

Μεταπτυχιακός φοιτητής: Νικόλαος Μαραγκός

Επιβλέπων: Θεόδωρος Χατζηγώγος

Τίτλος: Αντισεισμική μελέτη χωμάτινων φραγμάτων

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία αφορά την αντισεισμική μελέτη χωμάτινων φραγμάτων και αποτελείται από επτά Κεφάλαια.

Στο πρώτο Κεφάλαιο περιγράφονται οι κύριες μορφές αστοχίας των χωμάτινων φραγμάτων που μπορεί να προκληθούν από ένα σεισμό. Περιγράφονται και σχολιάζονται κριτικά πραγματικές περιπτώσεις αστοχιών χωμάτινων φραγμάτων που συνέβησαν από σεισμούς στο παρελθόν καθώς και φράγματα που υπέστησαν σοβαρές ζημιές. Η παράθεση σχετικών φωτογραφιών στο Κεφάλαιο αυτό αποσκοπεί να διευκολύνει την κατανόηση των Κεφαλαίων που ακολουθούν και τα οποία περιγράφουν το σύνθετο και δυσνόητο πολλές φορές αντικείμενο της σεισμικής απόκρισης των φραγμάτων.

Μία από τις πλέον επικίνδυνες αιτίες αστοχίας ενός φράγματος είναι η ρευστοποίηση τμήματος του. Το δεύτερο Κεφάλαιο πραγματεύεται το φαινόμενο αυτό. Η ρευστοποίηση παρατηρείται, όπως είναι γνωστό σε κορεσμένα πρακτικά μη συνεκτικά, λεπτόκοκκα αμμώδη υλικά. Το νερό που υπάρχει στα κενά δεν προλαβαίνει να διαφύγει κατά τη σεισμική διέγερση με αποτέλεσμα να αναπτύσσονται πιέσεις του νερού των πόρων, συνεχής μείωση της διατμητικής αντοχής μέχρις ότου στην οριακή κατάσταση το υλικό αρχίσει να συμπεριφέρεται σαν ρευστό. Αν το τμήμα του σώματος του φράγματος στο οποίο συμβεί ρευστοποίηση είναι ικανό να δημιουργήσει κινηματική επιφάνεια ολίσθησης τότε θα συμβεί απότομα ολίσθηση του πρηνούς του φράγματος.

Το Κεφάλαιο της ρευστοποίησης αναπτύσσεται σε έξη υποκεφάλαια. Σε αυτά περιγράφονται ο εργαστηριακός προσδιορισμός με ανακυκλιζόμενη φόρτιση του κινδύνου ρευστοποίησης, ο τρόπος με τον οποίο μία τυχαία χρονοϊστορία σεισμικής διέγερσης ανάγεται σε ομοιόμορφη κυκλική φόρτιση και δίνονται οι ορισμοί του κριτηρίου έναρξης της ρευστοποίησης, της κυκλικής αντοχής, της ισοδύναμης κυκλικής αντοχής, του συντελεστή ασφάλειας καθώς και άλλων μεγεθών απαραίτητων για τον προσδιορισμό της σεισμικής απόκρισης ενός χωμάτινου φράγματος. Στο Κεφάλαιο αναπτύσσεται η μέθοδος που εφαρμόζεται για την αριθμητική προσομοίωση της ρευστοποίησης και παρουσιάζονται τα παραδείγματα εφαρμογής της μεθόδου στα φράγματα Turnu-Magurele-Nicopole, Woodward και Upper και Lower San Fernando.

Στην περίπτωση μεγάλων φραγμάτων με ταμειυτήρες μεγάλης χωρητικότητας και ύψους η σεισμική φόρτιση προκαλεί κίνηση του νερού του ταμειυτήρα με αποτέλεσμα την ανάπτυξη υδροδυναμικών ωθήσεων που δρουν κάθετα στην επιφάνεια του φράγματος και προστίθενται στις υδροστατικές. Τις υδροδυναμικές ωθήσεις πάνω στο σώμα του φράγματος καθώς και σε άλλες κατασκευές (όπως για

παράδειγμα πάνω στον πύργο υδροληψίας, στον εκχειλιστή κ.λπ.) πραγματεύεται το τρίτο Κεφάλαιο. Το Κεφάλαιο περιλαμβάνει τέσσερα επιμέρους υποκεφάλαια στα οποία παρουσιάζονται η κυματική εξίσωση του συστήματος Φράγμα-Υδαταποθήκη και περιγράφονται η χρήση της δυναμικής συνάρτησης της ταχύτητας, η εκτίμηση των υδροδυναμικών πιέσεων κατά Westergaard και η λύση της κυματικής εξίσωσης με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.

