

Μη γραμμική 3D προσομοίωση της κατασκευής, πλήρωσης και σεισμικής απόκρισης φράγματος λιθορριπής με ανάντη πλάκα σκυροδέματος

Advanced simulation of the construction, impoundment and
seismic behavior of a CFR dam using nonlinear 3D analysis

Πάνος ΝΤΑΚΟΥΛΑΣ ¹

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Παρουσιάζεται μία προχωρημένη μεθοδολογία για τη μη-γραμμική 3D δυναμική ανάλυση φραγμάτων λιθορριπής με ανάντη πλάκα σκυροδέματος που περιλαμβάνει: προσομοίωση της σταδιακής κατασκευής, των καθιζήσεων ερπυσμού, της σταδιακής πλήρωσης της λεκάνης και της σεισμικής απόκρισης, λαμβάνοντας υπόψη τη δυναμική συνίζηση. Η κατασκευή και η πλήρωση της λεκάνης βασίζεται στο προσομοίωμα Duncan & Chang. Μετά τον προσδιορισμό των στατικών τάσεων, χρησιμοποιείται ένα μη-γραμμικό υστερητικό προσομοίωμα, το οποίο βασίζεται στις δυναμικές ιδιότητες της λιθορριπής και παράγει βρόγχους υστέρησης σε συμφωνία με τα πειραματικά δεδομένα για τη μεταβολή του μέτρου διάτμησης και του λόγου απόσβεσης με τη διατμητική παραμόρφωση. Η μεθοδολογία εφαρμόζεται για την μελέτη ενός φράγματος ύψους 150 m σε στενή κοιλάδα. Το φράγμα και οι 23 πλάκες διακριτοποιούνται με πεπερασμένα στοιχεία και προσομοιώνονται όλες οι διεπιφάνειες τριβής. Κατά την ισχυρή σεισμική δόνηση ($a_{\max} = 0.35$ g) αναπτύσσεται ζώνη εφελκυσμού περιμετρικά και παράλληλα στην πλίνθο όπου αναμένεται να αναπτυχθούν ρωγμές. Στο υποθετικό σενάριο δυναμικής συνίζησης της λιθορριπής κατά 50 cm στη στέψη, οι θλιπτικές τάσεις αυξάνουν σημαντικά στην κεντρική περιοχή της πλάκας κατά τον σεισμό.

ABSTRACT: A methodology is presented for nonlinear 3D finite element analysis of concrete faced rockfill dams based on simulation of the phased construction, creep settlements, reservoir impoundment and seismic shaking of the dam, accounting for dynamic settlements. The static analysis uses the nonlinear model by Duncan & Chang, whereas the dynamic analysis uses a nonlinear hysteretic model which accounts for the initial dynamic properties and produces hysteresis loops in agreement with the experimental data on the shear modulus and damping ratio variation with cyclic shear strain. The method is applied to study the response of a 150 m–high CFRD built in a narrow canyon. The dam and its 23 slabs are discretized with finite elements, using interfaces that account for friction and separation. The results show that during strong seismic shaking with $a_{\max} = 0.35$ g, a tension zone parallel to the plinth develops at the sides of the slab, where tension cracks may develop. In the hypothetical case of a 50 cm seismic crest settlement, the compressive stresses at the central region of the slab increase significantly during seismic shaking.

¹ Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Πολ. Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Βόλος, email: dakoulas@uth.gr

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο ισχυρός σεισμός μεγέθους $M = 7.8$ που δόνησε την περιοχή Sichuan της Κίνας την 12 Μαΐου 2008, δημιούργησε σημαντικές ρωγμές στην ανάντη πλάκα σκυροδέματος του φράγματος Zipingpu και, τουλάχιστον για μερικές ώρες μετά τον σεισμό, έντονη αγωνία για την ασφάλεια της πολύ πυκνά κατοικημένης ευρύτερης περιοχής στην κατάντη πλευρά του φράγματος. Λόγω της υψηλής διατμητικής αντοχής της συμπυκνωμένης λιθορριπής και της απουσίας υπερπιέσεων του ύδατος πόρων, τα φράγματα λιθορριπής με ανάντη πλάκα σκυροδέματος όπως το Zipingpu θεωρούνται ότι συμπεριφέρονται γενικά καλύτερα κατά τη διάρκεια σεισμών σε σύγκριση με φράγματα λιθορριπής αργιλικού πυρήνα (Gazetas & Dakoulas 1992, Gazetas & Uddin 1995, Sherard & Cooke 1987). Όμως, η εκτίμηση αυτή βασίζεται σε ελάχιστα ιστορικά περιστατικών τέτοιων φραγμάτων. Το πρόσφατο αυτό περιστατικό του φράγματος Zipingpu κατέδειξε ξεκάθαρα την ανάγκη για βαθύτερη κατανόηση της σεισμικής συμπεριφοράς φραγμάτων λιθορριπής με ανάντη πλάκα σκυροδέματος.

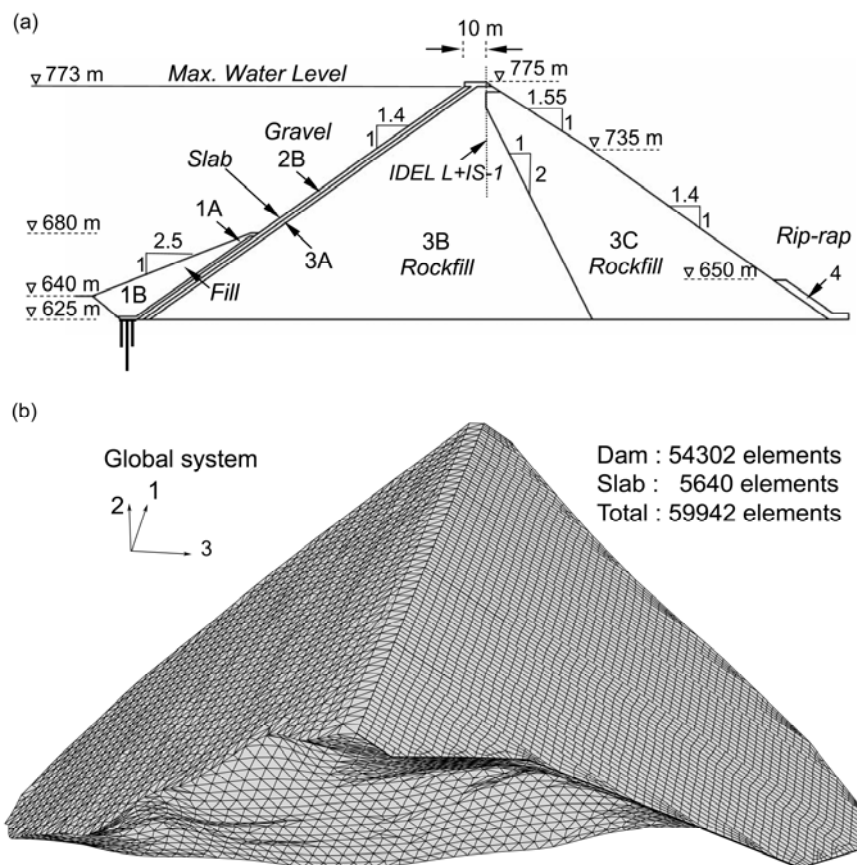
Η σεισμική συμπεριφορά φραγμάτων λιθορριπής εξαρτάται από ένα μεγάλο αριθμό παραγόντων, όπως ο βαθμός συμπύκνωσης, η ποιότητα του υλικού της λιθορριπής, η γεωμετρία του φράγματος, η στενότητα της κοιλάδας, η ενδοσιμότητα του «βράχου» της κοιλάδας, η ποιότητα των αρμών μεταξύ των πλακών και των περιμετρικών αρμών της πλίνθου, η ένταση και τα χαρακτηριστικά της σεισμικής δόνησης, η χωρική μεταβλητότητα της σεισμικής διέγερσης, κλπ. (Gazetas & Dakoulas 1992, Dakoulas 1993, 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 παρουσιάζει μία προχωρημένη μεθοδολογία σεισμικής ανάλυσης φραγμάτων λιθορριπής με ανάντη πλάκα σκυροδέματος για μια ρεαλιστική εκτίμηση της σεισμικής συμπεριφοράς του φράγματος και της πλάκας. 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 η σταδιακή κατασκευή και η φόρτιση του φράγματος κατά την πλήρωση της λεκάνης αποταμίευσης. 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 (Dakoulas et al. 2008). Κατά την σεισμική διέγερση ενεργοποιείται το δυναμικό καταστατικό προσομοίωμα, ενώ διατηρούνται πλήρως οι αρχικές τάσεις και παραμορφώσεις που αντιστοιχούν στο τέλος της πλήρωσης της λεκάνης αποταμίευσης. Η προσομοίωση της σεισμικής συμπεριφοράς του φράγματος λαμβάνει υπόψη μεταξύ άλλων τα εξής: (α) την πλήρη 3D γεωμετρία του φράγματος και της κοιλάδας (β) την μη-γραμμική συμπεριφορά του εδάφους (γ) την αρχική δυναμική δυσκαμψία του φράγματος (δ) την μεταβολή του μέτρου διάτμησης και του λόγου απόσβεσης με την ανακυκλική διατμητική παραμόρφωση, σύμφωνα με τα πειραματικά δεδομένα (ε) την δυναμική αλληλεπίδραση της λιθορριπής, των πλακών και της πλίνθου.

