

Βελτίωση του αντισεισμικού σχεδιασμού μεγάλων φραγμάτων λιθορριπής με ανάντη πλάκα σκυροδέματος

Ε. Σταυροθεοδώρου

Πολιτικός Μηχανικός, Υ.Δ., Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Π. Ντακούλας

Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, dakoulas@uth.gr

Λέξεις κλειδιά: Φράγμα λιθορριπής με ανάντη πλάκα σκυροδέματος, ινοπλισμένο σκυρόδεμα, καθίζηση, μη γραμμική ανάλυση, αντισεισμικός σχεδιασμός

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Με στόχο τη βελτίωση του αντισεισμικού σχεδιασμού φραγμάτων λιθορριπής με ανάντη πλάκα σκυροδέματος διερευνάται η συμπεριφορά τριών φραγμάτων ύψους 100, 200 και 300m μετά την πλήρωση της λεκάνης και υπό συνθήκες δυναμικής συνίζησης. Τα τρία φράγματα είναι κατασκευασμένα σε κοιλάδα τραπεζοειδούς σχήματος με λόγο μήκους προς ύψος $L/H=2$. Η διερεύνηση γίνεται με χρήση μη-γραμμικής 3-Δ ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων, στην οποία προσομοιώνεται η σταδιακή κατασκευή και η ανύψωση του ύδατος της λεκάνης. Με στόχο τη σημαντική αύξηση της πλαστιμότητας της ανάντη πλάκας, χρησιμοποιείται ινοπλισμένο σκυρόδεμα σε συνδυασμό με κανονικό οπλισμό. Διερευνάται η επίδραση της δυσκαμψίας και του ύψους του φράγματος στις καθιζήσεις της λιθορριπής, καθώς και στις μέγιστες θλιπτικές και εφελκυστικές τάσεις και στις πλαστικές παραμορφώσεις της ανάντη πλάκας.

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο αριθμός των φραγμάτων λιθορριπής με ανάντη πλάκα σκυροδέματος (CFRD) συνεχίζει να αυξάνει σταθερά παγκοσμίως λόγω των σημαντικών πλεονεκτημάτων τους, όπως η προσαρμοστικότητα σε τοπογραφικές και γεωλογικές συνθήκες και σε βροχερό ή πολύ δύσκολο κλίμα, ο μικρότερος όγκος υλικών κατασκευής, η μικρότερη απαίτηση για υλικά από μακρινές αποστάσεις, η ταχύτερη διαδικασία κατασκευής, η ασφαλέστερη λειτουργία και η ευκολότερη συντήρηση.

Η εμπειρία από την συμπεριφορά υψηλών CFRD δείχνει ότι κατά την διάρκεια της πλήρωσης της λεκάνης αποταμίευσης είναι δυνατόν να αναπτυχθούν ρηγματώσεις στη πλάκα σκυροδέματος λόγω εφελκυστικών τάσεων σε μία ζώνη παράλληλη της περιμετρικής πλίνθου {3}. Επίσης, η χρήση λιθορριπής κακής ποιότητας ή ανεπαρκούς συμπύκνωσης, είναι δυνατόν να δημιουργήσει σημαντικές καθιζήσεις οι οποίες να προκαλέσουν σημαντικές θλιπτικές τάσεις και θραύση του σκυροδέματος στους κατακόρυφους αρμούς της κεντρικής περιοχής της ανάντη πλάκας {1,3}. Οι διαρροές είναι δυνατόν να αυξήσουν τις καθιζήσεις με ξέπλυμα των λεπτόκοκκων υλικών και να οδηγήσουν σε μεγαλύτερες τιμές θλιπτικών τάσεων και τοπικών θραύσεων. Τέλος, σε φράγματα που έχουν κατασκευασθεί σε σειсмоγενείς περιοχές, πρόσθετες σεισμικές θλιπτικές τάσεις καθώς και θλιπτικές τάσεις που ενδέχεται να προκύψουν από πιθανές δυναμικές καθιζήσεις είναι δυνατόν να αυξήσουν περαιτέρω την θραύση κατά μήκος των κατακόρυφων αρμών της ανάντη πλάκας {4,6,7}.

Για την κάλυψη των συνεχώς αυξανόμενων αναγκών για νερό και παραγωγή καθαρής ηλεκτρικής ενέργειας, πολύ υψηλά φράγματα τύπου CFRD (με ύψος ≥ 150 m) σχεδιάζονται και κτίζονται σε διάφορα μέρη του κόσμου κατά την τελευταία δεκαετία. Ένα τέτοιο παράδειγμα είναι το φράγμα

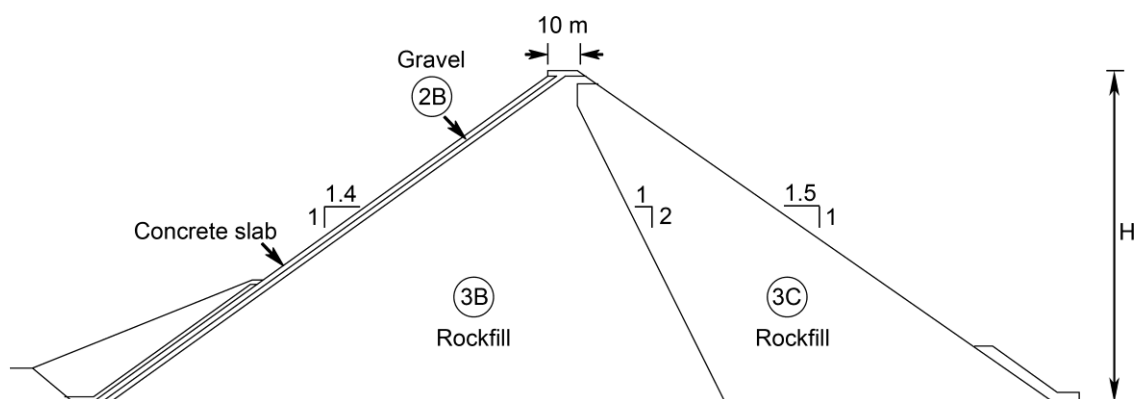
Shuibuya (Κίνα) ύψους 233 m, το οποίο λειτουργεί από το 2007. Επίσης, μεταξύ πολλών άλλων, είναι το υπό κατασκευή φράγμα Nuozadu ύψους 261.5m (Κίνα). Τέλος, ένας αριθμός πολύ μεγάλων φραγμάτων, τα οποία φθάνουν σε ύψος μέχρι και τα 300 m είναι στο στάδιο του σχεδιασμού. Καθώς η εμπειρία από την συμπεριφορά φραγμάτων με ύψος >200 m είναι πολύ μικρή, έχει αρκετό ενδιαφέρον η αριθμητική διερεύνηση της επίδρασης του ύψους και της συμπύκνωσης στη συμπεριφορά της ανάντη πλάκας σκυροδέματος και η σύγκριση με την πραγματική συμπεριφορά υπαρχόντων μεγάλων φραγμάτων μικρότερου ύψους.

