αντιπροσωπευτικό της κατηγορίας του, η ανάντη πλάκα σκυροδέματος έχει πάχος $0.3+0.003 \cdot H$ (m), όπου H το υδραυλικό φορτίο σε μέτρα νερού (30cm στη στέψη, 75cm στην κοίτη). Γενικά η τιμή του πάχους μεταβάλλεται από 0.3m στην στέψη του φράγματος έως $0.003 \cdot H$ (m) στη βάση του. Το σκυρόδεμα της πλάκας είναι κατηγορίας C25 με μέγιστο μέγεθος αδρανών 40 mm και μέσο όρο ποζολανικού τσιμέντου 350 kg/m^3 . Ο οπλισμός τοποθετείται στο μέσον της διατομής και έχει επιφάνεια ίση με το 0.4% της διατομής σκυροδέματος.

Η πλάκα έχει κατακόρυφους κατασκευαστικούς αρμούς ανά 15m, χωρίς συνέχεια οπλισμού.

Κατασκευάστηκαν τριών ειδών αρμοί:

- Περιμετρικός αρμός πλίνθου-πλάκας, με οπλισμό, εκτός από την κεντρική εσχάρα και στις επιφάνειες επαφής των δύο στοιχείων.
- Αρμός πλάκας τύπου Α, θλιπτικής καταπόνησης, στις 5 κεντρικές θέσεις.
- Αρμός πλάκας τύπου Β, εφελκυστικής καταπόνησης, στις υπόλοιπες θέσεις δεξιά και αριστερά των κεντρικών αρμών προς τα αντερείσματα.

Ο ειδικός αναρριχόμενος μεταλλότυπος που κατασκευάστηκε για το έργο περιελάμβανε διάταξη διανομής του σκυροδέματος, εξέδρες εργασιών συμπύκνωσης και φινιρίσματος και διάταξη συντήρησης, όπως φαίνονται στις παρακάτω εικόνες:



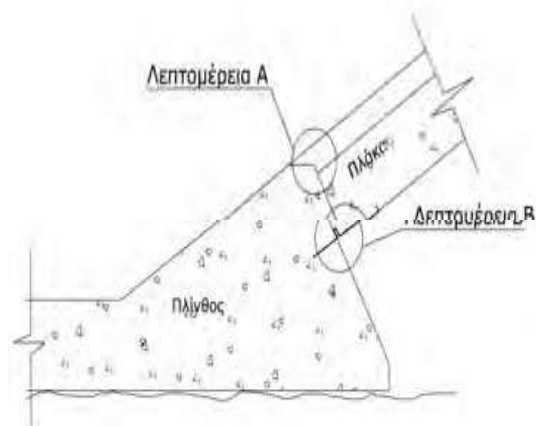
Εικ. 8: Μεταλλότυπος

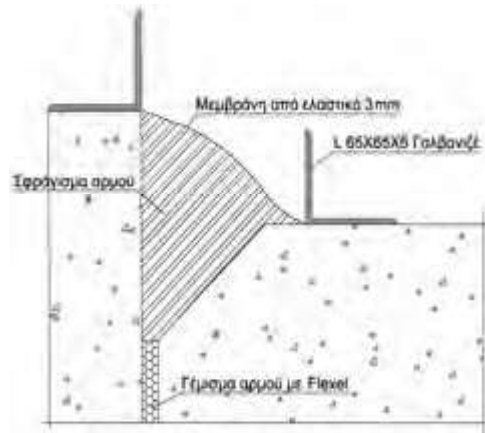


Εικ. 9: Τυπικό φράγμα CFRD υπό κατασκευή

Η τυπική διατομή των αρμών πλίνθου-πλάκας και του αρμού τύπου Β φαίνεται στα παρακάτω σχήματα (Λεπτομέρειες Α και Β)

Τυπική διάταξη αρμού Πλίνθου-Πλάκας:





Λεπτομέρεια Α



Λεπτομέρεια Β

Σχ. 11: Λεπτομέρειες Α και Β της διατομής των αρμών πλίνθου - πλάκας

Είναι σημαντικό να παρατηρήσει κανείς ότι στις θέσεις των αρμών σημειώνεται μια απομείωση της διατομής σκυροδέματος λόγω της προς τα πάνω καμπύλωσης πάχους 50 mm της διατομής του χαλκού, της διαμόρφωσης της επιφανειακής εγκοπής τύπου V στην πλάκα και της τοπικής διείδυσης των οδηγών τσιμεντοκονίας στο θεωρητικό πάχος της πλάκας.

Τα παραπάνω σημεία αποτελούσαν κοινή πρακτική της περιόδου 1990-2000 άλλα έχουν σημαντικές συνέπειες στην αντοχή της πλάκας σε θλιπτική καταπόνηση.

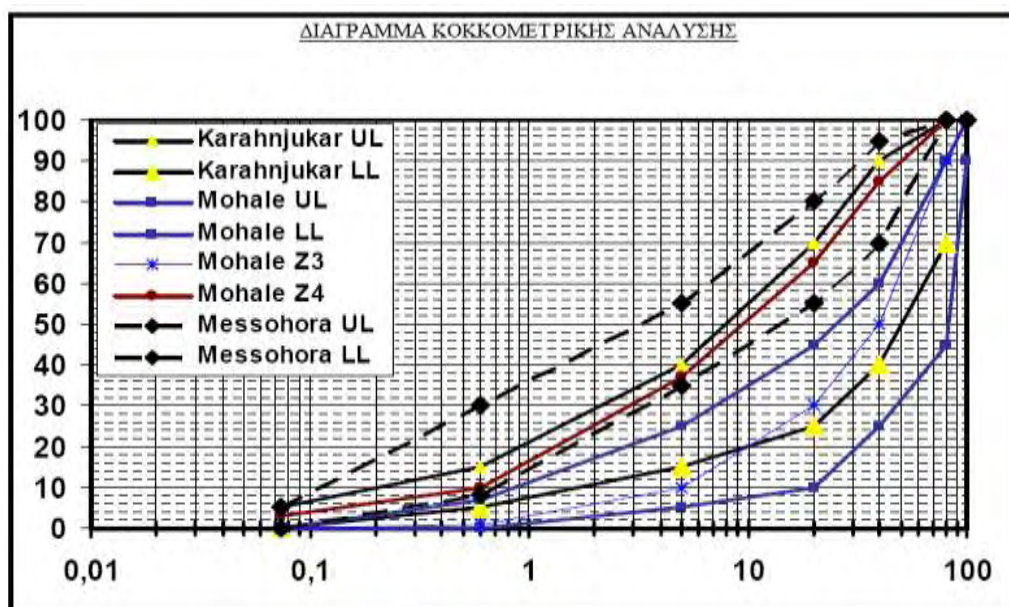
2.3 ΜΕΤΑΒΑΤΙΚΕΣ ΖΩΝΕΣ ΑΝΑΝΤΗ

Στην ανάντη επιφάνεια της πλάκας από το κατώτερο σημείο θεμελίωσης της πλίνθου τοποθετείται μια λεπτόκοκκη ζώνη 1A ως πρόσθετη προστασία έναντι διαρροών (διερχόμενα στο κόσκινο Νο200 > 30%). Το υλοαμμώδες αυτό υλικό αποτελεί μια τρίτη γραμμή άμυνας και έχει προβλεφθεί να διεισδύσει και να φράξει το άνοιγμα μιας πιθανής διαρροής.

Μία ζώνη πλάτους 4 m (ζώνη 2B) από επεξεργασμένο καλά διαβαθμισμένο αμμοχάλικο μέγιστου κόκκου 75 mm κατασκευάζεται στην ανάντη παρειά του επιχώματος, πριν την σκυροδέτηση της πλάκας, για να εξασφαλίσει την ομαλή κατανομή των φορτίων της. Η ζώνη αυτή έχει επίσης σαν στόχο να ελέγχει σε κάποιο βαθμό τις διαρροές που πιθανόν να εμφανισθούν από αστοχία κάποιου αρμού της πλάκας (λειτουργία φίλτρου ως προς το υλικό 1A).

Όπως φαίνεται από την κοκκομετρία, η ζώνη 2B στο φράγμα Μεσοχώρας είναι σχετικά πλούσια σε άμμο (35~55%), ενώ η αντίστοιχη ζώνη σε πιο σύγχρονα μεγάλα έργα είναι λιγότερο πλούσια σε κόκκους κάτω του N^ο 4. (Mohale, Karahnjukar).

Κατάντη του αρμού πλίνθου-πλάκας και σε περιορισμένο πλάτος εκατέρωθεν, τοποθετήθηκε η ζώνη άμμου-αμμοχάλικου 2A με μέγιστο κόκκο 19,5mm ώστε να αποτελέσει φίλτρο συγκράτησης των λεπτόκοκκων της ζώνης 1A σε περίπτωση μεγάλων παραμορφώσεων. Η ζώνη 2A αναμείχθηκε με τσιμέντο σε αναλογία 5% για να προσφέρει καλύτερη υποστήριξη της πλάκας στην θέση του περιμετρικού αρμού.



Διάγρ. 1: Κοκκομετρία ανάντη μεταβατικής ζώνης 2B σε σύγκριση με αυτή άλλων έργων (P. Johannesson 2007)

2.4 ΛΙΘΟΡΡΙΠΗ

Παρακάτω παρουσιάζονται τα υλικά λιθορριπής των ζωνών (Πίνακας 1) για το φράγμα της Μεσοχώρας και οι απαιτήσεις κοκκομετρίας των αντίστοιχων ζωνών λιθορριπής (Πίνακας 2) για τα έργα Karahnjuka, Mohale και Μεσοχώρας:

Υλικό	Ζώνη	Πάχος Στρώσης(m)	Μέγιστος κόκκος (m)	Επιτόπου Πυκνότητα (t/m ³)	Συμπύκνωση Διελύσεις Δομητ.Συμπ.
Λιθορριπή	3B	1.0	1.0	1.90	4
Λιθορριπή	3C	1.5	1.5	1.90	4
Επεξεργασμένη Λιθορριπή	3A	0.4	0.4	1.90	4
Επεξεργασμένα Αμμογάλκα	2B	0.4	0.075	2.25	4
Επεξεργασμένα Αμμογάλκα	2A	0.4	0.0195	2.20	4
Πυώδης Αργίλος	1A	0.30	#200>30%		Προωθητής
Τυχαία Υλικά	1B	0.30	0.30		4

Πίνακας 1: Ζώνες Φράγματος Μεσοχώρας: Απαιτήσεις προδιαγραφών και επιτόπου πυκνότητες

ΦΡΑΓΜΑ	Κόσκινο mm	Ζώνη 2B	Ζώνη 3C
Karahnjuka i	40	<55%	<40%
	5	<30%	<20%
	0,074	<7%	<5%
Mohale	25	<30%	<30%
	0,074	<10%	<10%
Μεσοχώρ α	25	<40%	<40%
	0,074	<5%	<5%

Πίνακας 2: Κοκκομετρική διαβάθμιση λιθορριπής, απαίτηση προδιαγραφών τριών φραγμάτων (P. Johannesson 2007)

ΤΕΧΝΙΚΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΤΩΝ CFRD

3.1 ΓΕΝΙΚΑ

Με βάση τη διεθνή εμπειρία έχουν θεσπιστεί κανόνες για την κατασκευή κάθε είδους φραγμάτων και έχουν εξελιχθεί ειδικά μηχανήματα για την εκσκαφή γεωλογικών σχηματισμών, τη συμπύκνωση των στρώσεων, τον οπλισμό των σκυροδεμάτων, τη στεγανοποίηση του υπεδάφους και των διαφόρων σημείων του έργου όπου υπάρχουν ενδείξεις πιθανών διαρροών, τη διάνοιξη σηράγγων κλπ.

Η μελέτη και η κατασκευή φραγμάτων αποτελεί εξειδικευμένη εργασία, η οποία διέπεται από ειδική νομοθεσία στη χώρα μας, αλλά και διεθνώς, όσον αφορά τη διαδικασία και τις τεχνικές προδιαγραφές που εφαρμόζονται.

Η διασφάλιση της ποιότητας κατά τη διάρκεια της κατασκευής γίνεται με ελέγχους σε εγκατεστημένα επί τόπου εργαστήρια και με διαδοχικές μετρήσεις. Η τήρηση των όρων προσαρμογής με τις συνθήκες του περιβάλλοντος υπακούει στη σχετική νομοθεσία και όπου απαιτείται κατασκευάζονται έργα αποκατάστασης. Σημαντικό ρόλο παίζει και η μελέτη σεισμικότητας και σεισμικής επικινδυνότητας της ευρύτερης περιοχής κατασκευής του φράγματος, αλλά και της δυναμικής του απόκρισης σε μεγάλο σεισμό.

Για τους παραπάνω λόγους η υλοποίηση τέτοιων έργων είναι χρονοβόρα και εξαρτάται πολύ από τις τοπικές συνθήκες.

Η τεχνολογία τόσο του σχεδιασμού όσο και της κατασκευής των έργων αυτών εξελίσσεται συνέχεια με αποτέλεσμα όλο και μεγαλύτερα και ψηλότερα φράγματα να κατασκευάζονται. Τα φράγματα από λιθορριπή με ανάντη πλάκα σκυροδέματος αναπτύχθηκαν έντονα κατά τις τελευταίες δεκαετίες. Ο τύπος αυτός φράγματος παρουσιάζει αναμφίβολα πολλά πλεονεκτήματα όπως:

- Υψηλές κλίσεις πρανών λόγω μεγάλης γωνίας διατμητικής αντοχής και απουσίας νερού από τη λιθορριπή
- Το βάρος του νερού αυξάνει τη δυσκαμψία και αντοχή της λιθορριπής
- Η συμπύκνωση της λιθορριπής υπό βροχή αποδεκτή ή επιθυμητή
- Οικονομία υλικών λόγω μεγάλης κλίσης πρανών
- Εύκολη προσαρμοστικότητα σε διαφορετικές γεωλογικές και τοπογραφικές συνθήκες
- Εισάγουν σχετικά χαμηλές τάσεις στη θεμελίωση και δέχονται χωρίς θραύση παραμορφώσεις από διαφορετικές καθιζήσεις ή σεισμικές ωθήσεις
- Μικρότερο όγκο επιχώματος και λίγα υλικά προς μεταφορά από άλλες περιοχές
- Εύκολη συντήρηση, επισκευή καθώς και ασφαλέστερη λειτουργία

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:

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 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 and E. Frossard 2008)

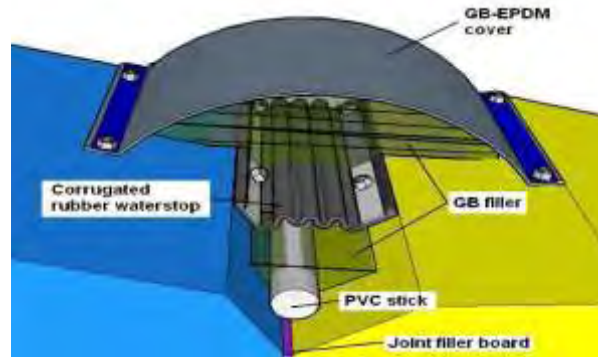
Ορισμένοι πρακτικοί κανόνες είναι ωστόσο χρήσιμο να υιοθετηθούν στον σχεδιασμό των νέων έργων και κάποιες σημαντικές βελτιώσεις έχουν ήδη γίνει σε πρόσφατα κατασκευασμένα φράγματα όπως το Karahnukar (202 m) και το Shuibuya (233 m). Οι βελτιώσεις αυτές (M.A. Hongqi and CAO Keming 2008) αφορούν σε:

- Αύξηση της ακαμψίας του επιχώματος στην ανάντη περιοχή στα 2/3 της διατομής και στο πάνω 1/4H τμήματος του φράγματος, με βελτίωση της πυκνότητας του.
- Ενίσχυση της πλάκας ώστε να αντιμετωπίζονται τα φαινόμενα θλιπτικής αστοχίας της.
- Καθορισμό των σταδίων κατασκευής του φράγματος ώστε να προβλέπεται χρόνος για ολοκλήρωση του μέγιστου μέρους των καθιζήσεων πριν την κατασκευή της πλάκας.

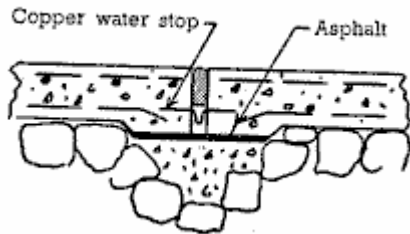
3.2 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΤΗΣ ΠΛΑΚΑΣ

Οι νέες τεχνικές που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή της πλάκας περιλαμβάνουν τη χρήση του αυτο-αναρριχώμενου καλουπιού (self-climbing top shutter) με συνεχή τροφοδοσία σκυροδέματος σε όλο το πλάτος του πάνελ, την ταχεία μετακίνηση του στη στέψη του φράγματος καθώς και το ειδικά κατασκευασμένο σύστημα μεταφοράς και τοποθέτησης του οπλισμού. Όλα μαζί συνετέλεσαν στην παραγωγή ενός πολύ καλού αποτελέσματος και πέτυχαν πολύ ψηλή επίδοση ταχύτητας στη σκυροδέτηση της πλάκας. Η πρωτοποριακή μέθοδος ελέγχου των συγκολλήσεων της χάλκινης στεγανωποιητικής λωρίδας (GB- waterstop), όπως φαίνεται στην εικόνα 10 με τη χρήση κενού αέρος, αποτελεί σταθμό στην κατασκευή των λιθόρριπτων φραγμάτων με ανάντη πλάκα.

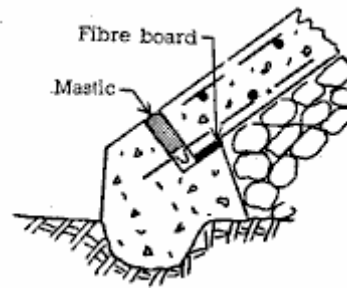
Στην επιφάνεια του σκυροδέματος στον αρμό εφαρμόζεται ένας διακόπτης ασφάλτου. Οι κεντρικές αρθρώσεις έχουν σχεδιαστεί ως αρμοί συμπίεσης με 20 mm πάχους πλήρωσης συμπίεστου φελλού. Έτσι θα επιτραπεί πιθανή κίνηση των πλακών προς την κοιλάδα κάτω από ενδεχόμενη συμπίεση.



Εικ. 10: Σύστημα υδατοστεγανότητας



Εικ. 11: Τυπικός κατακόρυφος αρμός



Εικ. 12: Τυπικός αρμός σε πλίνθο

Η πλάκα κατασκευάζεται σε δύο στάδια. Στο πρώτο στάδιο έως ένα συγκεκριμένο ύψος και στο δεύτερο στάδιο από το ύψος αυτό μέχρι την κορυφή (σύνδεση με το στηθαίο). Η οριζόντια άρθρωση μεταξύ του πρώτου και δεύτερου σταδίου της πλάκας είναι κατασκευασμένη με 20 mm κοινό πληρωτικό (waterstop στην κάτω επιφάνεια χαλκού και GB waterstop). Η πλήρωση αυτή θα μειώσει τις θλιπτικές τάσεις στην κατεύθυνση κλίσης.

Διπλή ενίσχυση οπλισμού στο στρώμα του συνόλου κατά 0,4% σε κάθε κατεύθυνση σε όλη την πλάκα προσώπου. Η αναλογία αυξάνεται σε 0,5% στην περιοχή την οποία οι διαφορικές καθιζήσεις είναι αναμενόμενες: Σε ύψος 20 m από τη βάση και 40 m οριζόντια απόσταση από τα αντερείσματα (Kutzner 1997, p.190).

Στις κεντρικές πλάκες σε μια περιοχή από περίπου 1/4 έως 3/4 του ύψους του φράγματος, όπου συμβαίνουν οι υψηλότερες συμπιεστικές δυνάμεις, παρέχονται επιπλέον συνδετήρες για την αποφυγή λυγισμού των πλακών και του υποκείμενου οπλισμού υπό υψηλή συμπίεση. Κατά μήκος των αρθρώσεων παρέχεται ενίσχυση προς αποφυγή θρυμματισμού αυτών.

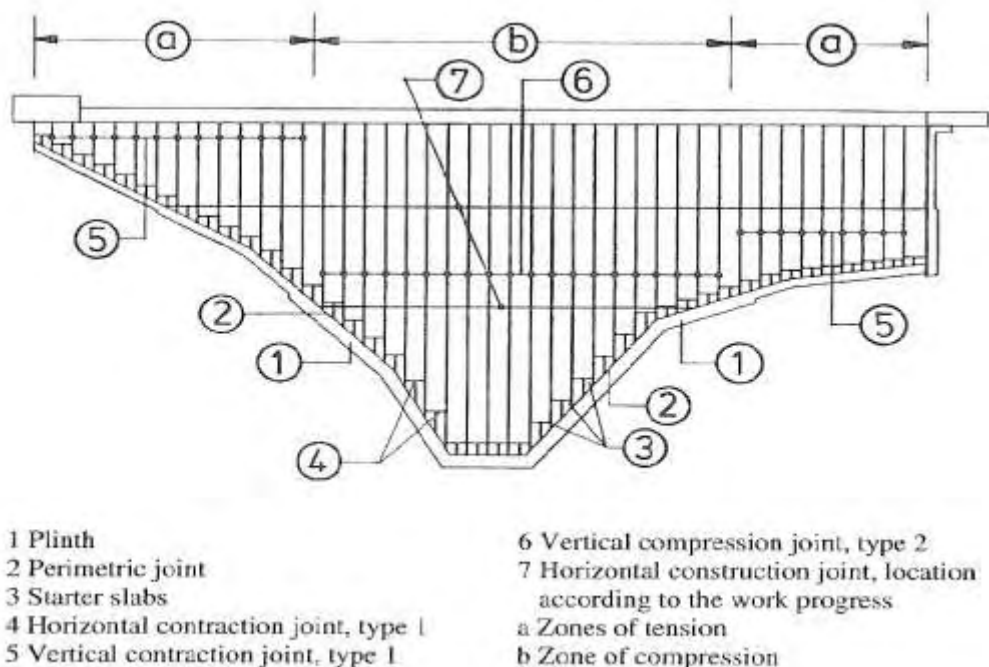
Αν και κατασκευάζεται από σκυρόδεμα σχετικά χαμηλής αντοχής (περίπου 25 MPa), η παραμορφωσιμότητα των πλακών είναι σημαντικά χαμηλότερη από εκείνη της λιθορριπής στη ζώνη 2B. Επομένως, αν η λιθορριπή παραμορφώνεται, διευθετεί τις σχετικά άκαμπτες πλάκες οι οποίες δύνανται να μην παρακολουθούν τις κινήσεις πλήρωσης των κενών που μπορεί να αναπτυχθούν κατά τη διάρκεια της κατασκευής του φράγματος.

Όταν το σκυρόδεμα των πλακών εκτεθεί σε υψηλό φορτίο νερού (κατά τη διάρκεια πλήρωσης του ταμιευτήρα) τα κράσπεδα μπορεί να ραγίσουν στις περιοχές των κενών. Στην περίπτωση αυτή, η πλάκα από σκυρόδεμα υπόκειται σε ταχεία παραμόρφωση και υψηλές τάσεις. Συνεπώς, η ανάπτυξη των μεγάλων κενών κάτω από τα συγκεκριμένα

κράσπεδα πρέπει να αποφεύγεται, ή εάν έχουν ήδη αναπτυχθεί θα πρέπει να πληρωθούν πριν από την κατάκλιση νερού, όπως π.χ. συνέβει στο CFRD φράγμα Κάραηγιόκαρ, όπου παρουσιάστηκαν εκτεταμένα κενά στην αρμολόγηση κάτω από τα κράσπεδα.

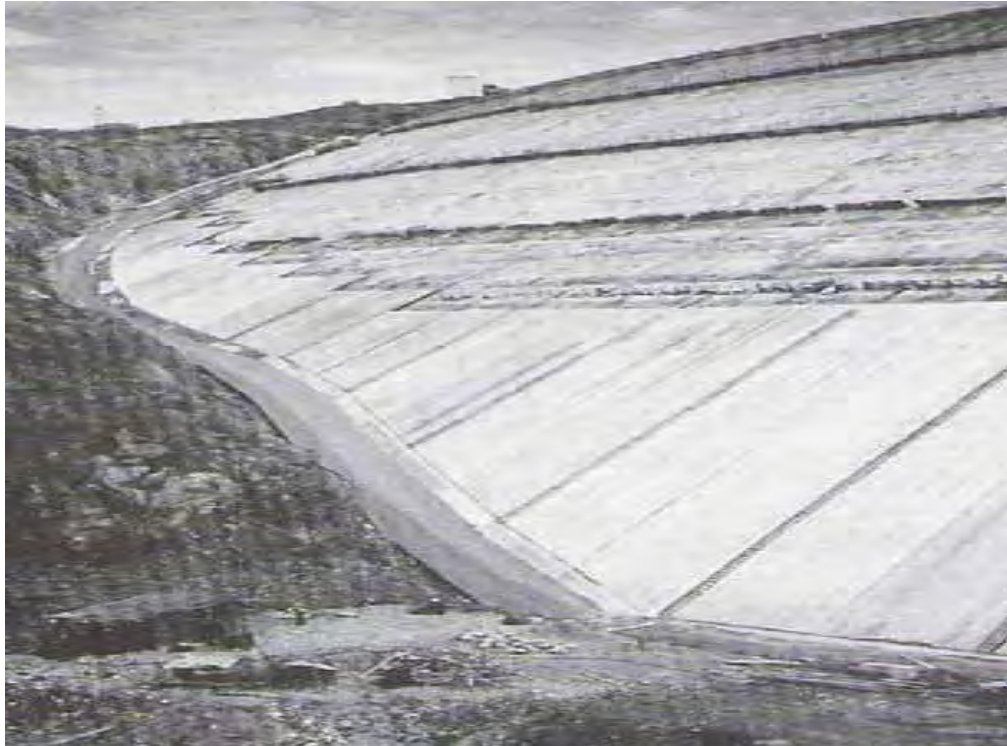
Για να μειωθεί η ανάπτυξη των σημαντικών κενών πίσω από τα κράσπεδα αυτά θα πρέπει να είναι πιο ευέλικτα, έτσι ώστε να είναι σε θέση να κινηθούν με τις παραμορφώσεις της λιθορριπής. Ο τεμαχισμός λοιπόν των κρασπέδων σε μικρότερα κομμάτια είναι μία μέθοδος πολλά υποσχόμενη. Ως εκ τούτου, σε ορισμένα CFRDs που κατασκευάστηκαν πρόσφατα στην Κίνα τα κράσπεδα κόπηκαν κάθετα στις θέσεις των αρμών της πλάκας πριν από την κατασκευή της ανάντη πλάκας. Έτσι αναπτύχθηκαν ρωγμές κατά μήκος των αυλακίων.

Σε μεταγενέστερο στάδιο του έργου διερευνητικές τρύπες θα ανοίγονται μέσα από την πλάκα με στόχο να διερευνηθεί, εάν έχουν αναπτυχθεί κενά μεταξύ των κρασπέδων της πλάκας και της 2B ζώνης. Εάν έχει συμβεί αυτό θα πρέπει να πληρωθούν άμεσα προς αποφυγή αστοχίας.



Σχ. 11: Τυπική στεγανοποίηση και διάταξη των πλακών σκυροδέματος (Kutzner 1997, p.191)

Το μέγιστο μέγεθος των κόκκων των αδρανών υλικών είναι περίπου 40 mm. Η περιεκτικότητα σε τσιμέντο ήταν αρχικά 350 kg/m^3 , και κατά προτίμηση είναι 300 kg/m^3 . Συνεπώς, η αναλογία νερού/τσιμέντο είναι τώρα περίπου 0,55. Η ανάπτυξη των ρωγμών συρρίκνωσης μπορεί ευρέως να αποφευχθεί με σκλήρυνση του σκυροδέματος με νερό μέχρι να αρχίσει η πλήρωση (Kutzner 1997).



Εικ. 13: Υπό κατασκευή στεγανοποίηση πλάκας σκυροδέματος. (πλάκες πλίνθου σε οριζόντια διάρθρωση κατασκευής και μεταβατική στρώση καλύμματος από σκυρόδεμα)

3.3 ΕΝΟΡΓΑΝΩΣΗ ΤΩΝ ΦΡΑΓΜΑΤΩΝ

Η συμπεριφορά του φράγματος και του ταμιευτήρα πρέπει να παρακολουθείται καθ' όλο το στάδιο λειτουργίας τους με ειδικά όργανα, στα οποία εκτελούνται μετρήσεις ακόμα και από το στάδιο κατασκευής. Τα όργανα αυτά καταγράφουν όλες τις παραμέτρους συμπεριφοράς του φράγματος, ώστε ανά πάσα στιγμή να είναι δυνατή η δημιουργία μιας εικόνας της ολικής συμπεριφοράς του.

Τέτοια όργανα είναι:

- Πιεσόμετρα νερού πόρων
- Κύτταρα μέτρησης ολικών πιέσεων
- Κλισιόμετρα
- Καθιζήμετρα
- Όργανα μέτρησης επιφανειακών μετακινήσεων
- Επιταχυνσιογράφοι
- Μετακίνησης αρμών

- ***Πιεσόμετρα νερού πόρων***

Ο σκοπός αυτών των οργάνων είναι η παρακολούθηση των πιέσεων του νερού των πόρων ειδικά μέσα στον αργιλικό πυρήνα, μιας πολύ σημαντικής και χρήσιμης παραμέτρου τόσο κατά τη διάρκεια της κατασκευής αλλά και κατά τη λειτουργία του φράγματος. Είναι πιθανό κατά την διάρκεια μιας ισχυρής σεισμικής δόνησης να αυξηθούν σημαντικά οι πιέσεις του νερού των πόρων, μέχρι σημείου που να επηρεάσουν την ασφάλεια του φράγματος. Τέτοιες αυξήσεις θα γίνουν αντιληπτές από τα πιεσόμετρα και θα καταγραφούν.