Ως παράδειγμα εφαρμογής της μεθόδου χρησιμοποιείται το φράγμα της Μεσοχώρας, το οποίο είναι κατασκευασμένο σε μία στενή κοιλάδα του ποταμού Αχελώου στην βόριο-δυτική Ελλάδα. Έχει ύψος 150 m στη μέγιστη διατομή και μήκος στέψης 330 m. Στο Σχ. 1a δίδεται η γεωμετρία της μέγιστης διατομής και οι ζώνες των υλικών, ενώ στο Σχ. 1b δίδεται μία άποψη της διακριτοποίησης του φράγματος και της ανάντη πλάκας σκυροδέματος. Μία πιο λεπτομερής περιγραφή του φράγματος δίδεται σε ξεχωριστό άρθρο (Dakoulas et al. 2008).

Η παρούσα εργασία επικεντρώνεται στην μελέτη σεισμικής απόκρισης του φράγματος και της εντατικής κατάστασης και πιθανής ρηγμάτωσης της πλάκας σκυροδέματος για διάφορα σενάρια. Πρέπει να τονιστεί ότι η παρούσα δυναμική μελέτη δεν βασίζεται σε πραγματικές μετρήσεις των δυναμικών ιδιοτήτων των υλικών του φράγματος, αλλά σε τρία υποθετικά σενάρια σχετικά με την δυσκαμψία των υλικών. Για μία πιο ρεαλιστική εκτίμηση της απόκρισης θα πρέπει βεβαίως να γίνουν επιτόπου μετρήσεις και να επαναληφθεί η δυναμική ανάλυση με τα πραγματικά δεδομένα.



Σχήμα 1. (a) Μέγιστη διατομή και ζώνες υλικών (b) Διακριτοποίηση της γεωμετρίας του αριθμητικού προσομοιώματος

Η αριθμητική προσομοίωση της σταδιακής κατασκευής, πλήρωσης της λεκάνης και επιβολής της σεισμικής δόνησης πραγματοποιείται στα εξής 8 στάδια:

Στάδιο 1: Το επίχωμα κατασκευάζεται σταδιακά με 20 στρώσεις.

Στάδιο 2: Κατασκευάζεται η πλάκα σκυροδέματος στην ανάντη πλευρά.

Στάδιο 3: Κατασκευάζεται επίχωμα στο κάτω μέρος της πλάκας από υψ. 625 m ως 680 m.

Στάδιο 4: Πραγματοποιούνται καθιζήσεις λόγω ερπυσμού της λιθορριπής.

Στάδιο 5: Η στάθμη του νερού ανέρχεται σε υψόμετρο 680 m.

Στάδιο 6: Η στάθμη του νερού ανέρχεται σε υψόμετρο 725 m.

Στάδιο 7: Η στάθμη του νερού ανέρχεται σε υψόμετρο 773 m.

Στάδιο 8: Επιβάλλεται η σεισμική διέγερση

ΜΕΘΟΔΟΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

Προσομοίωμα Duncan & Chang

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

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

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

$$\phi = \phi_o - \Delta\phi \log \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right) \quad (2)$$

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

$$E_{ur} = K_{ur} p_a \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)^n \quad (3)$$

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

$$B = K_b p_a \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)^m \quad (4)$$

όπου K_b , m = σταθερές.

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

$$B_{min} = \frac{E_t}{3} \left(\frac{2 - \sin \phi}{\sin \phi} \right) \quad (5)$$

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

$$S = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_{1f} - \sigma_{3f}} \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)^{1/4} \quad (6)$$

όπου σ_{1f}, σ_{3f} = κύριες τάσεις στην αστοχία. Αν $S \geq S_{max}$ τότε χρησιμοποιούνται τα μέτρα φόρτισης, ενώ αν $S < S_{max}$ χρησιμοποιούνται τα μέτρα αποφόρτισης.

Υστερητικό Προσομοίωμα

Για την ρεαλιστική πρόβλεψη της υστερητικής συμπεριφοράς της λιθορριπής και των χαλίκων δημιουργήθηκε ένα υστερητικό προσομοίωμα το οποίο ενσωματώθηκε με το στατικό προσομοίωμα Duncan et al. (1970) σε ένα ενιαίο αριθμητικό κώδικα («user material»). Το μέτρο διάτμησης σε πολύ μικρές παραμορφώσεις ($\gamma < 10^{-6}$) δίδεται από την σχέση

$$G_0 = 1000 A \frac{(2.17 - e)^2}{1 + e} (p'_0)^r \quad (8)$$

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

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

$$G_s / G_0 = \frac{a}{1 + \exp(-(\log \gamma_e - c)/b)} \quad (9)$$

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

$$\gamma_e = \sqrt{\frac{2}{3}} \sqrt{(\varepsilon_{11} - \varepsilon_{22})^2 + (\varepsilon_{22} - \varepsilon_{33})^2 + (\varepsilon_{33} - \varepsilon_{11})^2 + 3(\gamma_{12}^2 + \gamma_{23}^2 + \gamma_{31}^2)/2} \quad (10)$$

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

$$G_t/G_0 = \frac{a}{1 + \exp(-(\log \gamma_e - c)/b)} + \frac{a \exp(-(\log \gamma_e - c)/b)}{b(1 + \exp(-(\log \gamma_e - c)/b))^2 \ln 10} \quad (11)$$

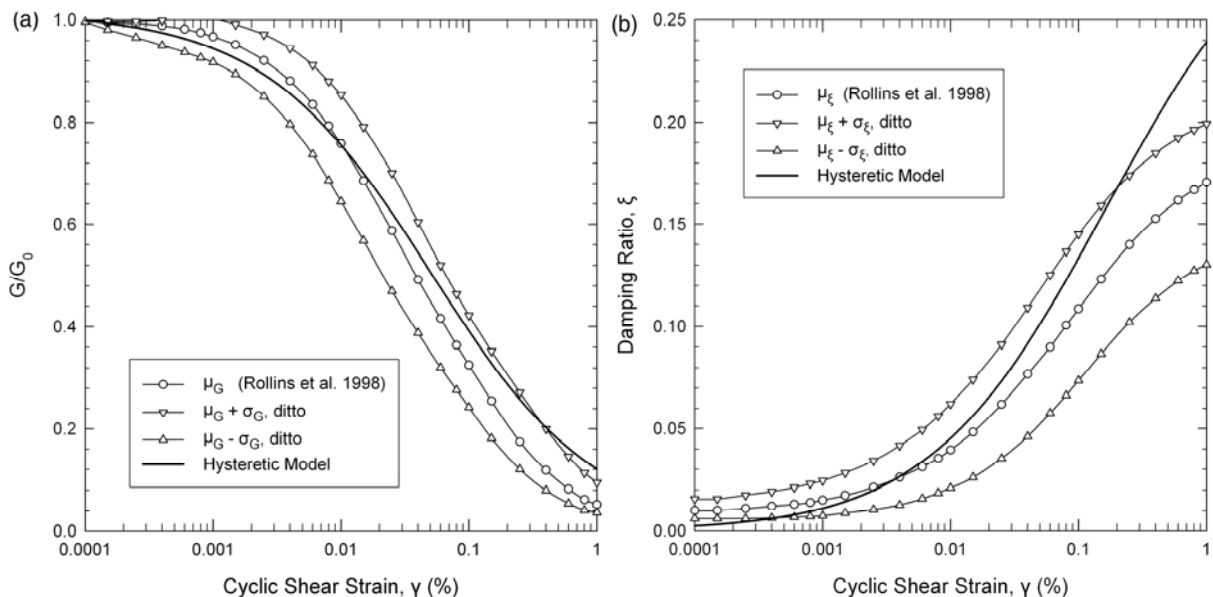
Κατά την ανακυκλική φόρτιση χρησιμοποιείται το κριτήριο Masing για την δημιουργία των βρόγχων υστέρησης, οπότε η νέα σχέση του εφαπτομενικού μέτρου διάτμησης γίνεται ίση προς

$$G_t/G_0 = \frac{a}{1 + \exp(-(\log(|\gamma - \gamma_{ref}|/2) - c)/b)} + \frac{a \exp(-(\log(|\gamma - \gamma_{ref}|/2) - c)/b)}{b(1 + \exp(-(\log(|\gamma - \gamma_{ref}|/2) - c)/b))^2 \ln 10} \quad (12)$$

όπου γ = το διάνυσμα των παραμορφώσεων, γ_{ref} = το διάνυσμα των παραμορφώσεων από τις οποίες έγινε η αποφόρτιση και $|\gamma - \gamma_{ref}|$ το μέτρο της διαφοράς των διανυσμάτων γ και γ_{ref} . Ένα βασικό στοιχείο στην περίπτωση σεισμικής διέγερσης (όπου εμφανίζονται τυχαίες αλλαγές της παραμόρφωσης) είναι η αποθήκευση της ιστορίας των διανυσμάτων αποφόρτισης γ_{ref} , ώστε να είναι δυνατή η χρήση της ορθής τιμής του γ_{ref} κατά την μετάβαση από μεγάλους βρόγχους σε εσωτερικούς μικρότερους βρόγχους και αντίστροφα.

Στο Σχ. 2 παρουσιάζεται η μέση τιμή και μία τυπική απόκλιση του τέμνοντος μέτρου διάτμησης G_s/G_0 και του λόγου υστερητικής απόσβεσης ξ χαλίκων από την αξιολογή μελέτη των Rollins et al. (1998). Επίσης δίδονται οι τιμές των G_s/G_0 και ξ οι οποίες προκύπτουν από το υστερητικό μοντέλο για τις τιμές των σταθερών a, b, c του Πίνακα 1.