Με στόχο τη βελτίωση του αντισεισμικού σχεδιασμού φραγμάτων λιθορριπής με ανάντη πλάκα σκυροδέματος, στην εργασία αυτή διερευνάται η συμπεριφορά τριών φραγμάτων ύψους 100 m, 200 m και 300 m μετά την πλήρωση της λεκάνης και υπό συνθήκες δυναμικής συνίζησης. Τα τρία φράγματα είναι κατασκευασμένα σε στενή κοιλάδα τραπεζοειδούς σχήματος με λόγο μήκους προς ύψος $L/H=2$. Η διερεύνηση γίνεται με χρήση μη-γραμμικής 3-Δ ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων, στην οποία προσομοιώνεται η σταδιακή κατασκευή και η ανύψωση του ύδατος της λεκάνης. Με στόχο τη σημαντική αύξηση της πλαστιμότητας της ανάντη πλάκας, χρησιμοποιείται ινοπλισμένο σκυρόδεμα σε συνδυασμό με κανονικό οπλισμό χάλυβα. Διερευνάται η επίδραση της δυσκαμψίας και του ύψους του φράγματος στις καθιζήσεις της λιθορριπής, καθώς και στις μέγιστες θλιπτικές και εφελκυστικές τάσεις και πλαστικές παραμορφώσεις της ανάντη πλάκας. Κατωτέρω περιγράφεται το αριθμητικό προσομοίωμα των τριών φραγμάτων και οι καταστατικές σχέσεις των υλικών.

2 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ

2.1 Γεωμετρία φράγματος και κοιλάδας

Στο Σχήμα 1 δίδεται η μέγιστη διατομή και οι ζώνες των υλικών των τριών φραγμάτων. Η κλίση του ανάντη πρανούς είναι 1:1.4 και του κατόντη πρανούς 1:1.5. Οι κύριες ζώνες υλικών είναι η ανάντη ζώνη 3B, η κατόντη ζώνη 3C, και η μεταβατική ζώνη χαλικιού 3B κάτω από την πλάκα. Η πλάκα αποτελείται από 14, 28 και 40 ανεξάρτητα πάνελ σκυροδέματος, αντίστοιχα, στα τρία φράγματα. Τα πάνελ έχουν πλάτος 15 m και πάχος που δίδεται από την σχέση $t = 0.30 + 0.003h$ όπου h είναι το ύψος του υπερκείμενου ύδατος. Κάθε πάνελ έχει κανονικό οπλισμό στο μέσο της διατομής σε δύο κατευθύνσεις. Επιπλέον, κάθε πάνελ έχει κατάλληλη διεπιφάνεια με διατμητική αντοχή λόγω τριβής και τη δυνατότητα διάνοιξης στη διεπιφάνεια σκυροδέματος-χαλικιού (βάση πλάκας) και στις κατακόρυφες πλευρές των αρμών γειτονικών πάνελ.



Σχήμα 1: Μέγιστη διατομή και ζώνες υλικών των τριών φραγμάτων ύψους $H=100$ m, 200 m, και 300 m

2.2 Διακριτοποίηση της τρισδιάστατης γεωμετρίας του φράγματος

Η δομική ακεραιότητα και η υδατο-στεγανότητα της ανάντη πλάκας είναι ιδιαίτερα σημαντική για την ασφάλεια και την καλή συμπεριφορά του φράγματος. Στη περίπτωση φραγμάτων που είναι κατασκευασμένα σε στενές κοιλάδες, είναι ιδιαίτερα σημαντική η ρεαλιστική διακριτοποίηση της 3Δ γεωμετρίας των πάνελ σκυροδέματος, η κατάλληλη προσομοίωση της ανελαστικής συμπεριφοράς του υλικού, και η προσομοίωση των διεπιφανειών στη βάση της πλάκας και στους κατακόρυφους αρμούς. Αγνοώντας την 3Δ φύση της γεωμετρίας ή την παρουσία των κατακόρυφων αρμών, όπως γίνεται ενίοτε προσεγγιστικά, είναι δυνατόν να οδηγήσει σε πολύ εσφαλμένη πρόβλεψη της πραγματικής συμπεριφοράς της πλάκας σκυροδέματος.

Η αριθμητική ανάλυση γίνεται με τον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS {2}. Το Σχήμα 2 παρουσιάζει την διακριτοποίηση της γεωμετρίας των τριών φραγμάτων. Διακριτοποιείται μόνο το μισό τμήμα του φράγματος λόγω συμμετρίας. Η διατομή του επιχώματος διαιρείται στις τρεις ζώνες που αναφέρθηκαν ανωτέρω. Το ανάχωμα υποδιαιρείται σε 40 οριζόντιες στρώσεις με στόχο την προσομοίωση της σταδιακής κατασκευής σε 40 βήματα. Το ανάχωμα διακριτοποιείται με εξαεδρικά στοιχεία C3D8, αποτελούμενα από 8 κόμβους. Η πλάκα σκυροδέματος διακριτοποιείται επίσης με δύο στρώσεις εξαεδρικών στοιχείων C3D8. Η ανελαστική συμπεριφορά του σκυροδέματος προσομοιώνεται με το ελαστο-πλαστικό προσομοίωμα των Lee και Fenves {8}, το οποίο παρουσιάζεται κατωτέρω. Ο οπλισμός που τοποθετείται στις δύο κάθετες κατευθύνσεις στο μέσο της διατομής της πλάκας αποτελείται από χάλυβα διαμέτρου 25 mm σε απόσταση 20 cm. Ο συντελεστής τριβής στη βάση της πλάκας είναι $\mu_b = 0.8$ ενώ στους κατακόρυφους αρμούς μεταξύ των πάνελ είναι $\mu_c = 0.5$.

