

Δυναμική Ανάλυση και Σεισμική Συμπεριφορά Υψηλού Χωμάτινου Φράγματος

Dynamic Analysis and Seismic Response of a High Earthfill Dam

ΚΛΗΜΗΣ, Ν. Δρ Πολιτικός Μηχανικός, Κύριος Ερευνητής ΙΤΣΑΚ
ΑΝΑΣΤΑΣΙΑΔΗΣ, Α. Δρ Πολιτικός Μηχανικός, Κύριος Ερευνητής ΙΤΣΑΚ
ΜΑΚΡΑ, Κ. Δρ Πολιτικός Μηχανικός, Δόκιμος Ερευνητής ΙΤΣΑΚ
ΜΑΡΓΑΡΗΣ, Β. Δρ Σεισμολόγος, Κύριος Ερευνητής ΙΤΣΑΚ
ΠΑΠΑΙΩΑΝΝΟΥ, Χρ. Δρ Σεισμολόγος, Κύριος Ερευνητής ΙΤΣΑΚ
ΚΩΜΟΔΡΟΜΟΣ, Αιμ. Δρ Πολιτικός Μηχανικός, Επίκουρος Καθηγητής Π.Θ.
ΣΙΑΧΟΥ, Σ. M.Sc Πολιτικός Μηχανικός, ΔΑΥΕ / ΔΕΗ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται αποτελέσματα σεισμικής συμπεριφοράς ενός υψηλού χωμάτινου φράγματος με κεντρικό αργιλικό πυρήνα. Η δυναμική ανάλυση του φράγματος υλοποιείται με πεπερασμένα στοιχεία σε επίπεδη παραμόρφωση και προσομοίωση των υλικών ως ισοδύναμα γραμμικά υλικά με υστερητικού τύπου απόσβεση. Για τις αναλύσεις χρησιμοποιήθηκαν τέσσερις σεισμοί σχεδιασμού. Οι μόνιμες μετακινήσεις υπολογίζονται εκ των υστέρων και συνιστούν το βασικότερο κριτήριο βάσει του οποίου κρίνεται η σεισμική επάρκεια του φράγματος. Παρόλο που ο μη-συζευγμένος υπολογισμός των ανελαστικών μετακινήσεων είναι κατά τεκμήριο συντηρητικός, οι προκύπτουσες τιμές είναι αποδεκτές σύμφωνα με τα διεθνή κριτήρια.

ABSTRACT: Seismic behavior of a central clay core earthfill dam is presented in this paper. Dynamic analysis of the examined dam is based on a 2-D finite element mesh, where dam materials are simulated as equivalent linear materials with hysteretic type damping. Four seismic input motions have been used in the analysis. Anelastic displacements are calculated uncoupled to the aforementioned methodology and represent the basic criterion of seismic sufficiency for the examined dam. Despite the fact that decoupled analyses usually result in conservative estimates of anticipated displacements, the calculated values are acceptable according to international standards.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Αντικείμενο της παρούσης είναι η διερεύνηση της σεισμικής συμπεριφοράς και επάρκειας του χωμάτινου με κεντρικό αργιλικό πυρήνα φράγματος του Ιλαρίωνα με σειρά δυναμικών αναλύσεων στις κρίσιμότερες διατομές του. Στο αντικείμενο της δυναμικής μελέτης συμπεριλαμβάνεται ο υπολογισμός της μη-γραμμικής απόκρισης του φράγματος, των κορυφαίων επιταχύνσεων, των κορυφαίων ελαστικών μετατοπίσεων, των κορυφαίων ενεργών διατμητικών παραμορφώσεων, καθώς και ο εκ των υστέρων και μη συζευγμένος υπολογισμός των ανελαστικών μετακινήσεων με την επιβολή των σεισμικών φορτίων σχεδιασμού.

2. ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΕΡΓΟΥ

Πρόκειται για χωμάτινο φράγμα με κεντρικό

αργιλικό πυρήνα, μήκους 564m στη στέψη και μέγιστου ύψους 130m. Η κλίση των πρσανών του φράγματος στην ανάντη πλευρά είναι $u:\beta=1:2,25$ και στην κατόντη $u:\beta=1:2$. Η κλίση των πρσανών του πυρήνα είναι $u:\beta=5:1$. Το φράγμα εδράζεται κυρίως σε φυλλίτες, ενώ μικρό τμήμα του σε ασβεστολίθους. Μεταξύ των παραπάνω βραχωδών σχηματισμών, υπάρχει μεταβατική ζώνη η οποία οφείλεται στην επώθηση των ασβεστολίθων επί των φυλλιτών. Στο κεντρικό τμήμα του φράγματος (διατομή A-A'), το ανάντη τμήμα του φράγματος εδράζεται κατά το μεγαλύτερο τμήμα, επί αλλουβιακών αποθέσεων μεταβλητού πάχους έως 15m περίπου. Για την έδραση του φράγματος προηγούνται γενικές εκσκαφές έως και 10m περίπου, ενώ τοπικά στην περιοχή έδρασης του πυρήνα, το βάθος εκσκαφών φθάνει έως και 20m περίπου, ώστε να απομακρυνθούν οι πρόσφατες επιφανειακές ποταμοχειμάρειες αποθέσεις και ο

επιφανειακός μανδύας αποσάθρωσης κυρίως του φυλλιτικού υποβάθρου. Κουρτίνες τσιμεντένεσων εξασφαλίζουν τις απαιτούμενες συνθήκες μη - διαπερατότητας.

3. ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΤΟΥ ΕΡΓΟΥ

3.1 Δυναμικά χαρακτηριστικά υλικών κατασκευής και έδρασης

Για τις δυναμικές αναλύσεις σεισμικής απόκρισης του φράγματος απαιτείται αξιόπιστος προσδιορισμός των εδαφοδυναμικών χαρακτηριστικών των γεωυλικών κατασκευής και του υπεδάφους θεμελίωσης του φράγματος. Για το σκοπό αυτό πραγματοποιήθηκε εκτενής διερεύνηση η οποία περιελάμβανε τόσο επιτόπου όσο και εργαστηριακές δοκιμές. Ειδικότερα, πραγματοποιήθηκαν 3 δοκιμές Cross-Hole και 9 δοκιμές σεισμικής διάθλασης από το Εργαστήριο Γεωφυσικής του ΑΠΘ με σκοπό τον προσδιορισμό των ταχυτήτων διάδοσης των επιμήκων και διατμητικών κυμάτων (V_p , V_s) των βραχωδών σχηματισμών. Από την αξιολόγηση και το συνδυασμό των αποτελεσμάτων των επιτόπου δοκιμών προέκυψαν οι τιμές V_s σχεδιασμού και το πάχος και η διαστρωμάτωση των βραχωδών σχηματισμών (Πίνακας 1).