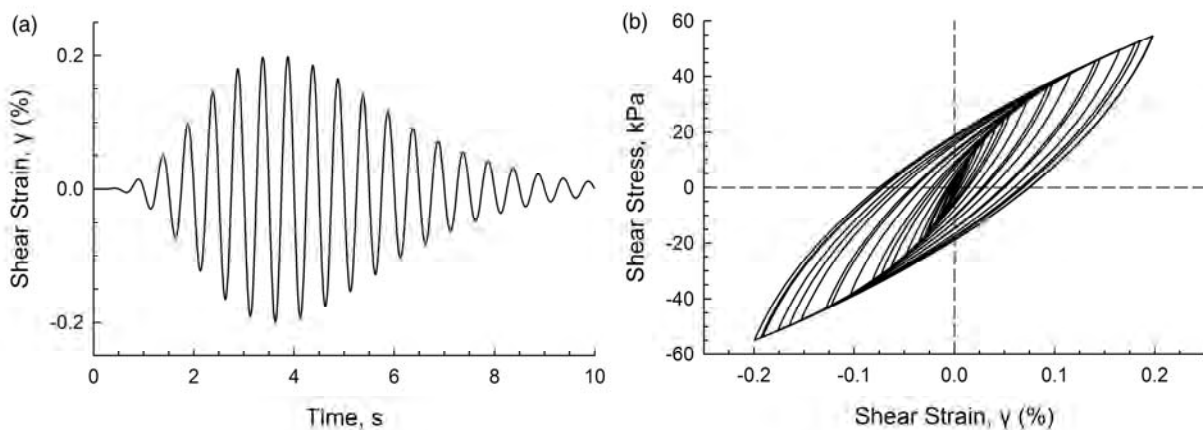
Το ενοποιημένο καταστατικό προσομοίωμα για τη στατική και τη δυναμική συμπεριφορά ενσωματώθηκε στο κώδικα ABAQUS και επιβεβαιώθηκε εκτενώς (Dakoulas 2007). Στο Σχ. 3 δίδεται η προσομοίωση μίας δοκιμής απλής διάτμησης κατά την οποία επιβάλλεται η δυναμική διατμητική παραμόρφωση του Σχ. 3α. Η σχέση τάσης – παραμόρφωσης που προβλέπεται από το καταστατικό προσομοίωμα για διάφορα πλάτη διατμητικής παραμόρφωσης κατά την φόρτιση/αποφόρτιση δίδεται στο Σχ. 3β.



Σχήμα 2. Πειραματικά δεδομένα και αριθμητικές προβλέψεις της μεταβολής (a) του τέμνοντος μέτρου διάτμησης και (b) του λόγου απόσβεσης με το πλάτος της διατμητικής παραμόρφωσης για χαλίκους.

Πίνακας 1. Ιδιότητες και παράμετροι του προσομοιώματος για λιθορριπή και χαλίκια

	Ζώνη 3B	Ζώνη 3C	Ζώνη 2G
Πυκνότητα ρ , kg/m ³	2150	2150	2150
Λόγος κενών, e	0.38	0.38	0.38
Λόγος Poisson, ν	0.35	0.35	0.35
K	600	450	1200
K_{ur}	1500	1125	3000
K_b	150	112.5	300
n	0.45	0.45	0.45
m	0.22	0.22	0.22
R_f	0.59	0.59	0.59
ϕ_0	51°	51°	51°
$\Delta\phi$	9°	9°	9°
A (Σενάριο 1)	14300	10725	28600
A (Σενάριο 2)	16600	12450	33200
A (Σενάριο 3)	19000	14250	38000
r	0.5	0.5	0.5



Σχήμα 3. Προσομοίωση δοκιμής απλής διάτμησης (α) επιβαλλόμενη διατμητική παραμόρφωση (β) προσομοίωση της σχέσης τάσης – παραμόρφωσης με το νέο καταστατικό προσομοίωμα που ενσωματώθηκε στον κώδικα ABAQUS.

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΚΑΙ ΠΛΗΡΩΣΗ ΛΕΚΑΝΗΣ

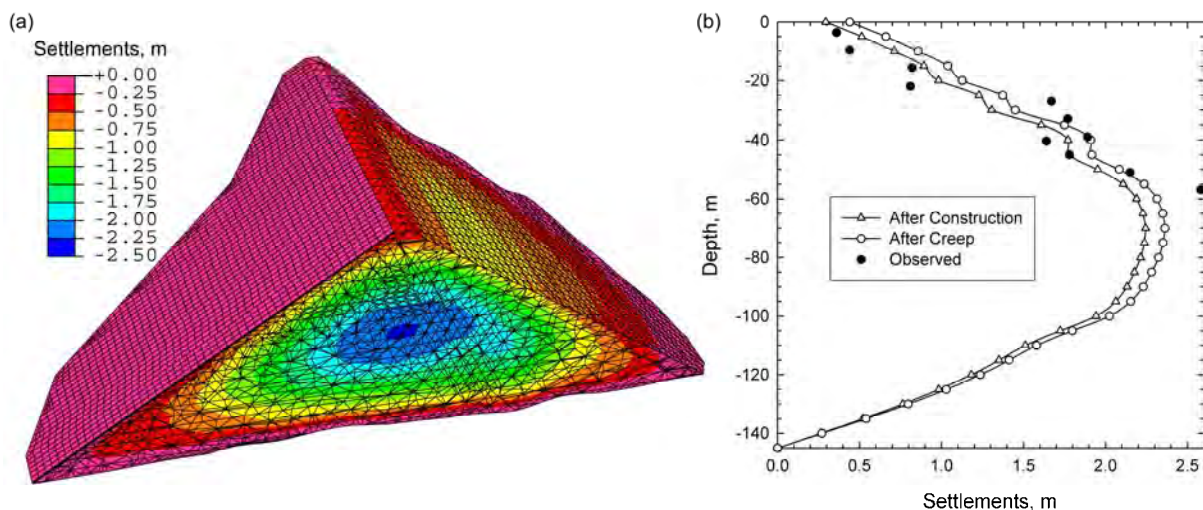
Στάδιο 1: Η σταδιακή κατασκευή του επιχώματος προσομοιώνεται θεωρώντας 20 στρώσεις πάχους 7.5 m. Το αριθμητικό προσομοίωμα διακριτοποιεί με ακρίβεια την 3D γεωμετρία του επιχώματος και της επιφάνειας των αντερισμάτων της κοιλάδας, χρησιμοποιώντας 54302 στοιχεία (Σχ. 1b). Εκτός των 20 οριζοντίων στρώσεων της κατασκευής, η διατομή υποδιαιρείται επίσης σε τρεις βασικές ζώνες: την ανάντη ζώνη 3B, την κατάντη ζώνη 3C, και την ζώνη χαλικιού 2B (Σχ. 1a).

Δεδομένου ότι δεν υπάρχουν απευθείας μετρήσεις της δυσκαμψίας της λιθορριπής, οι αρχικές τιμές των παραμέτρων του προσομοιώματος ελήφθησαν από δημοσιευμένα δεδομένα για παρόμοια υλικά σε παρόμοια φράγματα (Duncan et al. 1980), και στην

συνέχεια βαθμονομήθηκαν οι σταθερές K , K_{ur} και K_b με χρήση των καθιζήσεων που μετρήθηκαν στην μέγιστη διατομή κατά την διάρκεια της κατασκευής. Οι τιμές όλων των παραμέτρων του προσομοιώματος δίδονται στον Πίνακα 1.

Για την προσεγγιστική προσομοίωση των καθιζήσεων ερπυσμού που μετρήθηκαν μετά την κατασκευή του επιχώματος και την επιβολή της αντίστοιχης παραμόρφωσης στην πλάκα σκυροδέματος, στο Στάδιο 1 επιβλήθηκε το 94% της βαρύτητας, ενώ το υπόλοιπο 6% επιβλήθηκε μετά την κατασκευή της πλάκας και του επιχώματος (Στάδιο 4). Στο Σχ. 4b συγκρίνονται οι υπολογισμένες καθιζήσεις στην κεντρική διατομή του φράγματος στα Στάδια 1 και 4 με τις καθιζήσεις που μετρήθηκαν από το όργανο IDEL L+IS-1 (Σχ. 1a). Στο τέλος του Σταδίου 1 η μέγιστη καθίζηση είναι 2.25 m και ευρίσκεται περίπου στο μέσο του ύψους.

Η προσομοίωση της σταδιακής κατασκευής επαναλαμβάνεται αρκετές φορές με τροποποίηση της αρχικής γεωμετρίας του φράγματος έτσι ώστε μετά την επιβολή του 94% της βαρύτητας η επιφάνεια του ανάντη πρανούς να αποτελεί ένα τέλειο επίπεδο επάνω στο οποίο τοποθετείται στην συνέχεια η πλάκα.



Σχήμα 4. (a) Κατανομή καθιζήσεων εντός του φράγματος κατά το τέλος του ερπυσμού (b) Σύγκριση καθιζήσεων από τις μετρήσεις του οργάνου IDELL+IS-1 και προβλεπόμενων καθιζήσεων κατά το τέλος κατασκευής και το τέλος του ερπυσμού.