2.3 Καταστατικό προσομοίωμα για λιθορριπή και χάλικες

Παρόλο που η χρήση ενός ελαστο-πλαστικού προσομοιώματος με κράτνυση και μέτρο δυσκαμψίας εξαρτώμενο από την περιβάλλουσα τάση θα ήταν πολύ επιθυμητή για τη προσομοίωση της συμπεριφοράς της λιθορριπής, η σημαντική πολυπλοκότητα ενός τέτοιου μοντέλου σε συνδυασμό με την έλλειψη εργαστηριακών δεδομένων για υλικά λιθορριπής αποτελούν ένα σημαντικό μειονέκτημα. Το υπο-ελαστικό προσομοίωμα των Duncan and Chang {9,10} έχει χρησιμοποιηθεί εκτενώς για τη προσομοίωση λιθορριπής σε φράγματα {5,6,7}. Το μοντέλο χρησιμοποιεί μία υπερβολική σχέση τάσης-παραμόρφωσης και λαμβάνει υπόψη την εξάρτηση του μέτρου ελαστικότητας από τη περιβάλλουσα τάση και την κατάσταση φόρτισης/αποφόρτισης. Το εφαπτομενικό μέτρο του Young δίδεται από την σχέση

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

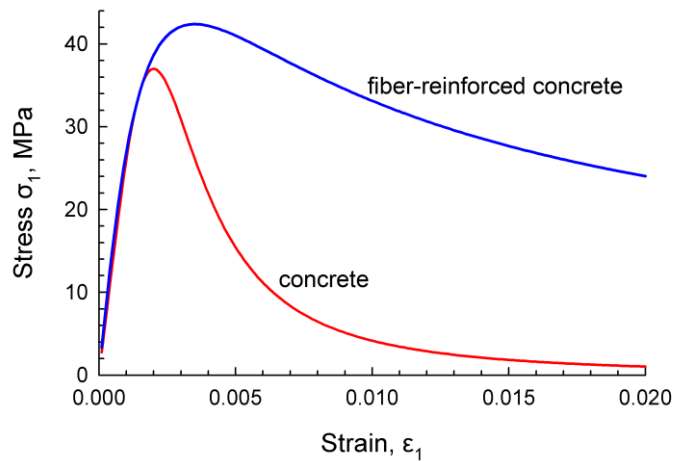
όπου σ_1, σ_3 = κύριες τάσεις, K, R_f, n = παράμετροι του μοντέλου, ϕ = γωνία τριβής, c = συνοχή, p_a = ατμοσφαιρική πίεση. Η γωνία τριβής εξαρτάται από την περιβάλλουσα τάση με τη σχέση $\phi = \phi_o - \Delta\phi \log \sigma_3 / p_a$ όπου $\phi_o, \Delta\phi$ = σταθερές του υλικού. Το ελαστικό μέτρο αποφόρτισης είναι

$$E_{ur} = K_{ur} p_a \sigma_3 / p_a^n \quad (2)$$

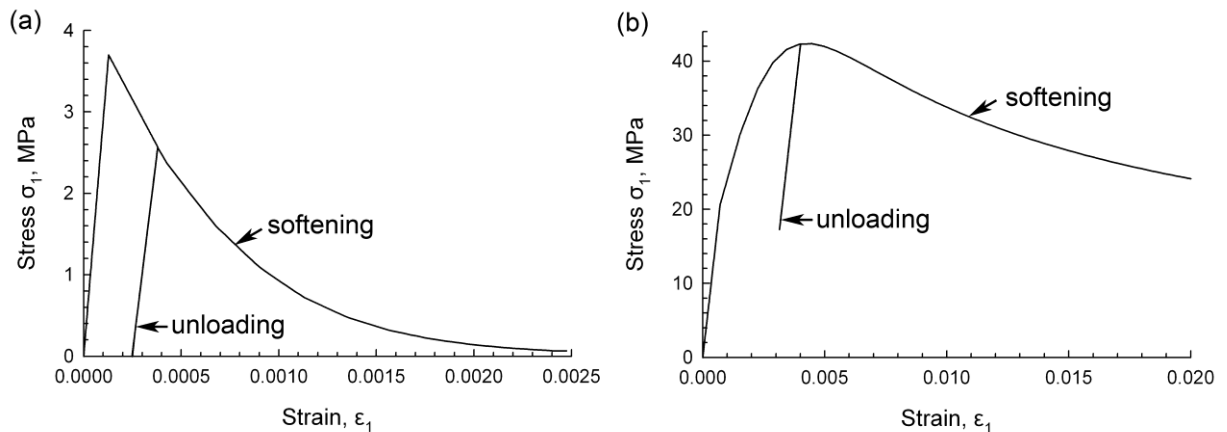
όπου K_{ur} = σταθερά με τιμές $1.2K \leq K_{ur} \leq 3K$. Το μέτρο διόγκωσης δίδεται από τη σχέση

$$B = K_b p_a \sigma_3 / p_a^m \quad (3)$$

όπου K_b, m = σταθερές. Το βασικό πλεονέκτημα του μοντέλου είναι η συσσωρευμένη εμπειρία σχετικά με τις παραμέτρους διαφόρων ειδών λιθορριπής {10}, για τις οποίες οι εργαστηριακές δοκιμές είναι δύσκολες. Ο Πίνακας 1 δίδει τις ιδιότητες και τις παραμέτρους των υλικών.



Σχήμα 3: Σχέση τάσης-παραμόρφωσης σε μονοαξονική θλίψη απλού και ινοπλισμένου σκυροδέματος βασισμένη στο μοντέλο Natarajia et al {11}.



Σχήμα 4: Σχέση τάσης-παραμόρφωσης από προσομοίωση μονοαξονικής δοκιμής (α) εφελκυσμού και (β) θλίψης με φόρτιση-αποφόρτιση-επαναφόρτιση σε κυβικά δοκίμια ινοπλισμένου σκυροδέματος (RI=2.5%)

2.4 Καταστατικό προσομοίωμα σκυροδέματος

Το σκυρόδεμα της ανάντη πλάκας προσομοιώνεται με το ελαστο-πλαστικό προσομοίωμα των Lee and Fenves {1} για μονοτονική και ανακυκλική συμπεριφορά του σκυροδέματος, το οποίο λαμβάνει υπόψη τη σταδιακή συσσώρευση βλάβης. Το προσομοίωμα λαμβάνει υπόψη τα αποτελέσματα της χαλάρωσης, διακρίνοντας τη βλάβη λόγω εφελκυσμού και λόγω θλίψης. Περιλαμβάνει ένα μηχανισμό που λαμβάνει υπόψη τα αποτελέσματα της βλάβης στην απομείωση της δυσκαμψίας, καθώς και την ανάκαμψη της δυσκαμψίας μετά το κλείσιμο της ρωγμής. Λεπτομέρειες για το προσομοίωμα και συγκρίσεις πειραματικών δεδομένων και αριθμητικών προβλέψεων της σχέσης τάσης-παραμόρφωσης για εφελκυσμό και θλίψη δίδονται στην {8}.