Το τέταρτο Κεφάλαιο αναφέρεται στη σεισμική απόκριση των φραγμάτων. Καλή εικόνα της σεισμικής απόκρισης ενός φράγματος δίνει η κατανομή της επιτάχυνσης καθ' ύψος. Η κατανομή αυτή αντανακλάται από την κατανομή του σεισμικού συντελεστή, ο προσδιορισμός του οποίου μπορεί να γίνει με διάφορες παραδοχές. Οι παραδοχές αυτές, ανάλογα με τον επιδιωκόμενο βαθμό προσέγγισης της σεισμικής απόκρισης, εισάγουν το πρόβλημα από απλό έως πολύ σύνθετο και είναι οι εξής: α) η χρήση εμπειρικής τιμής, β) η θεώρηση του φράγματος σαν άκαμπτου σώματος, γ) το φράγμα εξιδανικεύεται σαν ελαστικό ομοιογενές σώμα θεωρώντας μόνο την επιρροή των διατμητικών δυνάμεων, δ) το φράγμα προσομοιώνεται σαν ελαστικό ανομοιογενές σώμα και ε) το φράγμα θεωρείται σαν ανελαστικό ανομοιογενές σώμα.

Κατά την πρώτη χοντρική προσέγγιση χρησιμοποιούνται οι τιμές των σεισμικών συντελεστών που προτείνουν οι Αμερικανικοί και οι Γιαπωνέζικοι Κανονισμοί. Στο απλοποιημένο μοντέλο του άκαμπτου σώματος, η επιτάχυνση (και κατ' επέκταση ο σεισμικός συντελεστής) μεταβάλλεται μόνο με το χρόνο όπως ακριβώς και η επιτάχυνση θεμελίωσης και όχι και καθ' ύψος όπως συμβαίνει στην πραγματικότητα. Οι δύο αυτές προσεγγίσεις είναι επόμενο να απέχουν από την πραγματική απόκριση του φράγματος.

Η προσομοίωση του φράγματος σαν ελαστικού ομοιογενούς σώματος επιτυγχάνεται με το μοντέλο της διατμητικής δοκού. Το μοντέλο το οποίο βασίζεται στη μελέτη της δυναμικής ισορροπίας μιας οριζόντιας λωρίδας του φράγματος η οποία υπόκειται σε αδρανειακές και διατμητικές δυνάμεις, επιτρέπει την αναλυτική μεταχείριση των δυναμικών ιδιοτήτων του φράγματος και προσφέρει μία ρεαλιστική εικόνα της κατακόρυφης κατανομής της επιτάχυνσης που προκαλείται από δυναμική διέγερση ημιτονοειδούς τύπου. Η ανάλυση της κατανομής δείχνει ενίσχυση της επιτάχυνσης κατά δύομισι φορές περίπου στη στέψη σε σχέση με τη βάση του φράγματος, κατανομή η οποία, σύμφωνα με επιτόπου καταγραφές δεν απέχει πολύ από την πραγματικότητα.

Βελτιωμένο μοντέλο ανάλυσης αποτελεί η προσομοίωση του σώματος του φράγματος σαν ελαστικό ανομοιογενές. Γίνεται διακριτοποίηση του σώματος του φράγματος, υπολογίζονται τα μητρώα δυσκαμψίας και απόσβεσης και με τη βοήθεια της βασικής εξίσωσης της Δυναμικής και επιταχυνσιογραφημάτων διέγερσης υπολογίζεται η απόκριση του φράγματος.

Η πλέον ρεαλιστική προσέγγιση επιτυγχάνεται με τη θεώρηση του σώματος του φράγματος ως ανελαστικού ανομοιογενούς σώματος. Η ανάλυση γίνεται με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Η ανελαστική συμπεριφορά προσδιορίζεται με την εισαγωγή μητρώου δυσκαμψίας μεταβλητού με το μέγεθος της τάσης. Η σχέση τάσεων-παραμορφώσεων εξαρτάται από την πυκνότητα, την υγρασία, τις συνθήκες αποστράγγισης και από την αρχική εντατική κατάσταση. Η προσέγγιση της

απόκρισης του φράγματος με τη μέθοδο αυτή επιτυγχάνεται με μία βήμα προς βήμα πορεία.

Το πέμπτο Κεφάλαιο αναφέρεται στην ευστάθεια του φράγματος. Η ανάλυση της ευστάθειας του φράγματος και της ευστάθειας των πρηνών παρέχει καλή εικόνα της σεισμικής συμπεριφοράς των χωμάτινων φραγμάτων. Τα πρηνή γίνονται ασταθή και ολισθαίνουν κατά μήκος μιας επιφάνειας ολίσθησης όταν οι διατμητικές τάσεις που αναπτύσσονται στην επιφάνεια αυτή ξεπεράσουν τη διαθέσιμη διατμητική αντοχή του εδάφους. Για ευσταθή πρηνή στα οποία το καθεστώς των διατμητικών τάσεων είναι υψηλό, αρκούν ακόμη και μικρές πρόσθετες δυναμικές τάσεις για να καταστούν τα πρηνή ασταθή κατά τη διάρκεια ενός σεισμού. Η σεισμική ευστάθεια ενός πρηνούς επηρεάζεται συνεπώς καθοριστικά από τη στατική ευστάθεια του.