Ο ρυθμός γεμίσματος του φράγματος, πρέπει να ελέγχεται προσεκτικά παρατηρώντας τις αλλαγές των τιμών των πιέσεων του νερού των πόρων μέσα στον αργιλικό πυρήνα του φράγματος, ιδιαίτερα κατά τη διάρκεια του πρώτου γεμίσματος του φράγματος.



Εικ. 14: Τοποθέτηση ηλεκτρικών πιεσομέτρων.

- **Κύτταρα μέτρησης ολικών πιέσεων**

Τα όργανα αυτά τοποθετούνται σε συμπλέγματα (clusters) των πέντε, μαζί με ένα πιεσόμετρο. Μετρούν τις ολικές πιέσεις σε πέντε διαφορετικές κατευθύνσεις και μαζί με την μέτρηση του πιεσόμετρου επιτρέπουν τον υπολογισμό των ενεργών τάσεων στο σημείο τοποθέτησης τους.

Ένα όργανο είναι εγκατεστημένο να μετρά τη κάθετη πίεση, δύο όργανα την οριζόντια στην ανάντη-κατάντη και στην κατεύθυνση κατά μήκος του άξονα και δύο όργανα σε κλίση 45 μοιρών. Έτσι από τέτοιες μετρήσεις μπορεί να υπολογιστεί ο βαθμός τυχόν στροφής των κυρίων τάσεων. Επίσης φαίνεται από τις μετρήσεις των οργάνων αυτών πόσο από το συνολικό μέγεθος της φόρτισης μεταφέρεται στο σημείο των οργάνων. Αυτό δείχνει αν έχουν προκληθεί φαινόμενα αψίδωσης (arching) σε πιο ψηλά σημεία του φράγματος, τα οποία μπορεί να δημιουργήσουν συνθήκες υδραυλικών ρηγματώσεων (hydraulic fracturing) που μπορεί να είναι επικίνδυνες.

- **Κλισιόμετρα**

Τα όργανα αυτά είναι κλισιομετρικοί σωλήνες οι οποίοι τοποθετούνται είτε σε γεωτρήσεις, είτε δια μέσου των διαφόρων υλικών κατά την διάρκεια της τοποθέτησης τους, με σκοπό την μέτρηση οριζοντίων μετακινήσεων σε δύο κατευθύνσεις. Οι μετρήσεις λαμβάνονται με το κατέβασμα ειδικής τορπίλης σε όλο το μήκος του σωλήνα και την καταγραφή της απόκλισης κάθε μισό μέτρο. Έτσι διαγράφεται το ολικό προφίλ του σωλήνα. Οποιαδήποτε μετακίνηση σε κάποιο σημείο μπορεί να μετρηθεί και να αξιολογηθεί, ιδιαίτερα μετά από κάποιο σεισμική δόνηση.

Στο εξωτερικό του σωλήνα μπορεί να τοποθετηθούν μαγνήτες που ακολουθούν κάθετες μετακινήσεις, ώστε να καταγράφεται ταυτόχρονα και η καθίζηση στη περιοχή. Το όργανο αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό κυρίως στους αργλικούς πυρήνες όπου τέτοιες παραμορφώσεις είναι πιο συχνές και μπορεί να επηρεάσουν την σωστή λειτουργία τους.

- **Καθιζήμετρα**

Αυτά μπορεί να είναι υδραυλικά ή υδραργυρικά και μετρούν τοπικές καθιζήσεις. Τοποθετούνται συνήθως σε διάφορα υψόμετρα και τομές, στη ανάντη-κατάντη κατεύθυνση και παρέχουν την δυνατότητα σχεδιασμού τομών που δείχνουν, το βαθμό των καθιζήσεων των διαφόρων υλικών και τον υπολογισμό των παραμέτρων του μέτρου ελαστικότητάς των.



Εικ. 15: Τοποθέτηση υδραυλικού κλισιομέτρου σε αργλικό πυρήνα.

- **Επιφανειακές μετακινήσεις**

Τοπογραφικά σημεία τοποθετούνται σε επιλεγμένες θέσεις ώστε με την χρήση τοπογραφικών οργάνων μεγάλης ακριβείας να μετριοούνται επιφανειακές μετακινήσεις σε δύο οριζόντιες κατευθύνσεις, αλλά και καθιζήσεις.

- **Επιταχυνσιογράφοι**

Επιταχυνσιογράφοι ψηφιακής καταγραφής επιταχύνσεως σεισμών τοποθετούνται σε δύο ή τρία σημεία του φράγματος. Ένας στη βάση, ένας στη στέψη και ένας συνήθως σε μια από τις σήραγγες του έργου. Αυτή η διαρρύθμιση δείχνει το βαθμό της διαφοροποίησης του μεγέθους της επιτάχυνσης (δυναμική μεγέθυνση) από τη βάση κυρίως του φράγματος μέχρι τη στέψη.

4

ΑΙΤΙΕΣ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΦΡΑΓΜΑΤΩΝ

4.1 ΚΙΝΔΥΝΟΣ ΚΑΙ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑ

Οι αστοχίες των φραγμάτων αποτελούν σημαντικό κεφάλαιο της γεωτεχνικής μηχανικής, καθώς 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.

Πληροφορίες σχετικές με τους παράγοντες που προκαλούν αστοχίες σε φράγματα συλλέγονται από το 1850 περίπου. Προφανώς, η τεχνολογία έχει αλλάξει δραστικά από την εποχή εκείνη και τα βελτιωμένα κριτήρια σχεδιασμού (design standards) και οι καλύτερες πρακτικές κατασκευής συνεχίζουν να μειώνουν τον αριθμό των αστοχιών.

Στη μελέτη των συνεπειών της αστοχίας ενός φράγματος, ο κίνδυνος και η επικινδυνότητα ορίζονται ως εξής:

Επικινδυνότητα ορίζεται ως οι πιθανές συνέπειες από μια αστοχία φράγματος, όπως η ενδεχόμενη απώλεια ζωών ή οι ζημιές σε περιουσίες κατάντι του φράγματος από νερά πλημμύρας τα οποία απελευθερώθηκαν από το φράγμα ή από νερά τα οποία απελευθερώθηκαν λόγω μερικής ή ολικής αστοχίας του φράγματος.

Η κατάταξη αναλόγως της επικινδυνότητας δεν αναφέρεται στην κατάσταση του φράγματος ή των βοηθητικών κατασκευών ούτε στην προσδοκώμενη απόδοση ή λειτουργία του φράγματος. Είναι όμως περιγραφική της διάταξης των περιοχών κατάντι του φράγματος και είναι ένας δείκτης του σχετικού μεγέθους των πιθανών συνεπειών σε ανθρώπινες ζωές όταν το συγκεκριμένο φράγμα αστοχήσει.

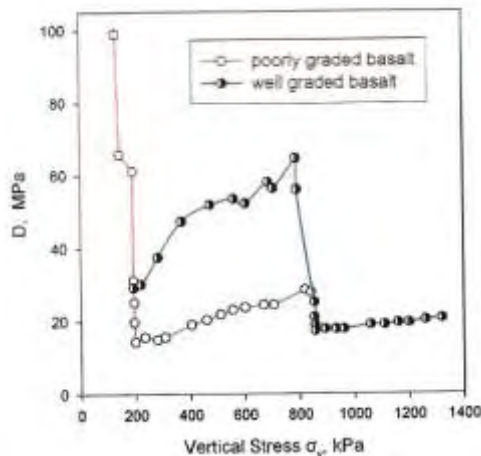
Ο κίνδυνος ορίζεται ως η πιθανότητα ενός φράγματος να αστοχήσει. Ασχέτως πόσο καλά είναι κατασκευασμένο ή συντηρημένο το φράγμα, ο κίνδυνος αστοχίας δεν μπορεί να μειωθεί στο μηδέν. Ένα φράγμα μπορεί να έχει μικρό κίνδυνο αστοχίας αλλά μπορεί να παρουσιάζει υψηλή επικινδυνότητα όταν συμβεί η αστοχία, ειδικά όταν μεγάλος αριθμός ανθρώπων ζουν μέσα στη ζώνη πλημμύρας του φράγματος. Όλα τα φράγματα παρουσιάζουν κάποιο κίνδυνο, ασχέτως πόσο χαμηλός είναι, παρουσιάζουν όμως και μια επικινδυνότητα στους πολίτες ή στις περιουσίες.

Οι παράγοντες κινδύνου που μπορεί να προκαλέσουν αστοχία ενός φράγματος ορίζονται σαν υψηλοί κίνδυνοι όταν απειλούνται ζωές ή περιουσίες.

4.2 Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΥΛΙΚΟΥ ΤΗΣ ΛΙΘΟΡΡΙΠΗΣ

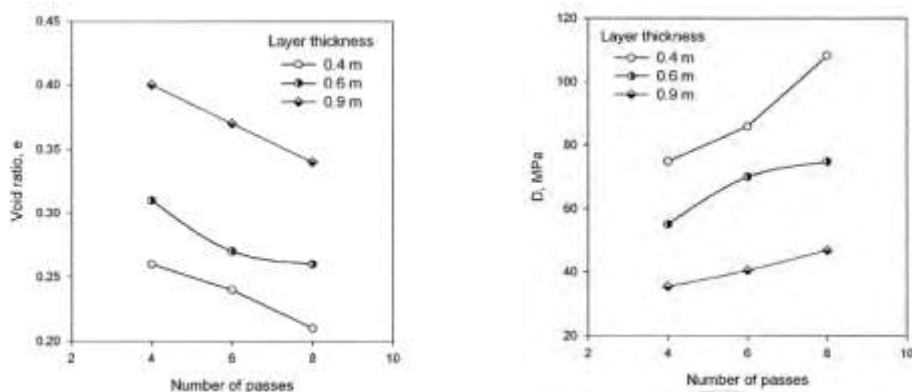
Στην κατασκευή των CFRDs συχνά έχουν χρησιμοποιηθεί υλικά πολύ μεγάλης αντοχής όπως ο υγής βασάλτης (με αντοχή >200 MPa). Το μέτρο ελαστικότητας των υλικών αυτών κατά την κατασκευή είναι αρκετά υψηλό, αλλά κατά την πλήρωση του φράγματος είναι δυνατόν να υποστεί δραστική μείωση. Ένα παράδειγμα κακής συμπεριφοράς τέτοιου υλικού δίνεται στο Διάγραμμα 2, το οποίο παρουσιάζει πειραματικά αποτελέσματα για τη μεταβολή του μέτρου μονοδιάστατης συμπίεσης

δολεριτικού βασάλτη. Στο φράγμα Mohale χρησιμοποιήθηκε καλώς διαβαθμισμένος βασάλτης στην ανάντη ζώνη και κακώς διαβαθμισμένος βασάλτης στην κατάντη ζώνη. Λόγω του γωνιώδους σχήματος και της σημαντικής αλληλεμπλοκής μετά τη συμπίκνωση το κακώς διαβαθμισμένο υλικό έχει μέτρο συμπίεσης $D = 100$ MPa, όμως μετά την αύξηση της κατακόρυφης τάσης σε τιμές άνω των 200 KPa, η τιμή του D μειώνεται δραστικά στα 14 MPa λόγω θραύσης του υλικού. Ο καλώς διαβαθμισμένος βασάλτης έχει αρχική τιμή του D ίση προς 29 MPa, η οποία αυξάνεται μέχρι τα 65 MPa καθώς η κατακόρυφη τάση αυξάνει στα 780 KPa, ενώ αμέσως μετά μειώνεται στην τιμή των 17 MPa. Παρόμοια πτώση του μέτρου ελαστικότητας μετά από κάποια τάση κρίσιμη παρατηρήθηκε επίσης στα φράγματα Karahjukur, Ita, κλπ.



Διάγραμμα 2: Μέτρο μονοδιάστατης συμπίεσης βασάλτη από το φράγμα Mohale (α) κακή διαβάθμιση (β) καλή διαβάθμιση (Ντακούλας 2010)

Η χρήση βασάλτη (ή άλλου υλικού) μέσης αντοχής (30-40 MPa), με καλή διαβάθμιση και καλή συμπίκνωση, είναι δυνατόν πέραν της σημαντικής οικονομίας, να αποδώσει μικρότερο λόγο κενών και συνεπώς μεγαλύτερο μέτρο ελαστικότητας. Με κατάλληλη διαβάθμιση και συμπίκνωση είναι δυνατή η μείωση του λόγου κενών e σε τιμές ≤ 0.3 , οπότε η περαιτέρω θραύση του υλικού είναι μικρή, ενώ για $e \leq 0.2$ είναι σχεδόν μηδενική. Στο Σχήμα 12 δίνεται η μεταβολή (α) του λόγου κενών e και (β) του μέτρου D ως προς τον αριθμό διελεύσεων του δονητικού συμπυκνωτή (12t) για τρία πάχη στρώσεων από τις δοκιμές συμπίκνωσης ιγνιμβρίτη στο φράγμα El Cajon, το οποίο παρουσίασε εξαιρετική συμπεριφορά.



Σχήμα 12: Φράγμα El Cajon: (α) Λόγος κενών (β) μέτρο μονοδιάστατης συμπίεσης ως προς τον αριθμό διελεύσεων (Ντακούλας 2010)

4.3 ΑΙΤΙΕΣ ΑΣΤΟΧΙΩΝ ΕΝΟΣ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ

• *Υπερχείλιση των αναχωμάτων λόγω ανεπάρκειας του υπερχειλιστή*

Είναι μια από τις πιο κοινές αιτίες των αστοχιών φραγμάτων και δεν έχει καμία σχέση με τη γεωλογία της περιοχής 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. Το μέγεθος της μέγιστης πλημμύρας, κατά τη διάρκεια της ζωής ενός φράγματος μεταβάλλεται έτσι ώστε, 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*

Στον σχεδιασμό και την κατασκευή ενός φράγματος πρέπει να προσεχθούν τα παρακάτω σημεία:

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

• *Γεωλογικά προβλήματα στη θεμελίωση*

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.λ.π.) ή να περιέχουν υλικά που να είναι εύκολα σε διάβρωση και να δημιουργήσουν συνθήκες αποσύνθεσης μετά το γέμισμα του ταμιευτήρα.

• *Κατολίσθησεις στον ταμιευτήρα*

Μια κατολίσθηση στον ταμιευτήρα μετά από ένα σεισμό, η μια μεγάλη κίνηση σε κάποιο ρήγμα που διασχίζει τα θεμέλια του φράγματος, μπορεί να προκαλέσει πλημμύρα αρκετά μεγάλη με υπερχείλιση που θα οδηγήσει τελικά στη αστοχία λόγω ανεπάρκειας του υπερχειλιστή.

• *Ανθρώπινοι παράγοντες*

Ανθρώπινα απλά λάθη, κακή διαχείριση λειτουργιών και παραλείψεις μπορεί να συνδυαστούν με άλλους κινδύνους και να αυξήσουν την πιθανότητα αστοχίας. Ο μηχανικός εξοπλισμός και τα εξωτερικά μέρη του σώματος του φράγματος, όπως π.χ η λιθορριπή (gir-rap), κινδυνεύουν να υποστούν ζημιές από τον άνθρωπο. Πρέπει να λαμβάνονται όλα τα μέτρα περιορισμού της πρόσβασης στα φράγματα σε μη εξουσιοδοτημένα άτομα και οχήματα.

• *Λειτουργικοί παράγοντες*

Αναφέρονται στην πρόσβαση και στο πόσο απόμακρο είναι ένα φράγμα, στην απουσία ενός εκπαιδευμένου ή έμπειρου χειριστή, στις ελλιπείς διαδικασίες συντήρησης του φράγματος, στην απουσία προγράμματος επιθεώρησης, στην αξιοπιστία της τροφοδοσίας ηλεκτρικού εξοπλισμού και στην πολυπλοκότητα του εξοπλισμού και των λειτουργικών διαδικασιών του φράγματος.

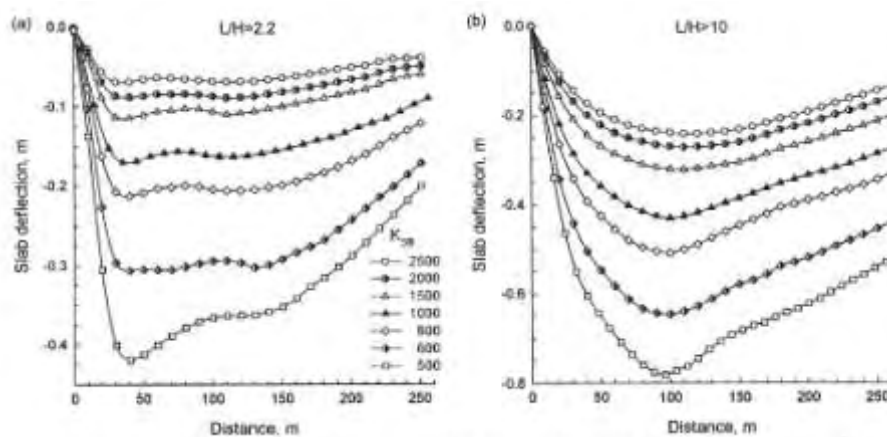
• Καθιζήσεις της λιθορριπής

Οι καθιζήσεις των CFRDs οφείλονται κυρίως στη συμπίεση και τον ερπυσμό της λιθορριπής και του υλικού θεμελίωσης υπό το ίδιο βάρος και το βάρος του νερού και εξαρτώνται από τη φύση του υλικού, την διαβάθμιση και το βαθμό συμπίκνωσης. Επίσης, καθιζήσεις είναι δυνατόν να προκύψουν κατά τη διάρκεια σημαντικής σεισμικής δόνησης λόγω της δυναμικής συνίζησης και της παραμόρφωσης των πρανών (bulging). Σε παλαιότερα φράγματα, η ελαφρά συμπίκνωση ή η χρήση μεγάλου και ομοιόμορφου μεγέθους λιθορριπής είχε ως συνέπεια την εμφάνιση σημαντικών καθιζήσεων. Σε σύγχρονα φράγματα επιδιώκεται καλή συμπίκνωση με στρώσεις πάχους ≤ 1 m και αρκετές διελεύσεις του συμπυκνωτή. Όμως, με τη συνεχή αύξηση του ύψους των νέων φραγμάτων, αυξάνονται σημαντικά οι τάσεις και οι αντίστοιχες παραμορφώσεις. Στην Εικ. 16 παρουσιάζονται σημαντικές ρωγμές που εμφανίσθηκαν στις πλάκες των φραγμάτων Campos Novos (H=202 m), Barra Grande (H=186 m) και Mohale (H=145 m).

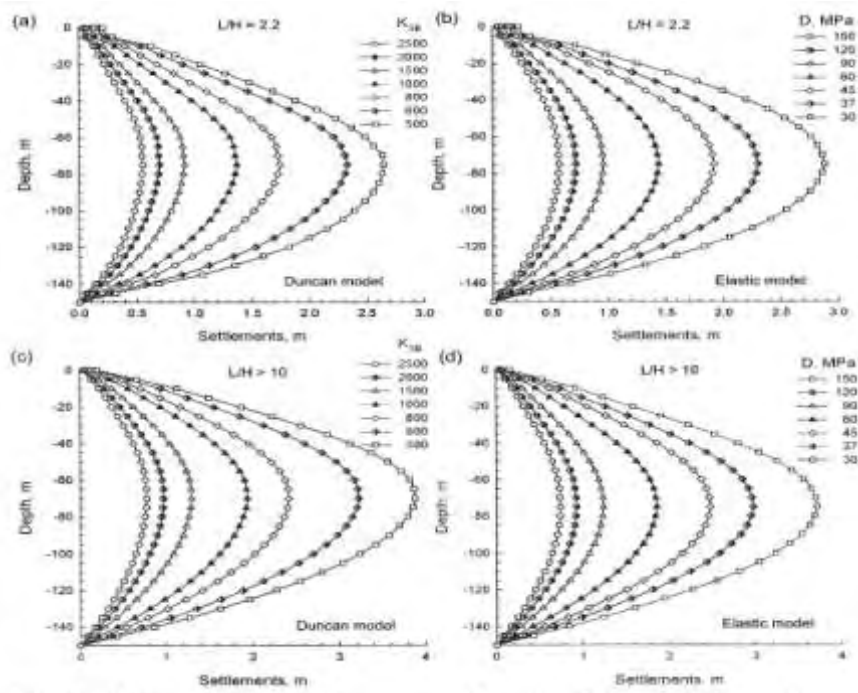


Εικ. 16: Αστοχίες της πλάκας σκυροδέματος: (a) Campos Novos (b) Barra Grande (c) Mohale

Στην περίπτωση στενής κοιλάδας, η εγγύτητα των «άκαμπτων» αντρεισμάτων δημιουργεί διατμητικές τάσεις και φαινόμενα ανίδωσης που δεν υπάρχουν σε φράγματα σε ευρείες κοιλάδες με αποτέλεσμα τη σημαντική αύξηση της δυσκαμψίας. Στο διάγραμμα 3 δίνονται οι βυθίσεις της πλάκας της λεκάνης για $L/H=2.2$ και $L/H \geq 10$. Λαμβάνοντας τα αποτελέσματα στα σχήματα 16 και 17 συμπεραίνεται ότι για $K_{3B} \geq 1500$ η δυσκαμψία είναι πολύ υψηλή, για $K_{3B} = 800-1000$ υψηλή, για $K_{3B} = 600-800$ μέτρια και για $K_{3B} \leq 500$ χαμηλή.



Διάγρ. 3: Βύθιση της πλάκας για διάφορες τιμές δυσκαμψίας: (α) Φράγμα σε στενή κοιλάδα με $L/H=2.2$ (β) Φράγμα σε ευρεία κοιλάδα με $L/H \geq 10$ (Μοντέλο Duncan) (Ντακούλας, 2010)



Λιάγρ. 4: Καθιζήσεις λόγω κατασκευής στην κεντρική διατομή για διάφορες τιμές δυσκαμψίας: Φράγμα σε στενή κοιλάδα με $L/H=2.2$ (α) Μοντέλο Duncan (β)Ελαστικό μοντέλο. Φράγμα σε ευρεία κοιλάδα με $L/H \geq 10$ (γ) Μοντέλο Duncan (δ)Ελαστικό μοντέλο (Ντακούλας, 2010)

Η μέγιστη καθίζηση στην διάρκεια της κατασκευής των επιχωμάτων των λιθόρριπτων φραγμάτων με πλάκα σκυροδέματος καταγράφεται στο μέσον περίπου του ύψους στην μέγιστη διατομή τους και λίγο πιο κατάντη από τον άξονα, λόγω της μικρότερης δυσκαμψίας της ζώνης 3C. Οι καθιζήσεις και τα συνεπαγόμενα μέτρα «ελαστικότητας» κατά την κατασκευή ($E_{κατ}$) εξαρτώνται από μια σειρά παραμέτρων (ύψος στρώσης, ενέργεια πυκνότητας, ποσοστό λεπτόκοκκων) οι οποίες συνοψίζονται τελικά στην τιμή της πυκνότητας ή τον δείκτη κενών του συμπυκνωμένου αναχώματος. Χαρακτηριστικές τιμές του $E_{κατ}$ για διάφορα έργα κινούνται μεταξύ 28 και 70 MPa.

Στην διαμόρφωση της τιμής του μέτρου ελαστικότητας σημαντικός είναι ο ρόλος της θραύσης των κόκκων υπό το βάρος των υπερκειμένων στρώσεων λιθορριπής. Το φαινόμενο εμφανίζεται μετά από κάποιο όριο πίεσης (0.5 έως 1 MPa) και αφορά κυρίως σε ανθεκτικού κόκκου υλικά, καθαρής λιθορριπής. Εφόσον ο δείκτης κενών διατηρηθεί σε τιμές κάτω του 0.30 η θραύση των κόκκων ελαχιστοποιείται.

Με την πλήρωση του ταμιευτήρα, η πίεση της λίμνης παραμορφώνει περαιτέρω το επίχωμα. Οι κύριες τάσεις στο σώμα του φράγματος, στην ανάντη περιοχή, τείνουν να γίνουν κάθετες και παράλληλες με την ανάντη παρειά. Η στροφή αυτή στην κατεύθυνση κύριας φόρτισης έχει σαν συνέπεια να εμφανίζεται το επίχωμα περισσότερο άκαμπτο, αφού η τασική διαδρομή του σημείου που απεικονίζει τις ενεργές τάσεις (stress path) πλησιάζει προς την ισότροπη κατάσταση φόρτισης.

Παρατηρήσεις σε μια σειρά φραγμάτων που λειτουργούν, οδήγησαν στο συμπέρασμα ότι ο λόγος του μέτρου ελαστικότητας κατά την πλήρωση προς αυτό της κατασκευής ($E_{πλ}/E_{κατ}$) είναι της τάξης του 2 έως 2.9.

Η πλάκα παραμορφώνεται κατά την πλήρωση υποχωρώντας σε κατεύθυνση κάθετη προς το επίπεδό της, με τη μέγιστη υποχώρηση να καταγράφεται στο μέσον περίπου του ύψους της. Στην περιοχή της στέψης, λόγω της μικρότερης ακαμψίας του κατάντη τμήματος του φράγματος (ζώνη 3C), παρατηρείται μια πιο έντονη μετακίνηση της πλάκας προς τα κατάντη, συνοδευόμενη από κάποια κάμψη και την εμφάνιση οριζόντιων εφελκυστικών ρηγματώσεων σε ορισμένα έργα, παράλληλων με τη στέψη (TSQ-1, Aquamilpa)

Άλλη αιτία εφελκυστικών ρηγματώσεων που έχει παρατηρηθεί είναι ανάπτυξη καμπτικών καταπονήσεων στην περιοχή της πλάκας κοντά στην πλίνθο, στην περίπτωση που υπάρχει έντονη μορφολογική μεταβολή του βράχου θεμελίωσης: Πράγματι, όταν το πάχος του επιχώματος μεταβάλλεται πολύ σε μικρή σχετικά απόσταση (μορφολογία χαράδρας) τότε η διαφορική καθίζηση του επιχώματος ευνοεί την ανάπτυξη εφελκυστικών ρωγμών παράλληλων με την πλίνθο, σε απόσταση 10 έως 20 m από αυτήν (φράγματα Xingo, Ita, Itapebi)

4.4 ΙΣΤΟΡΙΚΑ ΠΕΡΙΣΤΑΤΙΚΑ

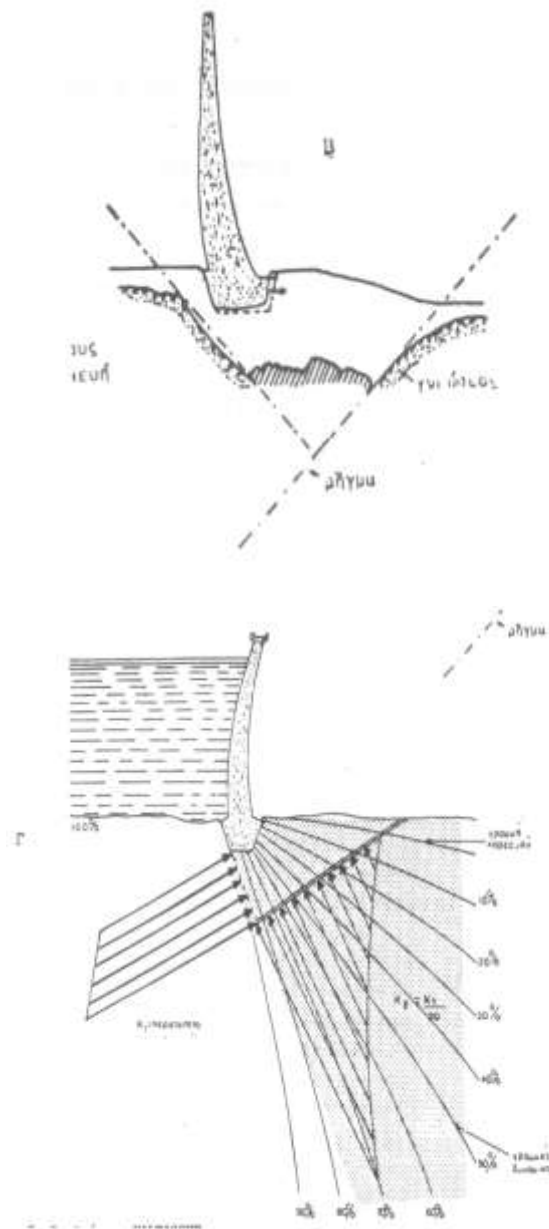
Αναφέρουμε παρακάτω παραδείγματα αστοχίας φραγμάτων με τις αντίστοιχες αιτίες τους και αποτελέσματα αυτών:

- **Φράγμα Malpasset, Ν.Α. Γαλλία, 1926**

Τοξωτό φράγμα, θεμελιωμένο πάνω σε υγιή και μέτρια ρωγματωμένο γνεύσιο που ήταν αδιαπέρατος από το νερό. Η αστοχία του οφειλόταν σε συνδυασμό παραγόντων όπως:

- Έντονες βροχοπτώσεις
- Εγκλωβισμένο νερό στις ρωγμές του γνευσίου
- Απουσία αποστραγγιστικών έργων κάτω από το φράγμα
- Ύπαρξη ρήγματος πληρωμένου με αργιλικό υλικό που διερχόταν κάτω από το φράγμα χωρίς να έχει εντοπισθεί από τις γεωλογικές έρευνες.
- Δημιουργία δίδροου και εκτίναξη τμήματος της βραχομάζας μαζί με το σώμα του φράγματος.

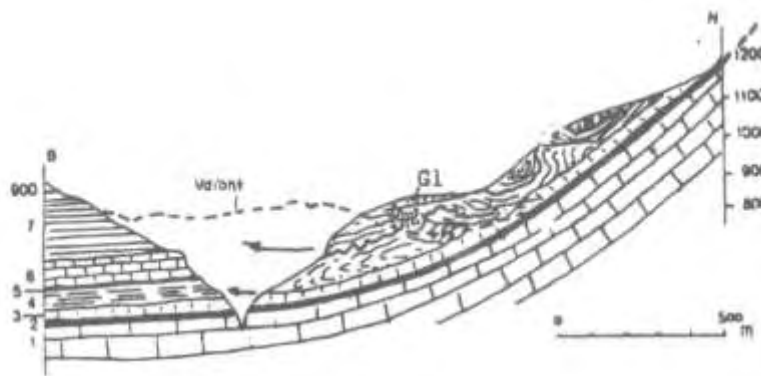
Απώλειες: περίπου 350 νεκροί.