Για τη βελτίωση της συμπεριφοράς του σκυροδέματος σε μεγάλου ύψους CFRD, είναι επιθυμητή αύξηση της πλαστιμότητας και της αντοχής του, ώστε να είναι δυνατή η ανάληψη μεγαλύτερων εφελκυστικών παραμορφώσεων με μικρότερη ρηγμάτωση και μεγαλύτερων θλιπτικών τάσεων χωρίς θραύση. Για τον σκοπό αυτή η προσθήκη μεταλλικών ινών είναι δυνατόν να βελτιώσει

σημαντικά τις μηχανικές ιδιότητες της τσιμεντοκονίας και σκυροδέματος, όπως την σκληρότητα και την αντοχή σε πρόσκρουση, κάμψη, κόπωση, εφελκυσμό και θλίψη {11}. Η σχέση τάσης-παραμόρφωσης του ινοπλισμένου σκυροδέματος εξαρτάται από τη θλιπτική αντοχή του απλού σκυροδέματος και το δείκτη ινοπλισμού $RI = w_f l / d$ (Reinforcement Index), όπου w_f = συντελεστής βαρύτητας, l = μήκος και d = διάμετρος ίνας. Στο Σχήμα 3 δίδεται η σχέση τάσης-παραμόρφωσης ενός κυβικού δοκιμίου σκυροδέματος από κανονικό και ινοπλισμένο σκυρόδεμα, με βάση εκτενή πειραματικά δεδομένα και αναλυτικές εκφράσεις από τους Natarajia et al. {11}. Το κανονικό σκυρόδεμα που χρησιμοποιήθηκε για τα δύο δοκίμια έχει θλιπτική αντοχή 37 MPa, ενώ το ινοπλισμένο έχει λόγο $RI = 2.5\%$. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3, το ινοπλισμένο σκυρόδεμα έχει σημαντικά μεγαλύτερη πλαστιμότητα σε σύγκριση με το κανονικό σκυρόδεμα και συνεπώς είναι δυνατόν να δεχθεί μεγαλύτερες θλιπτικές τάσεις χωρίς ρηγμάτωση. Αυτή η σημαντική πλαστιμότητα είναι εμφανής και στη περίπτωση της δοκιμής του εφελκυσμού. Εκτός από ίνες χάλυβα, είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν επίσης ίνες γυαλιού και πολυπροπυλενίου. Για την περίπτωση της ανάντη πλάκας σκυροδέματος, οι ίνες πολυπροπυλενίου έχουν τρία σημαντικά πλεονεκτήματα: μεγαλύτερη πλαστικότητα, μεγαλύτερο λόγο υστερητικής απόσβεσης και κανένα κίνδυνο διάβρωσης.

Στην παρούσα εργασία, η πλάκα αποτελείται από ινοπλισμένο σκυρόδεμα πυκνότητας $\rho = 2350 \text{ kg/m}^3$, θλιπτική αντοχή ίση προς $f_c = 42 \text{ MPa}$, εφελκυστική αντοχή ίση προς $f_t = 3.7 \text{ MPa}$, μέτρο ελαστικότητας $E = 29 \text{ GPa}$ και λόγο Poisson $\nu = 0.2$. Το ινοπλισμένο σκυρόδεμα δημιουργήθηκε από μίξη κανονικού σκυροδέματος με θλιπτική αντοχή $f_c = 37 \text{ MPa}$ και ινών χάλυβα που αντιστοιχούν σε δείκτη $RI = 2.5\%$. Στο Σχήμα 4 δίδονται οι σχέσεις τάσης-παραμόρφωσης δύο κυβικών δοκιμίων σκυροδέματος στα οποία γίνεται προσομοίωση μονο-αξονικής φόρτισης κάνοντας χρήση του ανωτέρω καταστατικού προσομοιώματος. Για τη δοκιμή εφελκυσμού στο Σχήμα 4α, λαμβάνεται υπόψη η συσσωρευμένη βλάβη λόγω ρηγμάτωσης στην απομείωση της δυσκαμψίας, ενώ στη δοκιμή θλίψης δεν λαμβάνεται.

3 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΤΑΔΙΑΚΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΚΑΙ ΠΛΗΡΩΣΗΣ ΛΕΚΑΝΗΣ