Στάδιο 2: Η πλάκα σκυροδέματος αποτελείται από 23 ανεξάρτητες πλάκες και διακριτοποιείται με συνολικά 5640 στοιχεία. Η γεωμετρία του προσομοιώματος της πλάκας είναι ταυτόσημη με την πραγματική γεωμετρία. Το πλάτος κάθε επιμέρους πλάκας είναι 15 m (εκτός από τις δύο πλάκες στα άκρα όπου είναι περίπου 7.5 m). Το πάχος της πλάκας είναι 0.3 m στην στέψη και μεταβάλλεται σαν συνάρτηση της κατακόρυφης απόστασης h από το μέγιστο ύψος του νερού σύμφωνα με την σχέση $w = 0.30 + 0.003h$. Για $h = 148$ m, το πάχος στη βάση της μέγιστης διατομής είναι 0.74 m. Το πάχος της πλάκας διακριτοποιείται με δύο λεπτά πεπερασμένα στοιχεία ενώ οι άλλες διαστάσεις των στοιχείων κυμαίνονται μεταξύ 2 m και 3.75 m, ώστε ο λόγος των διαστάσεων σε σχέση με το πάχος να είναι αποδεκτός. Το σκυρόδεμα προσομοιώνεται σαν ελαστικό υλικό με πυκνότητα $\rho = 2350 \text{ kg/m}^3$, μέτρο ελαστικότητας Young $E = 21 \text{ GPa}$ και λόγο Poisson $\nu = 0.2$. Η διεπιφάνεια στη βάση της κάθε πλάκας αναπτύσσει τριβή με την υποκείμενη στρώση χαλικιού και έχει τη δυνατότητα αποχωρισμού. Το ίδιο συμβαίνει με τη διεπιφάνεια μεταξύ των κατακόρυφων τοιχωμάτων

γειτονικών πλακών. Στο βασικό σενάριο ανάλυσης, ο συντελεστής τριβής μεταξύ σκυροδέματος και χαλικιού λαμβάνεται 0.7, ενώ μεταξύ επιφανειών σκυροδέματος 0.5. Στο Στάδιο 2 η πλάκα φορτίζεται από το ίδιο βάρος, και επειδή η τριβή δεν επαρκεί, υποστηρίζεται στο κάτω μέρος της από την πλίνθο.

Στάδιο 3: Κατασκευάζεται επιχώμα στην επιφάνεια της πλάκας από υψόμετρο 625 m έως 680 m με μέγιστο πάχος 25 m στον πόδα της πλάκας (Σχ. 1a). Η κατασκευή του επιχώματος προσομοιώνεται επιβάλλοντας γραμμικά κατανεμημένες ορθές και διατμητικές τάσεις στην κεκλιμένη επιφάνεια κάθε πλάκας.

Στάδιο 4: Η βαρύτητα στο σώμα του φράγματος αυξάνεται από 94% στο 100% σε 10 βήματα με αποτέλεσμα την αύξηση των καθιζήσεων στην στέψη κατά 13.5 cm. Η καθίζηση αυτή είναι ίση με την καθίζηση που μετρήθηκε στη στέψη του φράγματος λόγω ερπυσμού της λιθορριπής. Στο Σχ. 4a δίδονται ισοτιμές καθιζήσεων εντός του επιχώματος μετά το τέλος των καθιζήσεων ερπυσμού. Η μέγιστη καθίζηση το μέσο του ύψους είναι 2.37 m.

Στάδιο 5: Η στάθμη του ύδατος ανέρχεται στο υψόμετρο 680 m σε 10 βήματα. Ταυτόχρονα οι τάσεις που ασκεί το βάρος του επιχώματος στο Στάδιο 4 μειώνονται λόγω ανώσεως.

Στάδιο 6: Η στάθμη του ύδατος ανέρχεται στο υψόμετρο 725 m σε 10 βήματα. 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.

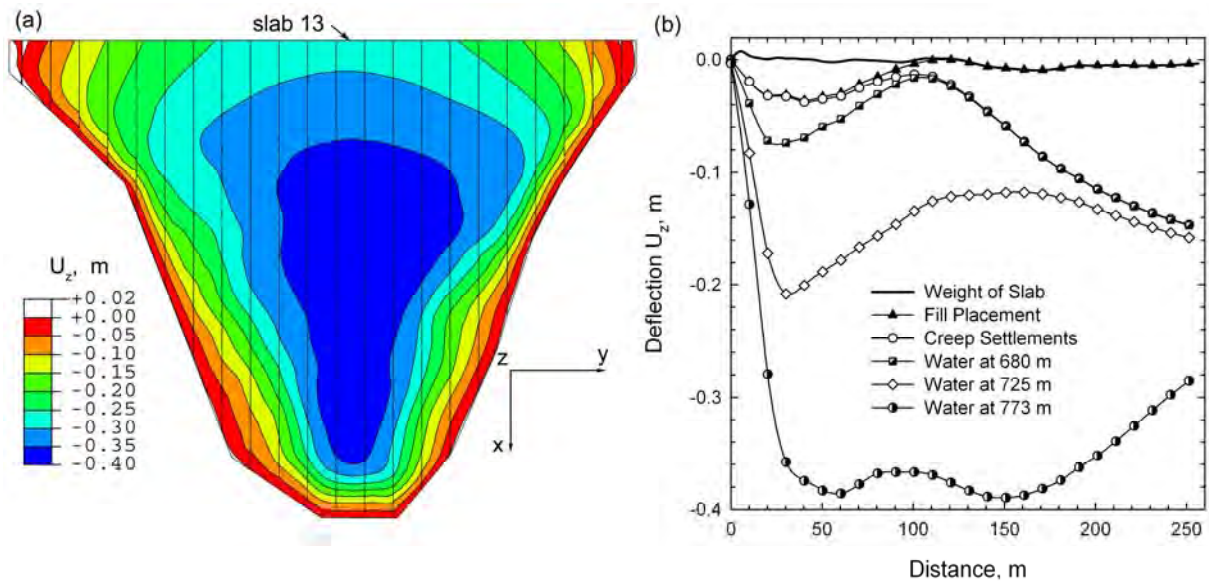
Στάδιο 7: Η στάθμη του ύδατος ανέρχεται στο υψόμετρο 773 m σε 10 βήματα.

Αποτελέσματα

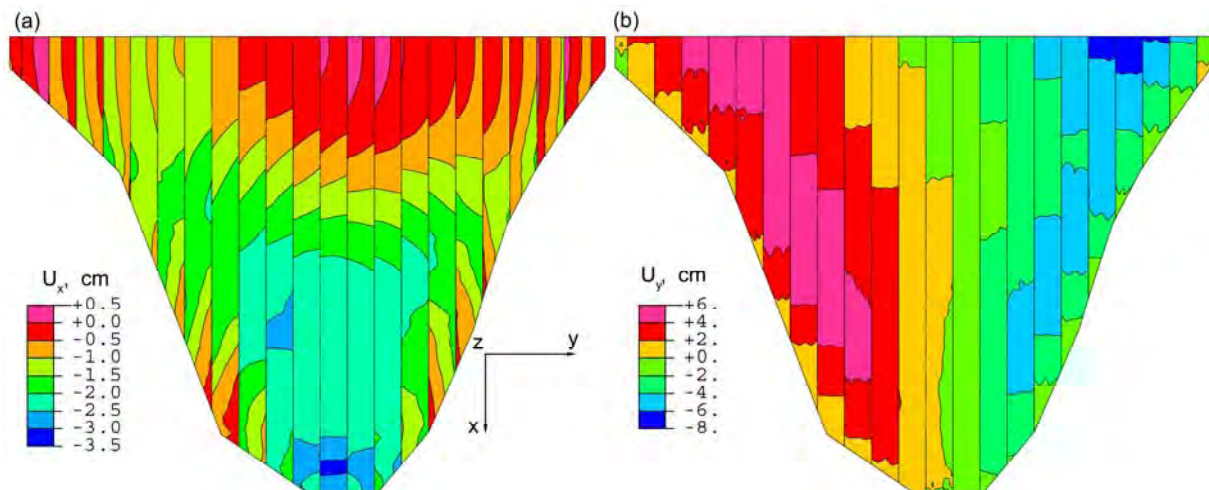
Το Σχ. 5a δίδει την βύθιση της πλάκας μετά την πλήρωση της λεκάνης στην στάθμη 773 m, ενώ το Σχ. 5b δίδει την κατανομή της βύθισης στην κεντρική πλάκα 13 ως προς την απόσταση από τον πόδα για διάφορα στάδια της φόρτισης. Μετά το τέλος του ερπυσμού η βύθιση στην στέψη είναι ≈ 15 cm. Μετά την τελική πλήρωση η μέγιστη βύθιση είναι 39 cm σε απόσταση 50 m και 150 m από τον πόδα της πλάκας.

Το Σχ. 6a παρουσιάζει την μετατόπιση της πλάκας στην κατεύθυνση X στο τοπικό σύστημα συντεταγμένων XYZ, μετά την πλήρωση της λεκάνης. Η μέγιστη μετατόπιση είναι ≈ 3.2 cm και λαμβάνει χώρα στον πόδα της πλάκας. Επομένως, το άνοιγμα του αρμού είναι μικρότερο του ορίου των 10 cm για διατήρηση της στεγανότητας κατά μήκος της πλίνθου. Κατά την διάρκεια της πλήρωσης η πλάκα τείνει να κινηθεί προς την στέψη λόγω παραμόρφωσης της λιθορριπής. Στο τελικό στάδιο η πλάκα 13 υφίσταται βράχυνση κατά 3 cm στην κατεύθυνση X με μέση θλιπτική παραμόρφωση $\varepsilon_x \approx 0.01\%$.

Το Σχ. 6b παρουσιάζει την μετατόπιση της πλάκας στην κατεύθυνση Y. Λόγω της παραμόρφωσης της υποκείμενης λιθορριπής, οι πλάκες μετατοπίζονται προς την κεντρική διατομή με μέγιστη μετατόπιση ≈ 7.2 cm. Η μετατόπιση αυτή δημιουργεί θλιπτικές τάσεις στα κατακόρυφα τοιχώματα γειτονικών πλακών στην κεντρική περιοχή.



Σχήμα 5. (a) Βύθιση της πλάκας μετά την πλήρωση της λεκάνης στην στάθμη 773 m. (b) Βύθιση της πλάκας 13 ως προς την απόσταση από τον πόδα για διάφορα στάδια φόρτισης.