Σχ. 13: Ερμηνεία αστοχίας φράγματος Malpasset

• Φράγμα Vaiont, Ελβετία, 1963

Τοξωτό φράγμα. Η αστοχία του οφειλόταν σε κατολίσθηση πρανού του ταμιευτήρα. Ασβεστολιθική μάζα όγκου $240 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ κατέπεσε στον ταμιευτήρα και δημιούργησε κύμα ύψους 100m που υπερέβη το φράγμα, χωρίς να το καταστρέψει, κατακλύζοντας βιαίως την πόλη Longarone. Απώλειες: περίπου 2100 νεκροί.



Σχ. 14: Ερμηνεία αστοχίας φράγματος Vaiont

• Φράγμα Mohale (145 m, Νότια Αφρική, 2000)

Το Mohale αποτελεί αξιοσημείωτο παράδειγμα CFRD εξαιτίας της σφοδρής ρηγμάτωσης της πλάκας του και της ολοκληρωτικής του αστοχίας. Το 2006 μεγάλες πλημμύρες έπληξαν την περιοχή, η στάθμη της δεξαμενής ανυψώθηκε απότομα και σημειώθηκαν σημαντικές καθιζήσεις στη λιθορριπή κοντά στην περιοχή της στέψης. Οι θλιπτικές τάσεις στο κέντρο της πλάκας αυξήθηκαν. Στο μεταξύ η λιθορριπή υπέστη απότομο θρυμματισμό και η πλάκα τελικά αστόχησε.

Η εμπειρία του Mohale θα πρέπει να αξιοποιηθεί στα επόμενα φράγματα και να μην επαναληφθούν τα ίδια λάθη. Είναι σημαντικό επομένως να γίνει μια εκτενής αναφορά στην περίπτωση αυτού του φράγματος.

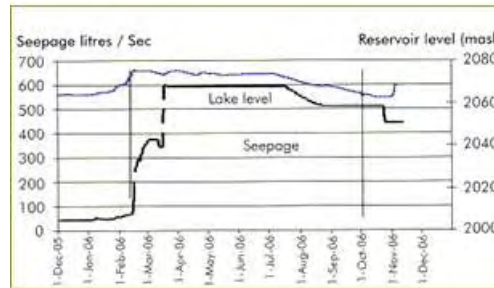


Εικ. 17: Η υπερχειλίση του Mohale μετά τις πλημμύρες.

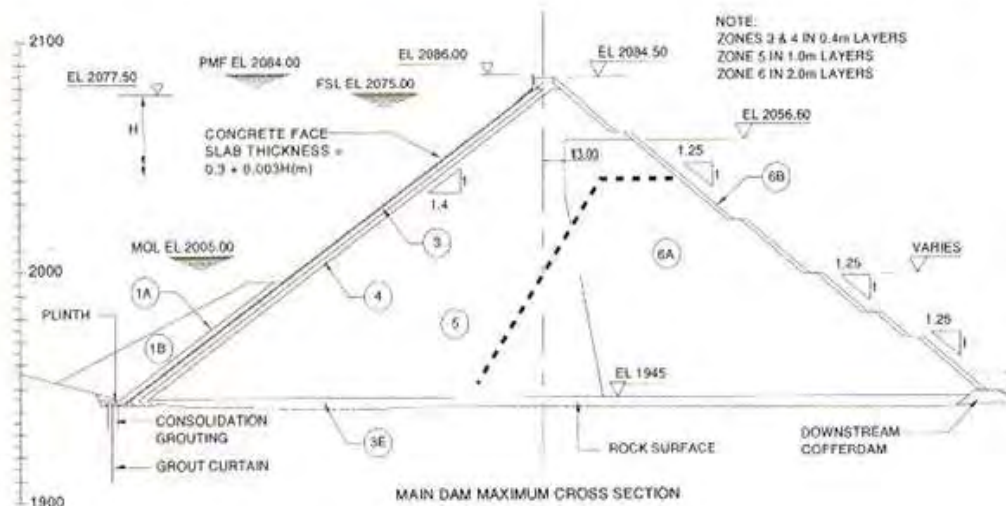
Το Mohale ολοκληρώθηκε το 2000 στο Lesotho (Ν. Αφρική). Τον Φεβρουάριο του 2006, ενώ το φράγμα ήταν ήδη σε λειτουργία, ισχυρές βροχοπτώσεις έπληξαν την περιοχή με αποτέλεσμα την απότομη άνοδο της στάθμης της δεξαμενής και κάποια υπερχειλίση (εικόνα 17). Αυτό επέφερε μεγάλες καθιζήσεις στη λιθορριπή, κατάντη και στην περιοχή της στέψης, και σημαντική αύξηση των θλιπτικών τάσεων στο κεντρικό τμήμα της πλάκας που αστόχησε (διάγραμμα 5). Σημειώνεται ότι για συνήθη

φράγματα ο λόγος της οριζόντιας μετακίνησης στη στέψη προς την καθίζηση είναι 0.65, ενώ στο Mohale μόλις 0.35.

Η πρώτη ρωγμή σημειώθηκε το Φεβρουάριο του 2006 και προκάλεσε κραδασμό που καταγράφηκε από σειсмоγράφο τοποθετημένο στην πλάκα. Ακολούθησε η αποκόλληση της πλάκας και της προεξέχουσας δοκού σκυροδέματος (extruded curb) που έφερε απότομη μείωση των τάσεων στην πλάκα και άνοιγμα των αρμών. Η εισροή έφτασε τα 600 l/s. Περαιτέρω μετρήσεις που έγιναν έδειξαν ότι αιτία της αρχικής ρηγματώσης ήταν η σημαντική θλίψη των μεσαίων πλακών.

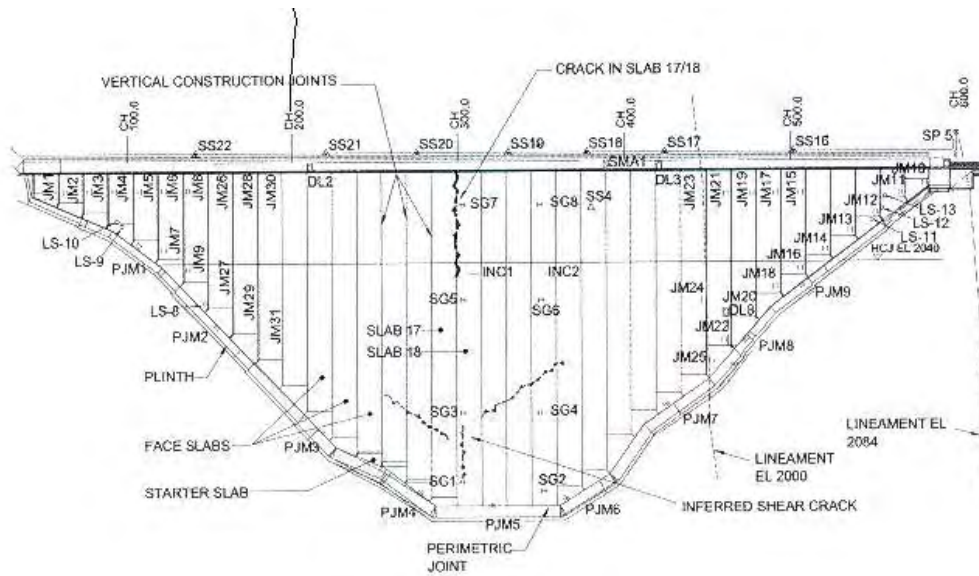


Διάγρ. 5: Η εξέλιξη της εισροής στο Mohale σε συνάρτηση με την άνοδο της στάθμης της δεξαμενής

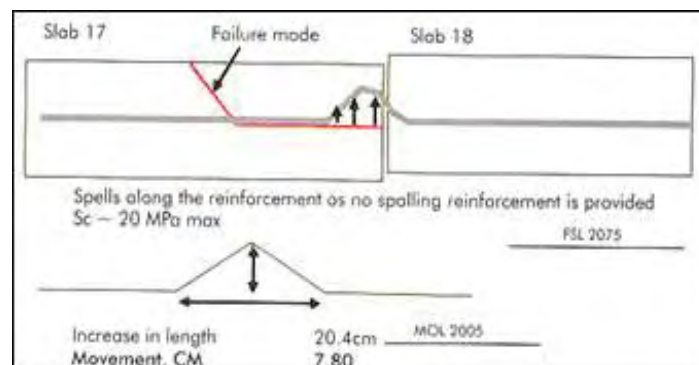


Σχ. 15: Η κεντρική διατομή του Mohale με λεπτομέρειες της πλίνθου και της κορυφής.

Φαίνεται πως από τη στιγμή που εμφανίστηκε η πρώτη ρωγμή, στα μέσα του Φλεβάρη η εισροή αυξήθηκε ραγδαία. Οι πρώτες ρωγμές της πλάκας φαίνονται στο σχήμα 16, ενώ η προστριβή μεταξύ των πλακών 17 και 18 που προκάλεσε αυτές τις ρωγμές φαίνεται σε λεπτομέρεια στην εικόνα 17.



Σχ. 16: Ρωγμές της πλάκας



Εικ. 17: Η σχετική κίνηση των πλακών 17 και 18

Η λιθορριπή του Mohale προέρχεται από δολεριτικό βασάλτη. Ο καθαρός βασάλτης είναι υλικό με πολύ μεγάλη αντοχή και ιδιαίτερα γωνιώδες. Όμως ο βασάλτης με πρόσμικτα που χρησιμοποιήθηκε, είχε μικρότερη αντοχή. Από δοκιμές που έγιναν μετά την αστοχία, διαπιστώθηκε λιθορριπή φτωχής διαβάθμισης και όχι καλά συμπυκνωμένη (η συμπίκνωση έγινε χωρίς διαβροχή και απέφερε μεγάλο δείκτη κενών). Με πολύ καλή διαβάθμιση της λιθορριπής και σωστή συμπίκνωση (με διαβροχή και σε λεπτές στρώσεις ≤ 1 m ανάντη) σύμφωνα με τους εμπειρογνώμονες το ίδιο υλικό θα έδινε πολύ μεγαλύτερο μέτρο ελαστικότητας.

Το μέτρο ελαστικότητας της λιθορριπής υπολογίστηκε με ανάδρομη ανάλυση μέσω των καθιζήσεων ίσο με 32 MPa ανάντη και 24 MPa κατάντη. Επιπλέον, αν η λιθορριπή είχε διαβραχεί επαρκώς, θα υπόκειτο σε λιγότερο ή καθόλου θρυμματισμό. Πιο πλαστικά συμπεριφέρθηκε η λιθορριπή κατά την 1η πλήρωση.

Είναι προφανές λοιπόν ότι η αρχική αιτία των προβλημάτων του Mohale ήταν η ιδιαίτερα παραμορφώσιμη λιθορριπή του. Με τις πλημμύρες, υπέστη τεράστια καθίζηση, και από εκεί ξεκίνησε η καταπόνηση της πλάκας του. Με την αύξηση του φορτίου επήλθε ο θρυμματισμός της λιθορριπής που κατέληξε σε αστοχία του φράγματος. Αποδείχτηκε πως η λιθορριπή θρυμματίστηκε σε εξαιρετικά μικρή τάση και μάλιστα ακαριαία εξαιτίας της ξηρής της συμπίκνωσης και της μικρής της δυσκαμψίας.

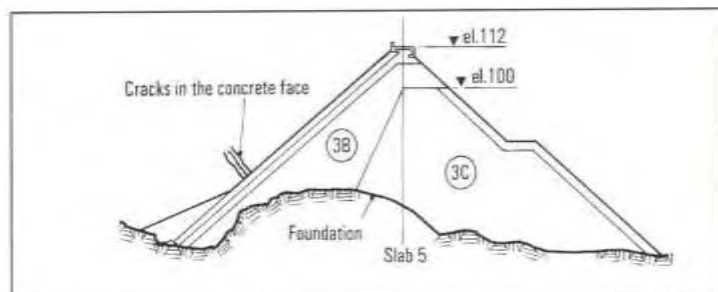
• Φράγμα Itarébi (100m, Brazil, 2002)

Το Itarébi, φράγμα ύψους 100 μέτρων, ολοκληρώθηκε στη Βραζιλία το 2002. Η ανάντη ζώνη χαρακτηρίζεται από ικανοποιητική δυσκαμψία (60 MPa) ενώ πολύ πιο παραμορφώσιμη είναι η λιθορριπή κατάντη (25 MPa). Σημειώνεται ότι η βύθιση στο μέσο της πλάκας 9 (πλάκα πλευρική της μέγιστης διατομής του φράγματος) αυξήθηκε ως τα 30 cm κατά τη διάρκεια της πλήρωσης, αλλά πολύ μικρή αύξηση της βύθισης σημειώθηκε κατά την τελευταία φάση της πλήρωσης. Αντίθετα, η βύθιση στην κορυφή της πλάκας αυξήθηκε δραματικά κατά την ολοκλήρωση της πλήρωσης φτάνοντας τα 45 cm (διάγραμμα 6). Η ιδιαίτερα παραμορφώσιμη κατάντη ζώνη (3B) προκάλεσε σημαντική βύθιση στην κορυφή της πλάκας αλλά όχι ρηγμάτωση.

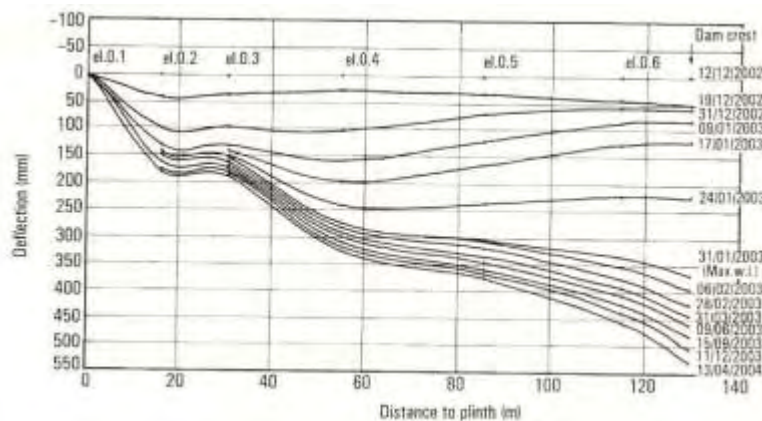
Η εισροή στο Itarébi άγγιξε τα 900 l/s και μειώθηκε στα 150 l/s έπειτα από κατασκευή επιχώματος στην επιφάνεια της πλάκας πάνω από τον πόδα. Υπόγειες μετρήσεις διαπίστωσαν ρωγμές σε 4 πλάκες στα δεξιά, σε μια ζώνη παράλληλα και 10-15 m πάνω από την πλίνθο (βλ. εικ. 18 και 19). Οι ρωγμές αυτές αποδόθηκαν στην περίπλοκη γεωμετρία του δεξιού συνόρου πλάκας-λιθορριπής που προκάλεσε διαφορετικές μετακινήσεις όπως συνέβη και στην περίπτωση του Xingo.



Εικ. 18: Itarébi: η θέση των ρωγμών στις πλάκες από σκυρόδεμα



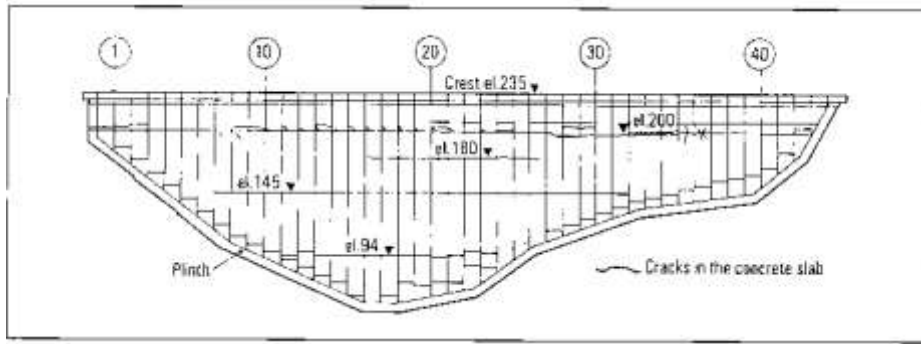
Εικ. 19: Ιταρέβι: θέση των ρωγμών και η γεωμετρία της θεμελίωσης



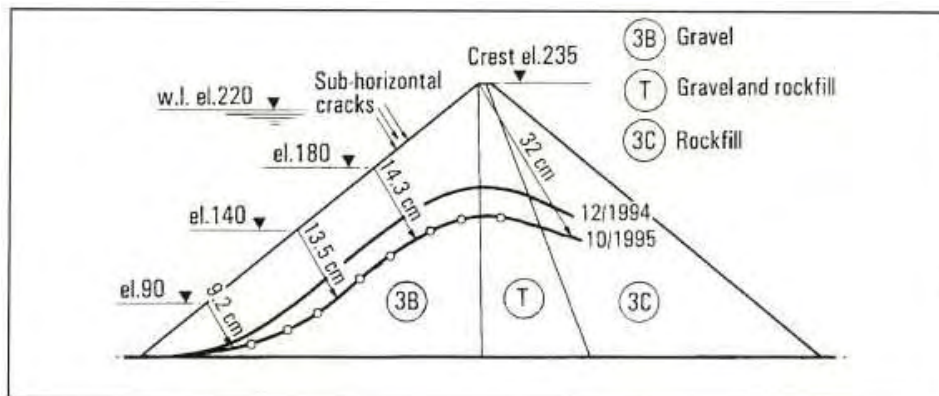
Διάγρ. 6: Ιταρέβι: Μετρήσεις βύθισης της πλάκας 9

• Φράγμα Aguamilpa (187 m, Mexico, 1993)

Στο φράγμα αυτό παρατηρήθηκε ξαφνική εισροή νερού κατά το τελευταίο στάδιο της πλήρωσης (η εισροή αυξήθηκε από 6 σε 260 l/s). Για να εξηγηθεί αυτό το φαινόμενο διεξήχθησαν έρευνες οι οποίες αποκάλυψαν οριζόντιες ρωγμές στο πάνω μέρος της πλάκας (εικ. 20) [16, 17]. Προκειμένου να διαπιστωθούν τα αίτια της ρηγμάτωσης μελετήθηκαν τα χαρακτηριστικά του φράγματος. Η λιθορριπή στα ανάντη 2/3 του φράγματος προέρχεται από χαλίκι (ζώνη 3B με $E_{3B} = 260$ MPa) και ανάμικτο χαλίκι με ιγνιμβρίτη (ζώνη T με $E_T = 130$ MPa), είναι καλά διαβαθμισμένη, πολύ πυκνή και συμπεριφέρθηκε άριστα. Η κατάντη όμως ζώνη 3C, είναι πολύ περισσότερο παραμορφώσιμη ($E_{3C} = 47$ MPa), γιατί αποτελείται από ιγνιμβρίτη και συμπυκνώθηκε σε στρώσεις πάχους 1.2 m χωρίς προηγουμένως να προστεθεί νερό. Στην κορυφή της λιθορριπής μετά την ολοκλήρωση της κατασκευής σημειώθηκε μέγιστη καθίζηση 0.185% μετά την 1η πλήρωση της δεξαμενής. Η μέγιστη βύθιση καταγράφηκε στην κορυφή (εικ. 21) και είναι ίση με 320 mm στη φάση μέγιστης πλήρωσης.



Εικ. 20: Ρωγμές της πλάκας (οι επιμέρους πλάκες είναι αριθμημένες)



Εικ. 21: Βύθιση της πλάκας. Η βύθιση μεγιστοποιείται στην κορυφή

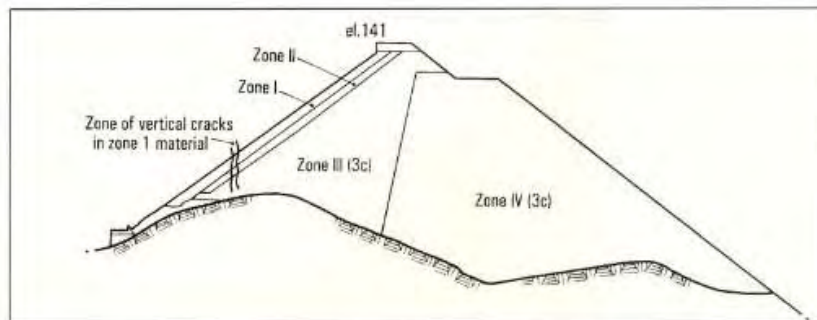
Παρατηρείται πολύ μεγαλύτερη βύθιση στην κορυφή της πλάκας η οποία αποδίδεται στην ιδιαίτερα παραμορφώσιμη κατάντη ζώνη. Ο λόγος της βύθισης στην κορυφή προς τη βύθιση στο κέντρο της πλάκας είναι 2.2 και η ρηγμάτωση είναι δικαιολογημένη.

Το αρκετά μεγάλο μέτρο ελαστικότητας των 3B και T, οφείλεται στη χρήση χαλκιού ως λιθορριπής και της συμπύκνωσης σε λεπτές στρώσεις (0.6m και 0.8m αντίστοιχα). Η πολύ μικρή συγκριτικά δυσκαμψία όμως στην κατάντη ζώνη θεωρείται η αιτία ρηγμάτωσης της πλάκας. Τα τόσο διαφορετικά μέτρα ελαστικότητας μεταξύ γειτονικών ζωνών είχαν ως αποτέλεσμα να αναπτυχθεί απότομη αλλαγή τάσεων στη λιθορριπή και κατά συνέπεια και στην πλάκα. Η λιθορριπή υπέστη μεγάλες μετατοπίσεις που οδήγησαν στην μεγάλη βύθιση της κορυφής της πλάκας (32 cm) και εν συνεχεία στη ρηγμάτωσή της

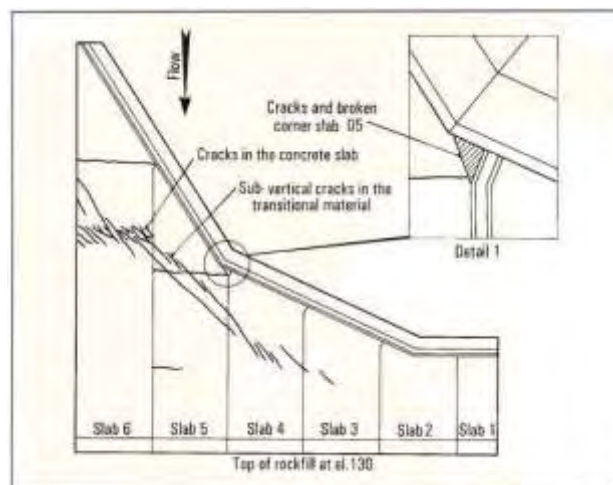
• Φράγμα Xingò (150 m, Brazil, 1994)

Το 150 μέτρων ύψους φράγμα Xingò στη Βραζιλία, ολοκληρώθηκε το 1994. Η λιθορριπή αποτελείται από δύο ζώνες (σχήμα 17). Η ανάντη ζώνη 3B προέρχεται από γνεύσιο συμπυκνωμένο σε στρώσεις πάχους ενός μέτρου ενώ η κατάντη ζώνη 3C συμπυκνώθηκε σε στρώσεις πάχους 2 μέτρων με περιοχές φτωχής ποιότητας βράχου. Το μέτρο ελαστικότητας μετά την ολοκλήρωση της κατασκευής κυμάνθηκε από 32 MPa στη ζώνη 3B (ανάντη), έως 20-24 MPa στη ζώνη 3C (κατάντη). Μετά την πλήρωση της δεξαμενής επιτεύχθηκε αρκετά υψηλό μέτρο ελαστικότητας ανάντη στα 76 MPa..

Κατά τη διάρκεια της κατασκευής εμφανίστηκαν κατακόρυφες ρωγμές στο λεπτόκοκκο συνεκτικό υλικό πάνω από την πλάκα σχεδόν παράλληλα στην πλίνθο στις στάθμες 103 m έως 127 m. Οι ρωγμές αυτές συνδέονται με την ακατάλληλη γεωμετρία του αριστερού αντερείσματος όπως φαίνεται στα σχήματα 17 και 18 αλλά και από την υψηλή παραμορφωσιμότητα του υλικού της ζώνης 3C.



Σχ. 17: Περιοχές που σημειώθηκαν ρωγμές στο συνεκτικό μεταβατικό υλικό κάτω από την πλάκα κατά τη διάρκεια της κατασκευής.



Σχ. 18: Ρωγμές στο αριστερό τμήμα της πλάκας και το σπάσιμο της γωνίας της πλάκας 5

Το μέτρο ελαστικότητας κυμάνθηκε από 44 MPa στην ανάντη ζώνη έως 20 MPa στην κατάντη ζώνη, αναλογία 2:1, που είναι σχετικά μικρή σε σύγκριση με το φράγμα Aguamilpa. Η μέγιστη βύθιση στην κεντρική διατομή της πλάκας έφθασε τα 114 cm. Κατά τη διάρκεια της κατασκευής της έβδομης φάσης, κατακόρυφες ρωγμές ποικίλου εύρους εμφανίστηκαν στο συνεκτικό υλικό της μεταβατικής ζώνης στο κεντρικό τμήμα του μετώπου του φράγματος, στις στάθμες 742 m έως 768 m λόγω των εφελκυστικών τάσεων που ασκήθηκαν στην πλάκα κατά την εσπευσμένη κατασκευή του τελευταίου σταδίου (από τα 740 m στα 787.3 m)

Έπειτα η στάθμη της δεξαμενής μειώθηκε από τα 760 m στα 721 m. Οριζόντιες ρωγμές εύρους από 0.1 έως 0.3 mm και περιστασιακά έως 2 mm προκλήθηκαν στην πλάκα. Οι ρωγμές αυτές οφείλονται στην πρόωρη πλήρωση της δεξαμενής μετά το δεύτερο στάδιο και τη γρήγορη περάτωση των σταδίων έξι και επτά. Οι μετρήσεις στη λιθορριπή έδειξαν πολύ μεγάλες παραμορφώσεις κατά την 1η (πρόωρη) πλήρωση. Στην κορυφή του φράγματος σημειώθηκε καθίζηση $>0.52\% = 93$ cm και οριζόντια μετατόπιση 67cm.

• Φράγμα Machadinho (125 m, Brazil, 2002)

Το 125 μέτρων φράγμα Machadinho ολοκληρώθηκε το 2002 στον ποταμό Pelotas της Ν. Βραζιλίας. Η κατασκευή του διήρκεσε 3 χρόνια. Για τις 2 ζώνες (ανάντη και μεταβατική) χρησιμοποιήθηκε βασάλτης σε στρώσεις πάχους 0.8 m, ενώ κατάντη αποσαθρωμένος βράχος σε στρώσεις πάχους 1.6 m. Χρησιμοποιήθηκε λιθορριπή παρόμοιας δυσκαμψίας ανάντη (49 MPa) και κατάντη (56 MPa). Στην μεταξύ των 2 ζωνών διεπιφάνεια δόθηκε εξαιρετικά απότομη κλίση (1.2:1).

Μετά την 1η πλήρωση της δεξαμενής, η βύθιση στην κορυφή της πλάκας και στο μέσον μετρήθηκε ίση με 37 cm. Στη φάση μέγιστης πλήρωσης, η εισροή ανήλθε στα 850 l/s και μετά από εξυγιαντικά μέτρα περιορίστηκε στα 600 l/s. Υποβρύχιες μετρήσεις που διεξήχθησαν για να διερευνηθεί η αιτία της τεράστιας εισροής δεν διαπίστωσαν ρωγμές στην πλάκα σε στάθμες χαμηλότερες από τη στάθμη της δεξαμενής. Επομένως η εισροή νερού στο φράγμα φαίνεται πως δεν προήλθε από ρωγμές στην πλάκα αλλά πιθανότατα από τον περιμετρικό αρμό, ο οποίος διευρύνεται και είναι δυνατόν να επιτρέπει εισροή.

4.5 ΑΣΤΟΧΙΑ ΛΟΓΩ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΔΙΕΓΕΡΣΗΣ

Γενικά είναι παραδεκτό ότι οι σεισμοί μπορούν να προκαλέσουν μικρές ή μεγάλες ζημιές στα φράγματα με μικρές όμως πιθανότητες ολοκληρωτικής καταστροφής. Ένας σεισμός μπορεί να προκαλέσει ρηγματώσεις, καθιζήσεις, μετακινήσεις η και ρευστοποιήσεις στα υλικά ενός φράγματος. Οι μεγαλύτερες μετακινήσεις συνήθως δημιουργούνται στις επιφάνειες επαφής διαφορετικών υλικών, ή σε απότομες αλλαγές στις διατομές. Το μέγεθος των μετακινήσεων που μπορεί να υπάρξουν πριν αυτές γίνουν επικίνδυνες εξαρτάται από τα υλικά που έχουν χρησιμοποιηθεί και από την λεπτομέρεια της εσωτερικής διατομής του φράγματος.

Οι αυξήσεις της πίεσης πόρων είναι άλλο ένα φαινόμενο που παρατηρείται σε ένα σεισμό. Τέτοιες αυξήσεις έχουν σαν αποτέλεσμα την μείωση των ενεργών τάσεων στα υλικά και την ταυτόχρονη μείωση του συντελεστή ασφάλειας.

Η Ρευστοποίηση είναι ίσως ένα από τα σοβαρότερα προβλήματα που μπορεί να προκληθούν από ένα σεισμό. Ρευστοποίηση είναι η μεγάλη μείωση της αντοχής των υλικών κατά την διάρκεια σεισμικών δονήσεων. Αυτό προκαλείται κυρίως από αυξήσεις των πιέσεων του νερού των πόρων με ταυτόχρονη μείωση της αντοχής. Συνέπεια της ρευστοποίησης μπορεί να είναι μια αστοχία του ανάντη κυρίως πρανούς που μπορεί να οδηγήσει και σε πλήρη κατάρρευση του φράγματος.