Οι εργαστηριακές δοκιμές πραγματοποιήθηκαν α) σε αργιλικά δείγματα του πυρήνα και β) αμμοχαλικώδη μείγματα για το σώμα στήριξης του φράγματος. Ειδικότερα, 6 αργιλικά δείγματα συντέθηκαν και συμπιέστηκαν σε πραγματικές εντατικές συνθήκες μετά την κατασκευή του φράγματος. Τρία από τα δείγματα αυτά δοκιμάστηκαν στη συσκευή στήλης συντονισμού (RC) για τον προσδιορισμό του μέγιστου μέτρου διάτμησης και της μεταβολής του όπως επίσης και της απόσβεσης με τη διατμητική παραμόρφωση. Επιπροσθέτως, 6 αμμοχαλικώδη δείγματα συντέθηκαν και δοκιμάστηκαν στη συσκευή κυκλικής τριαξονικής φόρτισης (CTX) για τον προσδιορισμό της αντίστασής τους σε ρευστοποίηση. Τα δείγματα αυτά είναι αντιπροσωπευτικά του υλικού κατασκευής του σώματος του φράγματος με μόνη διαφορά την αφαίρεση των μεγαλύτερων από 19mm κόκκων. Η διαδικασία της δοκιμής περιελάμβανε υψηλή συμπύκνωση ($D_r=87-89\%$, $e=0,22-$

$0,23$) και μεγάλο αριθμό κύκλων φόρτισης-αποφόρτισης ($N=200$). Κατά τη διάρκεια της δοκιμής, δεν παρατηρήθηκε ρευστοποίηση για αυτή την σχετική πυκνότητα. Ωστόσο για την περίπτωση του αμμοχαλικώδους υλικού στην ανάντη πλευρά του φράγματος (κορεσμένο και στην περίπτωση αστράγγιστων συνθηκών), για μέση ενεργό ορθή τάση $\sigma'_0 = 200\text{KPa}$ και για το ακραίο σεισμικό σενάριο $M=7,5$ που αντιστοιχεί σε 15 κύκλους φόρτισης-αποφόρτισης (Γκαζέτας, 1995) αναπτύχθηκε υπερπίεση του νερού των πόρων $\Delta u \cong 15\% \sigma'_0 = 30\text{KPa}$ (Xenaki & Athanasopoulos, 2004), πολύ χαμηλότερη του ορίου $\Delta u/\sigma'_0 = 60-70\%$ το οποίο θεωρείται βιβλιογραφικά ως κατώφλι για την εκδήλωση φαινομένων ρευστοποίησης (Das, 1993; Seed & Booker, 1997) και είχε ως αποτέλεσμα τη μείωση της γωνίας τριβής κατά τους ελέγχους ευστάθειας στο ανάντη αμμοχαλικώδες τμήμα του φράγματος. Στον Πίνακα 2, δίνονται η περιγραφή, οι σχέσεις μεταξύ του μέγιστου μέτρου διάτμησης με τη μέση ενεργό τάση που υιοθετήθηκαν για τα υλικά κατασκευής του φράγματος και των υποκείμενων αλλουβιακών αποθέσεων μετά την αξιολόγηση των εργαστηριακών αποτελεσμάτων με τη διαθέσιμη διεθνή βιβλιογραφία. Σημειώνεται ότι για την αποτίμηση του μέγιστου μέτρου διάτμησης, η αρχική κατάσταση των ενεργών τάσεων προσδιορίστηκε από μία στατική 2D αριθμητική ανάλυση η οποία έλαβε υπόψη τη σταδιακή κατασκευή του φράγματος και την άμεση πλήρωση του ταμιευτήρα. Η διακύμανση της ταχύτητας V_s στην κεντρική διατομή του φράγματος δίνεται στο Σχήμα 1, ενώ στα Σχήματα 2 έως 4 δίνονται η μεταβολή του αδιαστατοποιημένου μέτρου διάτμησης και του λόγου απόσβεσης συναρτήσει της διατμητικής παραμόρφωσης του αργιλικού πυρήνα, του υλικού σώματος και της λιθορριπής, καθώς και των λοιπών υλικών κατασκευής και έδρασης του φράγματος.

3.2 Σεισμολογικά στοιχεία

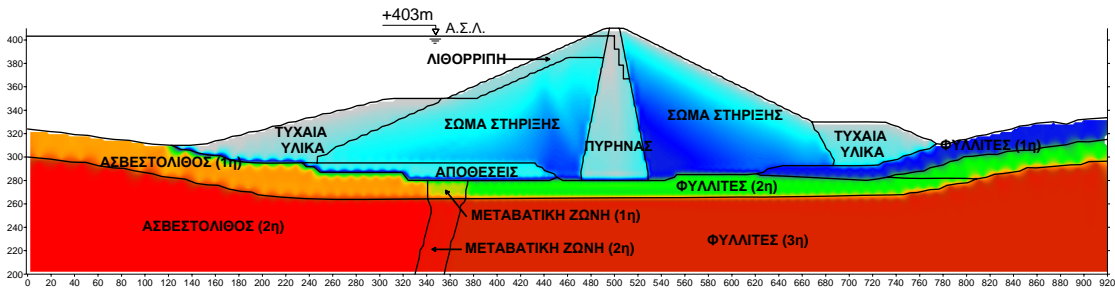
Σύμφωνα με τις πρόσφατες Ελβετικές Οδηγίες για τον αντισεισμικό σχεδιασμό φραγμάτων (Directives de l' OFEG, 2003), εδαφικά ή λι-