Στο Κεφάλαιο παρουσιάζονται διάφορες μέθοδοι προσδιορισμού της στατικής και της σεισμικής ευστάθειας. Ειδικά όσον αφορά τη σεισμική ευστάθεια των πρηνών περιγράφονται: η ψευδοστατική μέθοδος, η μέθοδος Newmark, η ανάλυση των Makdisi and Seed επομένως και η μέθοδος τάσεων-παραμορφώσεων.

Σχολιάζοντας μία προς μία τις μεθόδους που ασχολούνται με τη σεισμική ευστάθεια των χωμάτινων φραγμάτων, συνοψίζουμε τα εξής:

Με τη ψευδοστατική μέθοδο το δυναμικό πρόβλημα αντιμετωπίζεται σαν στατικό: Η σεισμική διέγερση λαμβάνεται υπόψη με την εφαρμογή μιας οριζόντιας ή και μιας κατακόρυφης αδρανειακής δύναμης που ενεργούν στο κέντρο βάρους της ολισθαίνουσας μάζας. Κατά την ανάλυση σημειώνονται όλες οι δυνάμεις που ενεργούν στη μάζα και προσδιορίζεται στη συνέχεια ο συντελεστής ασφάλειας έναντι ολίσθησης. Η αδυναμία της ψευδοστατικής μεθόδου είναι ότι δεν πληροφορεί για την παραμορφωσιακή συμπεριφορά των πρηνών.

Μέθοδος με την οποία επιτυγχάνεται ο προσδιορισμός της μετακίνησης των πρηνών αναπτύχθηκε από το Newmark. Η μέθοδος λαμβάνει υπόψη την ιστορία της σεισμικής επιτάχυνσης (καθορίζει την αδρανειακή δύναμη), την κρίσιμη επιτάχυνση και τη μέγιστη εδαφική επιτάχυνση.

Τη σεισμική παραμορφωσιακή συμπεριφορά αναλύει και η μέθοδος των Makdisi and Seed. Πρόκειται για μία απλοποιημένη μέθοδο η οποία, κατά κύριο λόγο στηρίζεται σε αποτελέσματα δυναμικής ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία και σε αποτελέσματα ανάλυσης της διατμητικής δοκού.

Με τη μέθοδο τάσεων-παραμορφώσεων προσδιορίζουμε τέλος την περιοχή στην οποία οι (ανηγμένες) δυναμικές ολισθητικές παραμορφώσεις ξεπερνούν το 20%. Επιτυγχάνεται με τον τρόπο αυτόν ο προσδιορισμός του βαθμού ευστάθειας των πρηνών.

Στο έκτο Κεφάλαιο περιγράφονται τα μέτρα αντισεισμικής προστασίας που έχουν εφαρμοστεί σε διάφορα φράγματα. Περιλαμβάνονται επίσης προτάσεις τις οποίες πρέπει να έχει υπόψη ο σχεδιαστής ενός φράγματος.

Στο έβδομο Κεφάλαιο παρουσιάζουμε εφαρμογή σεισμικής ανάλυσης που κάναμε στο φράγμα του Ηλιόλουστου, ύψους 35m. Ο έλεγχος της σεισμικής ευστάθειας των

πρανών γίνεται με πρόγραμμα σε ηλεκτρονικό υπολογιστή που βασίζεται στη μέθοδο Bishop για τις εξής τρεις περιπτώσεις: 1) αμέσως μετά την κατασκευή, 2) κατά την πλήρη λειτουργία του ταμιευτήρα και 3) για ακαριαία ταπείνωση στάθμης. Οι τρεις αυτές περιπτώσεις εξετάστηκαν για διάφορους σεισμικούς συντελεστές. Ακολούθησε έλεγχος ρευστοποίησης μέσω της σύγκρισης των κοκκομετρικών καμπυλών με την επικίνδυνη περιοχή ρευστοποίησης. Εφαρμόστηκε τέλος η ανάλυση ευστάθειας των Makdisi and Seed και προσδιορίστηκαν οι μόνιμες μετακινήσεις του πρανούς του φράγματος. Σε Παράρτημα παρατίθενται Πίνακες με τα ονόματα των αρχείων που χρησιμοποιήθηκαν κατά τις αναλύσεις και γίνεται περιγραφή κάθε αρχείου.

Τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την κριτική θεώρηση των σεισμικών μεθόδων ανάλυσης που περιλαμβάνονται στην εργασία καθώς και από την παρατήρηση της σεισμικής συμπεριφοράς πραγματικών κατασκευών συνοψίζονται ως εξής:

* Όταν εφαρμοστούν τα κατάλληλα μέτρα προστασίας έναντι σεισμού και γίνουν σωστά οι σχετικές αναλύσεις, τα χωμάτινα φράγματα δε διατρέχουν κίνδυνο να αστοχήσουν. Γενικά η σεισμική συμπεριφορά τους κρίνεται καλή.

* Ιδιαίτερη έμφαση κατά το σχεδιασμό πρέπει να δοθεί στην επιλογή των υλικών πλήρωσης του ανάντη, κορεσμένου πρανούς ώστε να αποφευχθούν φαινόμενα ρευστοποίησης.

* Έλεγχος ρευστοποίησης πρέπει να γίνεται και στο έδαφος θεμελίωσης.