5

ΑΝΑΛΥΣΗ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ ΛΙΘΟΡΡΙΠΗΣ ΜΕ ΑΝΑΝΤΗ ΠΛΑΚΑ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΣΕ ΤΕΚΤΟΝΙΚΟ ΡΗΓΜΑ

5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

5.1.1 ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία εξετάζεται η συμπεριφορά ενός φράγματος λιθορριπής σε δύο διαστάσεις με ανάντη πλάκα σκυροδέματος (CFRD), κατά τη μετακίνηση τμήματος της βάσης του λόγω παρουσίας κανονικού τεκτονικού ρήγματος. Η αριθμητική ανάλυση γίνεται με τον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS (2010). Η λιθορριπή προσομοιώνεται με το καταστατικό προσομοίωμα των Duncan et al. (1970) και η πλάκα με το ελαστο-πλαστικό προσομοίωμα concrete damage plasticity των Lee and Fenves (1998). Αρχικά προσομοιώνεται αριθμητικά η σταδιακή κατασκευή και πλήρωση της λεκάνης. Διερευνάται η επίδραση της μετακίνησης τμήματος της βάσης του φράγματος στην εντατική κατάσταση και στην παραμόρφωση της πλάκας και στη συμπεριφορά του φράγματος και των αρμών. Επίσης διερευνάται η επίδραση της αντοχής του σκυροδέματος στην συμπεριφορά της ανάντη πλάκας.

5.1.2 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η προσομοίωση και η διερεύνηση της εντατικής κατάστασης ενός φράγματος, κατά τη μετακίνηση τμήματος της βάσης του, λόγω ενεργοποίησης τεκτονικού ρήγματος, είναι ένα πρόβλημα ιδιαίτερα σύνθετο για την Γεωτεχνική Σεισμική Μηχανική και απαιτεί πολυσταδιακή μη-γραμμική ανάλυση. 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. Ένα πρόσφατο περιστατικό του φράγματος Ziringru κατέδειξε ξεκάθαρα την ανάγκη για βαθύτερη κατανόηση της σεισμικής συμπεριφοράς φραγμάτων λιθορριπής με ανάντη πλάκα σκυροδέματος.

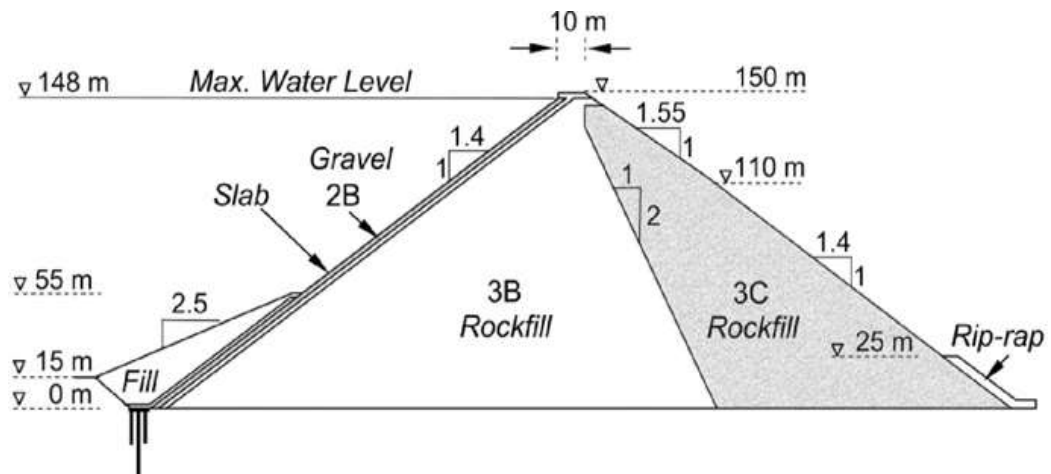
Η σεισμική συμπεριφορά φραγμάτων λιθορριπής εξαρτάται από ένα μεγάλο αριθμό παραγόντων, όπως ο βαθμός συμπίκνωσης, η ποιότητα του υλικού της λιθορριπής, η γεωμετρία του φράγματος, η στενότητα της κοιλάδας, η ενδοσιμότητα του «βράχου» της κοιλάδας, η ποιότητα των αρμών μεταξύ των πλακών και των περιμετρικών 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).

Ειδικότερα, η σεισμική ασφάλεια φραγμάτων λιθορριπής με ανάντη πλάκα σκυροδέματος επηρεάζεται σημαντικά από: (α) την συμπεριφορά των περιμετρικών αρμών της πλίνθου και των αρμών μεταξύ των πλακών (β) την ανάπτυξη ρωγμών στην πλάκα σκυροδέματος λόγω της σεισμικής απόκρισης του φράγματος και (γ) 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.

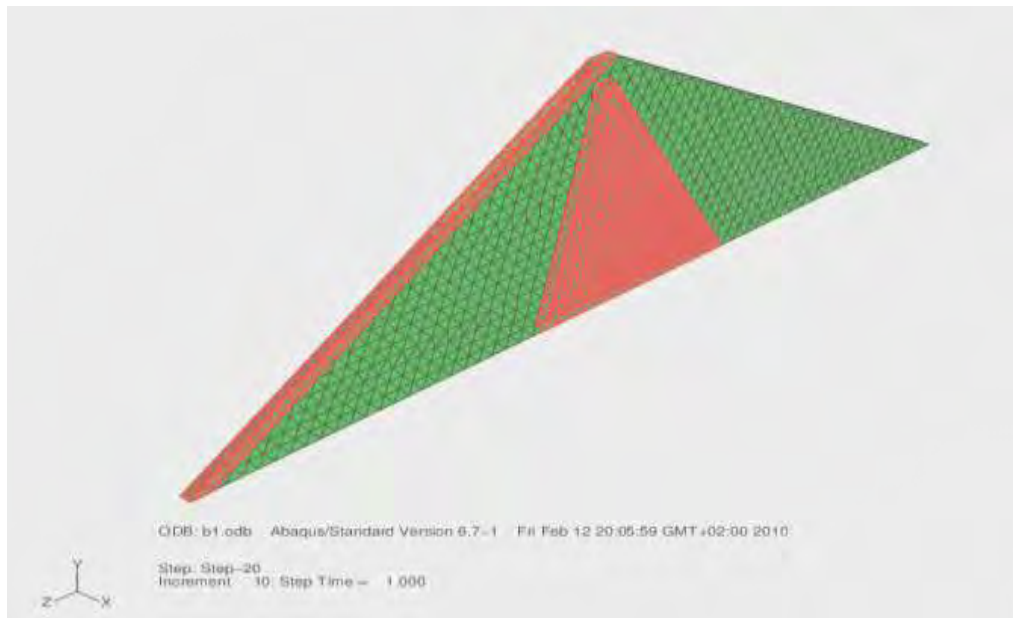
Η παρούσα εργασία διερευνά την συμπεριφορά φραγμάτων λιθορριπής με ανάντη πλάκα σκυροδέματος κατά τη μετακίνηση τμήματος της βάσης λόγω παρουσίας κανονικού τεκτονικού ρήγματος. Η μέθοδος αυτή είναι δυνατόν να αποτελέσει ένα πολύτιμο εργαλείο για την λεπτομερή διερεύνηση και αξιολόγηση διαφόρων παραμέτρων που επηρεάζουν την συνολική σεισμική συμπεριφορά του φράγματος. Για τον σκοπό αυτό, αρχικά προσομοιώνεται με λεπτομερή τρόπο μετά από διακριτοποίηση, η σταδιακή κατασκευή και η φόρτιση του φράγματος κατά την πλήρωση του ταμιευτήρα. Κατά το στάδιο αυτό, η συμπεριφορά των υλικών του φράγματος προσομοιώνεται με το καταστατικό προσομοίωμα Duncan & Chang (1970). Το προσομοίωμα αυτό θεωρεί μία υπερβολική σχέση τάσης-παραμόρφωσης η οποία λαμβάνει υπόψη την εξάρτηση των μέτρων ελαστικότητας από την περιβάλλουσα τάση (Ντακούλας et al. 2008).

Ως παράδειγμα εφαρμογής της μεθόδου χρησιμοποιείται μια μέγιστη διατομή ενός φράγματος ύψους 150 m και απείρου μήκους (κατάσταση επίπεδης παραμόρφωσης). Στο Σχ. 21 δίδεται η γεωμετρία της διατομής και οι ζώνες των υλικών, ενώ στην εικόνα 22 δίδεται μία εικόνα της διακριτοποίησης του φράγματος και της ανάντη πλάκας σκυροδέματος.

Η παρούσα εργασία επικεντρώνεται στην μελέτη σεισμικής απόκρισης του φράγματος και της εντατικής κατάστασης και πιθανής ρηγμάτωσης της πλάκας σκυροδέματος για μετακίνηση τμήματος της βάσης κατά 1m κατακόρυφα και οριζόντια. Πρέπει να τονιστεί ότι η παρούσα μελέτη δεν βασίζεται σε πραγματικές μετρήσεις των δυναμικών ιδιοτήτων των υλικών του φράγματος, αλλά σε εύλογα σενάρια δυσκαμψίας των υλικών, με βάση την υπάρχουσα εμπειρία.



Σχ. 21: Μέγιστη διατομή και ζώνες υλικών.



Εικ. 22: Γεωμετρία του αριθμητικού προσομοιώματος και διαζώνιση

5.2 ΣΤΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

5.2.1 ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ DUNCAN

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

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

όπου σ_1, σ_3 = κύριες τάσεις, K, R_f, n = σταθερές του υλικού, ϕ = γωνία διατμητικής αντοχής, c = συνοχή και p_a = η ατμοσφαιρική πίεση.

Η γωνία διατμητικής αντοχής εξαρτάται από την περιβάλλουσα τάση και δίνεται από τον τύπο:

$$\phi = \phi_0 - \Delta\phi \log \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)$$

όπου ϕ_0 και $\Delta\phi$ = σταθερές του υλικού. Το μέτρο ελαστικότητας κατά την αποφόρτιση δίνεται:

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

όπου K_{ur} = σταθερά του υλικού που λαμβάνει τιμές $1.2K \leq K_{ur} \leq 3K$.

Επιπλέον, το μέτρο διόγκωσης δίνεται από τη σχέση:

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

όπου K_b, m = σταθερές του υλικού. Τα όρια του B δίνονται από τη σχέση $B = E_t / 3(1 - 2\nu)$. Για δείκτη Poisson $\nu = 0.49$ η μέγιστη τιμή είναι $B_{\max} = 17E_t$, ενώ η ελάχιστη τιμή αντιστοιχεί σε γεωστατικές συνθήκες είναι:

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

Το κριτήριο φόρτισης αποφόρτισης καθορίζεται από τη σχέση:

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

όπου σ_{1f} , σ_{3f} = οι κύριες τάσεις κατά την αστοχία.

Αν $S \geq S_{max}$, χρησιμοποιούνται τα μέτρα φόρτισης (εφαπτομενικό μέτρο Young κλπ), διαφορετικά χρησιμοποιούνται τα μέτρα ελαστικότητας της αποφόρτισης. Το καταστατικό μοντέλο εισήχθη στον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS (2008) με δυνατότητα μετατροπής από τον χρήστη. Για την επαλήθευση των αποτελεσμάτων των αναλύσεων έγιναν συγκρίσεις τους, με τα αποτελέσματα μαθηματικών αναλύσεων και πειραματικών δοκιμών.

5.2.2 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

Για την αριθμητική ανάλυση της προσομοίωσης της σταδιακής κατασκευής και φόρτισης του φράγματος κατά την πλήρωση της λεκάνης έγινε διακριτοποίηση του φράγματος σε πεπερασμένα στοιχεία. Κάθε πεπερασμένο στοιχείο προσδιορίζεται από τα σημεία των κορυφών του που ονομάζονται κόμβοι. Για κάθε στοιχείο αναπτύσσεται το μητρώο δυσκαμψίας το οποίο επιτρέπει τον υπολογισμό της μεταβολής των τάσεων εντός του στοιχείου όταν είναι γνωστή η μεταβολή των μετατοπίσεων στους κόμβους. Τα μητρώα δυσκαμψίας όλων των πεπερασμένων στοιχείων του συστήματος «συναθροίζονται», λαμβάνοντας υπόψη τον τρόπο με τον οποίο συνδέονται γειτονικά στοιχεία, και σχηματίζεται το καθολικό μητρώο δυσκαμψίας (global stiffness matrix).

Η επίλυση του προβλήματος επιτυγχάνεται με την εύρεση όλων των μετατοπίσεων των κόμβων της κατασκευής με τρόπο που να ικανοποιεί την ισορροπία, το συμβιβαστό των παραμορφώσεων, την σχέση τάσης-παραμόρφωσης, τις συνοριακές συνθήκες και τις αρχικές συνθήκες όλου του συστήματος. Για την επίλυση των εξισώσεων ακολουθείται επαναληπτική διαδικασία κατά την οποία ο καταστατικός νόμος χρησιμοποιείται αρκετές φορές.

Οι αναλύσεις είναι δυνατόν να πραγματοποιηθούν σε 2 ή 3 διαστάσεις. Για την περίπτωση της ανάλυσης λιθόρριπτων φραγμάτων με ανάντη πλάκα σκυροδέματος, που είναι θεμελιωμένα σε σχετικά στενή κοιλάδα, επιβάλλεται η χρήση της τρισδιάστατης ανάλυσης για την πιο ρεαλιστική απεικόνιση του φράγματος και την ορθή πρόβλεψη της συμπεριφοράς του.

6

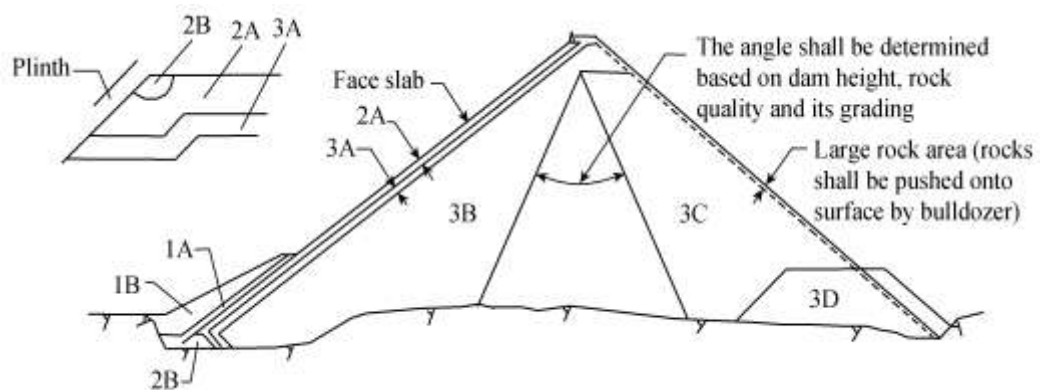
ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΚΑΙ ΠΛΗΡΩΣΗΣ CFRD

6.1 ΤΥΠΙΚΕΣ ΖΩΝΕΣ ΣΤΗΝ CFRDs

Οι τυπικές ζώνες υλικών σε φράγματα λιθορριπής είναι οι εξής:

- 1A. Ανάντη ζώνη. Αδιαπέραστο υλικό.
- 2A. Ζώνη συμπιεσμένου υλικού.
- 3A. Μεταβατική ζώνη. Επιλεγμένο μέγεθος κόκκων λιθορριπής και πάχους του ενδιάμεσου στρώματος.
- 1B. Ζώνη με υλικό πάχους 0,5 m.
- 2B. Ειδική ζώνη μαξιλάρι με επεξεργασμένο - φιλτραρισμένο λεπτό υλικό.
- 3B. Κυρίως ζώνη, λατομικού υλικού πάχους περίπου 1 εκ.
- 3C. Ownstream ζώνη. Υλικό λατομείου πάχους περίπου 2 μέτρα.
- 3D. Κατάντη του φράγματος ζώνη, riprap υλικό πλήρωσης, ανάλογα με την απαίτηση.

Το γέμισμα σε όλες τις ζώνες θα πρέπει να συμπιέζεται 4 φορές από 10 τόνους δονητικό οδοστρωτήρα.



Σχ. 22: Τυπικές ζώνες CFRDs

Η ζώνη 1 είναι ένα στρώμα επικάλυψης που αποτελείται από μη διαπερατά εδάφη. Ο σκοπός αυτής της ζώνης είναι να καλύπτει τις συνενώσεις και την περίμετρο της πλάκας στα χαμηλότερα υψόμετρα με ένα αδιαπέραστο υλικό, που θα σφραγίσει ρωγμές ή ανοίγματα μεταξύ των πλακών. Προτιμάται κυρίως σε υψηλά φράγματα, αλλά δεν είναι απαραίτητη στο σχεδιασμό της αντοχής.

Υπάρχουν φράγματα τα οποία λειτουργούν χωρίς τη ζώνη 1. Στην πραγματικότητα όμως η χρησιμότητά της αναδεικνύεται μόνο όταν παρουσιαστεί κάποιο πρόβλημα. Μπορεί να τοποθετηθεί από τη βάση της ανάντη πλευράς έως λίγο πάνω από την αρχική κοίτη του ποταμού (Cooke et al., 1987).

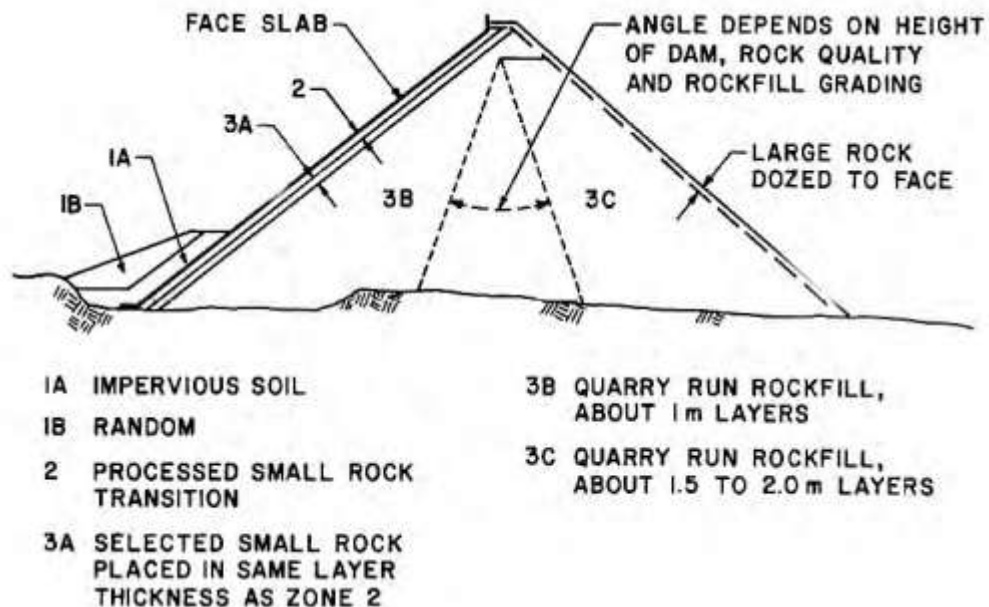
Η ζώνη 2 αποτελείται από λεπτά τεμάχια βράχου. Ο σκοπός της ζώνης αυτής, ακριβώς κάτω από την πλάκα, είναι να παρέχει μια σταθερή αντιστήριξη της πλάκας. Τα υλικά λιθορριπής με μέγεθος σωματιδίων μεταξύ 7,5 και 15 cm χρησιμοποιούνται με 40% άμμο. Η συμπίεση πραγματοποιείται σε στρώσεις πάχους 0,4-0,5 m, χρησιμοποιώντας δονητικούς οδοστρωτήρες. Δημιουργείται ένα ημι-αδιαπέραστο στρώμα, για την αποτροπή οποιασδήποτε μεγάλης διαρροής η οποία μπορεί να αναπτυχθεί από ρωγμή στην πλάκα σκυροδέματος. Σύμφωνα με τους Cooke et al. (1987), η τρέχουσα πρακτική του σχεδιασμού είναι να χρησιμοποιούνται περισσότερη άμμος στη ζώνη, για την αύξηση της ευκαμψίας και μείωση της διαπερατότητας. Ωστόσο, σε βροχερές περιοχές, πρέπει να ληφθούν ειδικές προφυλάξεις στη Ζώνη 2 λόγω αυξημένης διάβρωσης.

Η κυρίως ζώνη ως προς την αντοχή είναι η ζώνη 3. Η ζώνη αυτή αποτελείται από τρεις εσωτερικές ζώνες: Ζώνη 3A, Ζώνη 3B και Ζώνη 3C.

Η ζώνη 3A είναι μια μεταβατική ζώνη μεταξύ των ζωνών 2 και της κύριας λιθορριπής, η οποία συμπυκνώνεται σε στρώματα των 0,4-0,5 m παρόμοια με της Ζώνης 2. Κύριος σκοπός της είναι η συμπύκνωση να περιορίσει το μέγεθος των κενών της Ζώνης 3A και να εξασφαλίσει ότι η Ζώνη 2 δεν θα έχει μεγάλα κενά (Cooke et al., 1987).

Η κυρίως ζώνη 3B συμπυκνώνεται σε στρώσεις πάχους περίπου 1 μ., που εξομαλύνονται με τύμπανο δονητικού κυλίνδρου σε 10-12 περάσματα.

Ζώνη 3C έχει μικρή επίδραση στην πλάκα και λαμβάνει αμελητέο φορτίο νερού. Η ζώνη αυτή συμπυκνώνεται σε στρώματα του 1-2 μ. εξομαλύνοντας αυτά με τύμπανο δονητικού οδοστρωτήρα σε 4 περάσματα.



Σχ. 23: Τυπικές ζώνες των CFRD (Cooke et al., 1987)

6.2 ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΓΙΑ ΤΑ ΦΡΑΓΜΑΤΑ ΛΙΘΟΡΡΙΠΗΣ

Οι προδιαγραφές για την λιθορριπή δεν είναι τόσο αυστηρές όσο για τα αδρανή υλικά του σκυροδέματος. Το υλικό του βράχου που θα χρησιμοποιηθεί στο φράγμα, θα πρέπει να είναι υγιές και πρέπει να είναι ανθεκτικό στην αποσάθρωση και την αποσύνθεση από τις καιρικές συνθήκες. Τα καταλληλότερα είδη πετρωμάτων είναι τα πυριγενή ή μεταμορφωμένα πετρώματα, όπως οι γρανίτες, διορίτες, γνεύσιοι, βασάλτες, πυκνοί ψαμμίτες και οι δολομιτικοί ασβεστόλιθοι και χαλαζίτες οι οποίοι χρησιμοποιούνται ικανοποιητικά για τα φράγματα λιθορριπής. Χρησιμοποιούνται επίσης και σχετικά μαλακά πετρώματα, όπως ιλύολιθοι, σχιστόλιθοι και αργιλικά γενικώς πετρώματα (Singh et al., 1995).

Το εύρος αντοχής της λιθορριπής σε δοκιμή ανεμπόδιστης θλίψης κυμαίνεται σημαντικά. Τιμές αντοχής της τάξης 10-20 MPa είναι πολύ χαμηλές, τιμές 250 MPa θεωρούνται υψηλές, ενώ η πλειοψηφία των περιπτώσεων είναι στην περιοχή των 50-150 MPa.

Τα πετρώματα με αντοχή ανεμπόδιστης θλίψης της τάξης του 30 MPa θεωρούνται επαρκή για τα CFRDs. Η λιθορριπή υψηλότερης αντοχής δεν έχει γενικά πλεονέκτημα έναντι της λιθορριπής των 30-40 MPa και δεν επηρεάζει τη συμπίεστικότητα του φράγματος. Αντίθετα, η χρήση λιθορριπής από βράχο χαμηλής έως μέτριας αντοχής έχει πολλά πλεονεκτήματα από πλευράς κόστους, δεδομένου ότι είναι λιγότερο δαπανηρή για τη λήψη και έχει πολύ λιγότερες επιπτώσεις στο μηχανικό εξοπλισμό (Cooke et al., 1987).

Σύμφωνα με τον Cooke (1984), ένα από τα βασικά σημεία για την επιλογή του τύπου του πετρώματος είναι η συμπεριφορά του κατά τη διαβροχή. Αν μετά από διαβροχή, ένα στρώμα λιθορριπής είναι αρκετά ισχυρό ώστε να υποβαστάζει χωματουργικά φορτηγά και δονητικούς κυλίνδρους 10 τόνων, μπορεί να θεωρηθεί ως κατάλληλο φράγμα λιθορριπής. Αν ο βράχος διασπάται, είναι απαραίτητο να παρεμβληθούν ζώνες σκληρών, διαπερατών πετρωμάτων για την εσωτερική αποστράγγιση.

Οι πιο σημαντικές ιδιότητες της λιθορριπής των αναχωμάτων είναι η χαμηλή συμπίεστικότητα και η υψηλή αντοχή σε διάτμηση. Συνήθως είναι και η μεγάλη διαπερατότητα. Κατά γενικό κανόνα, ο μέσος όρος διαβάθμισης μεγέθους κόκκων είναι λιγότερο από το 20% να διαπερνά το κόσκινο Νο 4 και λιγότερο από το 10% το κόσκινο Νο.200. Έτσι δημιουργείται μία λιθορριπή υψηλής διατμητικής αντοχής και χαμηλής συμπίεστικότητας (Cooke et al., 1987).

Η προσθήκη του νερού στη λιθορριπή γίνεται για τη βελτίωση της συμπίκνωσης. Η ποσότητα του νερού που χρησιμοποιείται κυμαίνεται μεταξύ του 10-20% του όγκου επιχώματος Cooke et al. (1987).

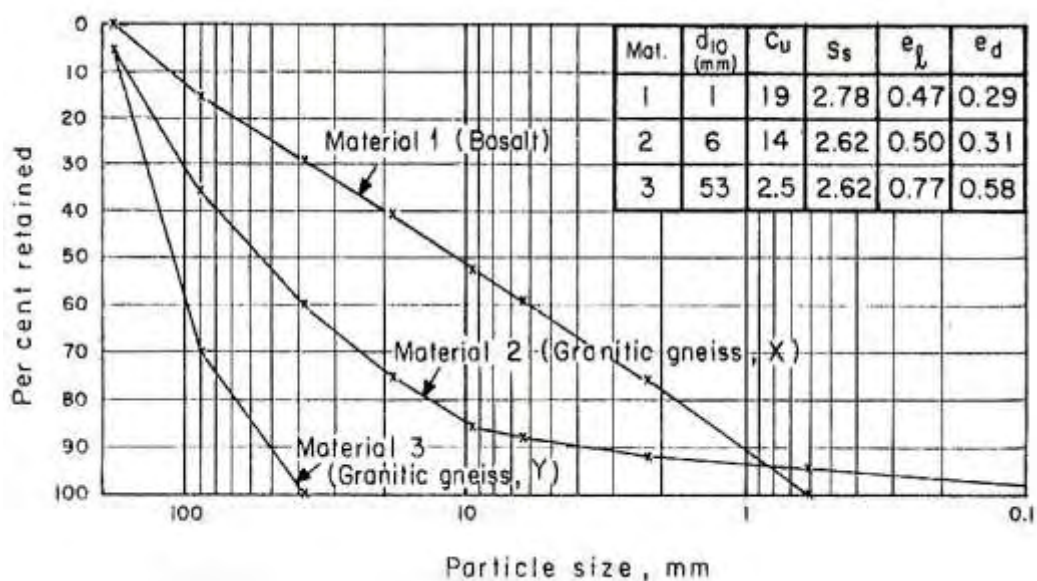
6.3 ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΥΛΙΚΩΝ ΛΙΘΟΡΡΙΠΗΣ

Η διατμητική αντοχή είναι ένα σημαντικό θέμα στη μηχανική του εδάφους. Ωστόσο ο καθορισμός των χαρακτηριστικών της διατμητικής αντοχής της λιθορριπής ήταν πάντα ένα δύσκολο θέμα για τη γεωτεχνική μηχανική. Δεδομένου ότι σε πολλές συνθήκες τα υλικά της λιθορριπής περιέχουν λίθους διαμέτρου έως και 1.2 m, δεν μπορούν να δοκιμάζονται με τη συμβατική τριαξονική συσκευή. Για να πραγματοποιηθούν αυτού του είδους τριαξονικές δοκιμές, απαιτούνται μεγάλες εγκαταστάσεις με πολύ μεγάλο κόστος και έτσι δεν είναι διαθέσιμες σε πολλές περιπτώσεις. Για να ξεπεραστεί αυτή η δυσκολία, ορισμένες ειδικές μέθοδοι έχουν αναπτυχθεί για τη μείωση του μέγεθους των

λίθων για τριαξονική δοκιμή. Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται μπορεί να συνοψιστούν ως εξής:

- (1) Η τεχνική scalping (Zeller et al, 1957).
- (2) Τεχνική παράλληλων διαβαθμίσεων (Lowe, 1964).
- (3) Καμπύλες κατανομής μεγέθους κόκκου (Fumagalli, 1969) και
- (4) Η τεχνική αντικατάστασης (Frost, 1973).

Παρά τη δυσκολία όμως, υπάρχουν πολλές μελέτες για την διατμητική αντοχή της λιθορριπής. Μερικά από τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν μπορούν να συνοψιστούν στα παρακάτω διαγράμματα 7 (Marsal 1967) και 8 (Leps 1970), καθώς και στον πίνακα 3, (Marachi et al. 1972).