Πίνακας 1. Τιμές V_s σχεδιασμού, πάχος και διαστρωμάτωση των βραχωδών σχηματισμών
Table 1. Shear wave velocities and thicknesses of foundation rock formations of the dam

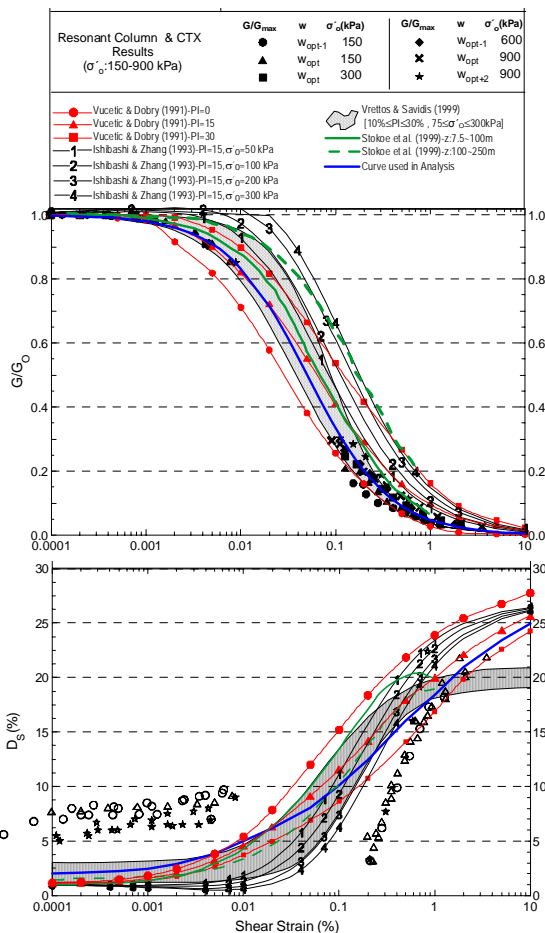
	Ασβεστόλιθοι		Μεταβατική ζώνη		Φυλλίτες	
	V_s (m/sec)	Πάχος (m)	V_s (m/sec)	Πάχος (m)	V_s (m/sec)	Πάχος (m)
1 ^η στρώση (επιφάνεια)	1700	25	1500	16-17	800	11-14
2 ^η στρώση	2400	υπόβαθρο	2300	υπόβαθρο	1300	14-21
3 ^η στρώση					2200	υπόβαθρο

Πίνακας 2. Περιγραφή και σχέσεις $G_0 = f(\sigma'_o)$ για τα υλικά κατασκευής και έδρασης του φράγματος
 Table 2. Soil description & shear modulus relationships for the construction materials of the dam

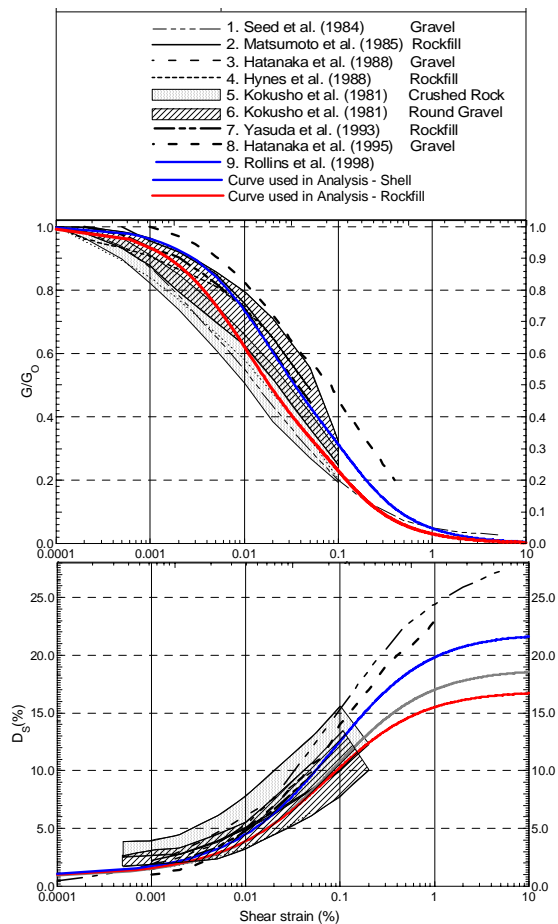
	Περιγραφή	$G_0 = f(\sigma'_o)$	Vs (m/sec)	
			Min	max
Πυρήνας	Χαμηλής πλαστικότητας αμμώδης άργιλος-αργιλοίλυσ (CL)	$G_0 = 7304\sigma'_o{}^{0.58}$	205	405
Σώμα	Καθαρό αμμοχάλικο (e=0,30)	$G_0 = 14.731\sigma'_o{}^{0.62}$	205	840
Λιθορριπή	Εξομοίωση με καθαρό αμμοχάλικο (e=0,40)	$G_0 = 12.255\sigma'_o{}^{0.62}$	270	380
Τυχαία Υλικά	Υλικά εκσκαφής από αποσπασμένους φυλλίτες (χαλικώδη υλικά με κροκάλες)	$G_0 = 15\sigma'_o{}^{0.50}$	185	400
Αποθέσεις	Ποτάμιες αλλουβιακές αποθέσεις	$G_0 = 17\sigma'_o{}^{0.50}$	350	520



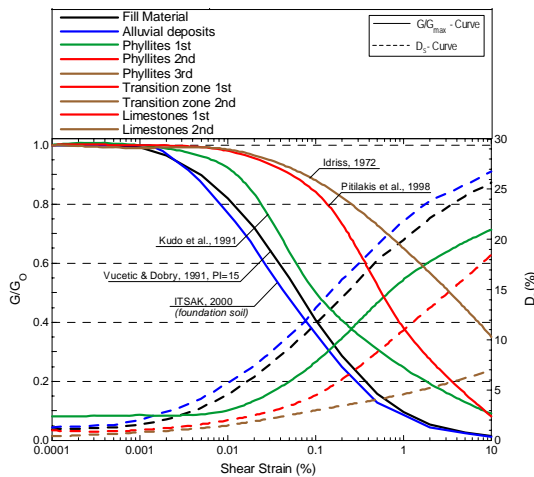
Σχήμα 1. Διακύμανση της ταχύτητας Vs στην κεντρική διατομή του φράγματος (A-A')
 Figure 1. Shear wave velocity distribution along the main cross-section of the dam



Σχήμα 2. Καμπύλες $G/G_0 - \gamma$ (αριστερά) & $D_s - \gamma$ (δεξιά) για το αργιλικό υλικό του πυρήνα
 Figure 2. $G/G_0 - \gamma$ (left) & $D_s - \gamma$ (right) curves for the clayey material of the dam core.