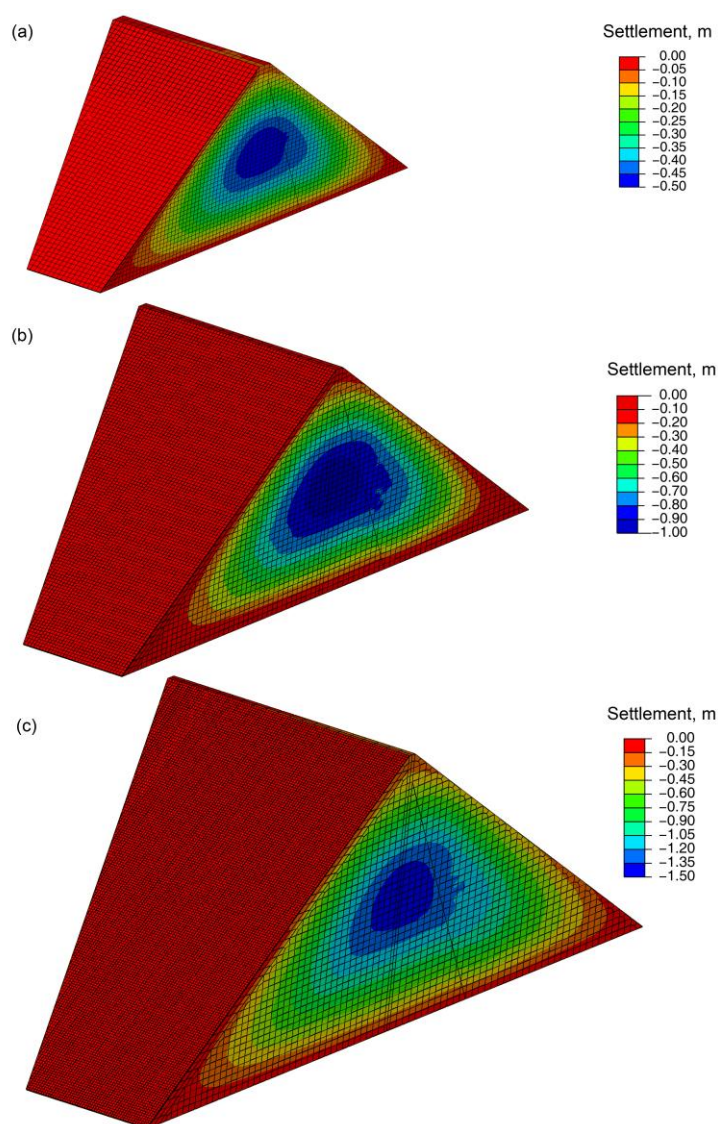
3.1 Καθιζήσεις λιθορριπής

Η προσομοίωση της σταδιακής κατασκευής εκτελείται σε 40 βήματα, σε κάθε ένα από τα οποία προστίθεται μία νέα στρώση υλικού και γίνεται στατική ανάλυση. Ένας σημαντικός δείκτης της ποιότητας συμπίκνωσης είναι ο λόγος της μέγιστης καθίζησης κατασκευής ως προς το ύψος του φράγματος (S_{\max} / H). Π.χ., για συνήθεις πρακτικές συμπίκνωσης ο λόγος S_{\max} / H είναι περίπου 1.5%, ενώ για εξαιρετική ποιότητα συμπίκνωσης ο λόγος S_{\max} / H μπορεί να είναι στην περιοχή του 0.5%. Οι παράμετροι του υλικού K , K_{ur} και K_b στις σχέσεις (1)-(3) βαθμονομούνται με επαναληπτικές αναλύσεις, ώστε η μέγιστη καθίζηση κατασκευής να είναι ίση προς μία στοχευόμενη τιμή. Στην παρούσα εργασία δίδεται έμφαση κυρίως στη συμπεριφορά υψηλών CFRD με πολύ καλή συμπίκνωση ($S_{\max} / H = 0.5\%$), αλλά παρουσιάζονται και συγκρίσεις με τη συμπεριφορά φραγμάτων με συνήθη (μέτρια έως καλή) συμπίκνωση ($S_{\max} / H = 1.5\%$).

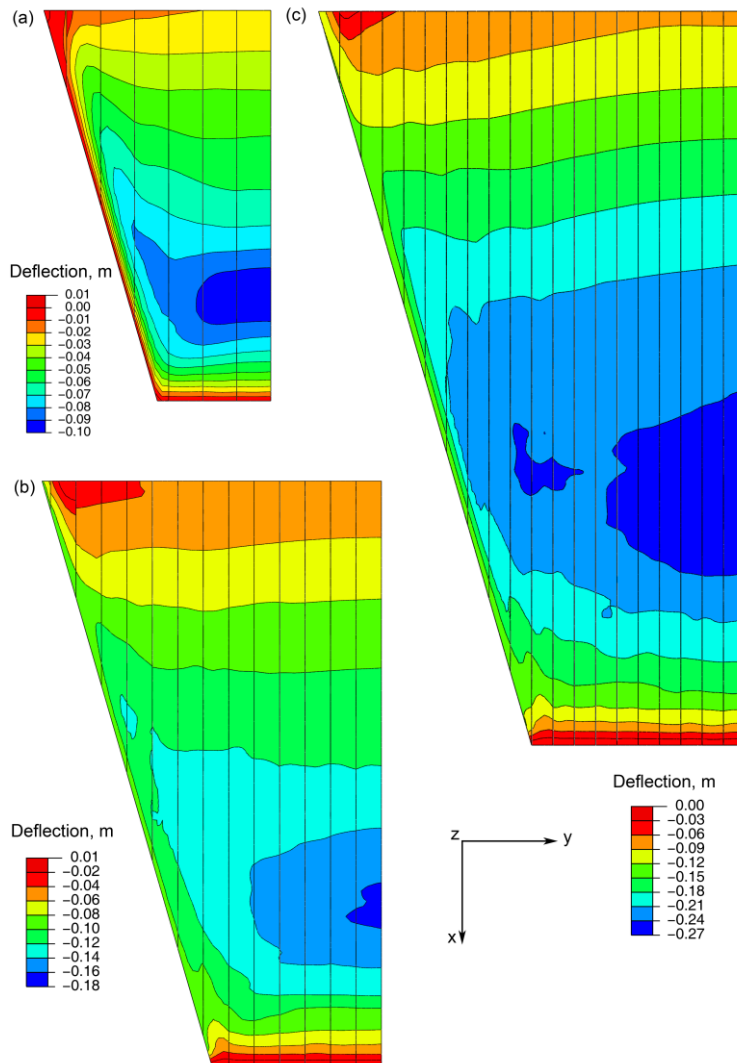
Στο Σχήμα 5 δίδεται η κατανομή των καθιζήσεων μετά το τέλος της κατασκευής για τα τρία φράγματα για $S_{\max} / H = 0.5\%$. Για $S_{\max} / H = 0.5\%$, οι μέγιστες καθιζήσεις κατασκευής είναι 0.5 m, 1 m και 1.5 m, ενώ για $S_{\max} / H = 1.5\%$ είναι 0.5 m, 1 m και 1.5 m αντίστοιχα για τα τρία φράγματα {12}.

3.2 Βύθιση και μετατόπιση της πλάκας σκυροδέματος

Μετά την ολοκλήρωση της σταδιακής κατασκευής του επιχώματος, τοποθετούνται οι πλάκες σκυροδέματος στην ανάντη πλευρά. Οι συντεταγμένες της επιφάνειας του ανάντη πρανούς τροποποιούνται μέσω μίας επαναληπτικής ανάλυσης, ούτως ώστε μετά τη σταδιακή κατασκευή του επιχώματος το ανάντη πρανές να είναι ένα τέλειο επίπεδο και να μην επιβάλλει καμία αρχική παραμόρφωση στην πλάκα. Κατά μήκος της περιμέτρου της πλάκας προσομοιώνεται η στήριξη που προσφέρει η πλίνθος. Σε τυπικό σχεδιασμό CRFDs, στο κάτω μέρος της πλάκας συνήθως τοποθετείται ένα ανάχωμα (βλέπε Σχήμα 1) για περαιτέρω προστασία έναντι διαρροών. Τέτοιο ανάχωμα δεν έχει τοποθετηθεί στην παρούσα προσομοίωση, όμως είναι δυνατόν να γίνει με απλό τρόπο σε μετέπειτα στάδιο. Τέλος, η στάθμη του νερού ανυψώνεται σταδιακά στο μέγιστο ύψος που είναι 98 m, 198 m και 298 m, αντίστοιχα, για τα τρία φράγματα.