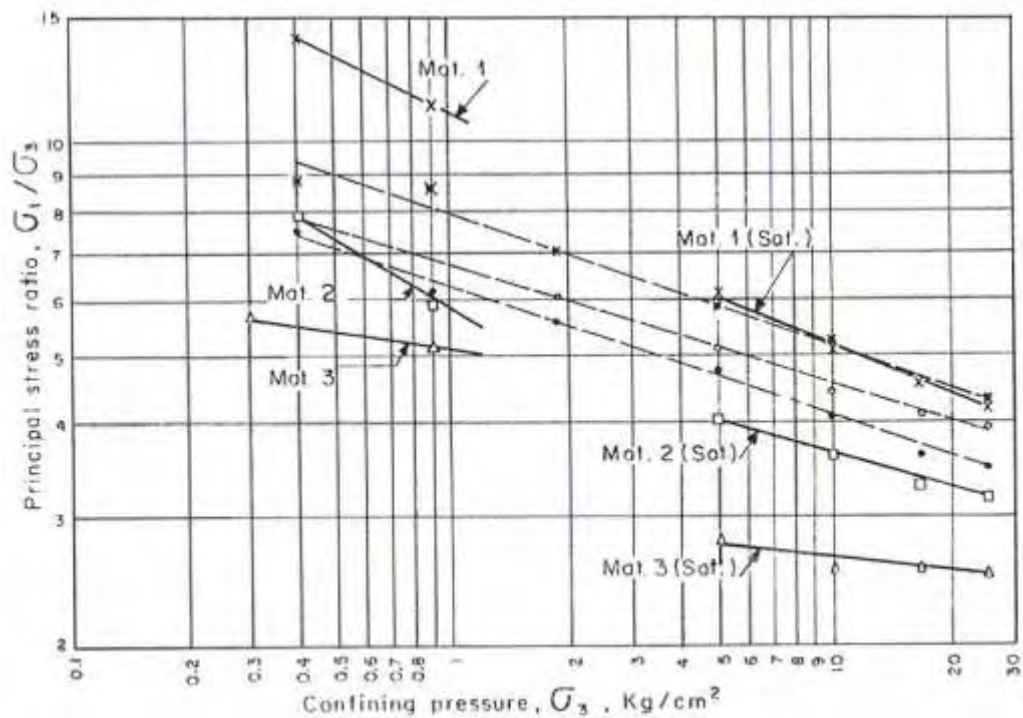
Λιάγρ. 7: Κοκκομετρικές καμπύλες διαβάθμισης τριών υλικών Λιθορριπής (Marsal 1967)

Ο Marsal διεξήγαγε δοκιμές σε συνθήκες στράγγισης με δείγματα πλήρως κορεσμένα λιθορριπής. Στον πίνακα 3, βλέπουμε ότι η αύξηση του λόγου των τάσεων κατά τη μέγιστη αντοχή μειώνεται σημαντικά όταν τα δείγματα υποβάλλονται σε χαμηλή πλευρική περιβάλλουσα τάση. Στον διάγραμμα 8, οι τελικές διαβαθμίσεις των υλικών που δοκιμάστηκαν σε πίεση των 2.5 MPa εμφανίζονται ως εξής: το υλικό 1 δείχνει κατακερματισμό της τάξης του 10-12%, το υλικό 2 περίπου 23-24% και το υλικό 3 μέχρι 53%.

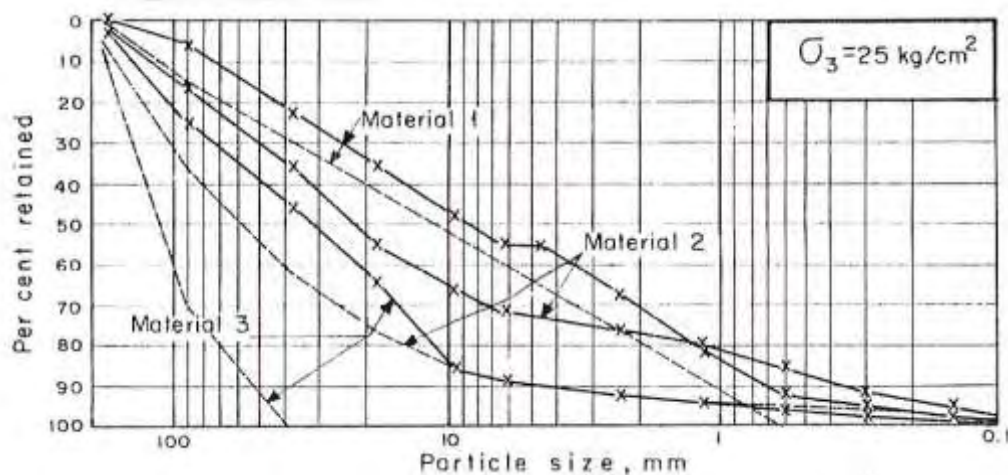
MATERIAL		Particle Shape	d_{10} mm	C_u	e^*	P_0 kg
Crushed, sound basalt	X(1)	Angular	1	19	0.30	860
Quarry-blasted, granitic gneiss	□(2)	Sub-angular	6	14	0.32	130
Quarry-blasted, granitic gneiss	Δ(3)	Sub-angular	53	2.5	0.62	130
Alluvial sand and gravel	⊗(P)	Sub-rounded	0.2	105	0.34	580
Quarry-blasted, sound silicified conglomerate	○(1)	Angular	5	15	0.45	230
Quarry-blasted, sound diorite	●(D)	Angular	20	5	0.56	170

* Void ratio, before testing

Vacuum apparatus, dry specimens ← | → High pressure apparatus



Πίν. 3: Σχέση λόγου κύριων πιέσεων προς κύριας πίεσης σ_3 (Marsal, 1967)

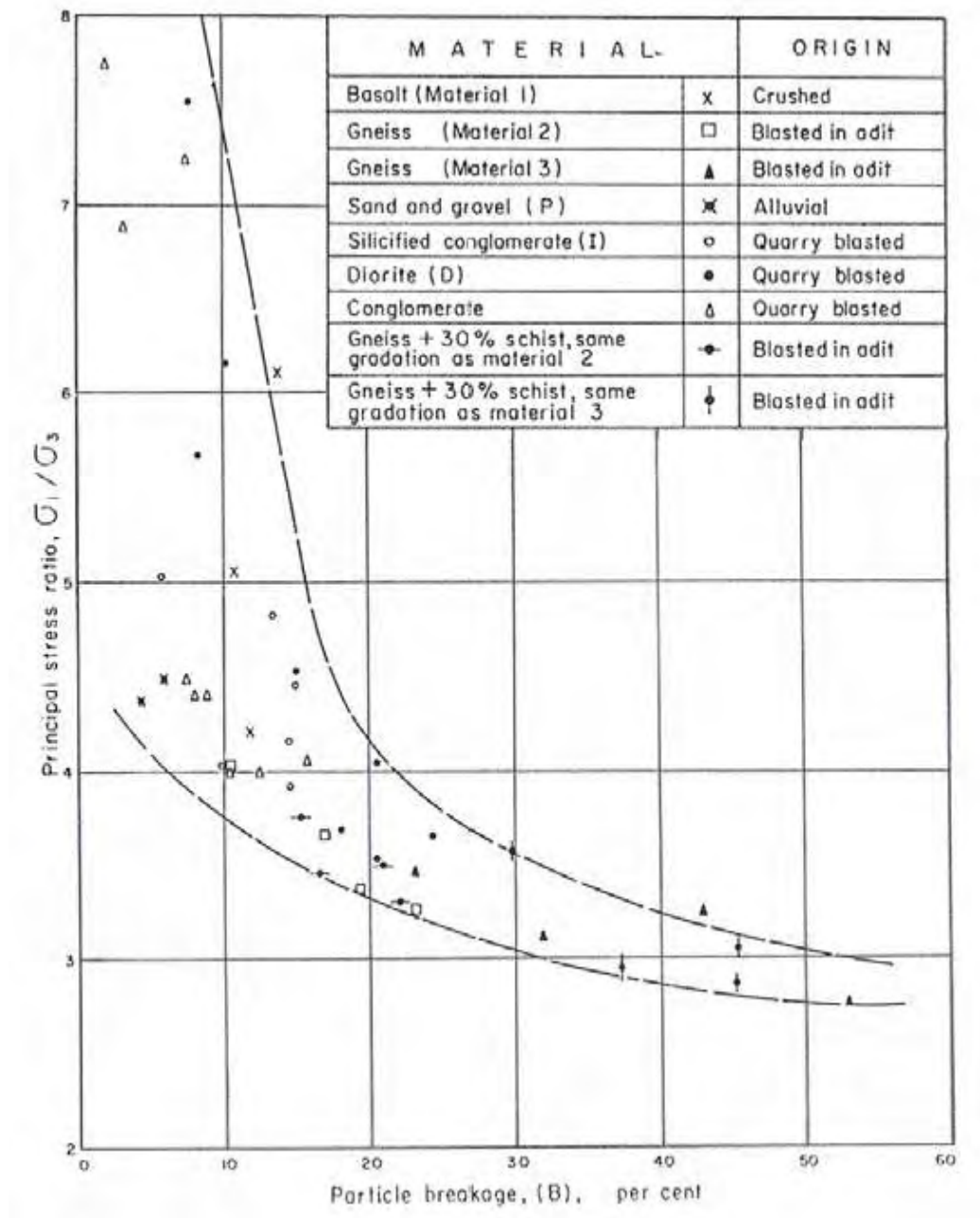


Διάγρ. 8: Διαβαθμίσεις των υλικών σε δοκιμή κύριας πίεσης σ_3 (Marsal, 1967)

Μετά τις δοκιμές, ο Marsal κατέληξε στο συμπέρασμα ότι ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες που επηρεάζουν τόσο την αντοχή όσο και τη συμπιεστότητα της λιθορριπής είναι η θραύση των σωματιδίων ή ο κατακερματισμός.

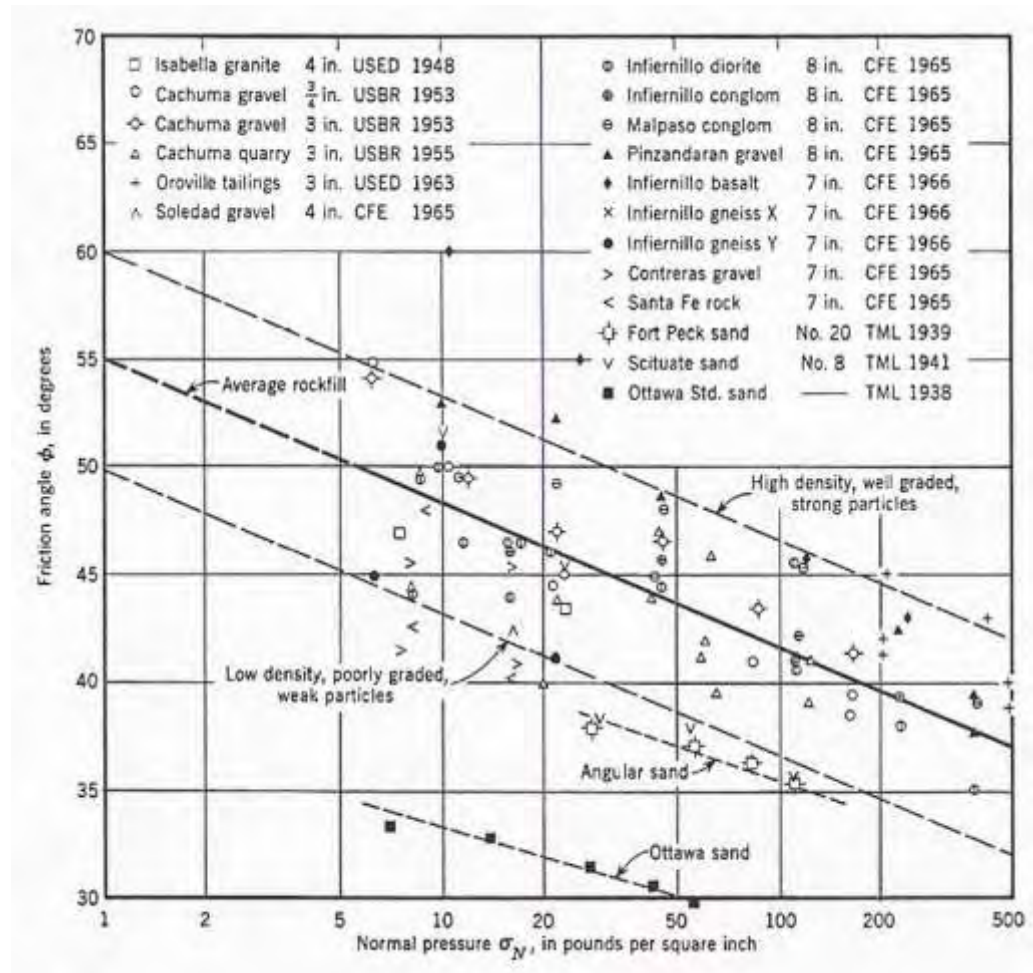
Σύμφωνα με τον Marsal η συμπιεστότητα είναι ένα σύνθετο φαινόμενο και είναι αποτέλεσμα των σχετικών μετατοπίσεων μεταξύ σωματιδίων, σε συνδυασμό με τη θραύση και την παραμόρφωση των επιφανειών επαφής. Έχοντας υπ όψιν λοιπόν το σημείο διατμητικής αντοχής, κατέληξε στα ακόλουθα συμπεράσματα:

Η διατμητική αντοχή είναι μεγαλύτερη σε καλά διαβαθμισμένα υλικά και δεν εξαρτάται σημαντικά από τη προέλευση του βράχου. Υλικά με παρόμοιες διαβαθμίσεις παρουσιάζουν κάποια μεταβολή της διατμητικής αντοχής, πιθανώς λόγω των εγγενών χαρακτηριστικών των κόκκων (διάγρ. 9).



Διάγρ. 9: Παράγοντες που επηρεάζουν τη θραύση σε σχέση με το λόγο σ_1/σ_3 (Marsal, 1967)

Στο διάγραμμα 10 έχουμε δεδομένα 15 διαφορετικών υλικών, κατά Leps τα οποία ανήκουν σε τρεις κατηγορίες ανάλογα με την διαβάθμιση και την αντοχή τους σε θλίψη: (α) ασθενή θραύσματα βράχου με αντοχή σε θλίψη 500 έως 2500 psi. (β) μέσης αντοχής θραύσματα βράχου από 2500 έως 10000 psi και θραύσματα υψηλής αντοχής σε θλίψη από 10000 έως 30000 psi (1 MPa = 145 psi).



Διάγρ. 10: Επίδραση της πίεσης περισίφιξης στην κορυφή της γωνίας τριβής - Λιθόρ δείγματα (Leps, 1970)

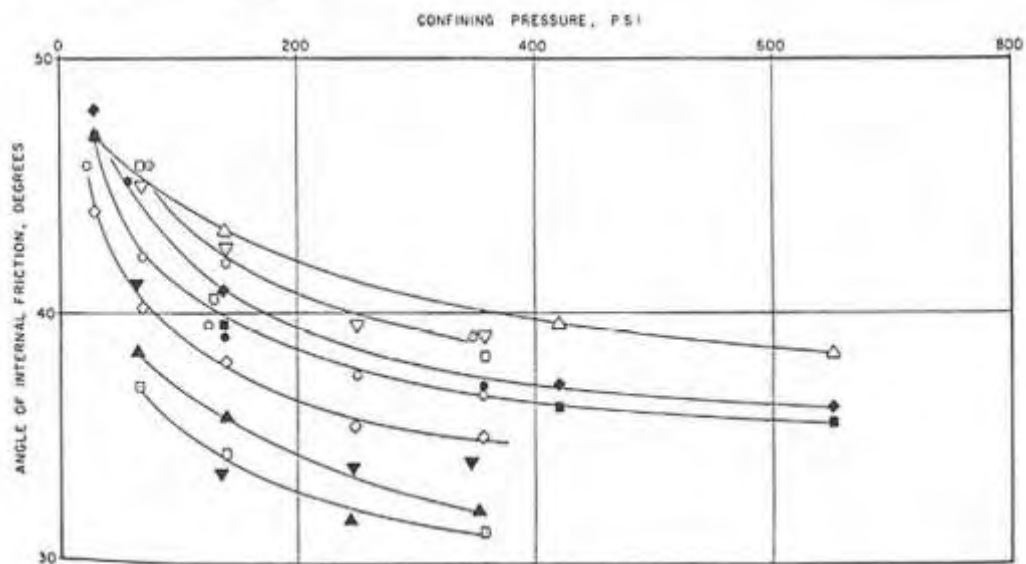
Υπάρχει μία σαφής σχέση της γωνίας τριβής και της περιβάλλουσας τάσης (διάγραμμα 10):

- Σε μια δεδομένη περιβάλλουσα τάση, η γωνία τριβής αυξάνει με την αύξηση της σχετικής πυκνότητας. Η αύξηση αυτή είναι περισσότερο αισθητή στα χαμηλά επίπεδα πίεσης σε σχέση με τα υψηλότερα επίπεδα. Επίσης, η βελτίωση της διαβάθμισης της λιθορριπής αυξάνει τη γωνία τριβής.
- Όταν όλοι οι άλλοι παράγοντες παραμένουν σταθεροί, οι πιο γωνιώδεις κόκκοι δίνουν μεγαλύτερη γωνία τριβής από τους πιο στρογγυλεμένους. Η αύξηση αυτή μπορεί να είναι 10°-15° σε χαμηλή περιβάλλουσα τάση.

**STRENGTH AND DEFORMATION CHARACTERISTICS OF LARGE
ROCK FILL SPECIMENS (CONFINING PRESSURE = 350 PSI)**

SYMBOL	DAM OR PLACE	MATERIAL	GRADATION	PARTICLE SHAPE	ϕ°	E_1, f %	E_2, f %	σ_1^f CRITICAL PSI	REFERENCE
△	OROVILLE	DREDGER TAILINGS	WELL-GRADED 6" - fines	ROUNDED	40	6.5	1.5	120	THIS REPORT
▽	PIZANDARAN	SAND AND GRAVEL (Dry)	WELL-GRADED 8" - fines	ROUNDED	39	8	4.7	60	MARSAL, 19
○	SAN FRANCISCO	BASALT	WELL-GRADED 8" - 1/4"	ANGULAR	39	15	6	60	MARSAL, 18
□	SAN FRANCISCO	BASALT	WELL-GRADED 3" - 1/4"	ANGULAR	38				MARSAL, 19
◆	SAN FRANCISCO	BASALT	POORLY-GRADED 6" - fines	ANGULAR	37	20	6.5	40	THIS REPORT
●	MALPASO	CONGLOMERATE (Dry)	WELL-GRADED 8" - fines	ANGULAR	37	13	4.5	20	MARSAL, 19
○	EL INFIERNILLO	SILICIFIED conglomerate (dry)	POORLY-GRADED 8" - fines	ANGULAR	36.5	14	5.5	30	MARSAL, 17
■	PYRAMID	ARGILLITE	POORLY-GRADED 6" - fines	ANGULAR	36.5	20	5.5	25	THIS REPORT
○	EL INFIERNILLO	DIORITE (dry)	POORLY-GRADED 8" - fines	ANGULAR	35	15	10	25	MARSAL, 19
▽	EL GRANERO	SHALE ⁽¹⁾	WELL-GRADED 8" - 1/4"	ANGULAR	+35	> 14	> 10	10	MARSAL, 19
▲	EL GRANERO	SHALE ⁽¹⁾	POORLY-GRADED 8" - 3/4"	ANGULAR	+33	> 14	> 10	5	MARSAL, 19
□	MICA	GRANITIC GNEISS ⁽¹⁾	WELL-GRADED 8" - fines	ANGULAR	+32	> 14	6	20	MARSAL, 18
NOT SHOWN	MICA	GRANITIC GNEISS ⁽¹⁾	POORLY-GRADED 8" - 1 1/3"	ANGULAR	+25	> 14	10	5	MARSAL, 18

⁽¹⁾ TEST NOT CONTINUED TO FAILURE.



Διάγρ. 11: Αποτέλεσμα της πίεσης στην γωνία τριβής των υλικών (Marachi et al., 1972)

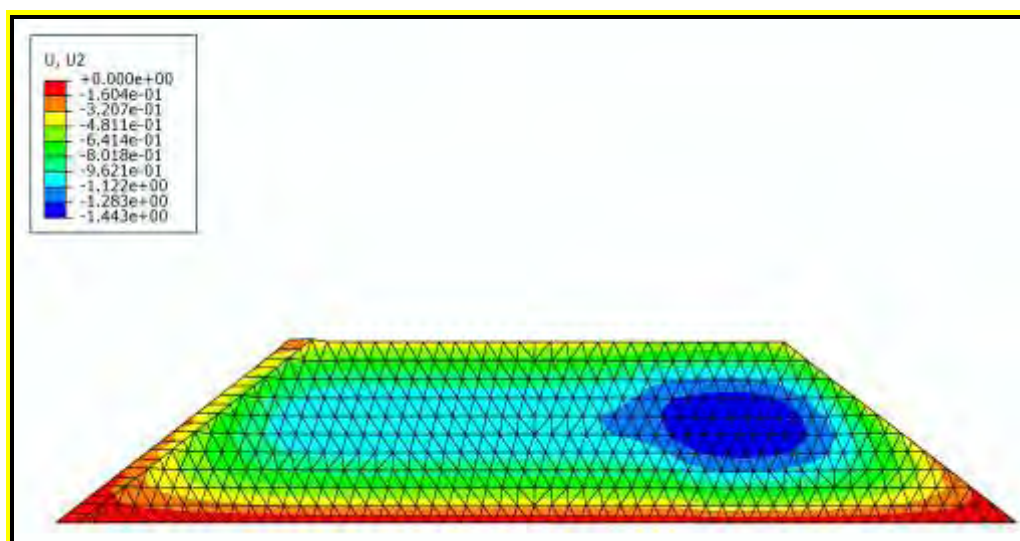
6.4 ΣΤΑΔΙΑΚΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΚΑΙ ΠΛΗΡΩΣΗ ΤΗΣ ΛΕΚΑΝΗΣ

Η αριθμητική προσομοίωση της σταδιακής κατασκευής, πλήρωσης της λεκάνης και εφαρμογής της μετακίνησης στη βάση του φράγματος, πραγματοποιείται σε 13 στάδια, καθένα από τα οποία υλοποιείται σε διάφορα βήματα όπως φαίνεται ενδεικτικά παρακάτω.

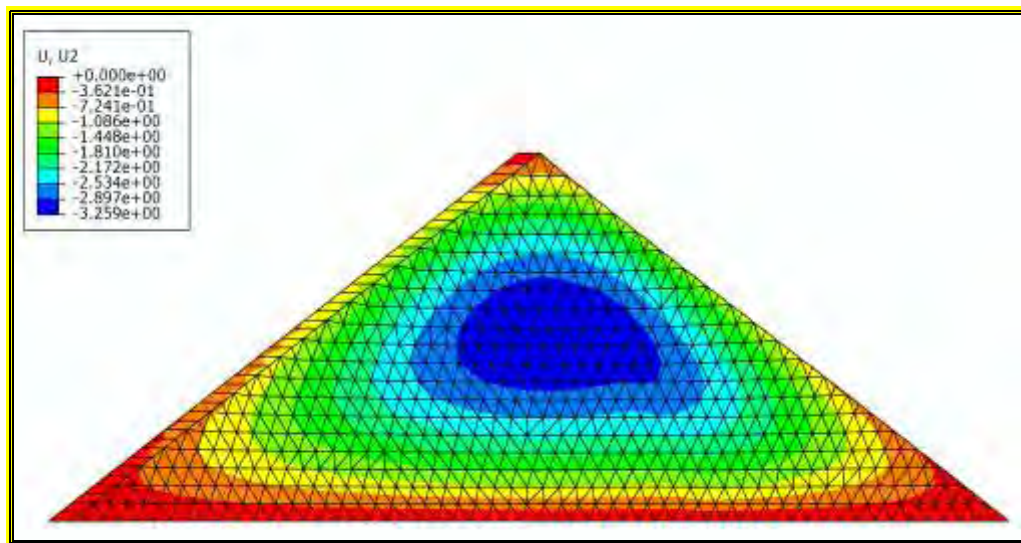
Σταδιακή κατασκευή του επιχώματος σε 20 στρώσεις:



Σχ. 24: 1^η στρώση στην κατασκευή του επιχώματος (βήμα 1)

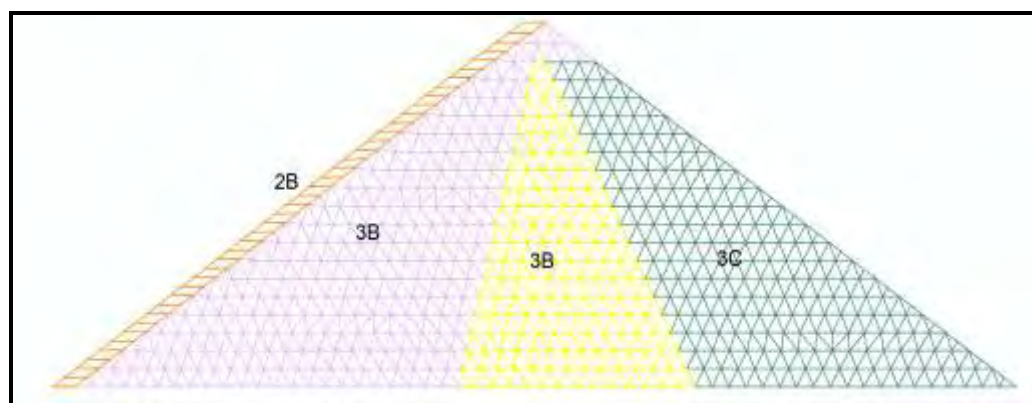


Σχ. 25: Οι 10 πρώτες στρώσεις στην κατασκευή του επιχώματος (βήμα 10)



Σχ. 26: Ολοκλήρωση της κατασκευής του επιχώματος (βήμα 20)

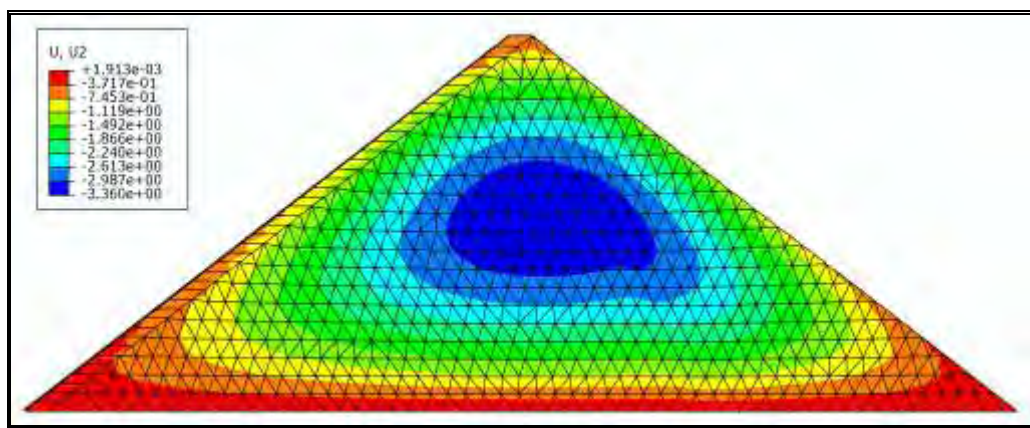
Η σταδιακή κατασκευή του επιχώματος προσομοιώνεται θεωρώντας 20 στρώσεις πάχους 7.5 m. Το αριθμητικό προσομοίωμα διακριτοποιεί με ακρίβεια τη γεωμετρία του επιχώματος. Εκτός των 20 οριζόντιων στρώσεων της κατασκευής, η διατομή υποδιαιρείται σε τρεις βασικές ζώνες: την ανάντη ζώνη 3B, την κατάντη ζώνη 3C και τη ζώνη χαλικιού 2B. Έτσι, η μέγιστη διατομή του φράγματος χωρίζεται συνολικά σε 60 ζώνες, κάθε μία από τις οποίες διακριτοποιείται χωριστά με μέγιστη διάσταση στοιχείου περίπου 4m. Οι τιμές των παραμέτρων του προσομοιώματος πάρθηκαν από δημοσιευμένα δεδομένα (Duncan et al. 1980).



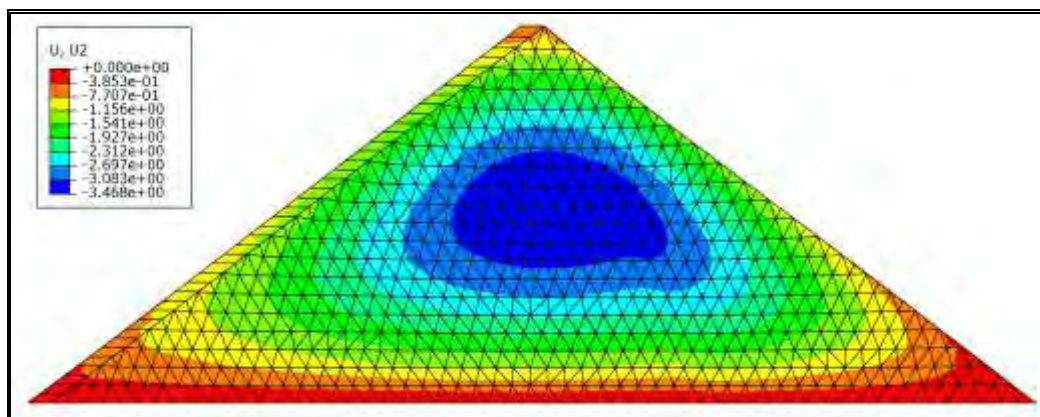
Σχ. 27: Διατομή του αναχώματος και ζώνες υλικών 2B, 3B, και 3C

Η προσομοίωση της σταδιακής κατασκευής επαναλαμβάνεται αρκετές φορές και μετά από κάθε ανάλυση η αρχική γεωμετρία του φράγματος τροποποιείται έτσι ώστε μετά την επιβολή του 94% της βαρύτητας η επιφάνεια του ανάντη πρανούς να αποτελεί ένα τέλειο επίπεδο πάνω στο οποίο τοποθετείται η πλάκα.

Κατασκευάζεται η πλάκα σκυροδέματος στην ανάντη πλευρά και επιβάλλεται η πίεση του επιχώματος στο κάτω μέρος της πλάκας. Στην συνέχεια γίνεται σταδιακή πλήρωση της λεκάνης στα 55 m, στα 100 m, και τέλος στα 148 m.