Σχήμα 3. Καμπύλες $G/G_0 - \gamma$ (αριστερά) & $D_s - \gamma$ (δεξιά) του υλικού σώματος και λιθορριπής
 Figure 3. $G/G_0 - \gamma$ (left) & $D_s - \gamma$ (right) curves for the dam shell and rockfill materials



Σχήμα 4. Καμπύλες G/G_0 - γ & D_s - γ για τα λοιπά υλικά κατασκευής και έδρασης του φράγματος.
Figure 4. G/G_0 - γ & D_s - γ curves for the rest materials of the dam and its foundation

θόρριπτα φράγματα ύψους μεγαλύτερου από 40m μελετώνται για σεισμούς με μέση περίοδο επανάληψης τα 10.000χρόνια (Finn et al. 1997; Design Standards N°13, 1999). Με βάση τις μελέτες σεισμικότητας και σεισμικής επικινδυνότητας της περιοχής, η μέση αναμενόμενη τιμή της κορυφαίας εδαφικής επιτάχυνσης για σεισμό με μέση περίοδο επανάληψης 10000 χρόνια σε συνθήκες επιφανειακής εκδήλωσης βράχου εκτιμάται σε 0,37g. Για τις ανάγκες της παρούσας μελέτης επιλέχθηκαν 4 πραγματικά επιταχυνσιογραφήματα (Πίνακας 3) που ικανοποιούν τα παρακάτω κριτήρια α) προέρχονται από σεισμούς παρόμοιου σεισμοτεκτονικού περιβάλλοντος β) καταγράφηκαν σε συνθήκες επιφανειακής εκδήλωσης βράχου (με εξαίρεση το Αίγιο) γ) καλύπτουν διαφορετικές επικεντρικές αποστάσεις (κοντινό, ενδιάμεσο και μακρινό πεδίο) και δ) το συχνотικό τους περιεχόμενο καλύπτει το φάσμα κατηγορίας A του EAK και του EC8 (Σχήμα 5). Τα επιταχυνσιογραφήματα αυτά τροποποιήθηκαν για κορυφαία τιμή εδαφικής επιτάχυνσης 0,37g.

4. ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗ

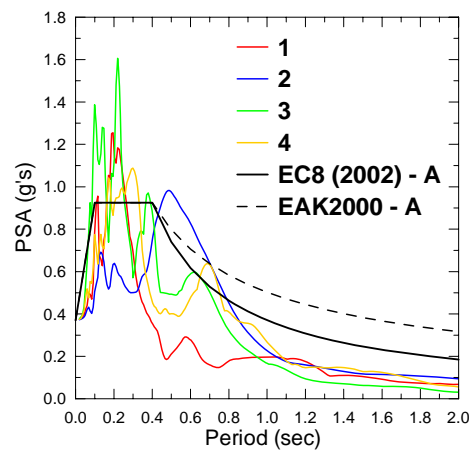
Οι διδιάστατες δυναμικές αναλύσεις πραγματοποιούνται για τις τιμές σχεδιασμού των υλικών

Πίνακας 3. Σεισμολογικές και άλλες πληροφορίες των επιλεγμένων επιταχυνσιογραφημάτων
Table 3. Seismological and site conditions information for the selected accelerograms

No	Σεισμός	Μέγεθος*	Επικεντρική Απόσταση(km)*	Σταθμός καταγραφής	Έδαφος*
1	Κοζάνη (950513)	M 6,6	20	Prefecture	βράχος
2	Αίγιο (950615)	M 6,4	22	OTE	αποσυνελιγμένο**
3	Valnerina (790919)	M 5,8	4	Cascia	βράχος
4	Montenegro (790415)	M 7,0	65	Herceg Novi – O.S.	βράχος

* European Strong Motion Database (Ambraseys et al., 2000)

** Προσωπική επικοινωνία (Καθ. Γ. Γκαζέτας)



Σχήμα 5. Σύγκριση φασμάτων απόκρισης καταγραφών με τα αντίστοιχα της κατηγορίας A των κανονισμών
Figure 5. Comparison of response spectra with those of soil type A proposed in EAK and EC8

κατασκευής και έδρασης του φράγματος. Πρόσθετη σειρά αναλύσεων με αύξηση της δυστημής των υλικών κατασκευής (κυρίως) και έδρασης (δευτερευόντως και σε μικρότερο βαθμό) πραγματοποιείται με σκοπό η προκύπτουσα θεμελιώδης ιδιοπερίοδος από τις διδιάστατες αναλύσεις να μειωθεί (περίπου 20%) προκειμένου να ληφθεί υπόψη η αυξημένη δυσκαμψία του φράγματος λόγω της επιρροής της γεωμετρίας της κοιλάδας και να προσδιορισθούν οι πιθανόν μεγαλύτερες τιμές των κορυφαίων εδαφικών επιταχύνσεων στο ανώτερο τμήμα του φράγματος (Vrymoed, 1981; Gazetas & Dakoulas, 1992; Boulanger et al., 1995; Jafarzadeh & Javaheri, 2002). Για λόγους πληρότητας της μελέτης και αντιμετώπισης των διαφόρων παραδοχών κατά την ανάλυση του προβλήματος, οι δυναμικές αναλύσεις «σχεδιασμού» συμπληρώθηκαν με πρόσθετες αναλύσεις στις οποίες γίνεται τεχνητή μείωση της συνολικής δυστημής των υλικών κατασκευής και έδρασης του φράγματος.