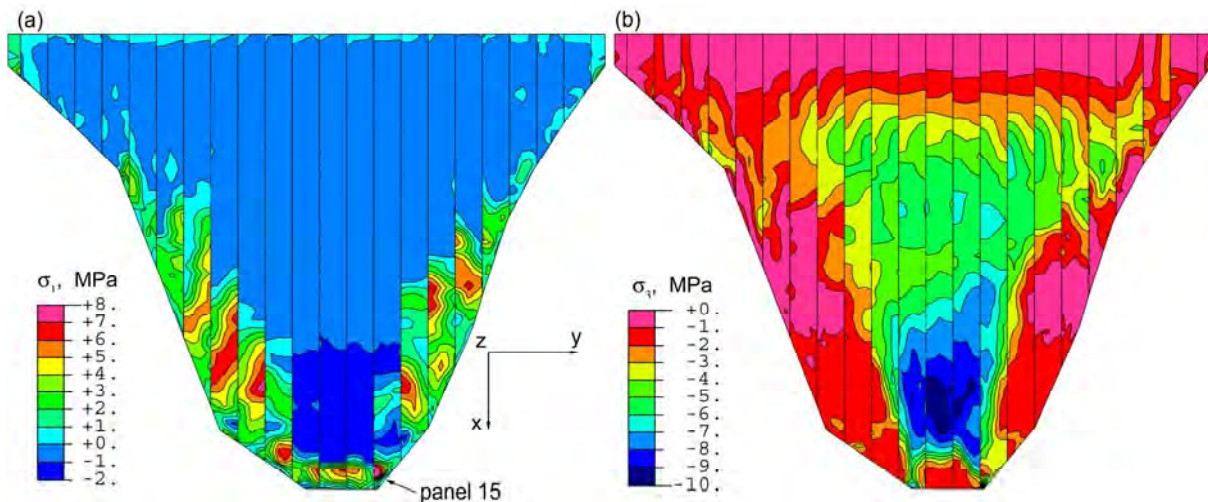


Σχήμα 6. Μετατόπιση της πλάκας μετά την πλήρωση της λεκάνης στην στάθμη 773 m: (a) στην κατεύθυνση X και (b) στην κατεύθυνση Y.

Το Σχ. 7α παρουσιάζει την κατανομή της μέγιστης κύριας τάσης σ_1 στην άνω επιφάνεια της πλάκας μετά την πλήρωση της λεκάνης (η σ_1 επηρεάζεται κυρίως από την τάση σ_x). Όπως φαίνεται στο σχήμα, δημιουργούνται δύο ζώνες εφελκυσμού πλάτους περίπου 35 m παράλληλα με την πλίνθο με μέγιστες εφελκυστικές τάσεις ≈ 8 MPa, δηλ. μεγαλύτερες από την αντοχή του σκυροδέματος σε εφελκυσμό ($\approx 3-4$ MPa). Η παρουσία των ζωνών εφελκυσμού συμφωνεί με τις καταγραφές παρόμοιων ζωνών πλάτους 10–20 m στις οποίες παρουσιάζονται ρωγμές, όπως π.χ. στα φράγματα Χιγρό, Ιτά και Ιταρεβί (Marques Filho & Pinto 2005). Επίσης, οι κατευθύνσεις της μέγιστης κύριας τάσης είναι σε ποιοτική συμφωνία (δηλαδή κάθετες) με τις κατευθύνσεις των ρωγμών που παρατηρήθηκαν στην ζώνη εφελκυσμού των φραγμάτων Χιγρό, Ιτά, Ιταρεβί, κλπ. Η εμφάνιση της ζώνης εφελκυσμού συνδέεται κυρίως με την απότομη αλλαγής κλίσης της επιφάνειας του αντερείσματος, αλλά μπορεί να επιδεινωθεί στην περίπτωση λιθορριπής με μικρή δυσκαμψία στην ανάντη ζώνη.

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

Το Σχ. 7b παρουσιάζει τη κατανομή της ελάχιστης κύριας τάσης σ_3 , η οποία επηρεάζεται κυρίως από την τάση σ_y . Η μέγιστη θλίψη αναπτύσσεται σε μία περιοχή με κέντρο περίπου στο 1/5 του ύψους του φράγματος από τον πόδα. Στην περιοχή αυτή η μέγιστη τάση σ_y μεταξύ των γειτονικών πλακών είναι ≈ -10 MPa, δηλαδή αρκετά μικρότερη της αντοχής σε θλίψη (≈ -21 MPa).



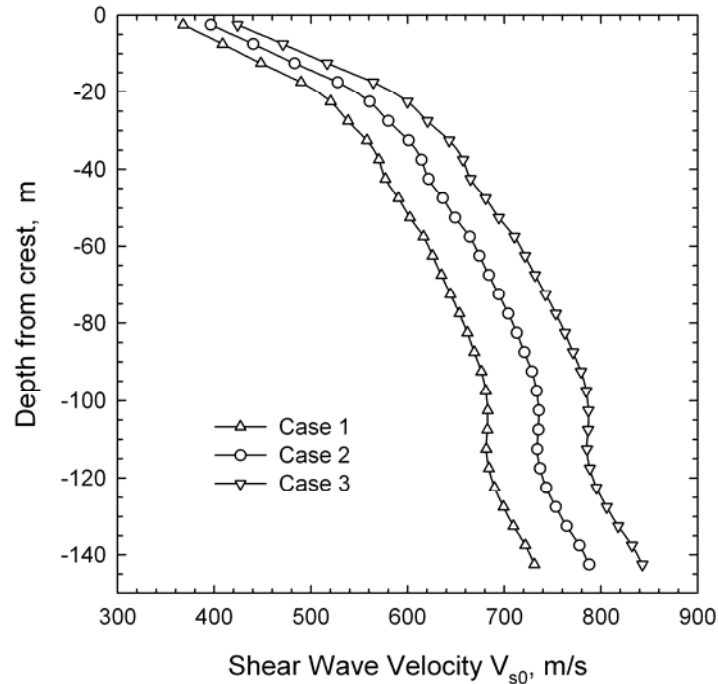
Σχήμα 7. (α) Μέγιστη κύρια τάση σ_1 και (β) ελάχιστη κύρια τάση σ_3 της πλάκας μετά την πλήρωση της λεκάνης στην στάθμη 773 m.

Αξίζει να σημειωθεί ότι η παρουσία της αρκετά στενής κοιλάδας (το εμβαδό της πλάκας προς το τετράγωνο του ύψους A/H^2 είναι 2.3) έχει ιδιαίτερα θετικό αποτέλεσμα στην αύξηση της δυσκαμψίας του φράγματος, και συνεπώς την μείωση των καθιζήσεων και της προς κατόπι μετατόπισης της λιθορριπής και της πλάκας. Όμως οι διαφορικές καθιζήσεις της λιθορριπής κατά μήκος του άξονα του φράγματος δημιουργούν αυξημένες θλιπτικές τάσεις μεταξύ των κατακόρυφων τοιχωμάτων των πλακών, όπως φαίνεται στο Σχ. 7b, κάτι που δεν παρουσιάζεται σε φράγματα κατασκευασμένα σε ευρείες κοιλάδες. Σε περίπτωση αυξημένης συμπίεσής της λιθορριπής, οι θλιπτικές αυτές τάσεις είναι δυνατόν να είναι πολύ σημαντικές.

ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

Λόγω της έλλειψης πραγματικών μετρήσεων της ταχύτητας των διαμηθικών κυμάτων V_{s0} καθ' ύψος του φράγματος, χρησιμοποιούνται τρία υποθετικά σενάρια με σκοπό την παραμετρική διερεύνηση της απόκρισης. Η ταχύτητα των διαμηθικών κυμάτων σε μικρές παραμορφώσεις προσδιορίζεται από την σχέση $V_{s0} = \sqrt{G_0/\rho}$, όπου η τιμή του G_0 προκύπτει από την Εξ. (8). Το Σενάριο 1 αντιπροσωπεύει ένα φράγμα μέτριας συμπύκνωσης της

λιθορριπής, το Σενάριο 2 ένα φράγμα καλής συμπύκνωσης και το Σενάριο 3 ένα φράγμα πολύ καλής συμπύκνωσης. Οι σταθερές A , r της Εξ. (8) δίδονται στον Πίνακα 1 για τα τρία σενάρια. Στο Σχ. 8 δίδονται οι κατανομές της V_{s0} ως προς την απόσταση από την στέψη στον άξονα της κεντρικής διατομής για τα τρία σενάρια. Εκτιμάται ότι το φράγμα της Μεσοχώρας έχει μία κατανομή της V_{s0} που πλησιάζει το Σενάριο 2.