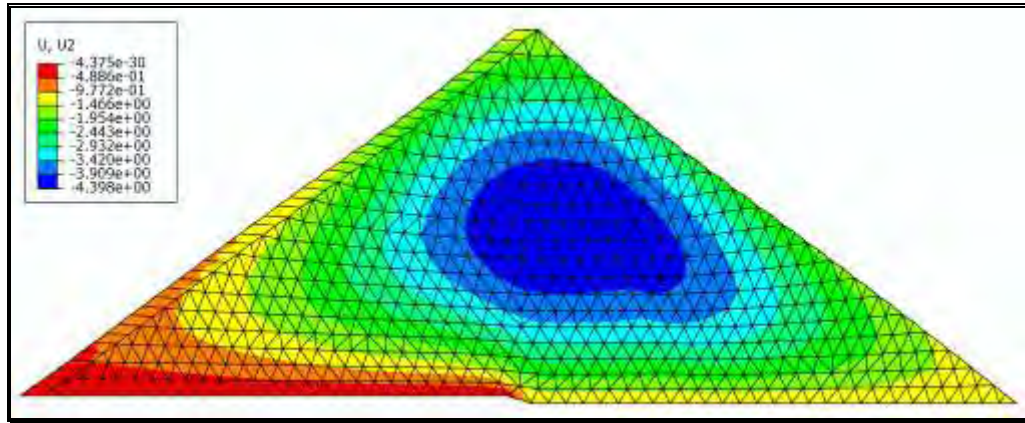


Σχ. 28: Πλήρωση της λεκάνης σε ύψος 55 m (step 21)



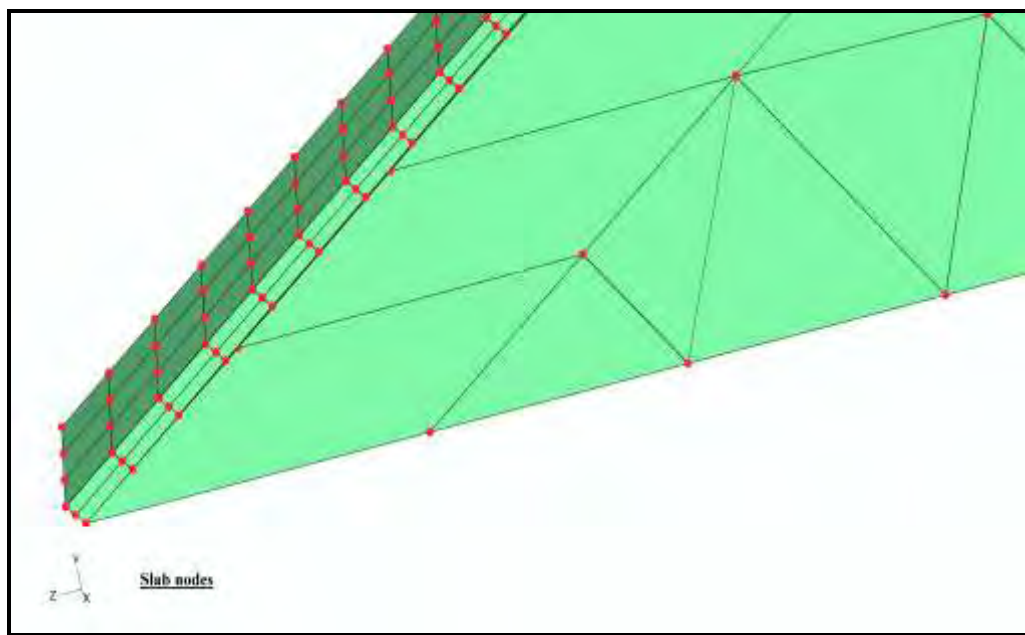
Σχ. 29: Τελική πλήρωση της λεκάνης σε ύψος 148 m (step 28)

Στην συνέχεια επιβάλλεται μία σταδιακή μετακίνηση τμήματος της βάσης του επιχώματος κατά την οριζόντια και κατακόρυφη διεύθυνση υπό γωνία 45° ως προς την κατακόρυφο, που προσομοιώνει τη μετακίνηση του τεκτονικού ρήγματος. Η συνιστώσα της τελικής μετατόπισης είναι 1.41 m.

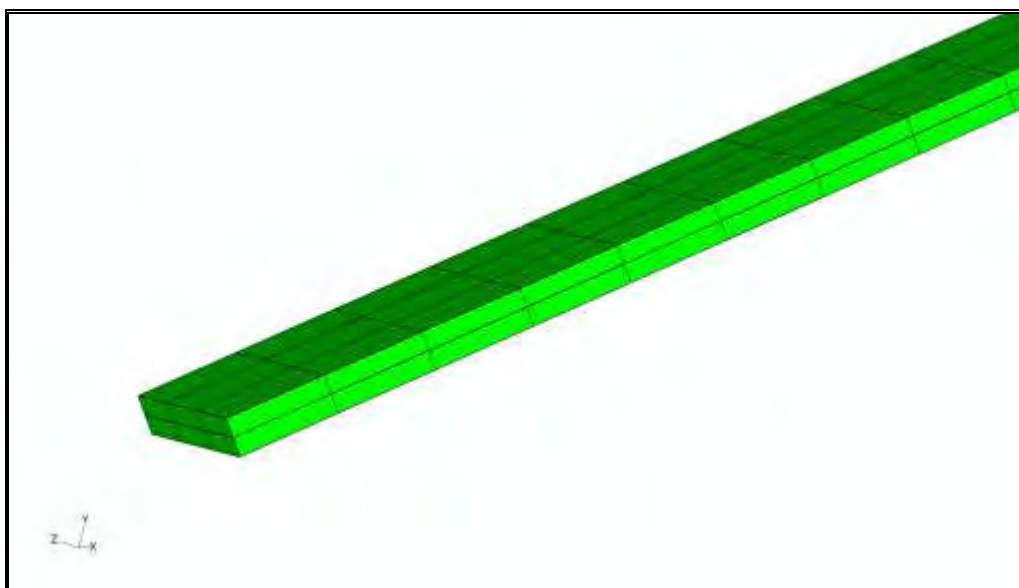


Σχ. 30: Τελική μετακίνηση της βάσης κατά 1.41 m (βήμα 38)

Η πλάκα σκυροδέματος αποτελείται από δύο σειρές λεπτών πεπερασμένων στοιχείων στην κατεύθυνση του πάχους και από τρεις σειρές στοιχείων στην κατεύθυνση τους πλάτους της. Το πάχος της πλάκας είναι 0,30 m στην στέψη και 0,75 m στον πόδα.



Σχ. 31: Μεγέθυνση τμήματος της πλάκας τοποθετημένη στην ανάντη επιφάνεια. Διακρίνονται οι κόμβοι με κόκκινες βούλες (nodes)



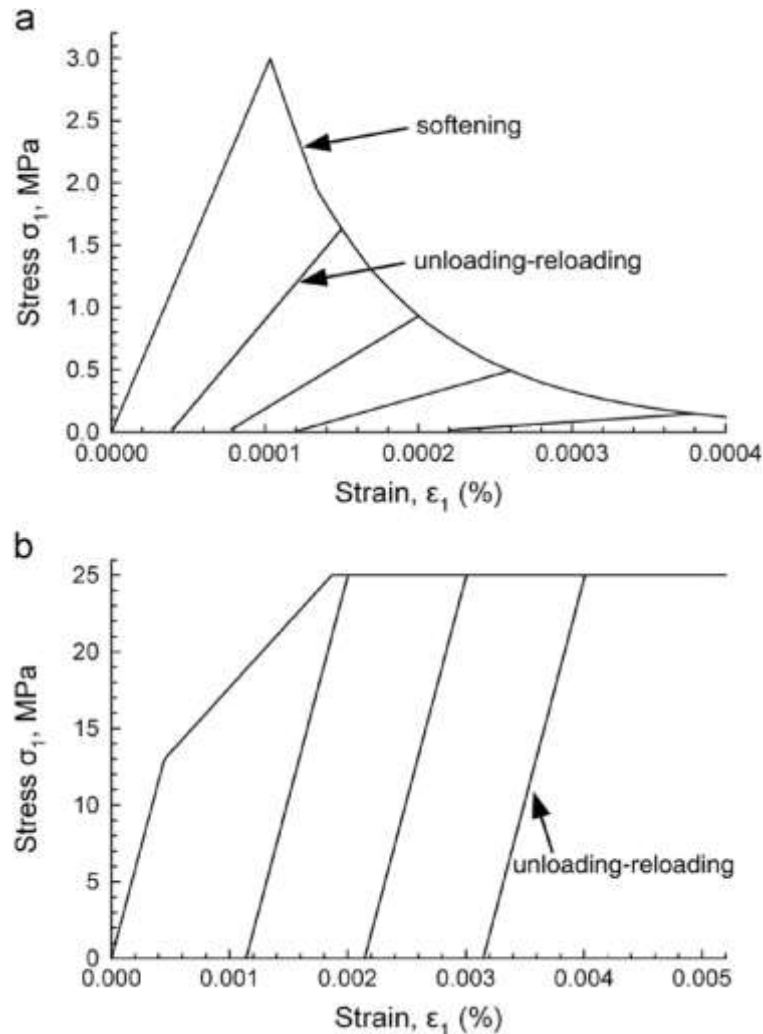
Σχ. 32: Τμήμα της πλάκας σκυροδέματος – διακριτοποίηση

Για κατασκευή της πλάκας χρησιμοποιούνται οι ποιότητες σκυροδέματος c25, c37 και c45. Οι ιδιότητες του σκυροδέματος δίδονται στον παρακάτω πίνακα:

Ποιότητα σκυροδέματος	c25	c37	c45
Αντοχή σε θλίψη, MPa	25	37	45
Αντοχή σε εφελκυσμό, MPa	3	3.7	4.5
Πυκνότητα ρ , km/m ³	2350	2350	2350
Μέτρο Yang, GPa	29	29	29
Λόγος Poisson	0.3	0.3	0.3
Συντελεστής τριβής μ_c	0.5	0.5	0.5

Πίν. 6: Ιδιότητες σκυροδέματος

Η σχέση τάσης-παραμόρφωσης από προσομοίωση της μονοαξονικής ανακυκλικής φόρτισης για εφελκυσμό και θλίψη σκυροδέματος C25 δίδεται στο παρακάτω διάγραμμα 12-a,b:



Διάγραμμα 12: (α) Σχέση τάσης παραμόρφωσης σε εφελκυσμό (β) Σχέση τάσης παραμόρφωσης σε πίεση για σκυρόδεμα C25 (Π. Ντακούλας 2011)

Η διεπιφάνεια στη βάση της κάθε πλάκας αναπτύσσει τριβή με την υποκείμενη στρώση χαλκιού και έχει τη δυνατότητα αποχωρισμού. Στο βασικό σενάριο ανάλυσης, ο συντελεστής τριβής μεταξύ σκυροδέματος και χαλκιού λαμβάνεται 0,7. Αρχικά η πλάκα φορτίζεται από το ίδιο βάρος και επειδή η τριβή δεν επαρκεί, υποστηρίζεται στο κάτω μέρος της από την πλίνθο.

Κατασκευάζεται επίχωμα στην επιφάνεια της πλάκας έως υψόμετρο 55 m με μέγιστο πάχος 25 m στον πόδα της πλάκας. Η κατασκευή του επιχώματος προσομοιώνεται επιβάλλοντας γραμμικά κατανεμημένες ορθές και διατμητικές τάσεις στην κεκλιμένη επιφάνεια κάθε πλάκας.

Καθώς η στάθμη του ύδατος ανέρχεται ταυτόχρονα οι τάσεις που ασκεί το βάρος του επιχώματος μειώνονται λόγω ανώσεως. Κατά μήκος των διεπιφανειών πλακών-πλίνθου, οι συνοριακές συνθήκες επιτρέπουν την μετακίνηση των πλακών προς το κέντρο του φράγματος, ενώ εμποδίζουν τη μετακίνηση πέραν της πλίνθου.

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

7.1 ΓΕΝΙΚΑ

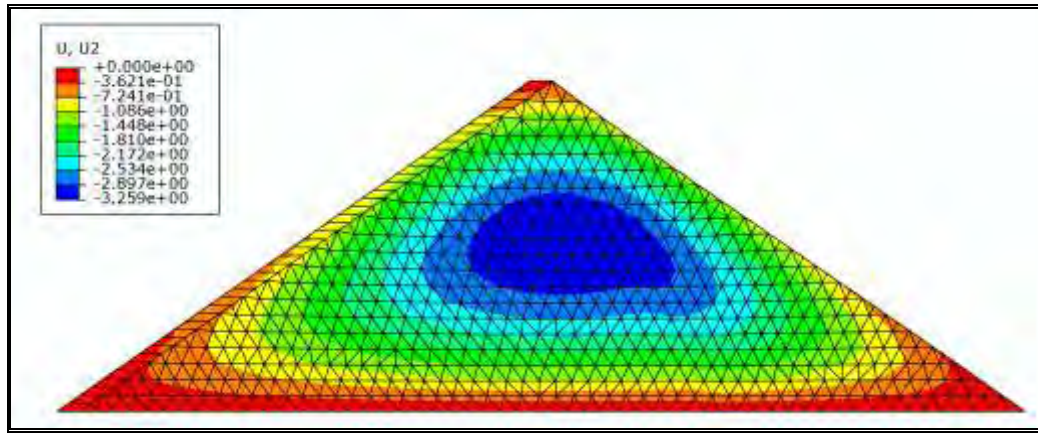
Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την αριθμητική ανάλυση του φράγματος. Τα αποτελέσματα δίδονται για (α) το πέρας της κατασκευής του επιχώματος (β) το στάδιο πλήρωσης της λεκάνης (γ) το στάδιο της μετατόπισης του ρήγματος κατά 1 m οριζόντια και 1 m κατακόρυφα (η συνισταμένη μετακίνηση σε κατεύθυνση που σχηματίζει γωνία 45° είναι 1.41 m). Για τα στάδια (α) και (β) τα αποτελέσματα δίδονται για αντοχή σκυροδέματος σε θλίψη ίση προς 25 MPa (C25), ενώ για το στάδιο (γ) εξετάζεται η επίδραση της μετατόπισης του ρήγματος στην συμπεριφορά της πλάκας για τις τρεις διαφορετικές τιμές της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος, δηλαδή για C25, C37 και C45. Πιο συγκεκριμένα για το στάδιο (α) δίδονται οι καθιζήσεις, κατακόρυφες ορθές τάσεις και ελάχιστες κύριες τάσεις του επιχώματος. Για τα στάδια (β) και (γ) εξετάζονται για το επίχωμα οι καθιζήσεις, κατακόρυφες ορθές τάσεις και ελάχιστες κύριες τάσεις του, ενώ για την πλάκα εξετάζονται η βύθιση, η κατά μήκος μετατόπιση, η μέγιστη και ελάχιστη κύρια τάση και η μέγιστη κύρια πλαστική παραμόρφωση λόγω εφελκυσμού κατά την πλήρωση της λεκάνης και μετακίνησης του ρήγματος, αντίστοιχα.

7.2 ΣΤΑΔΙΟ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΕΠΙΧΩΜΑΤΟΣ

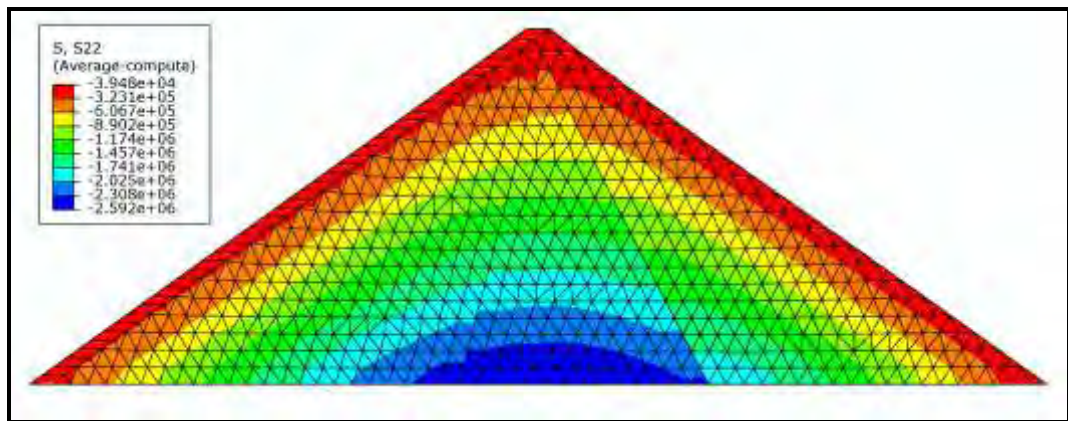
Στο στάδιο της κατασκευής του επιχώματος, το οποίο υλοποιείται όπως προαναφέραμε σε 20 βήματα, μπορούμε να δούμε αναλυτικά τα αποτελέσματα για την καθίζηση U_2 και την κατακόρυφη ορθή τάση S_{22} του επιχώματος.

Συγκεκριμένα για την καθίζηση U_2 (Σχήμα 33) η μέγιστη τιμή της είναι 3.26 m και παρουσιάζεται στο κέντρο του επιχώματος.

Για την κατακόρυφη ορθή τάση S_{22} η μεταβολή της βαίνει αυξανόμενη με το βάθος, με μέγιστη τιμή στο κεντρικό τμήμα της βάσης ίση προς 2.59 MPa (Σχ. 34).



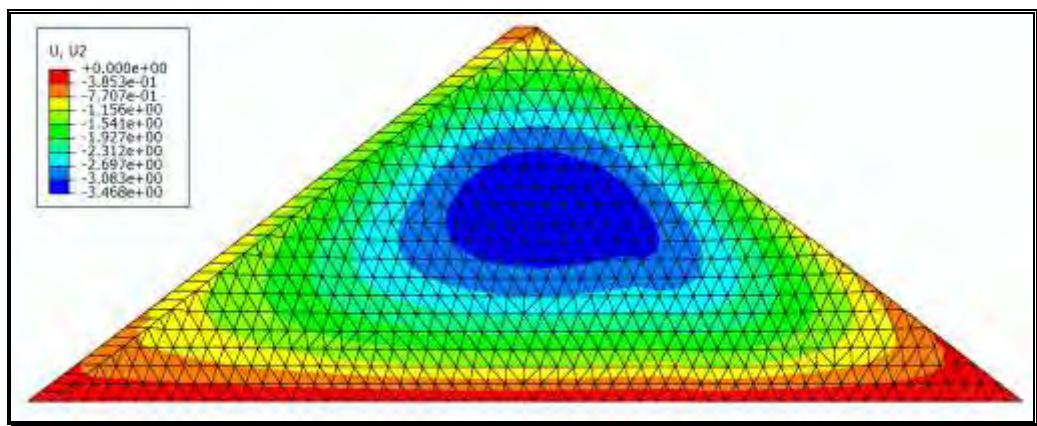
Σχ. 33: Καθίζηση μετά το πέρας της κατασκευής του επιχώματος



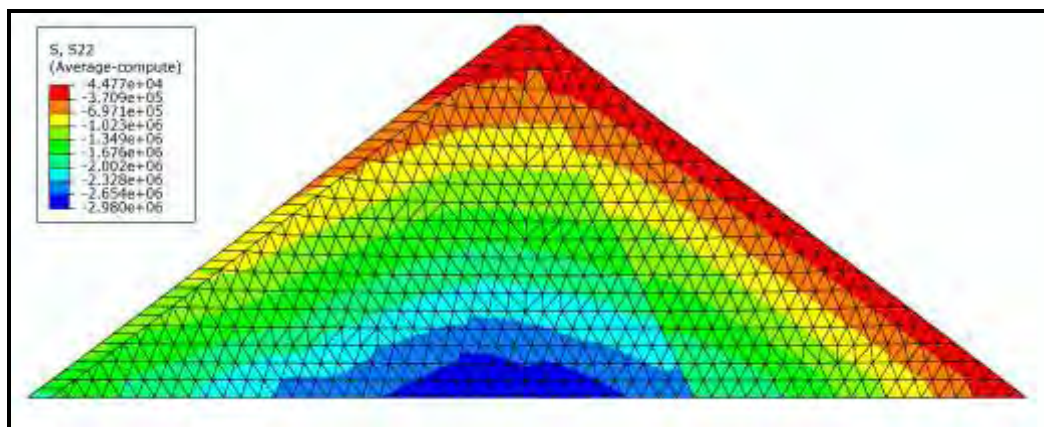
Σχ. 34: Κατακόρυφη ορθή τάση μετά το πέρας της κατασκευής του επιχώματος

7.3 ΣΤΑΔΙΟ ΠΛΗΡΩΣΗΣ ΤΗΣ ΛΕΚΑΝΗΣ

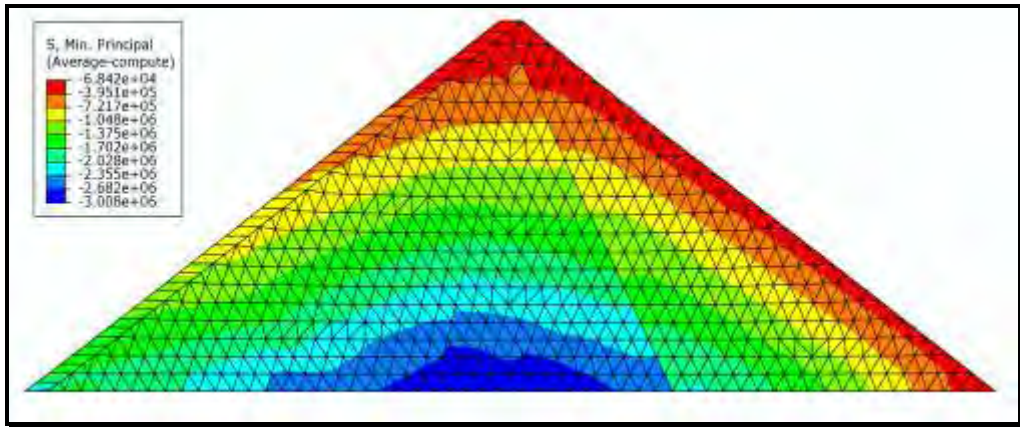
Η πλήρωση της λεκάνης λαμβάνει χώρα μετά την τοποθέτηση της πλάκας σκυροδέματος. Οι κατανομές στο σώμα του φράγματος της καθίζησης U_2 , της κατακόρυφης ορθής τάσης S_{22} και της ελάχιστης κύριας τάσης S_{\min} δίδονται στα παρακάτω σχήματα 35, 36 και 37 αντίστοιχα. Η πλάκα σκυροδέματος έχει σκοπίμως αφαιρεθεί, καθώς οι τάσεις στην πλάκα είναι αρκετά μεγαλύτερες και δεν μπορούμε να δούμε ξεκάθαρα τις αλλαγές των τάσεων στο επίχωμα. Η μέγιστη καθίζηση είναι 3.47 m και οι μέγιστες τιμές των S_{22} και S_{\min} είναι 2.98 MPa και 3.00 MPa, αντίστοιχα.



Σχ. 35: Καθίζηση μετά την πλήρωση της λεκάνης

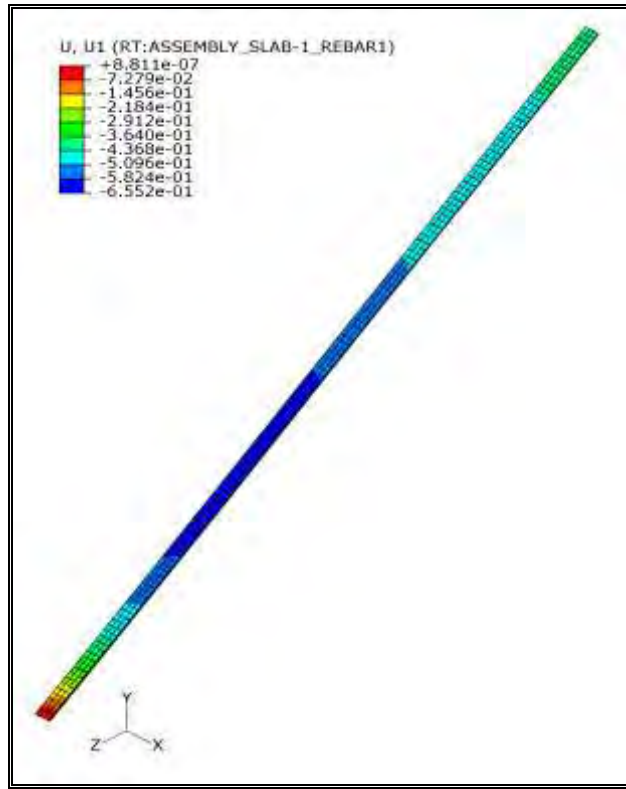


Σχ. 36: Κατακόρυφη ορθή τάση μετά την πλήρωση της λεκάνης

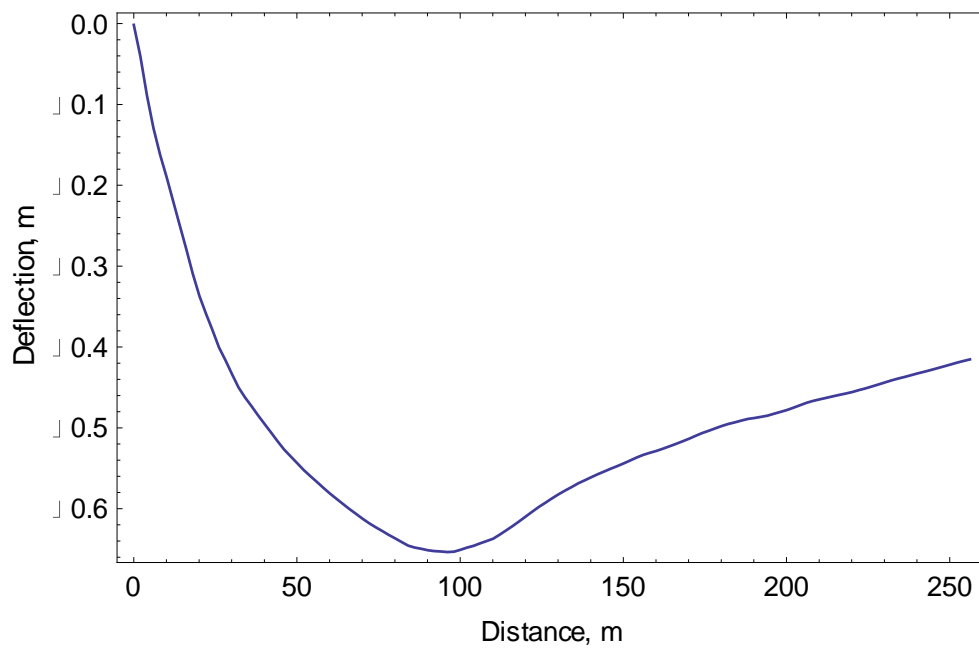


Σχ. 37: Ελάχιστη κύρια τάση μετά την πλήρωση της λεκάνης

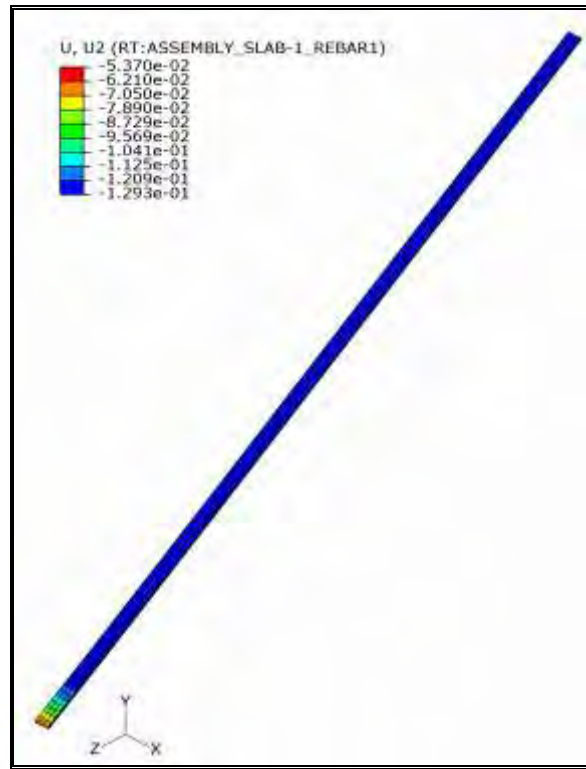
Οι μεταβολές των αντίστοιχων τιμών των τάσεων και μετατοπίσεων στην πλάκα σκυροδέματος δίδονται στα σχήματα και διαγράμματα που ακολουθούν. Μετά την πλήρωσης της λεκάνης, η μέγιστη βύθιση της πλάκας είναι 65.5 cm, και παρουσιάζεται στο 1/3 του ύψους του φράγματος. Η μέγιστη κατάντη μετατόπιση της πλάκας είναι 13 cm χωρίς απώλεια υδατοστεγανότητας του αρμού (σχήμα 39). Ο μέγιστος εφελκυσμός είναι 2.7 MPa (στον πόδα, βλέπε Σχήμα 40) και η μέγιστη θλίψη 4.7 MPa (Σχήμα 41). Η μέγιστη θλίψη συνδέεται με την ορθή τάση στην κατά μήκος κατεύθυνση της πλάκας τάσης S_{22} .