Η μεθοδολογία που ακολουθείται είναι η διδιάστατη ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία σε επίπεδη παραμόρφωση, με προσομοίωση της μη-γραμμικής συμπεριφοράς των υλικών ως "ισοδύναμα γραμμικά υλικά με υστερητικού τύπου απόσβεση" [TELDYN V1.34, 1984] η

οποία είναι συμβατή με τα αποτελέσματα των εργαστηριακών δοκιμών σε ό,τι αφορά τη συμπεριφορά τους σε ανακυκλική φόρτιση. Η ισοδύναμη γραμμική ανάλυση εκτελείται κατά τρόπο επαναληπτικό ώστε να επαναπροσδιορίζονται το συμβιβαστό με την υπολογισθείσα διατμητική παραμόρφωση $\gamma(\%)$ σε κάθε στοιχείο μέγιστο μέτρο διάτμησης G_0 και υστερητική απόσβεση D_s , σύμφωνα με το καθορισθέν κριτήριο σύγκλισης.

Η διακριτοποίηση του καννάβου γίνεται έτσι ώστε, η κατακόρυφη διάσταση των εδαφικών στοιχείων να είναι επαρκώς μικρότερη από το μέγιστο μήκος κύματος των κατακόρυφα διαδιδόμενων SH κυμάτων. Οι σεισμικές διεγέρσεις επιβάλλονται ως κατακόρυφα διαδιδόμενα SH κύματα ταυτόχρονα σε όλα τα σημεία της βάσης του προσομοιώματος, υπόθεση που συνιστά άλλωστε δυσμενή παραδοχή (Gazetas & Dakoulas, 1992).

Δυναμικές αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν για τρεις χαρακτηριστικές διατομές του φράγματος. Στην παρούσα παρουσιάζονται ενδεικτικά τα αποτελέσματα μόνο για την κεντρική διατομή A-A' η οποία αποτελεί την υψηλότερη διατομή (130m) του φράγματος (Anastasiadis et al., 2004). Στην περίπτωση των αναλύσεων με τις τιμές σχεδιασμού, παρατηρείται ότι για όλα τα σεισμικά σενάρια με δυσμενέστερο αυτό του Αιγίου (Σχήμα 6), το μεγαλύτερο τμήμα του φράγματος εμφανίζει επιταχύνσεις μεταξύ 0,2 και 0,3g. Ωστόσο, κορυφαίες τιμές έως και 1,2g παρατηρούνται επιφανειακά έως και σε μερικά μέτρα βάθος στα τυχαία υλικά σταθεροποίησης εξαιτίας χαμηλών συμπίεστικών τάσεων και εγγύς της στέψης εξαιτίας της εστίασης των σεισμικών κυμάτων. Συμβατή με τη διακύμανση των κορυφαίων επιταχύνσεων είναι και η διακύμανση των ενεργών παραμορφώσεων. Στο μεγαλύτερο τμήμα του φράγματος παρατηρούνται ενεργές παραμορφώσεις μικρότερες των 0,1% ενώ στις ίδιες ζώνες που περιγράφηκαν παραπάνω οι ενεργές τιμές των παραμορφώσεων φθάνουν τα 0,3% και τοπικά στο πυ-

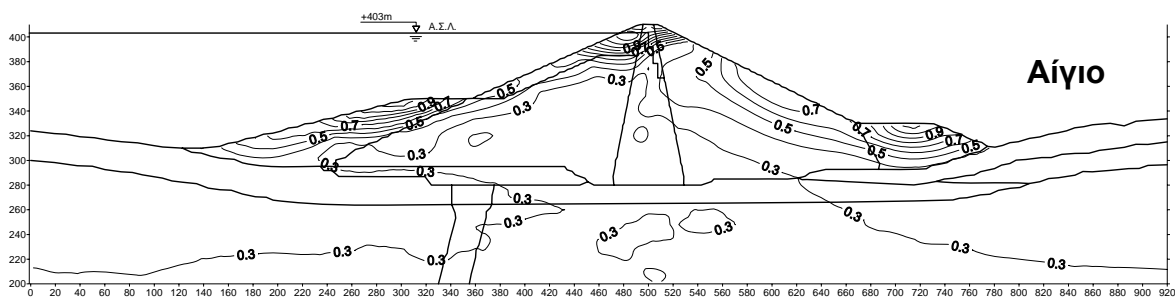
ρήνα του φράγματος φθάνουν το 1,0%.

Στον Πίνακα 4 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα για όλες τις εξεταζόμενες περιπτώσεις δυναμικής ανάλυσης ($G_{0,des}$, $G_{0,max}$, $G_{0,min}$). Συγκεκριμένα δίνονται η μέση περίοδος των καταγραφών εισαγωγής, T_m , σε σχέση με τη θεμελιώδη περίοδο της διατομής του φράγματος, T_s , και οι τιμές των κορυφαίων επιταχύνσεων και ελαστικών μετατοπίσεων στη στέψη και στη βάση του φράγματος. Παρατηρείται ότι οι μέγιστες τιμές των παραπάνω μεγεθών προκύπτουν για τη σεισμική διέγερση του Αιγίου ανεξαρτήτως των παραδοχών των παραμέτρων σχεδιασμού ($G_{0,des}$, $G_{0,max}$, $G_{0,min}$). Ο λόγος μεταξύ της θεμελιώδους περιόδου του φράγματος και της μέσης περιόδου της καταγραφής του Αιγίου κυμαίνεται μεταξύ 1,29 και 1,95, και συνεπώς είναι δυνατόν να προκύψουν φαινόμενα συντονισμού, αιτία η οποία μπορεί να εξηγήσει τις μεγάλες τιμές των εδαφικών αυτών παραμέτρων.

5. ΑΝΕΛΑΣΤΙΚΕΣ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΙΣ

Ανελαστικές μετακινήσεις συντελούνται μόνο εφόσον οι προκαλούμενες διατμητικές τάσεις επί των υποθετικών επιφανειών ολίσθησης υπερβαίνουν τη διατμητική αντοχή που υφίσταται επί των υπόψη επιφανειών. Η επιτάχυνση που οδηγεί σε οριακό συντελεστή ευστάθειας $F=1,0$ καλείται 'κρίσιμη επιτάχυνση ή επιτάχυνση διαρροής a_y '. Οι μόνιμες μετακινήσεις αποτελούν βασικό κριτήριο για τη σεισμική επάρκεια του φράγματος και στη συγκεκριμένη περίπτωση υπολογίζονται εκ των υστέρων τόσο με τη μεθοδολογία των Makdisi & Seed (1978), όσο και με τη μεθοδολογία του "ολισθαίνοντος" πρίσματος" (Newmark, 1965; Chopra, 1966), οι οποίες οδηγούν, στις περισσότερες περιπτώσεις χωμάτων ή λιθόρριπτων φραγμάτων σε συντηρητικό υπολογισμό των μόνιμων μετακινήσεων (Lin & Whitman 1986; Gazetas & Uddin 1994; Rathjé & Bray 1999).