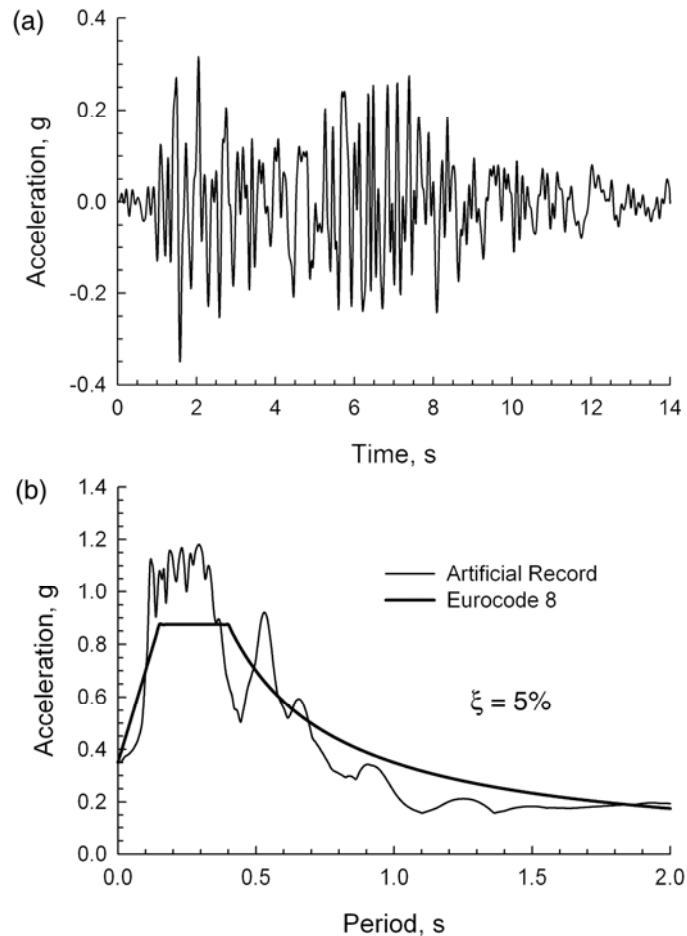
Σχήμα 8. Μεταβολή της ταχύτητας διατμητικών κυμάτων V_{s0} σε μικρές παραμορφώσεις ως προς την απόσταση από την στέψη για τρία σενάρια διαφορετικής συμπύκνωσης των υλικών λιθορριπής.

Η εργασία αυτή θεωρεί ότι ο σεισμός σχεδιασμού έχει μέγεθος $M = 6.5$ και η μέγιστη επιτάχυνση στην ελεύθερη επιφάνεια του βράχου ίση προς $0.35g$. Δεδομένου ότι ο βράχος της κοιλάδας είναι υγιής, για την δυναμική ανάλυση του φράγματος χρησιμοποιούνται καταγραφές με σχετικά υψηλό συχνοτικό περιεχόμενο, παρόμοιο με αυτό των καταγραφών σε βράχο. Λόγω ελλείψεως χώρου, παρουσιάζονται αποτελέσματα από την δυσμενέστερη ανάλυση, η οποία αντιστοιχεί σε διέγερση με ένα τεχνητό επιταχυνσιογράφημα που προσεγγίζει σε κάποιο βαθμό το φάσμα του σεισμού σχεδιασμού για βραχώδες έδαφος του Ευροκώδικα 8. Το Σχ. 9a παρουσιάζει την σεισμική διέγερση και το Σχ. 9b το φάσμα απόκρισης και το φάσμα του σεισμού σχεδιασμού για βραχώδες έδαφος του Ευροκώδικα 8 για λόγο απόσβεσης $\xi = 5\%$. Η διέγερση επιβάλλεται μόνο στη οριζόντια ανάντη – κατάντη κατεύθυνση. Ο βράχος της κοιλάδας θεωρείται άκαμπτος και αγνοούνται τα υδροδυναμικά φαινόμενα.

Αποτελέσματα

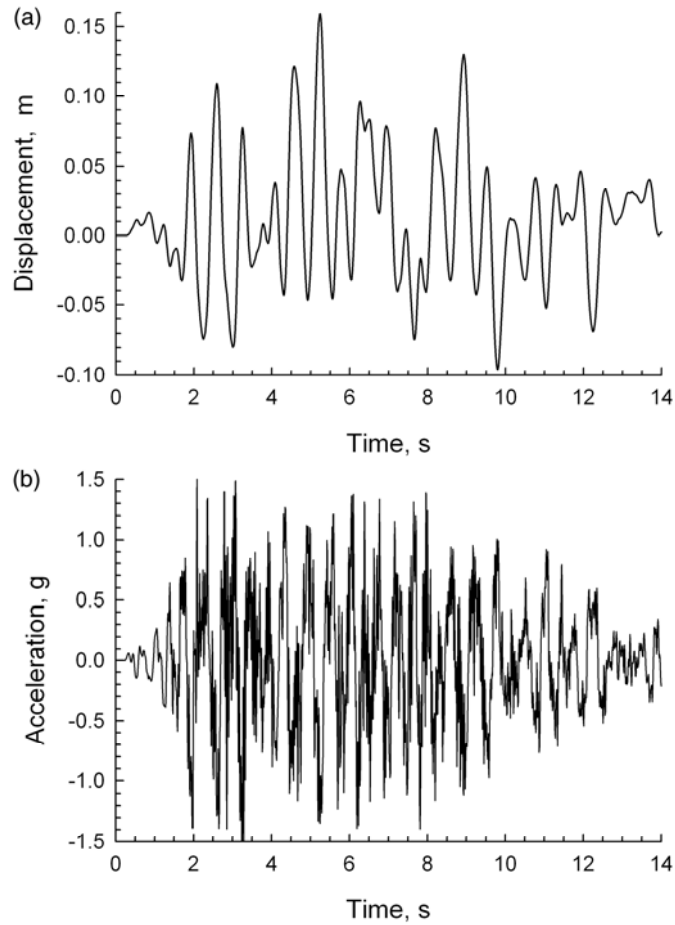
Το Σχ. 10 παρουσιάζει την οριζόντια μετατόπιση και επιτάχυνση στο μέσο της στέψης για το Σενάριο 2. Η μέγιστη μετατόπιση είναι ≈ 16 cm και η μέγιστη επιτάχυνση ≈ 1.54 g. Οι μέγιστες επιταχύνσεις για τα Σενάρια 1 και 3 είναι 1.50 g και 1.63 g αντίστοιχα. Αυτές οι

αρκετά υψηλές επιταχύνσεις στο μέσο της στέψης δημιουργούνται από την «εστίαση» των σεισμικών κυμάτων στην περιοχή αυτή (Gazetas & Dakoulas 1992, Dakoulas 1993, 1995, Mejia & Seed 1982). Σημειώνεται ότι κατά τον σεισμό της 12 Μαΐου, 2008 έχουν καταγραφεί ακόμη μεγαλύτερες επιταχύνσεις στο φράγμα Ziripgru. Παρά την υψηλή τιμή, οι επιταχύνσεις αυτές όταν ενεργούν για ένα πάρα πολύ μικρό χρονικό διάστημα δεν επηρεάζουν την ευστάθεια του φράγματος. Αποτελέσματα από άλλες σεισμικές διεγέρσεις με ιστορικές καταγραφές από βραχώδεις περιοχές έδωσαν μετατοπίσεις μεταξύ 0.1-0.16 m, διατμητικές παραμορφώσεις μεταξύ 0.1% - 0.15% και μέγιστες επιταχύνσεις μεταξύ 1g-1.7g.

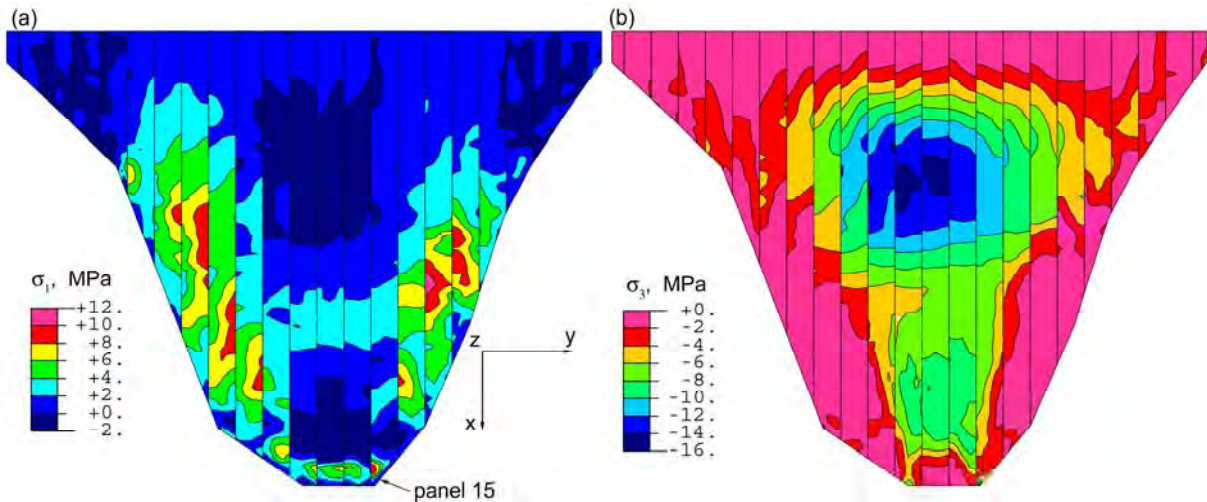


Σχήμα 9. (a) Τεχνητή σεισμική διέγερση (b) Φάσματα επιτάχυνσης της διέγερσης και του Ευροκώδικα 8 για βράχο.

Το Σχ. 11a παρουσιάζει την μέγιστη κύρια τάση της πλάκας σκυροδέματος για το Σενάριο 2 την χρονική στιγμή ($t = 2.90$ s) κατά την οποία η πλάκα υφίσταται μέγιστο εφελκυσμό. Οι μέγιστες εφελκυστικές τάσεις είναι περίπου 50% υψηλότερες από εκείνες της στατικής ανάλυσης και αναπτύσσονται στην ίδια ζώνη πλάτους ≈ 35 m παράλληλα με την πλίνθο. Σημειώνεται ότι με αύξηση της δυσκαμψίας της λιθορριπής (Σενάριο 3) οι εφελκυστικές τάσεις μειώνονται. Το Σχ. 11b παρουσιάζει την ελάχιστη κύρια τάση της πλάκας για το Σενάριο 2 την χρονική στιγμή ($t = 2.54$ s) κατά την οποία η πλάκα υφίσταται μέγιστη θλίψη. Η μέγιστη θλίψη έχει τιμή -16 MPa και αναπτύσσεται σε μία ζώνη με κέντρο στα 2/3 του ύψους του φράγματος.