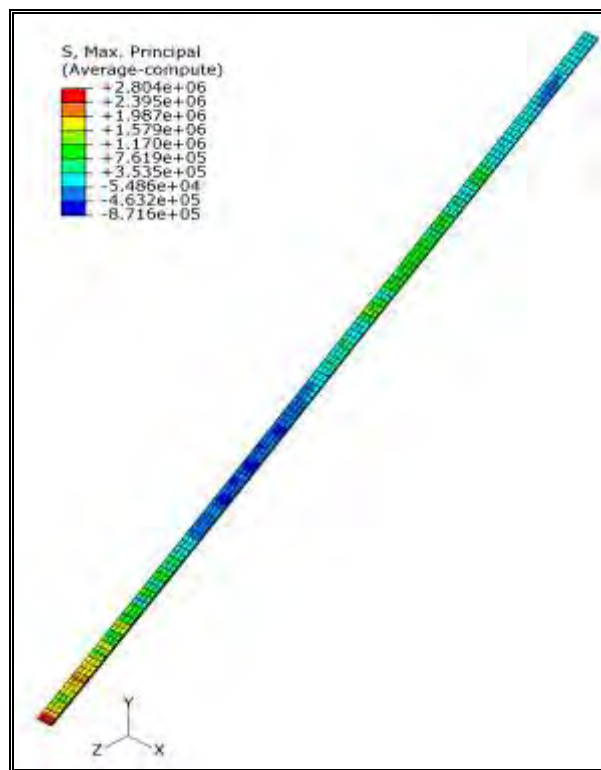
Σχ. 38: Βύθιση της πλάκας μετά την πλήρωση της λεκάνης



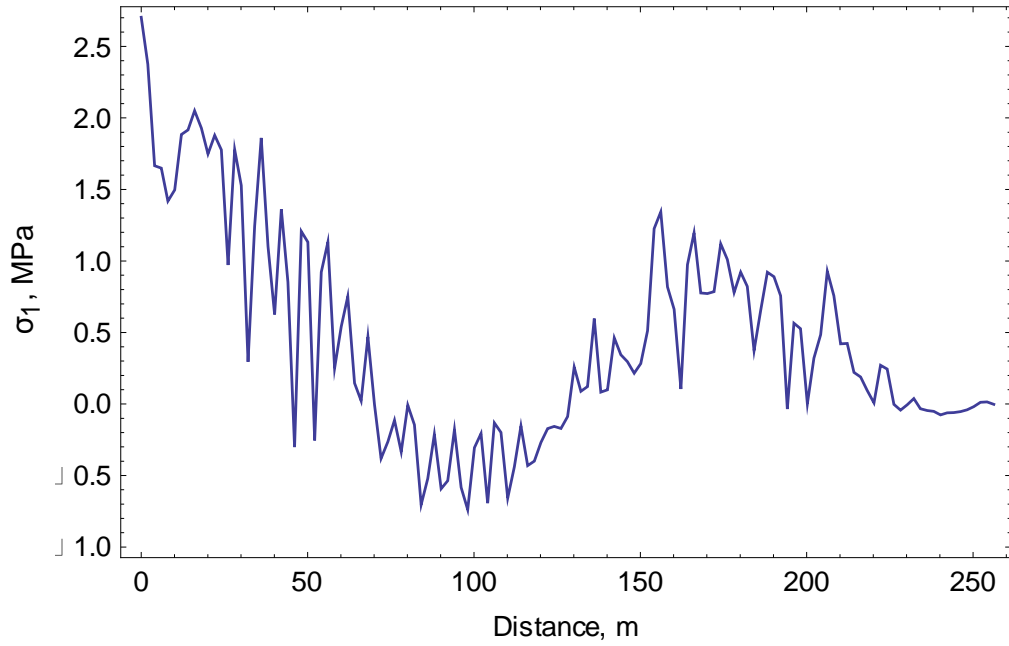
Διαγρ. 13: Βύθιση της πλάκας ως προς την απόσταση (από τον πόδα) μετά την πλήρωση της λεκάνης



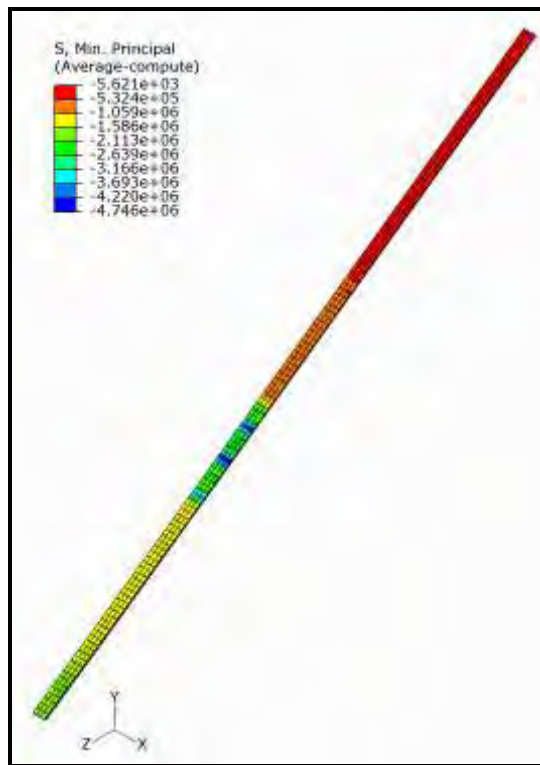
Σχ. 39: Κατά μήκος μετατόπιση της πλάκας μετά την πλήρωση της λεκάνης



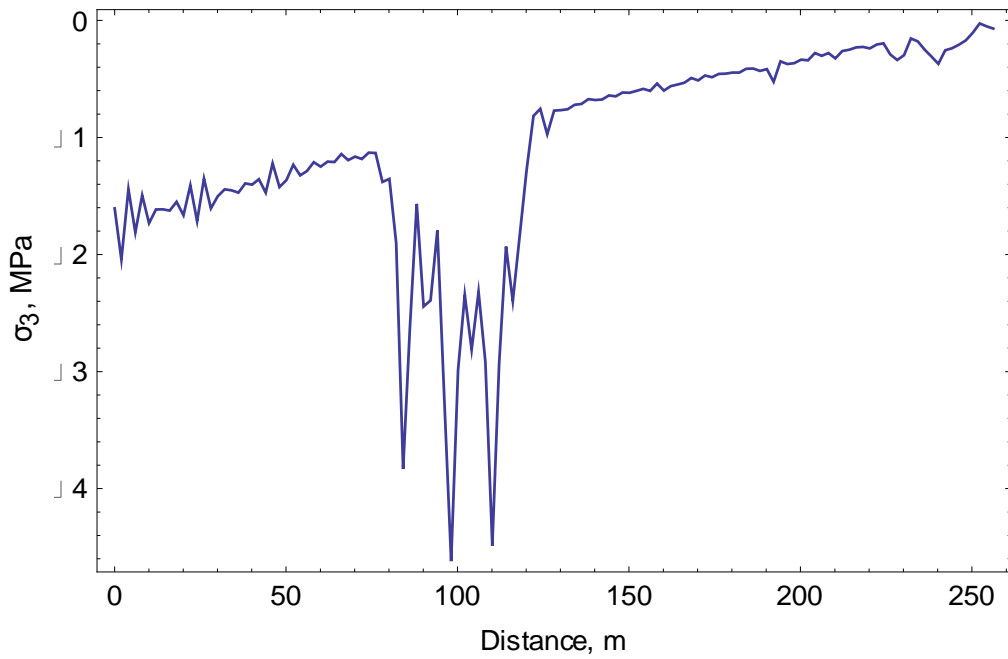
Σχ. 40: Μέγιστη κύρια τάση (μέγιστος εφελκυσμός) στην πλάκα μετά την πλήρωση της λεκάνης



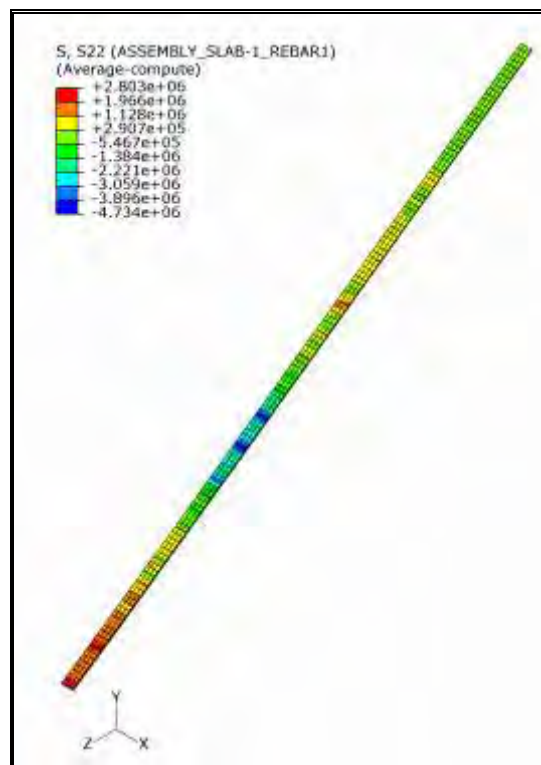
Διαγρ. 14: Μέγιστη κύρια τάση (μέγιστος εφελκυσμός) στην πλάκα μετά την πλήρωση της λεκάνης



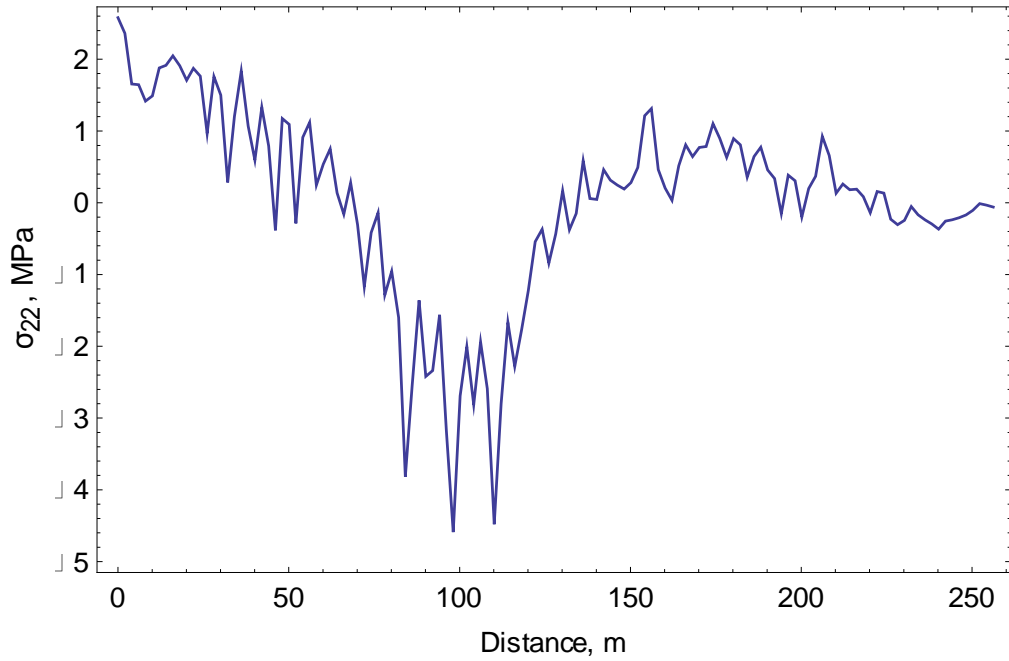
Σχ. 41: Ελάχιστη κύρια τάση (μέγιστη θλίψη) στην πλάκα μετά την πλήρωση της λεκάνης



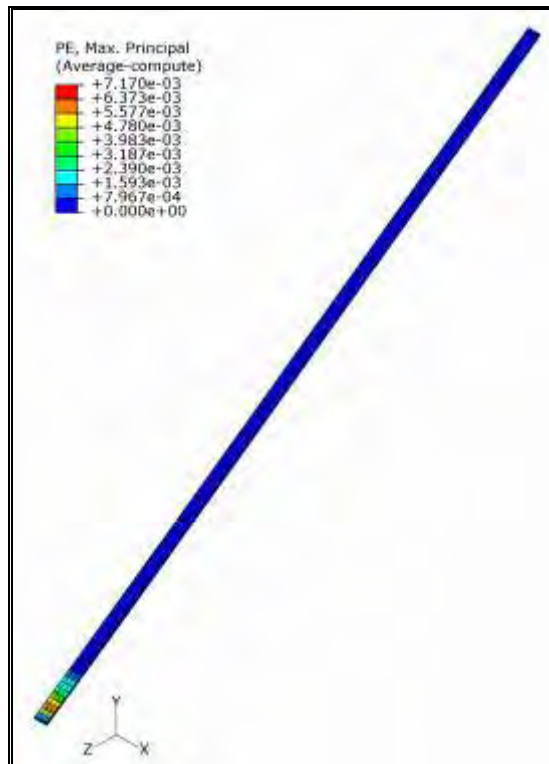
Διαγρ. 15: Ελάχιστη κύρια τάση (μέγιστη θλίψη) στην πλάκα μετά την πλήρωση της λεκάνης



Σχ. 42: Ορθή τάση S_{22} στην κατά μήκος κατεύθυνση της πλάκας μετά την πλήρωση της λεκάνης



Διαγρ. 16: Ορθή τάση S_{22} στην κατά μήκος κατεύθυνση της πλάκας μετά την πλήρωση της λεκάνης



Σχ. 43: Μέγιστη κύρια πλαστική παραμόρφωση (λόγω εφελκυσμού) στην πλάκα μετά την πλήρωση της λεκάνης

7.4 ΣΤΑΔΙΟ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ ΤΗΣ ΒΑΣΗΣ

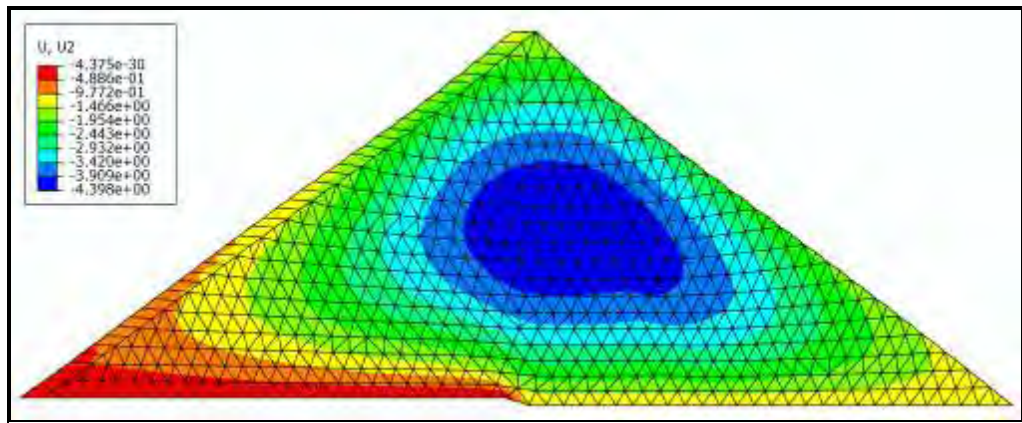
Η ενεργοποίηση διερχομένου τεκτονικού κανονικού ρήγματος και μετατόπιση του υποκείμενου εδάφους κατά 1m οριζόντια και 1 m κατακόρυφα (1.41 m κατά την υποτεινούσα διεύθυνση), μας υπαγορεύει τη μελέτη των επιπτώσεων στο σώμα και την πλάκα. Για την πλάκα εξετάζεται ξεχωριστά η συμπεριφορά για c25, c37 και c45.

Εξετάζονται οι μεταβολές των τάσεων, των μετατοπίσεων και των παραμορφώσεων για το σώμα και την πλάκα ξεχωριστά. Η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων αυτών θα οδηγήσει στο ζητούμενο της παρούσης εργασίας, δηλαδή το κατά πόσο θα αντέξει το εξεταζόμενο φράγμα σε αυτή τη σημαντική μετατόπιση στη βάση του.

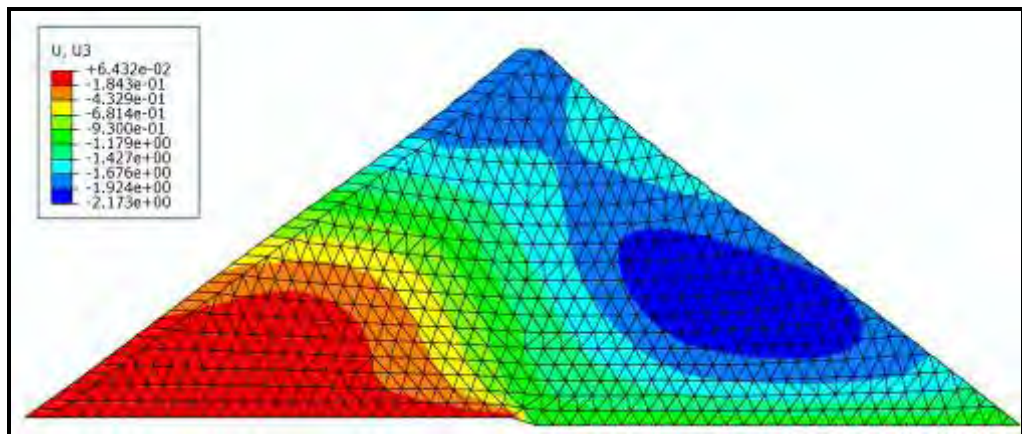
7.4.1 ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΣΤΟ ΣΩΜΑ

Θα ξεκινήσουμε με τις επιπτώσεις αρχικά στο σώμα, και εν συνεχεία στην πλάκα για τους διάφορους τύπους σκυροδέματος, τις μετατοπίσεις κατά X (U_1), κατά Y (U_2) και τις τάσεις S_{11} , S_{22} αντίστοιχα.

Στο Σχήμα 44 παρατηρείται μία σημαντική αύξηση της καθίζησης στο μισό της βάσης του επιχώματος προς την κατάντη πλευρά, από 3.47 m σε 4.40 m. Στο Σχήμα 45 δίδεται η κατανομή της οριζόντιας μετατόπισης του επιχώματος μετά την μετατόπιση του ρήγματος.

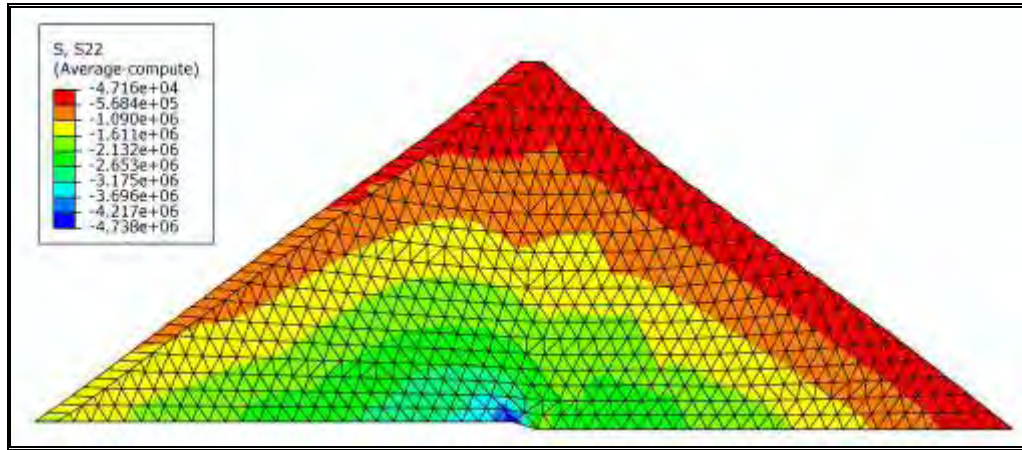


Σχ. 44: Βύθιση του σώματος κατά τη διεύθυνση X (τοπικό σύστημα συντεταγμένων)



Σχ. 45: Μετατόπιση του σώματος κατά τη διεύθυνση Y (τοπικό σύστημα συντεταγμένων)

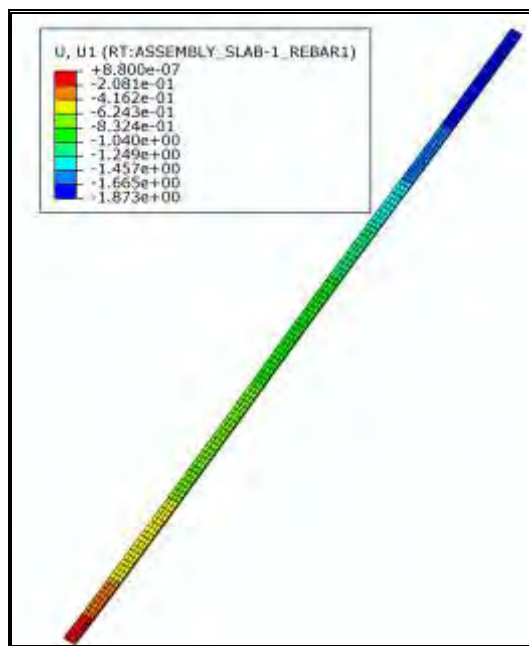
Το Σχήμα 46 δίνει την κατανομή της κατακόρυφης ορθής τάσης S_{22} . Παρατηρείται μία σημαντική τοπική αύξηση της θλιπτικής τάσης στην περιοχή της απότομης βύθισης, λόγω μεγαλύτερης ανάληψης φορτίου από το ανάντη τμήμα της βάσης στο σημείο αυτό.



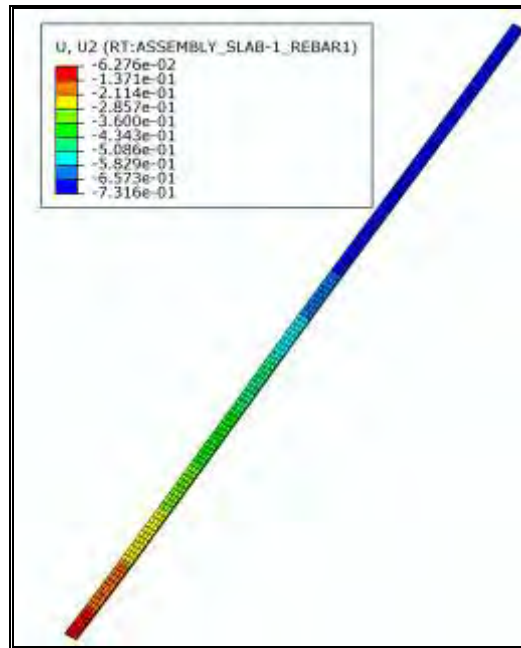
Σχ. 46: Μεταβολή κατακόρυφης ορθής τάσης S_{22}

7.4.2 ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΣΤΗΝ ΠΛΑΚΑ (SLAB) ΓΙΑ C25 – C37 – C45

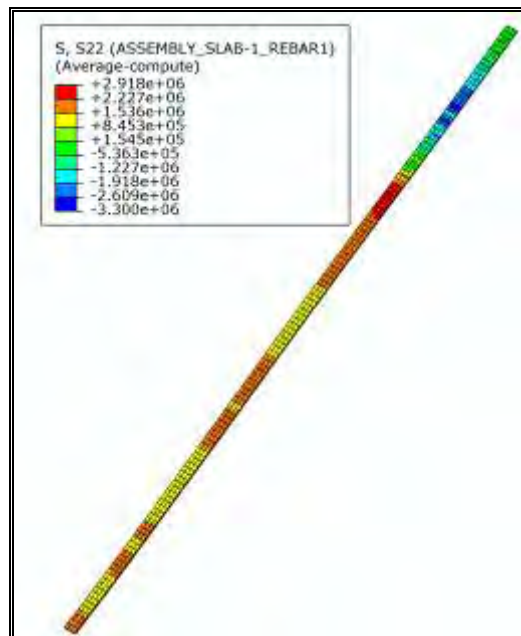
Αρχικά εξετάζεται η επίδραση της μετατόπισης του ρήγματος στη βάση του φράγματος για σκυρόδεμα πλάκας C25. Στα σχήματα 47 και 48, δίδονται η βύθιση και η κατά μήκος της πλάκας μετατόπιση μετά την μετατόπιση του ρήγματος. Επίσης στα Σχήματα 49 και 50 δίδεται η κατανομή της ορθής τάσης S_{22} και της μέγιστης κύριας πλαστικής παραμόρφωσης.



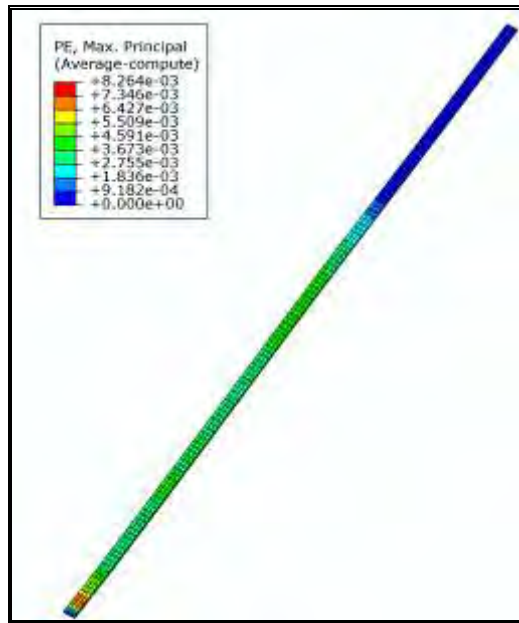
Σχ. 47: Βύθιση της πλάκας μετά την μετατόπιση της βάσης του σώματος για σκυρόδεμα c25



Σχ. 48: Μετατόπιση της πλάκας στην κατά μήκος κατεύθυνση μετά την μετατόπιση της βάσης του σώματος για σκυρόδεμα c25



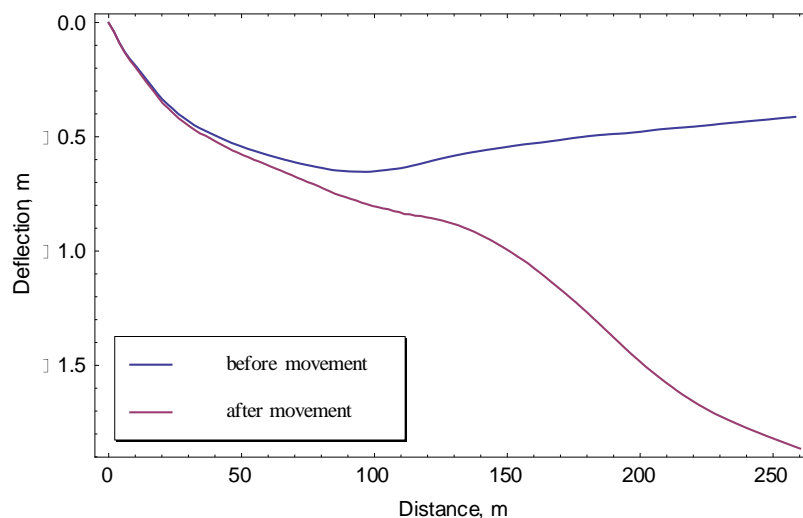
Σχ. 49: Ορθή τάση S_{22} μετά την μετατόπιση της βάσης του σώματος για σκυρόδεμα c25



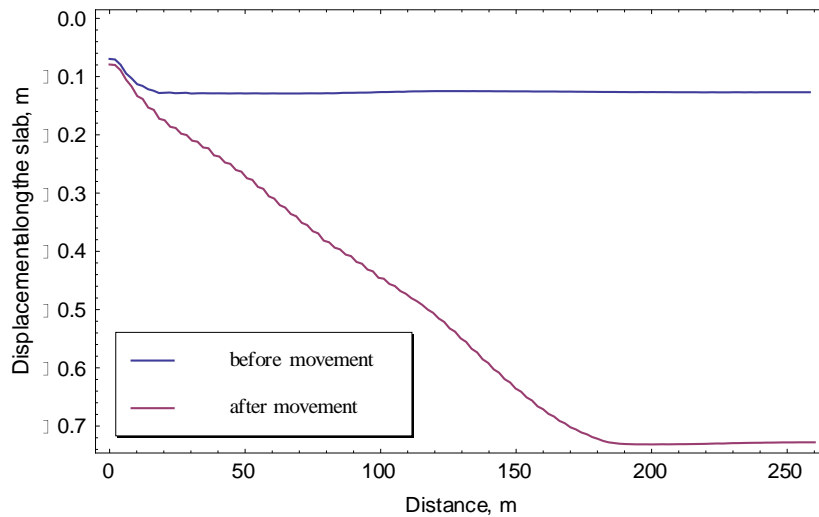
Σχ. 50: Μέγιστη κύρια πλαστική παραμόρφωση μετά την μετατόπιση της βάσης του σώματος για σκυρόδεμα c25

Η σημαντική επίδραση της μετατόπισης της βάσης του φράγματος στην κατανομή της βύθισης της πλάκας φαίνεται στο Σχήμα 51, όπου συγκρίνεται η βύθιση πριν και μετά την μετατόπιση. Παρατηρείται μία πολύ σημαντική αύξηση της βύθισης στο άνω μισό του φράγματος και ιδιαίτερα στην στέψη όπου η αύξηση είναι κατά 1.46 m. Επίσης, στο σχήμα 52, δίδεται η κατά μήκος της πλάκας μετατόπιση η οποία αυξάνει το μήκος της πλάκας κατά 0.60 m στα πρώτα περίπου 200 m του μήκους της πλάκας.

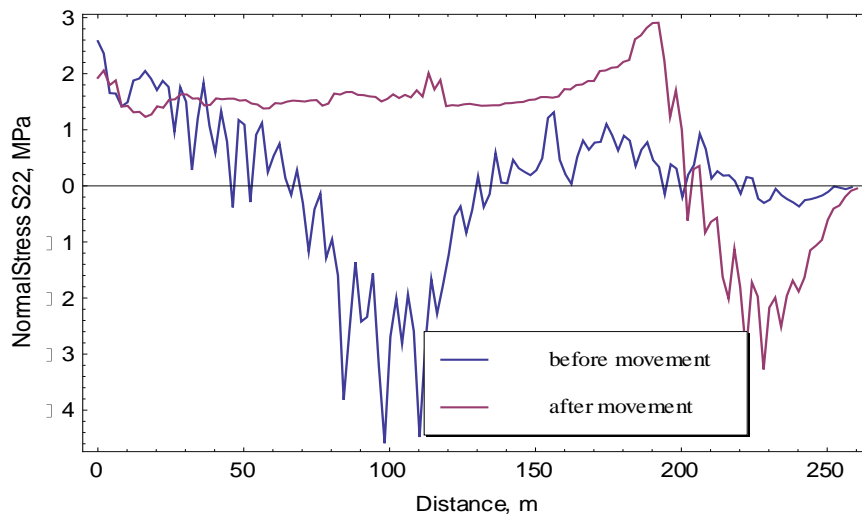
Στο Σχήμα 53 δίδεται η κατανομή της ορθής τάσης S_{22} κατά μήκος της πλάκας στην οποία είναι εμφανής η σημαντική αύξηση του εφελκυσμού στα πρώτα 200 m της πλάκας. Επίσης, στο Σχήμα 53 δίδεται η κατανομή της μέγιστης κύριας πλαστικής παραμόρφωσης λόγω εφελκυσμού η οποία αυξάνει δραματικά με την επιβολή της μετατόπισης στη βάση. Τα αποτελέσματα καταδεικνύουν ότι η πλάκα θα υποστεί σημαντική ρηγμάτωση.