Συνολικά εξετάστηκαν για τη διατομή A-A',



Σχήμα 6. Ισοτιμές της κορυφαίας επιτάχυνσης στη διατομή A-A' για το σεισμό Αιγίου (N^o2)
Figure 6. Contours of peak acceleration at the cross-section A-A' for Aegio earthquake (N^o2)

Πίνακας 4. Χαρακτηριστικά αποτελέσματα για τις εξεταζόμενες περιπτώσεις δυναμικής ανάλυσης $G_{o,des}$, $G_{o,max}$ & $G_{o,min}$.

Table 4. Characteristic results from the examined dynamic analyses ($G_{o,des}$, $G_{o,max}$ & $G_{o,min}$).

	Earthq No	T_m (sec)	T_s (sec)	T_s / T_m	$a_{m,cr}$ (g)	$a_{m,b}$ (g)	$a_{m,o}$ (g)	$a_{m,cr}/a_{m,b}$	$a_{m,cr}/a_{m,o}$	$d_{m,cr}$ (cm)	$d_{m,b}$ (cm)
$G_{o,des}$	1	0,283	0,839	2,97	0,69	0,22	0,37	3,14	1,86	9,4	2,4
	2	0,553		1,52	1,15	0,29	0,37	3,97	3,11	24,0	10,9
	3	0,269		3,12	0,85	0,25	0,37	3,40	2,30	8,4	3,2
	4	0,406		2,07	0,65	0,25	0,37	2,60	1,76	11,5	5,1
$G_{o,max}$	1	0,283	0,713	2,52	0,67	0,22	0,37	3,05	1,81	5,79	2,52
	2	0,553		1,29	1,29	0,29	0,37	4,45	3,49	21,62	8,12
	3	0,269		2,65	0,74	0,25	0,37	2,96	2,00	7,73	3,07
	4	0,406		1,76	0,78	0,25	0,37	3,12	2,11	11,04	3,94
$G_{o,min}$	1	0,283	1,076	3,80	0,42	0,23	0,37	1,83	1,14	9,59	2,27
	2	0,553		1,95	1,00	0,29	0,37	3,45	2,70	28,38	17,25
	3	0,269		4,00	0,55	0,26	0,37	2,12	1,49	7,04	3,18
	4	0,406		2,65	0,56	0,26	0,37	2,15	1,51	13,97	6,62

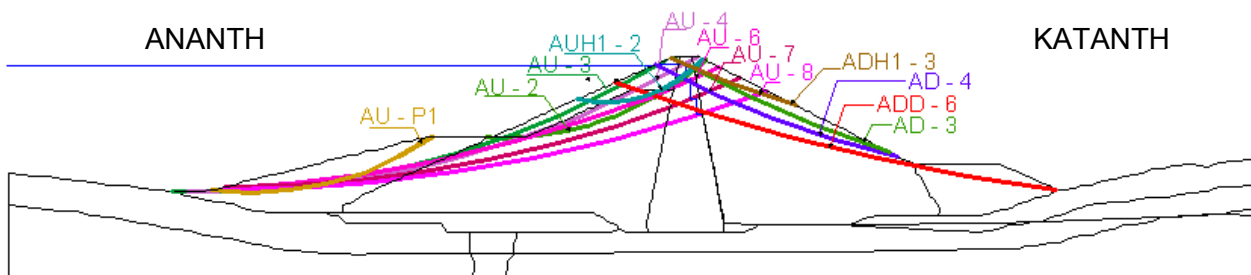
$a_{m,cr}$: κορυφαία επιτάχυνση στέψης $a_{m,b}$: κορυφαία επιτάχυνση βάσης $a_{m,o}$: κορυφαία επιτάχυνση εισαγωγής $d_{m,cr}$: κορυφαία ελαστική μετατόπιση στέψης $d_{m,b}$: κορυφαία ελαστική μετατόπιση βάσης

12 υποθετικές επιφάνειες (Σχήμα 7), καλύπτοντας κάθε είδος δυνητικών ολισθήσεων από επιδερμικές έως βαθιές, διερχόμενες σε σημαντικό βάθος από τη στέψη του φράγματος, καθώς επίσης και τοπικές ολισθήσεις (π.χ. σε αναβαθμούς). Η κρίσιμη επιτάχυνση a_y κυμαίνεται από 0,13g έως 0,25g στα ανάντη και από 0,27g έως 0,31g στα κατόντη. Υπολογίζοντας τη μέση ενεργή επιτάχυνση για κάθε δυνητική επιφάνεια ολίσθησης, προσδιορίζεται πλέον από τα νομογραφήματα των Makdisi & Seed (1978) ανά σεισμική διέγερση σχεδιασμού, η τιμή της μέγιστης αναμενόμενης μόνιμης μετακίνησης (Anastasiadis et al. 2004). Στον πίνακα 5 δίνονται οι τιμές των μόνιμων μετακινήσεων για κάθε σεισμικό σενάριο για όλες τις περιπτώσεις παραμέτρων σχεδιασμού.