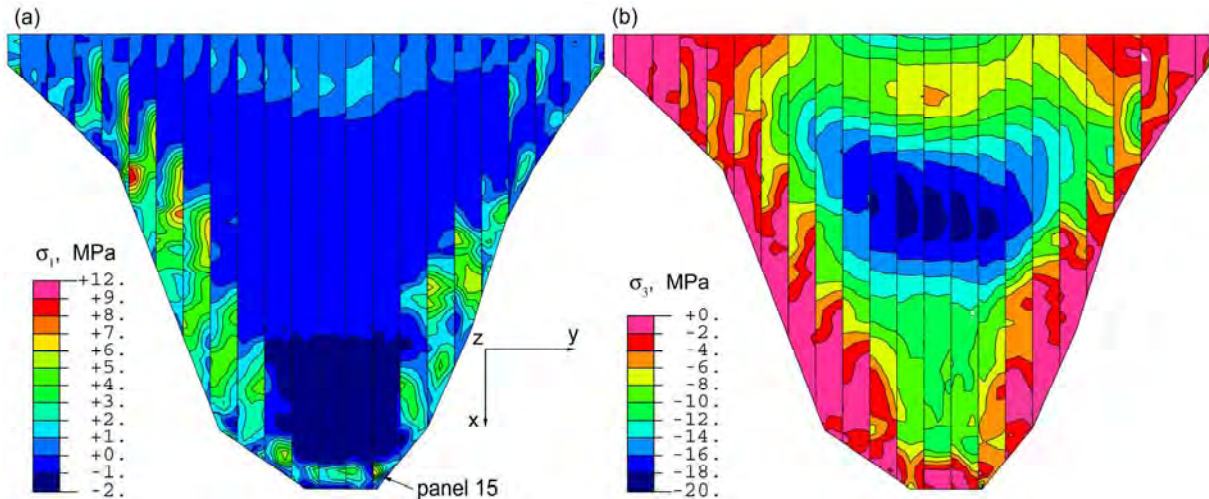
Σχήμα 10. Σενάριο λιθορριπής 2: (α) Οριζόντια μετατόπιση και (β) επιτάχυνση στο μέσο της στέψης του φράγματος



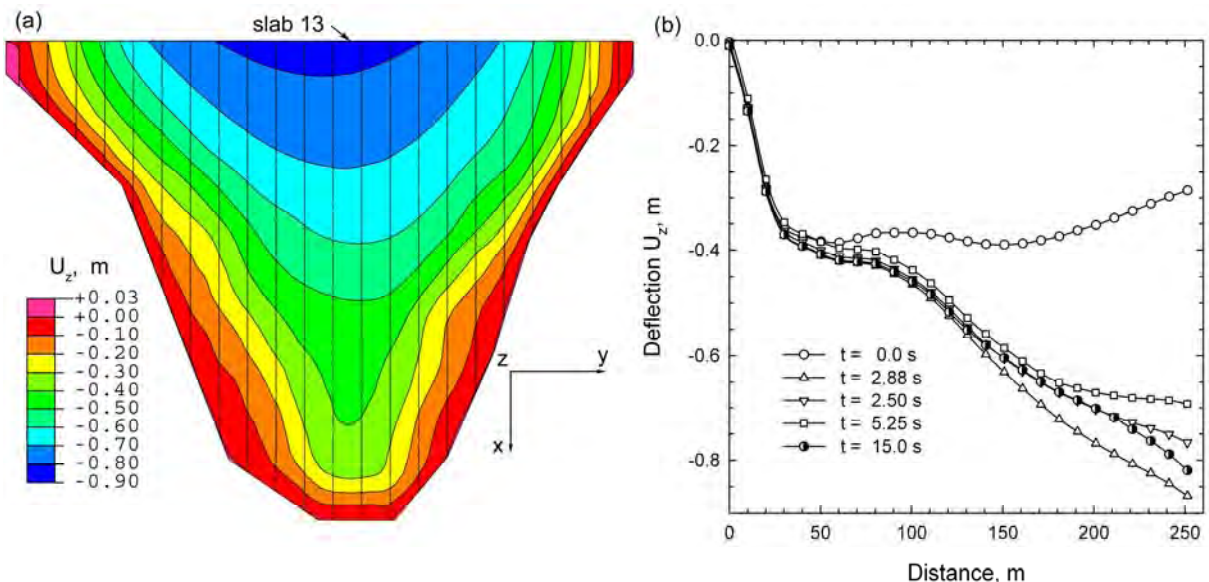
Σχήμα 11. Σενάριο λιθορριπής 2 – Κύριες τάσεις της πλάκας σκυροδέματος: (α) Μέγιστη κύρια τάση σ_1 την χρονική στιγμή $t = 2.90$ s και (β) ελάχιστη κύρια τάση σ_3 την χρονική στιγμή $t = 2.54$ s.

Τα αποτελέσματα του Σχ. 11 υπολογίσθηκαν θεωρώντας ότι κατά τον σεισμό δεν δημιουργείται δυναμική συνίζηση. Μία ισχυρή σεισμική δόνηση είναι δυνατόν να προκαλέσει δυναμική συνίζηση, όπως στην περίπτωση του φράγματος Cogoti (Χιλή), ύψους 85 m, το οποίο κατά

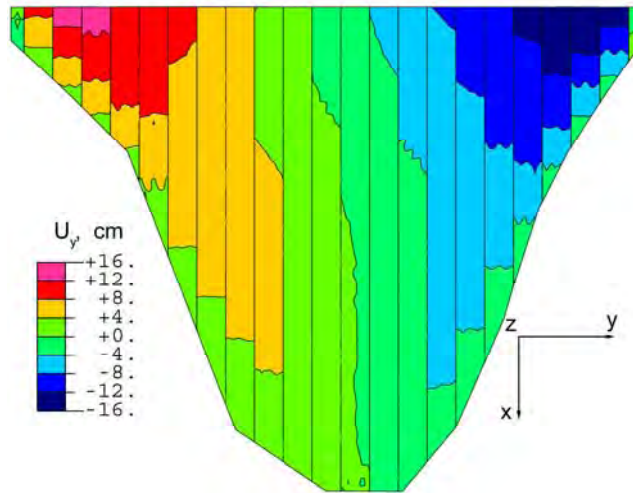
τον σεισμό Illapel του 1943 υπέστη συνίζηση στην στέψη ≈ 40 cm. Παρομοίως, το φράγμα Ziringru κατά τον σεισμό της 12 Μαΐου, 2008 υπέστη συνίζηση στη στέψη μεταξύ 50 και 70 cm. Γενικά εκτιμάται ότι ένα υψηλό φράγμα λιθορριπής με ανάντη πλάκα σκυροδέματος είναι πιθανό να υποστεί μέγιστη δυναμική συνίζηση μεταξύ 0.5 m και 1m (Wieland 2007).



Σχήμα 12. Σενάριο λιθορριπής 2 με δυναμική συνίζηση 50 cm: Κύριες τάσεις της πλάκας σκυροδέματος: (α) Μέγιστη κύρια τάση σ_1 την χρονική στιγμή $t = 2.88$ s και (β) ελάχιστη κύρια τάση σ_3 την χρονική στιγμή $t = 2.50$ s.



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



Σχήμα 14. Σενάριο λιθορριπής 2 με δυναμική συνίζηση 50 cm: Μετατόπιση της πλάκας στην κατεύθυνση Y μετά την σεισμική δόνηση.

Το Σχ. 12a παρουσιάζει την μέγιστη κύρια τάση στην πλάκα την χρονική στιγμή ($t = 2.88$ s) κατά την οποία η πλάκα υφίσταται μέγιστο εφελκυσμό. Σε σύγκριση με τα αποτελέσματα του Σχ. 11a όπου δεν θεωρείται δυναμική συνίζηση, τα αποτελέσματα με συνίζηση 50 cm οδηγούν σε μείωση των εφελκυστικών τάσεων. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η αύξηση της καθίζησης της λιθορριπής όλης της διατομής του φράγματος, μέσω των σημαντικών δυνάμεων τριβής μεταξύ πλάκας και χαλικιού, μεταφέρει θλιπτικές τάσεις ή μειώνει τις εφελκυστικές τάσεις στην πλάκα. (Σημειώνεται ότι αν, παράλληλα με την καθίζηση, υπάρχει και σημαντική κατάντη μετατόπιση της λιθορριπής, τότε ο εφελκυσμός στην πλάκα είναι δυνατόν να αυξηθεί). Το Σχ. 12b παρουσιάζει την ελάχιστη κύρια τάση σ_3 την χρονική στιγμή ($t = 2.50$ s) της μέγιστης θλίψης. Οι μέγιστες θλιπτικές τάσεις πλησιάζουν την τιμή των -20 MPa στην κεντρική περιοχή της πλάκας. Η μεγάλη τιμή των θλιπτικών τάσεων οφείλεται το γεγονός ότι το φράγμα διεγείρεται με μία αρκετά ισχυρή σεισμική δόνηση, όπως φαίνεται από το φάσμα απόκρισης, σε συνδυασμό με μία αρκετά δυσμενή παραδοχή δυναμικής συνίζησης.