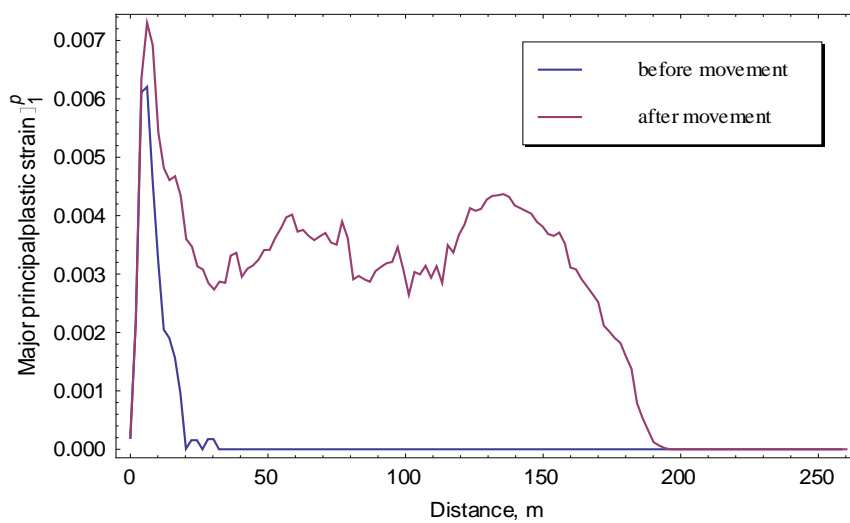
Σχ. 51: Βύθιση της πλάκας πριν και μετά την μετατόπιση της βάσης του σώματος για σκυρόδεμα c25



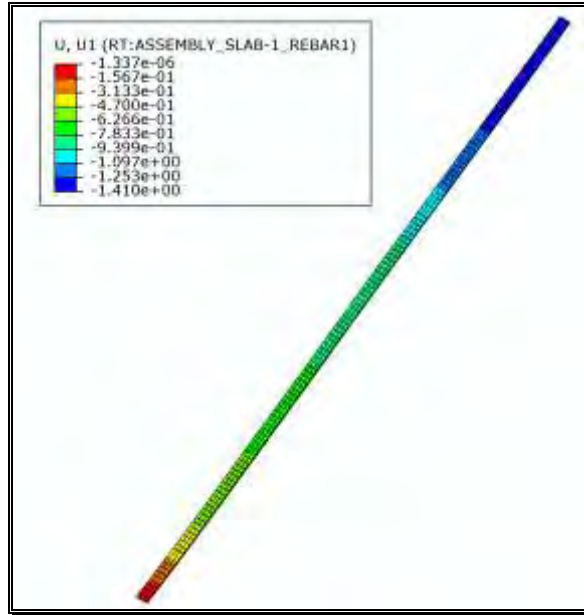
Σχ. 52: Κατά μήκος μετατόπιση της πλάκας πριν και μετά την μετατόπιση της βάσης του σώματος για σκυρόδεμα c25



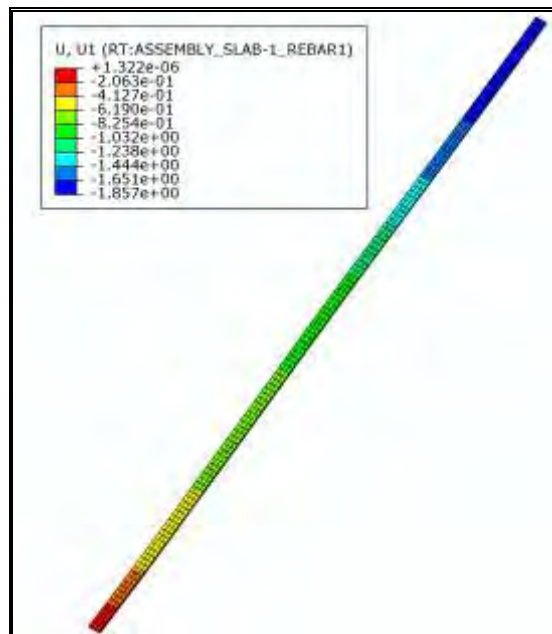
Σχ. 53: Ορθή τάση στην κατά μήκος κατεύθυνση της πλάκας πριν και μετά την μετατόπιση της βάσης του σώματος για σκυρόδεμα c25



Σχ. 54: Μέγιστη κύρια πλαστική παραμόρφωση της πλάκας πριν και μετά την μετατόπιση της βάσης του σώματος για σκυρόδεμα c25



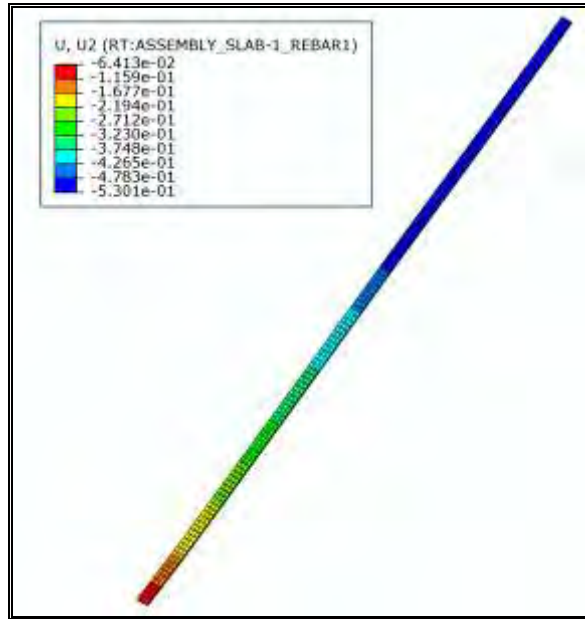
(α)



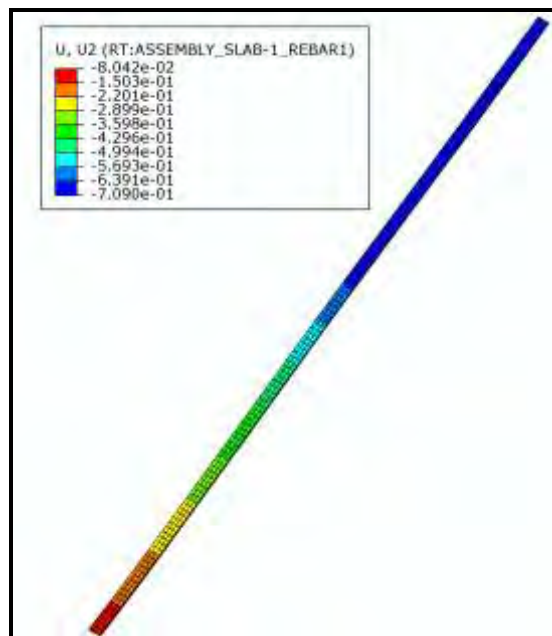
(β)

Σχ. 55: Βύθιση της πλάκας μετά την μετατόπιση της βάσης του σώματος για σκυρόδεμα (α) c37 και (β) c45

Η επίδραση της ποιότητας του σκυροδέματος δίδεται στα σχήματα 54 έως 62. Στο Σχήμα 55 δίδεται η κατανομή της βύθισης για c37 και c45, χωρίς να φαίνονται κάποιες ιδιαίτερες διαφορές. Παρομοίως, στα σχήματα 56, 57 και 58 δίδονται οι κατά μήκος μετατόπιση της πλάκας, η ορθή τάσης S_{22} και η μέγιστη κύρια πλαστική παραμόρφωση για c37 και c45.

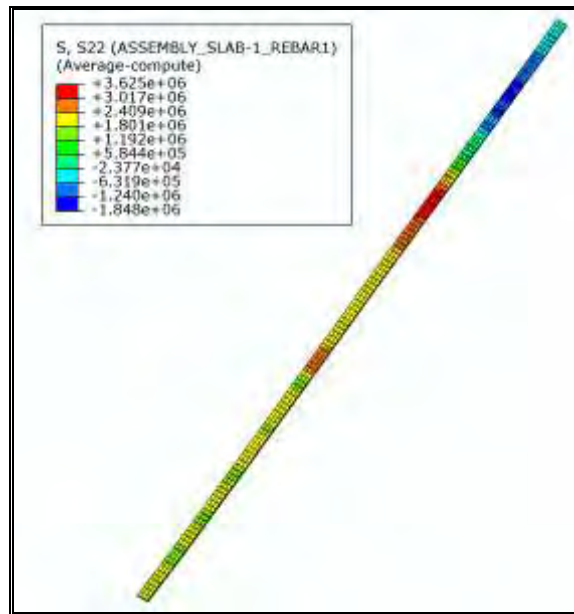


(α)

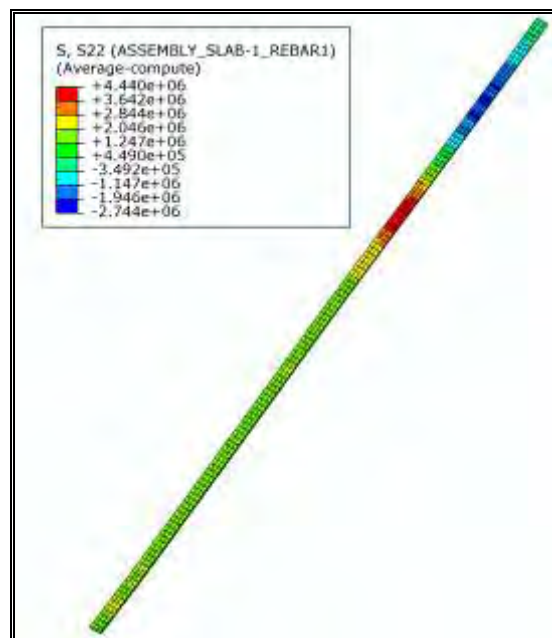


(β)

Σχ. 56: Κατά μήκος μετατόπιση της πλάκας μετά την μετατόπιση της βάσης του σώματος για σκυρόδεμα (α) c27 και (β) c45

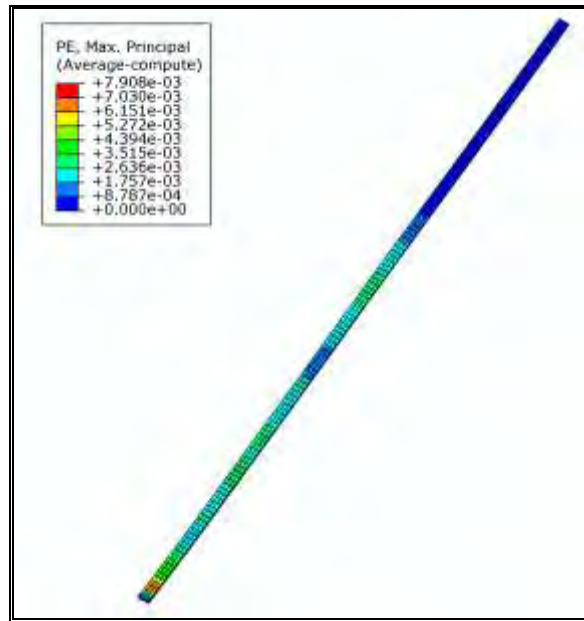


(α)

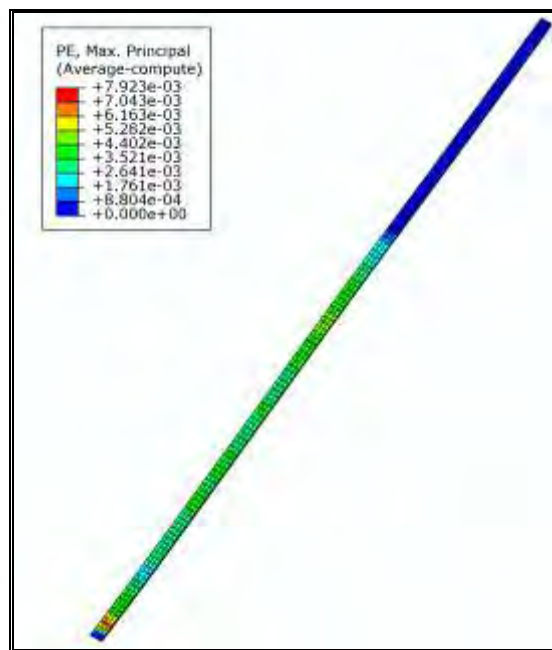


(β)

Σχ. 57: Ορθή τάση S_{22} της πλάκας μετά την μετατόπιση της βάσης του σώματος για σκυρόδεμα (α) c37 και (β) c47

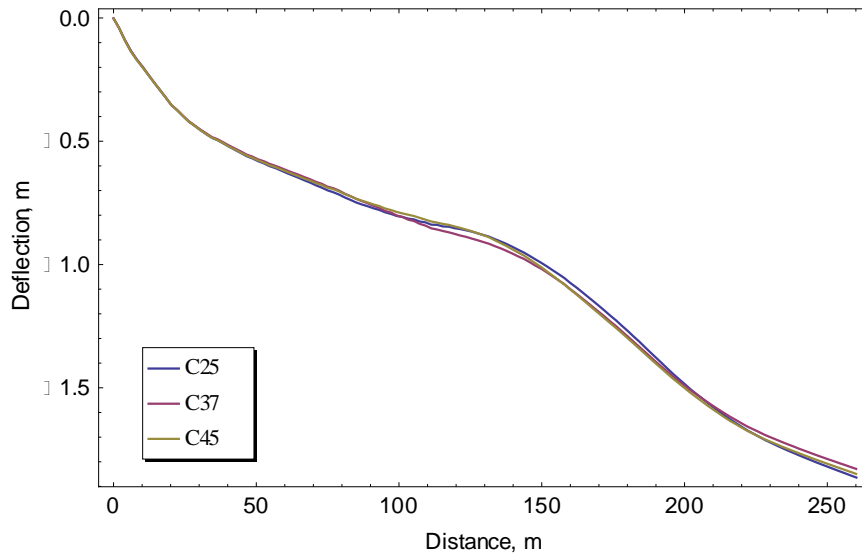


(α)

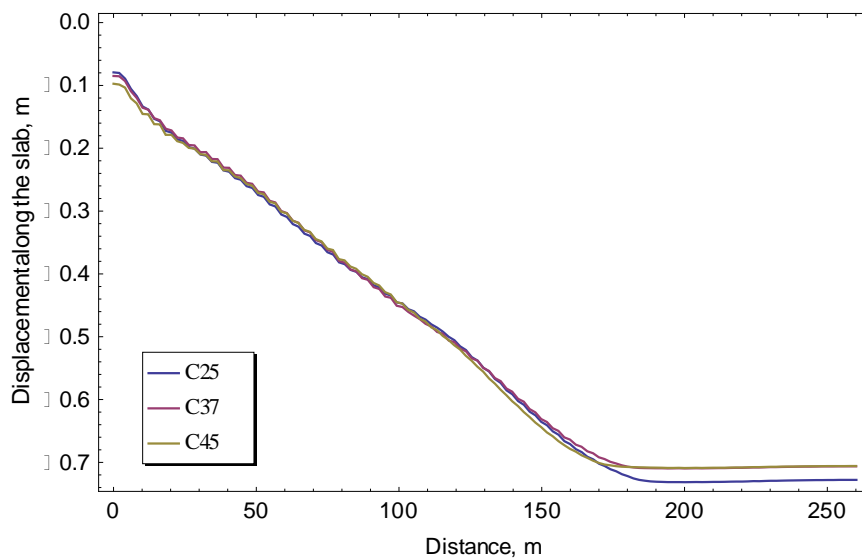


(β)

Σχ. 58: Μέγιστη κύρια πλαστική παραμόρφωση της πλάκας μετά την μετατόπιση της βάσης του σώματος για σκυρόδεμα (α) c37 και (β) c45

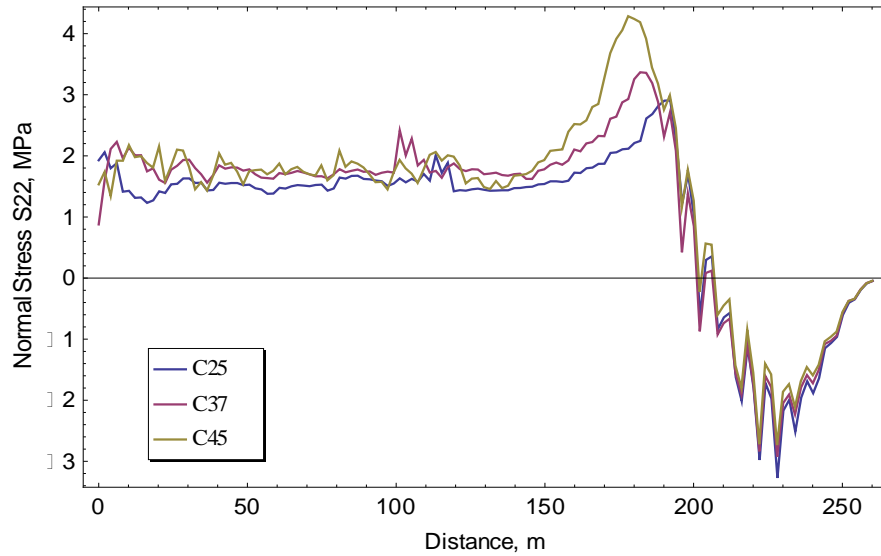


Σχ. 59: Βύθιση της πλάκας για σκυρόδεμα c25, c37 και c45

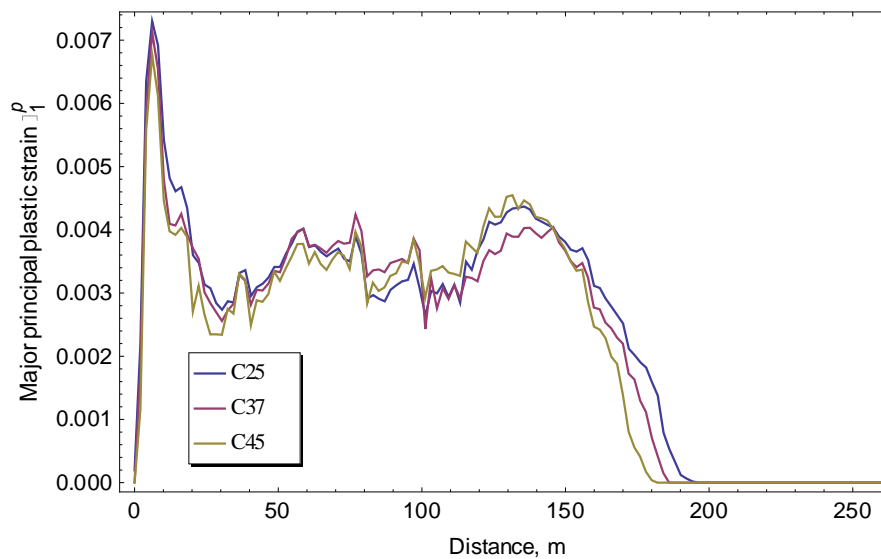


Σχ. 60: Μετατόπιση κατά μήκος της πλάκας για σκυρόδεμα c25, c37 και c45

Η επίδραση της ποιότητας του σκυροδέματος φαίνεται ακόμη πιο ξεκάθαρα στα σχήματα 59 έως 62, όπου παρουσιάζονται η βύθιση, η κατά μήκος μετατόπιση, η ορθή τάσης S_{22} και η μέγιστη κύρια πλαστική παραμόρφωση κατά μήκος της πλάκας για c25, c37 και c45. Όλα τα αποτελέσματα καταδεικνύουν ότι η επίδραση της αντοχής του σκυροδέματος είναι μικρή στην συμπεριφορά της πλάκας. Π.χ., στο Σχήμα 62, κύρια πλαστική παραμόρφωση κατά μήκος της πλάκας είναι πρακτικά παρόμοια για τις τρεις ποιότητες σκυροδέματος.



Σχ. 61: Ορθή τάση S_{22} κατά μήκος της πλάκας για σκυρόδεμα c25, c37 και c45



Σχ. 62: Μέγιστη κύρια πλαστική παραμόρφωση κατά μήκος της πλάκας για σκυρόδεμα c25, c37 και c45

Τέλος, με βάση τα ανωτέρω αποτελέσματα είναι σαφές ότι η επίδραση της μετατόπισης της βάσης είναι καταστροφική για την πλάκα η οποία θα υποστεί σημαντικές ρηγματώσεις. Συνεπώς είναι και καταστροφική για την στεγανότητα του φράγματος, ενώ από άποψη ευστάθειας δεν αναμένεται να υπάρξει σοβαρό πρόβλημα.

7.5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η παρούσα εργασία οδηγεί στα ακόλουθα συμπεράσματα:

1. Η μεθοδολογία για την μη-γραμμική 3D ανάλυση φράγματος λιθορριπής με ανάντη πλάκα σκυροδέματος διερχομένων από ενεργό τεκτονικό ρήγμα, λαμβάνει υπόψη με ρεαλιστικό τρόπο την αρχική εντατική κατάσταση και παραμόρφωση του φράγματος και της πλάκας, με πλήρη προσομοίωση της σταδιακής κατασκευής και πλήρωσης της λεκάνης. Εν συνεχεία, διερευνά την επίδραση της μετατόπισης κατά 1 m (κατά την οριζόντια και κατακόρυφη έννοια) της βάσης του φράγματος στην πλάκα σκυροδέματος.
2. Η δυσκαμψία της λιθορριπής έχει πολύ μεγάλη σημασία στην αρχική εντατική κατάσταση και παραμόρφωση της πλάκας σκυροδέματος. Μία σχετικά εύκαμπτη λιθορριπή οδηγεί σε σημαντικές εφελκυστικές τάσεις στην πλάκα σκυροδέματος που ξεπερνούν την αντοχή σε μία μεγάλη ζώνη.
3. Από τα αποτελέσματα των αναλύσεων που παρουσιάστηκαν για ποιότητα σκυροδέματος c25 προκύπτει ότι η μετατόπιση τμήματος της βάσης κατά 1 m (κατά την οριζόντια και κατακόρυφη κατεύθυνση) έχει καταστροφικά αποτελέσματα για την δομική ακεραιότητα και στεγανότητα της πλάκας.
4. Παρά την καταστροφή της στεγανότητας, η ευστάθεια του φράγματος δεν απειλείται λόγω της δομής του συγκεκριμένου τύπου του φράγματος (CFRD).
5. Η διερεύνηση της επίδρασης της ποιότητας του σκυροδέματος κατέδειξε ότι η αύξηση της αντοχής του σκυροδέματος δεν βελτιώνει την επιτελεστικότητα της κατασκευής. Συγκεκριμένα εξετάστηκαν τρεις ποιότητες σκυροδέματος (c25, c37 και c45) με παρόμοια αποτελέσματα σχετικά με την πλαστική παραμόρφωση και συνεπώς ρηγμάτωση της πλάκας.
6. Τέλος, ο σχεδιασμός ενός φράγματος με ανάντη πλάκα σκυροδέματος θα πρέπει να γίνεται προσεκτικά λαμβάνοντας υπόψη όλες τις παραμέτρους προκειμένου να εξασφαλιστεί η ασφαλής και αποδοτική λειτουργία του. Η μέθοδος ανάλυσης που χρησιμοποιήθηκε μας επέτρεψε για την καλύτερη κατανόηση των επιδράσεων διαφόρων παραμέτρων του προβλήματος και μελλοντική βελτίωση παρόμοιου σχεδιασμού. Η τεχνολογία των CFRDs εξελίσσεται συνεχώς και κάθε φράγμα που κατασκευάζεται παρέχει τεχνογνωσία που αξιοποιείται στα επόμενα φράγματα χωρίς να επαναλαμβάνονται τα κατασκευαστικά σφάλματα του παρελθόντος.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Fitzpatrick F.D., Bruce A.C., Kinstler F.L., Knoop B.P. (1985): Design of Concrete Faced Rockfill Dams, p.p. 410, 434 *CFRD Design, Construction and Performance Edited by J.B.Cooke & J.Sherard*
2. Ι. Θανόπουλος, Ν. Καζίλης, Σ. Φελέκος (1992): Το Επίχωμα του Λιθόρριπτου Φράγματος με Πλάκα Σκυροδέματος της Μεσοχώρας, 2^ο Πανελλήνιο Συνέδριο Γεωτεχνικής Μηχανικής
3. Palmi Johannesson (2007): Assessing the performance of high CFRDs: Rockfill properties and creep, *Hydropower & Dams, Issue 5, 2007*
4. J. Thanopoulos, J. Tikof, (1998): Erosion problems of CFRDs during construction: The case of Messochora Dam, *Proceedings of the International Symposium on Dam Safety, ICOLD, Barcelona, June 1998*
5. P. Marques Filho, N. L. De S. Pinto (2005): CFRD dam characteristics learned from experience, *Hydropower & Dams. Issue 1, 2005*
6. P. Dakoulas, Y. Thanopoulos, K. Anastasopoulos (2008): Non-linear 3D simulation of the construction and impounding of a CFRD, *Hydropower & Dams, Issue 2, 2008*
7. B.Materon (2006): Consulting Report on the Messochora Dam behaviour and necessary measures before reservoir filling, *PPC internal report, October 2006*
8. Carpi S. A. (2007) : Carpi patented Geomembrane system, waterproofing of the joints and upstream face, *Proposal to PPC, Report April 2007*
9. R. Albert, E. Frossard (2008): Considerations on materials for high embankment dams, *Hydropower & Dams, Issue 2, 2008*
10. MA Hongqi, CAO Keming (2008): Key technical problems of extra high CFRDs, *State of the Art, Dam Construction in China, Chinese Committee Of Large Dams, 2008.*
11. Αθανασόπουλος, Α. Αναστόπουλος, Θ. Δόλκας, Ε. Δρόσος, Ο. Καρασαχινίδης Α. Καπλανίδης, Γ. Μπαϊρακτάρης, Ζ. Μορφόπουλος, Ν. Παπαγιάννη, Γ. Πασχαλίνος, Π. Περγιαλιώτης, Β. Τσαρμπός, Θ. Χασιώτης, Β. Χαχάμη, (2006) «Τα φράγματα και οι λιμνοδεξαμενές Του Υπουργείου Αγροτικής Ανάπτυξης και τροφίμων», Φεβρουάριος.
12. Βούλγαρη Χρυσούλα (2011), «Φίλτρα φραγμάτων - Καταγραφή στοιχείων από ελληνικά φράγματα», Αθήνα, 2012
13. Δ. Αντωνίου: Φράγμα Κανναβιού: Το πρώτο Λιθόρριπτο Φράγμα με Ανάντη Πλάκα στη Κύπρο με κατασκευαστικές καινοτομίες. 1^ο Πανελλήνιο συνέδριο Μεγάλων Φραγμάτων (ΤΕΕ, ΤΕΕ – Τμ. Κεντρ. & Δυτικής Θεσσαλίας, 13-15 Νοεμβρίου, 2008: Λάρισα)
14. LAU Chau Chin. A dissertation for the Study on Concrete Faced Rockfill Dams. (October, 2004 - University of Southern Queensland, Faculty of Engineering and Surveying)

15. The 1st International Symposium on Rockfill Dams. *Zurich, Switzerland* - Ruedi Straubaar¹, Eva van Gunsteren² and Stephen Moll³ - Design Considerations of a high rockfill dam nam ngum CFRD, LAO PDR
16. Α. Αντωνίου, Γεωλογία και φράγματα, Σημειώσεις Μαθήματος, ΠΘ.
17. ABAQUS (2008): *Users' Manual, Version 6.7*, Simulia, Providence, RI, USA.
18. 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.
19. Dakoulas, P. (1993), "Earth Dam - Canyon Interaction Effects For Obliquely Incident SH Waves", *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 119, No. 11, 1696-1716.
20. 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.
21. 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.
22. 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.
23. 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.
24. 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.
25. Abouseeda, H. and Dakoulas, P. (1998), Nonlinear Earth Dam - Foundation Interaction Using a BE-FE Method, *J. of Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 27(12), 917-936.
26. 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
27. Gazetas, G. and Dakoulas, P. (1992), "Seismic Analysis and Design of Rockfill Dams: State of the Art", *Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 11, No. 1, pp. 27-61. Itasca (2005), *FLAC*, Itasca Consulting Group, User's Manuals, Minneapolis.
28. Marques Filho, F. and Pinto N. de S., (2005). CFRD dam characteristics learned from experience, *Hydropower & Dams*, Issue 1, 72-78.
29. 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
30. Sherard, J.L. & Cooke, J.B. (1987), Concrete face rockfill dams: Assessment. *J. Geotechnical Engineering*, ASCE, 113(10), 1096-1112.
31. Wieland, M. (2007), Seismic Performance of CFRDs, *Water Power and Dam Construction*, March.

32. 13 1ο Πανελλήνιο συνέδριο Μεγάλων Φραγμάτων, ΤΕΕ, ΤΕΕ-Τμ.ΚΔΘ, 13-15 Νοεμβρίου, 2008: Λάρισα 13
33. Λιακοπούλου Μαρία (2012), Διπλωματική εργασία, Τμήμα Πολ. Μηχανικών, ΠΘ.
34. Ντακούλας, Π., (2010), «Επίδραση της δυσκαμψίας της λιθορριπής στην συμπεριφορά φραγμάτων με ανάντη πλάκα σκυροδέματος», 6^ο Πανελλήνιο Συνέδριο Γεωτεχνικής και Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής, ΤΕΕ, Βόλος, Οκτ. 2010.
35. 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.
36. Dakoulas, P. (2011), “*Longitudinal vibrations of tall concrete faced rockfill dams in narrow canyons*”, Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 41, 44-58.