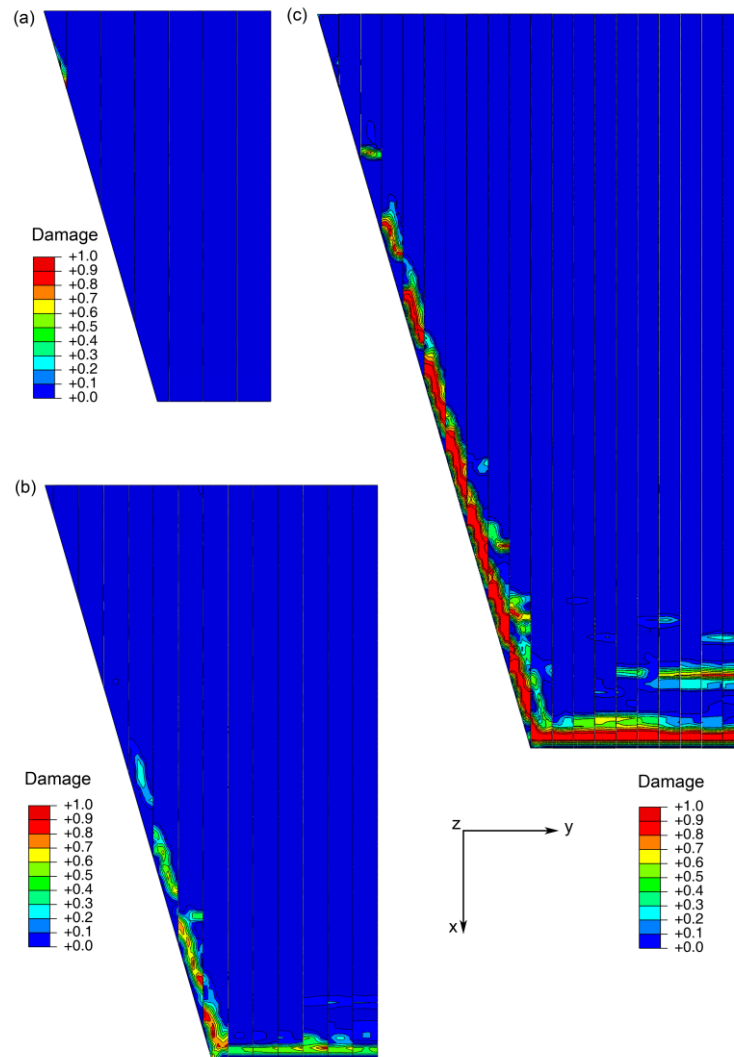
Σχήμα 5: Καθιζήσεις κατασκευής του αναχώματος για λόγο $S_{\max} / H = 0.5\%$: (α) $H = 100$ m, (β) $H = 200$ m (γ) $H = 300$ m



Σχήμα 6: Βύθιση της πλάκας μετά την πλήρωση της λεκάνης (α) $H = 100$ m, (b) $H = 200$ m (c) $H = 300$ m

Στο Σχήμα 6 δίδεται η βύθιση των τριών πλακών μετά την πλήρωση της λεκάνης (μετρούμενη κάθετα στην επιφάνεια της πλάκας). Οι μέγιστες τιμές της βύθισης είναι 10 cm, 17 cm και 27 cm για τα τρία φράγματα, και παρουσιάζονται περίπου σε ύψος $H/3$ από τη βάση. Σημειώνεται ότι οι μέγιστες τιμές της βύθισης για $S_{\max}/H=1.5\%$ είναι 32.5 cm, 46 cm και 59 cm [12]. Λαμβάνοντας υπόψη την σημαντική αύξηση του ύψους στα τρία φράγματα, η βύθιση των υψηλότερων φραγμάτων ευρίσκεται σε αποδεκτά όρια.

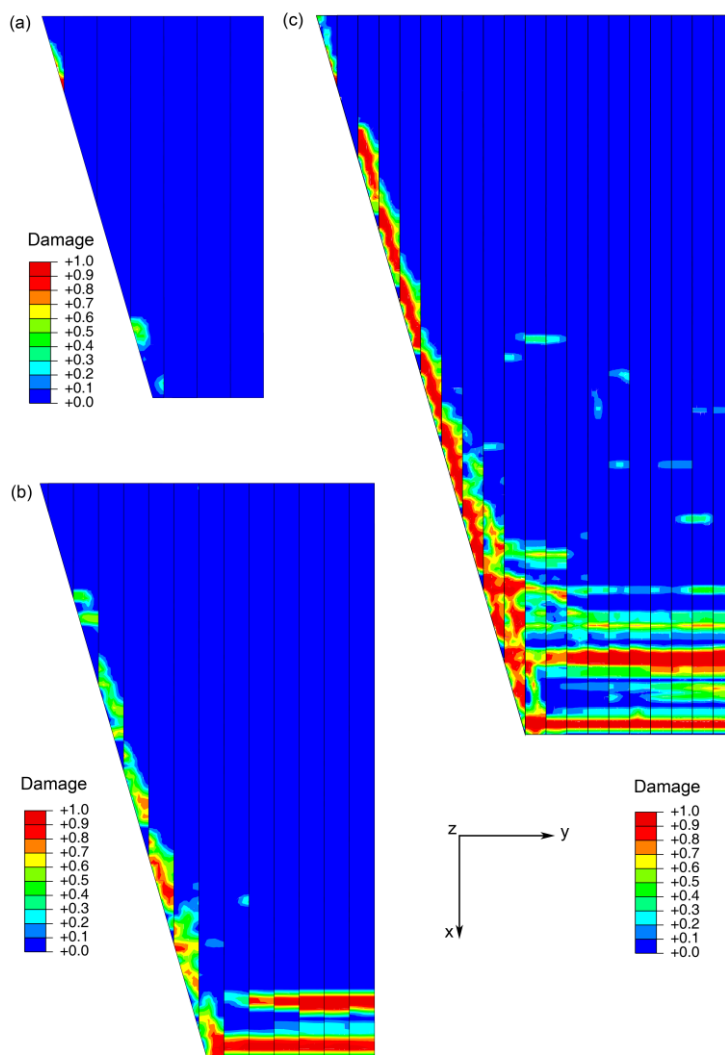
Κατά την πλήρωση της λεκάνης, λόγω της παραμόρφωσης της υποκείμενης λιθορριπής και τη μεγάλη τριβή στη βάση της πλάκας, οι πλάκες τείνουν να κινηθούν προς την κεντρική διατομή (κατεύθυνση y) και προς την στέγη (κατεύθυνση x). Η μέγιστη τιμή της μετακίνησης της πλάκας προς την κατεύθυνση x είναι περίπου 3 cm ενώ στην κατεύθυνση y είναι περίπου 4 cm. Συνεπώς, οι τιμές αυτές είναι αρκετά μικρότερες από το όριο στεγανότητας των κατακόρυφων αρμών και των αρμών στην πλίνθο, που είναι 10 cm.