Είναι φανερό ότι οι ανάντη επιφάνειες ολίσθησης παρουσιάζουν μεγαλύτερες μόνιμες μετακινήσεις από ότι οι κατόντη, γεγονός αναμενόμενο λαμβανομένων υπόψη των επιταχύνσεων που απαιτούνται για να προκληθεί ολίσθηση στις επιφάνειες αυτές. Επίσης, ανεξαρτήτως των παραδοχών στις παραμέτρους σχεδιασμού, οι μέγιστες ανελαστικές μετακινήσεις παρατηρούνται για τον σεισμό του Αιγίου

(No2). Η παρατήρηση αυτή είναι συμβατή με τα αποτελέσματα της δι-διάστατης ανάλυσης όπου αναδεικνύονται οι μέγιστες τιμές των κορυφαίων επιταχύνσεων. Οι επιφάνειες ολίσθησης AUH1-2, AU-2, AU-3, AU-4 και AU-6 παρουσιάζουν μεγάλες ανελαστικές μετακινήσεις (κατά μέσο όρο 33, 43, 52, 51 και 44 cm, αντίστοιχα). Η AU-3 είναι πολύ επιδερμική και διέρχεται μέσα από το λιθόρριπτο κάλυμα του σώματος του φράγματος μέχρι τον πόδα του, ενώ οι AUH1-2, AU-2, AU-4 και AU-6 διέρχονται μέσα από τον πυρήνα του φράγματος με τις AUH1-2 και AU-2 να έχουν τοπικό χαρακτήρα. Οι επιφάνειες ολίσθησης που διαπερνούν τον πυρήνα του φράγματος θεωρούνται ως κρισιμότερες για τη λειτουργικότητα και την ασφάλεια του φράγματος.

Πρόσθετοι υπολογισμοί πραγματοποιήθηκαν για τις κρισιμότερες επιφάνειες ολίσθησης βάσει του μέσου επιταχυνσιογραφήματος των στοιχείων που τέμνουν την επιφάνεια ολίσθησης (TNMN, 1984) στην οποία εφαρμόζεται η μεθοδολογία του Newmark (1965). Στον πίνακα 6 βρίσκονται τα αποτελέσματα της προσέγγισης αυτής. Οι μέγιστες τιμές παρατηρούνται τώρα για τη σεισμική διέγερση του Montenegro



Σχήμα 7. Δυνητικές επιφάνειες ολίσθησης της κεντρικής διατομής A-A'

Figure 7. Potential slip surfaces that were examined for the main cross section A-A'

Πίνακας 5. Σύνοψη των αναμενόμενων ανελαστικών μετακινήσεων κατά Makdisi & Seed
Table 5. Synopsis of expected anelastic displacements using Makdisi & Seed methodology

		$G_{o,des}$				$G_{o,max}$				$G_{o,min}$			
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
	Slip surface	U_{eff} (cm)	U_{eff} (cm)	U_{eff} (cm)	U_{eff} (cm)	U_{eff} (cm)	U_{eff} (cm)	U_{eff} (cm)	U_{eff} (cm)	U_{eff} (cm)	U_{eff} (cm)	U_{eff} (cm)	U_{eff} (cm)
ΑΝΑΝΤΗ	AUH1-2	16	88	30	17	7	128	26	16	<1	36	10	8
	AU-2	27	92	44	32	19	135	39	28	4	53	21	16
	AU-3	27	83	74	61	26	112	43	46	11	76	42	28
	AU-4	28	98	63	48	23	134	43	39	6	70	32	23
	AU-6	23	94	49	40	18	133	40	32	5	55	22	17
	AU-7	6	30	15	11	5	53	15	10	<1	12	5	3
	AU-8	<1	8	5	3	<1	22	5	3	<1	3	<1	<1
ΚΑΤΑΝΤΗ	ADH1-3	<1	17	5	4	<1	33	7	3	<1	9	<1	<1
	AD-3	3	23	10	6	<1	30	18	5	<1	13	6	4
	AD-4	<1	18	7	4	<1	26	12	3	<1	8	<1	<1
	ADD-6	<1	12	4	<1	<1	17	6	<1	<1	4	<1	<1

(N°4) ανεξαρτήτως των παραμέτρων σχεδιασμού της 2-Δ ανάλυσης, αναδεικνύοντας ότι παράμετροι όπως η διάρκεια της σεισμικής κίνησης σε σχέση με τον αριθμό των κύκλων φόρτισης που υπερβαίνουν την επιτάχυνση διαρροής επηρεάζουν σημαντικά τις τιμές των αναμενόμενων μετακινήσεων στην προσέγγιση αυτή.

6. ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΕΠΑΡΚΕΙΑ ΤΟΥ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΒΑΣΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Οι σοβαρότερες των επιπτώσεων από τις προκαλούμενες μόνιμες μετακινήσεις λόγω του σεισμού σχεδιασμού των 10000 ετών παρατίθενται επιγραμματικά ακολούθως:

α) Δυναμικές συνιζήσεις - καθιζήσεις

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε μία εμπειρική προσέγγιση (Swaisgood, 1998) βασισμένη κυρίως στην παρατήρηση βλαβών σε χωμάτινα και λιθόρριπτα φράγματα. Η εμπειρική συσχέτιση προκύπτει ως το γινόμενο του συντελεστή σεισμικής ενέργειας, SEF (συνάρτηση μεγέθους του σεισμού και κορυφαίας εδαφικής επιτάχυνσης) και του συντελεστή συντονισμού, RF (συνάρτηση του τύπου του φράγματος και της απόστασης μεταξύ της σεισμικής

πηγής και της θέσης του φράγματος). Δεδομένου ότι το φράγμα εδράζεται σε βραχώδεις σχηματισμούς, οι καθιζήσεις λόγω σεισμού είναι αμελητέες, ενώ σε αδρή προσέγγιση οι δυναμικές συνιζήσεις υπολογίσθηκαν της τάξης των 25cm.