Το Σχ. 13a παρουσιάζει την κατανομή της βύθισης της πλάκας σκυροδέματος κατά το τέλος της σεισμικής δόνησης. Η βύθιση της πλάκας 13 σε διάφορες χρονικές στιγμές κατά την διάρκεια της δόνησης δίδεται στο Σχ. 13b. Παρατηρείται ότι η βύθιση στην στέψη είναι 0.28 m πριν την δόνηση και 0.82 m μετά την δόνηση. Τέλος το Σχ. 14 παρουσιάζει την μετατόπιση των πλακών στην κατεύθυνση Y, η οποία αυξάνει σημαντικά από περίπου 7 cm πριν την δόνηση σε 16 cm μετά την δόνηση. Λόγω της κατανομής αυτών των μετατοπίσεων σε αρκετές πλάκες, αλλά και της μετατόπισης της υποκείμενης λιθορριπής και του προστατευτικού συστήματος στεγανότητας του αρμού, δεν αναμένονται απώλειες ύδατος μέσω των αρμών. Τέλος, σημειώνεται ότι οι μετατοπίσεις των πλακών στη κατεύθυνση X παραμένουν μικρότερες των 5 cm σε κάθε περίπτωση, και συνεπώς δεν αναμένονται διαρροές στον περιμετρικό αρμό της πλίνθου.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα ακόλουθα συμπεράσματα προκύπτουν από την παρούσα εργασία:

1. Η προτεινόμενη μεθοδολογία για 3D μη-γραμμική αριθμητική ανάλυση φραγμάτων λιθορριπής με ανάντη πλάκα σκυροδέματος παρέχει ένα ισχυρό υπολογιστικό εργαλείο για την ολοκληρωμένη προσομοίωση της σταδιακής κατασκευής, των φαινομένων ερπυσμού, της πλήρωσης της λεκάνης, και της σεισμικής απόκρισης του φράγματος, λαμβάνοντας υπόψη το φαινόμενο της δυναμικής συνίζησης.
2. Πέραν της συνολικής σεισμικής συμπεριφοράς του φράγματος, η προτεινόμενη μέθοδος παρέχει την δυνατότητα της λεπτομερούς εκτίμησης (α) των εφελκυστικών τάσεων στις πλάκες σκυροδέματος (β) των θλιπτικών τάσεων στις κατακόρυφες διεπιφάνειες επαφής μεταξύ των γειτονικών πλακών (γ) το άνοιγμα των αρμών.
3. Μία ρεαλιστική προσομοίωση της σταδιακής κατασκευής και πλήρωσης της λεκάνης φράγματος λιθορριπής με ανάντη πλάκα σκυροδέματος είναι δυνατόν να πραγματοποιηθεί με βάση μετρήσεις των καθιζήσεων της κεντρικής διατομής, κατά προτίμηση σε τρία σημεία: την στέψη, το μέσο του ανάντη πρανού και το μέσο του κατόντη πρανού. Για την σεισμική ανάλυση, είναι απαραίτητη η μέτρηση της κατανομής της ταχύτητας των διατμητικών κυμάτων καθ' ύψος του φράγματος.
4. Για το φράγμα που εξετάστηκε, αναπτύσσεται μία ζώνη εφελκυσμού παράλληλη με την πλίνθο πλάτους περίπου 35 m κατά την πλήρωση της λεκάνης. Η ζώνη εφελκυσμού συνδέεται με την απότομη αλλαγή της κλίσης του αντερείσματος, και μπορεί να επιδεινωθεί από την χαμηλή δυσκαμψία της λιθορριπής στην ανάντη ζώνη. Παρόμοια ζώνη εφελκυσμού σε φράγματα με χαμηλή δυσκαμψία της λιθορριπής στην ανάντη ζώνη καταγράφηκε στα φράγματα Xingó, Itá και Itapebi. Η μέγιστη εφελκυστική τάση υπό στατικές συνθήκες φόρτισης είναι 8 MPa και υπό σεισμική δόνηση 12 MPa.
5. Κατά την πλήρωση της λεκάνης, αναπτύσσεται μία ζώνη θλίψης στις κεντρικές πλάκες με μέγιστη τιμή ίση προς -10 MPa, σε ύψος ίσο περίπου με το 1/5 του ύψους του φράγματος (από τον πόδα της πλάκας). Κατά την σεισμική δόνηση, αν δεν υπάρξει δυναμική συνίζηση, η μέγιστη θλιπτική τάση είναι -16 MPa. Για δυναμική συνίζηση 50 cm στην στέψη, η μέγιστη θλίψη προσεγγίζει την τιμή των -20 MPa.
6. Η μέγιστη οριζόντια μετατόπιση των πλακών στην κατά μήκος του φράγματος κατεύθυνση είναι 7 cm κατά την πλήρωση της λεκάνης και 16 cm μετά την σεισμική δόνηση με συνίζηση 50 cm. Λόγω της κατανομής των μετατοπίσεων αυτών, δεν αναμένονται διαρροές ύδατος από τους κατακόρυφους αρμούς. Η μέγιστη μετατόπιση των πλακών στην ανάντη – κατόντη κατεύθυνση είναι <5 cm, και συνεπώς δεν αναμένονται διαρροές ύδατος στον περιμετρικό αρμό της πλίνθου.
7. Παραμετρικές αναλύσεις κατέδειξαν ότι ο πλέον σημαντικός παράγοντας για την άριστη συμπεριφορά φράγματος υπό στατικές και δυναμικές συνθήκες είναι η

εξαιρετικής ποιότητας συμπύκνωση της λιθορριπής, η οποία εξασφαλίζει υψηλή δυσκαμψία.

8. Η στενότητα της κοιλάδας αυξάνει σημαντικά την δυσκαμψία του φράγματος για στατικές και δυναμικές συνθήκες. Συστηματικές συγκρίσεις αποτελεσμάτων από 2D και 3D αναλύσεις φραγμάτων σε στενές κοιλάδες κατέδειξαν ότι οι 2D αναλύσεις οδηγούν σε σημαντικά μεγαλύτερες βυθίσεις και εφελκυστικές τάσεις στην πλάκα σε σχέση με τις 3D αναλύσεις. Επίσης, η 2D ανάλυση αγνοεί πλήρως τις σημαντικές θλιπτικές τάσεις που είναι δυνατόν να αναπτυχθούν μεταξύ γειτονικών πλακών λόγω της 3D γεωμετρίας, η οποία επιβάλλει σημαντικές διαφορικές καθιζήσεις κατά μήκος του φράγματος. Επομένως, η χρήση 2D αναλύσεων σε στενές κοιλάδες είναι εντελώς ακατάλληλη και οδηγεί σε εσφαλμένο σχεδιασμό.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- ABAQUS (2007): *Users' Manual, Version 6.7*, Simulia, Providence, RI, USA.
- Abouseeda, H. and Dakoulas, P. (1998), Nonlinear Earth Dam - Foundation Interaction Using a BE-FE Method, *J. of Earthq. Engineering & Struct. Dynamics*, Vol. 27(12), 917-936.
- Dakoulas, P., Thanopoulos, Y., and Anastassopoulos, K. (2008), "Nonlinear 3D simulation of CFR dam construction and reservoir filling", *Int. Journal of Hydropower & Dams*, 2, 95-101.
- Dakoulas, P. (1993), "Response of Earth Dams in Semi-Cylindrical Valleys Subjected to Oblique SH Waves", *Journal of Engineering Mechanics, ASCE*, Vol. 119, No. 1, pp. 74-90.
- Dakoulas, P., and Hsu (1995), "Response of Earth Dams in Semi-Elliptical Canyons to Oblique SH Waves", *Journal of Engineering Mechanics, ASCE*, Vol. 120, 3, pp. 379-391.
- Dakoulas, P. and Abouseeda, H. (1997), "Response of Earth Dams to Rayleigh Waves Using a Coupled Finite Element - Boundary Element Method", *Journal of Engineering Mechanics, ASCE*, Vol. 123, No. 12, 1311-1320.
- Dakoulas, P., (2007). *Messochora CFR Dam: slab and dam performance during reservoir filling based on 3D nonlinear analysis*, Research Report, Dept. of Civil Engineering, University of Thessaly, Volos, Greece.
- Duncan J. M. and C. Y. Chang, 1970. Nonlinear analysis of stress and strain in soils, *J. of Soil Mech. And Found. Engineering*, ASCE, 96(5), 1629-1653.
- Duncan J. M. and Byrne, P, Wong, K. and Mabry P. (1980). *Strength, stress-strain and bulk modulus parameters for finite element analyses of stresses and movements in soil masses*, Report UCB/GT/80-01, University of California, Berkeley, CA, USA.
- Ebeling, R. M., Peters, R. F. and Clough G. (1992). *User's guide for the incremental construction soil-structure interaction program SOILSTRUCT*, Waterways Experiment Station, US Corps of Engineers, Technical Report ITL-90-6, 1992.
- Uddin, N. and Gazetas, G. (1995), Dynamic response of concrete-faced rockfill dams to strong seismic excitation, *Journal of Geotechnical Engineering*, 121(2), 185-197.
- Gazetas, G. and Dakoulas, P. (1992), "Seismic Analysis and Design of Rockfill Dams: State of the Art", *Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 11(1), pp. 27-61.
- Marques Filho, F. and Pinto N. de S., (2005). CFRD dam characteristics learned from experience, *Hydropower & Dams*, Issue 1, 72-78.
- Mejia, L.H. & Seed, H.B. (1983), Comparison of 2D and 3D analyses of earth dams, *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, 109(11), 1383-1398.
- Rollins, K., Evans, M., Diehl, N.B., Daily, W.D. (1998), Shear modulus and damping relations for gravel, *J. Geotechn. and Geoenvironm. Engineering, ASCE*, 124(5), 396-405
- Sherard, J.L. & Cooke, J.B. (1987), Concrete face rockfill dams: Assessment. *J. Geotechnical Engineering, ASCE*, 113(10), 1096-1112.
- Wieland, M. (2007), Seismic Performance of CFRDs, *Water Power & Dam Construction*, March.