Σχήμα 7: Κατανομή της βλάβης λόγω εφελκυσμού μετά την πλήρωση της λεκάνης (α) $H = 100$ m, (β) $H = 200$ m (c) $H = 300$ m ($S_{\max} / H = 0.5\%$)

3.3 Βλάβη στη πλάκα λόγω εφελκυσμού και θλίψης

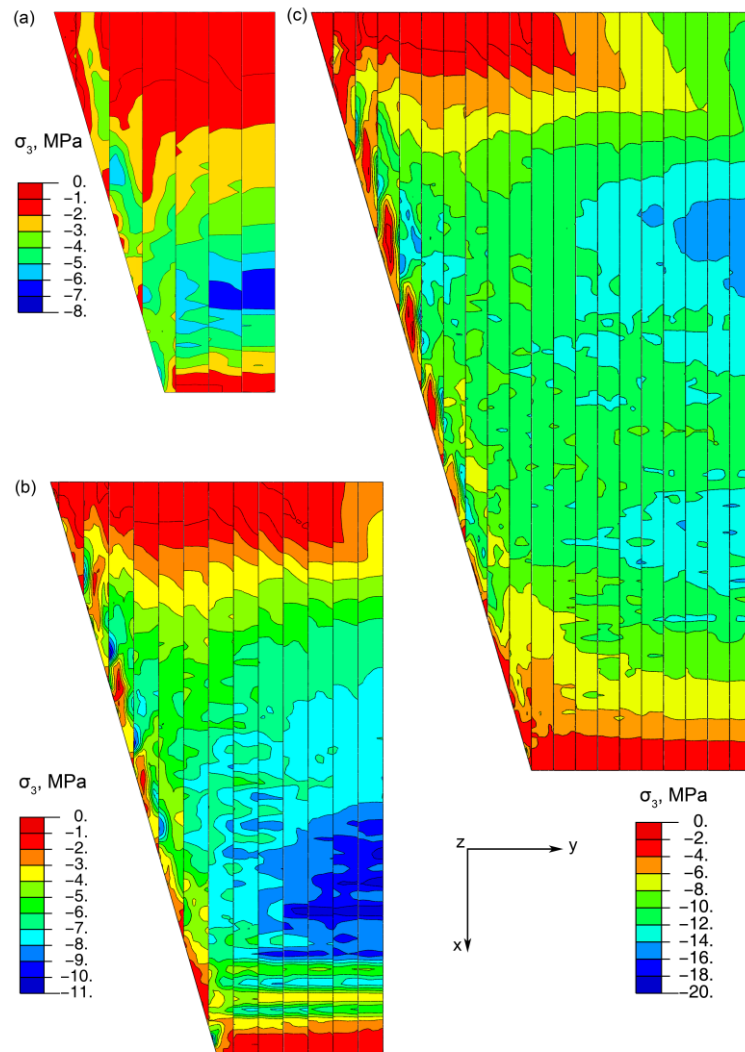
Στο Σχήμα 7 δίδεται η κατανομή του δείκτη βλάβης στην άνω επιφάνεια της πλάκας λόγω εφελκυστικών τάσεων που ξεπερνούν του όριο ελαστικότητας (Σχήμα 4α). Μετά τη διαρροή, το υλικό υφίσταται χαλάρωση (Σχήμα 4α) με ταυτόχρονη ανάπτυξη εφελκυστικών ρηγματώσεων. Συνεπώς, στη περίπτωση αυτή είναι πιο χρήσιμο να εξετασθεί ο δείκτης συσσωρευμένης βλάβης παρά η τιμή της μέγιστης κύριας τάσης σ_1 . Μηδενική τιμή του δείκτη υποδηλώνει ελαστική συμπεριφορά, ενώ τιμή ίση προς ένα υποδηλώνει μέγιστη βαθμό βλάβης. Για το φράγμα ύψους 100 m, η βλάβη λόγω εφελκυσμού είναι πρακτικά ασήμαντη (Σχήμα 7α). Για το φράγμα ύψους $H=200$ m, υπάρχει κάποια σχετικά μικρή τοπική βλάβη που αναπτύσσεται στο κάτω μέρος των πλακών στο αριστερό αντέρεισμα (Σχήμα 7β). Τέλος, στο φράγμα $H=300$ m, η βλάβη περιμετρικά της πλάκας είναι αρκετά πιο σημαντική. Τέτοιες εφελκυστικές τάσεις αναπτύσσονται λόγω της σημαντικής μεταβολής της δυσκαμψίας της υποκείμενης λιθορριπής από τον πόδα της πλάκας μέχρι την στέψη. Στην περιοχή της βλάβης αναμένεται να αναπτυχθούν ρηγματώσεις και συνεπώς θα πρέπει να ληφθούν κατάλληλα μέτρα ενίσχυσης της υδατο-στεγανότητας.



Σχήμα 8: Κατανομή της βλάβης λόγω εφελκυσμού μετά την πλήρωση της λεκάνης (α) $H = 100$ m, (β) $H = 200$ m (c) $H = 300$ m ($S_{\max} / H = 1.5\%$)

Στο Σχήμα 8 δίδεται αντίστοιχα η κατανομή του δείκτη βλάβης στην άνω επιφάνεια της πλάκας λόγω εφελκυστικών τάσεων για λόγο καθιζήσεων κατασκευής ίσο προς $S_{\max} / H = 1.5\%$. Σύγκριση της βλάβης στα Σχήματα 7 και 8 για τα φράγματα ύψους 200 m και 300 m, καταδεικνύει ότι η περιμετρική βλάβη είναι ανεξάρτητη της ποιότητας συμπύκνωσης της λιθορριπής και συνδέεται με την σημαντική αλλαγή της δυσκαμψίας της λιθορριπής λόγω μεταβολής του πάχους της υποκείμενης στρώσης από τον πόδα προς τη στέψη. Όμως, η μικρότερη συμπύκνωση της λιθορριπής είναι δυνατόν να οδηγήσει σε επέκταση της περιμετρικής ζώνης βλάβης σε αρκετά μεγαλύτερη περιοχή (Σχήματα 8b και 8c).

Στο Σχήμα 9 δίδεται η κατανομή της ελάχιστης κύριας τάσης (μέγιστη θλίψη) στην άνω επιφάνεια της πλάκας μετά την πλήρωση της λεκάνης, και την επιβολή της καθίζησης ερπυσμού και δυναμικής καθίζησης, η οποία έχει ληφθεί ως $S_{dyn} / H = 0.5\%$. Οι μέγιστες τιμές των θλιπτικών τάσεων για τα τρία φράγματα είναι 7 MPa, 11 MPa, και 15 MPa, αντίστοιχα.



Σχήμα 9: Κατανομή της ελάχιστης κύριας τάσης (μέγιστη θλίψη) μετά την πλήρωση της λεκάνης, ερπυσμό και δυναμική συνίζηση λόγω σεισμικής δόνησης (α) $H = 100$ m, (β) $H = 200$ m (γ) $H = 300$ m

Στην περίπτωση που η καθίζηση κατασκευής είναι τριπλάσια ($S_{\max}/H = 1.5\%$), οι μέγιστες θλιπτικές τάσεις είναι αντίστοιχα 15 MPa, 18 MPa, και 24 MPa [12]. Σημειώνεται ότι οι τιμές αυτές είναι αρκετά μικρότερες από την θλιπτική αντοχή του ινοπλισμένου σκυροδέματος (42.5 MPa), δίδοντας ένα αρκετά μεγάλο συντελεστή ασφαλείας έναντι πρόσθετων θλιπτικών τάσεων που είναι δυνατόν να προκύψουν κατά την διάρκεια μίας σεισμικής δόνησης.

4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο άρθρο αυτό διερευνήθηκε η συμπεριφορά τριών φραγμάτων λιθορριπής με ανάντη πλάκα σκυροδέματος, ύψους 100 m, 200 m, και 300 m. Τα κυριότερα συμπεράσματα είναι τα εξής:

1. Για φράγματα με καθιζήσεις κατασκευής $S_{\max}/H \leq 0.5\%$, οι βυθίσεις της πλάκας μετά την πλήρωση της λεκάνης είναι πρακτικά πολύ μικρές (10 cm-27 cm), ενώ για $S_{\max}/H \leq 1.5\%$ είναι εντός αποδεκτών ορίων (32 cm-59 cm).

2. Για τα φράγματα ύψους 200 m και 300 m, η βλάβη λόγω εφελκυστικών τάσεων περιμετρικά και στον πόδα της πλάκας είναι τοπικά σημαντική και πρέπει να ληφθούν κατάλληλα μέτρα στεγάνωσης.
3. Οι μέγιστες θλιπτικές τάσεις στην πλάκα είναι πολύ μικρότερες από την θλιπτική αντοχή του ινοπλισμένου σκυροδέματος για καθιζήσεις κατασκευής $S_{\max} / H \leq 1.5\%$.
4. Η συνολική συμπεριφορά των τριών φραγμάτων με πλάκα ινοπλισμένου σκυροδέματος είναι ικανοποιητική και οι συντελεστές ασφαλείας επαρκείς.

5 ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα έρευνα έχει συγχρηματοδοτηθεί από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο - ΕΚΤ) και από εθνικούς πόρους μέσω του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» του Εθνικού Στρατηγικού Πλαισίου Αναφοράς (ΕΣΠΑ) – Ερευνητικό Χρηματοδοτούμενο Έργο: Ηράκλειτος ΙΙ. Επένδυση στην κοινωνία της γνώσης μέσω του Ευρωπαϊκού Κοινωνικού Ταμείου.



Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης

6 ΑΝΑΦΟΡΕΣ

1. Ma, H. and CAO, K., “Key technical problems of extra-high concrete faced rockfill dam” *Science in China, Series E, Technological Sciences*, 2007,50, 20-33
2. ABAQUS, Users’ Manual, Simulia, Pawtucket, Rhode Island, 2011.
3. Marques Filho, F., Pinto N., “CFRD dam characteristics learned from experience”, *Hydropower & Dams*, 2005; 1:72-76
4. Guan, Z., “Investigation of the 5.12 Wenchuan Earthquake damages to Zipingpu Water Control Project and an assessment of its safety state”, *Science in China, Series E, Technological Sciences*, 2009; 52(4):820-834.
5. Dakoulas, P., Thanopoulos, Y., and Anastassopoulos, K., “Nonlinear 3D simulation of CFR dam construction and reservoir filling”, *Intern. Journal of Hydropower and Dams*, 2008, Issue 2, 95-101.
6. Dakoulas, P., “Nonlinear seismic response of tall concrete faced rockfill dams in narrow canyons” *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2012, 34, 11-24.
7. Dakoulas, P., “Longitudinal vibrations of tall concrete faced rockfill dams in narrow canyons”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2012, 41, 44-58.
8. Lee J., Fenves, G.L., “A plastic-damage concrete model for earthquake analysis of dams”, *Journal of Earthq. Eng. & Struct. Dynamics* 1998; 27: 937-596.
9. Duncan J. M., Chang C. Y., “Nonlinear analysis of stress and strain in soils”, *J. of Soil Mech. and Found. Engineering*, ASCE 1970: 96(5): 1629-1653.
10. Duncan J. M., Byrne, P, Wong, K., Mabry P., “Strength, stress-strain and bulk modulus parameters for finite element analyses of stresses and movements in soil masses”, *Report UCB/GT/80-01*, Univ. of California, Berkeley, CA, USA, 1980.
11. M.C. Nataraja, N. Dhang, A.P. Gupta, “Stress-strain curves for steel-fiber reinforced concrete under compression”, *Cement & Concrete Composites*, 1999, 21, 383-390.
12. Stavrotheodorou, E. and Dakoulas, P. (2012), “Behaviour of very tall concrete faced rockfill dams during impoundment”, *International Journal of Hydropower and Dams: Hydro 2012 Conference*, 29-31 Oct., Bilbao, Spain, CD.

Aseismic design improvement of tall concrete-faced rockfill dams

E. Stavrotheodorou

Civil Engineer, PhD Candidate, Department of Civil Engineering, University of Thessaly

P. Dakoulas

Professor, Department of Civil Engineering, University of Thessaly, dakoulas@uth.gr

Key words: CFRD, fiber-reinforced concrete, settlement, non-linear analysis, aseismic design

SUMMARY: In order to improve aseismic design of tall concrete-faced rockfill dams (CFRDs), the behavior of three dams having height of 100, 200 and 300 m is investigated. The three dams are built in narrow canyons of trapezoidal shape with length to height ratio $L/H=2$. The study is performed using non-linear 3D finite element analysis, in which the staged construction, the impoundment and the development of dynamic settlements are simulated. In order to increase the ductility of the face slab, fiber-reinforced concrete combined with standard steel reinforcement is utilized. The effects of rockfill stiffness and dam height on the maximum compressive and tensile stresses and plastic strains of the slab are investigated.