β) Μείωση του ελεύθερου ύψους στέψης

Η ακρότατη τιμή της περιβάλλουσας των αναμενόμενων ανελαστικών μετακινήσεων δεν υπερβαίνει το 1,5m, η οποία υπολογίσθηκε με μή-συζευγμένες μεθοδολογίες κάτω από τις πλέον αντίξοες συνθήκες και τους δυσμενέστερους συνδυασμούς (συχνοτικό περιεχομένο σεισμικής διέγερσης, επιλογή εξεταζόμενης διατομής του φράγματος, κρισιμότερος κύκλος ολίσθησης, τιμές δυσμησίας υλικών κατασκευής και έδρασης του φράγματος και δυναμικών συνιζήσεων) συνιστούν το απολύτως άνω όριο. Άρα η μέγιστη τιμή μείωσης του ελεύθερου ύψους στέψης από δυνητικούς κύκλους ολίσθησης στα ανάντη οι οποίοι να διατέμνουν τον πυρήνα του φράγματος, δεν μπορεί να υπερβαίνει σε καμία περίπτωση την τιμή 1,6m. Κατά συνέπεια, ακόμη και με τά το ακραίο σενάριο του σεισμού σχεδιασμού υπό τις πλέον αντίξοες συνθήκες, η μεν στέψη του αργιλικού πυρήνα θα υπερβαίνει υψομετρικά

Πίνακας 6. Σύνοψη των αναμενόμενων ανελαστικών μετακινήσεων κατά Newmark (1965)
Table 6. Synopsis of expected anelastic displacements using Newmark's approach

		G_o				G_{max}				G_{min}			
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
	Slip surface	U_{eff} (cm)	U_{eff} (cm)	U_{eff} (cm)	U_{eff} (cm)	U_{eff} (cm)	U_{eff} (cm)	U_{eff} (cm)	U_{eff} (cm)	U_{eff} (cm)	U_{eff} (cm)	U_{eff} (cm)	U_{eff} (cm)
ΑΝΑΝΤΗ	AUH1-2	51	90	57	88	18	119	69	135	1	37	15	69
	AU-2	60	71	43	98	20	109	65	145	1	27	8	51
	AU-4	9	37	30	33	10	44	24	31	1	13	1	15
	AU-7	2	10	4	7	2	29	5	11	0	1	0	1
	AU-P1	17	82	86	127	29	105	80	96	12	44	26	75

την Α.Σ.Λ. κατά 1,9m ενώ η στέψη του φράγματος θα εξακολουθεί να διαθέτει 5,4m υπομετρική διαφορά από την Α.Σ.Λ.

γ) Κίνδυνος εσωτερικής διάβρωσης

Σύμφωνα με τις πρόσφατες Ελβετικές οδηγίες οι κατολισθητικές μετακινήσεις λόγω σεισμού δεν πρέπει να υπερβαίνουν το 50% του πάχους των φίλτρων ανάντη ή κατόντη του πυρήνα (Directives de l' OFEG, 2003). Στην παρούσα περίπτωση, ακόμη και στα πλέον ακραία σενάρια, οι ανελαστικές μετακινήσεις που διατέμνουν τον αργιλικό πυρήνα ή τμήμα αυτού περιορίζονται στο 20% του πάχους των φίλτρων για κύκλους βάρους έως 25m (πάχος 8m) από τη στέψη του φράγματος, ενώ για βαθύτερους κύκλους δεν υπερέβησαν το 25% (πάχος φίλτρου 4m).

Με βάση όλα τα παραπάνω προκύπτει ότι οι ανελαστικές μετακινήσεις καλύπτουν άνετα τα κριτήρια σεισμικής ασφάλειας του φράγματος σύμφωνα με τις διεθνείς απαιτήσεις (μείωση του ελεύθερου ύψους στέψης, εσωτερική διάβρωση, αλλά και στατικής μετασεισμικής επάρκειας, με συντελεστή ασφαλείας $F_S=1,42>1$ ακόμη και για σεισμό με μέση περίοδο επανάληψης 10.000 χρόνια.

7. ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Οι συγγραφείς εκφράζουν τις θερμές ευχαριστίες τους προς τη ΔΑΥΕ – ΔΕΗ, η οποία ανέθεσε στο ΙΤΣΑΚ την υπόψη μελέτη και επέτρεψε τη δημοσίευση των κυριοτέρων συμπερασμάτων. Επίσης, ευχαριστίες εκφράζονται προς τους κ. Γ. Αθανασόπουλο, Καθ. Π. Πατρών και τον κ. Κ. Παπαζάχο, Αναπλ. Καθ. Α.Π.Θ για τη γόνιμη και αποδοτική συνεργασία τους αντίστοιχα στις ειδικές μετρήσεις εργαστηρίου και πεδίου, καθώς επίσης και προς τον κ. Γ. Μπουκοβάλα, Καθ. Ε.Μ.Π. για τη χρήσιμη ανταλλαγή απόψεων και την εποικοδομητική του κριτική.

8. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

Ambraseys, N., P.Smit, R. Berardi, D. Rinaldis, F. Cotton, C. Berge-Thierry. "Dissemination of European Strong Motion Data". CD-ROM collection, 2000. EC, Environment & Climate Research Program.

Anastasiadis A., Klimis N., Makra K. & B. Margaris (2004). "On seismic behavior of a 130m high rockfill dam: an integrated approach" Proc 13th WCEE, Canada, CDRom Paper No. 2933

Boulanger R.W., Jonathan D.B., Scott S.M. & Mejia L.H. (1995) "Three-dimensional dynamic response analyses on Cogswell Dam", Canadian Geotech.Journal, Vol. 32, pp. 453-464.

Γκαζέτας, Γ. (1995) Πανεπιστημιακές Σημειώσεις Εδαφοδυναμικής, Τομ. Γεωτεχνικής, ΠΜ ΕΜΠ

Das, B. M. (1993) "Principles of Soil Dynamics." Boston: PWS-KENT Publishing Company.

Design Standards No.13, Embankment Dams. "Chapter 13: Seismic Design and Analysis", US Bureau of Reclamation (Draft-June 16, 1999).

Directives de l' OFEG. Sécurité des ouvrages d'accumulation; Version 1.2, Novembre 2003.

Finn, W.D.L., Ledbetter, R.H. & Marcuson III, W.F. (1997) "North American practice for evaluating the seismic safety of embankment dams", 1st Intern Conf. on Earthq. Geotech. Eng., Tokyo, 14-16 November, Ishihara(ed)-A.A. Balkema, Vol. 1, pp. 1227-1252.

Gazetas, G. & Dakoulas, P. (1992) "Seismic analysis and design of rockfill dams: state-of-the-art" SDEE, Vol. 2, pp. 27-61.

Gazetas, G. & Uddin, N. (1994) "Permanent deformation on preexisting sliding surfaces in dams", Journal of Geotech. Eng., Vol. 120, No. 11, pp. 2041-2061.

Jafarzadeh F and H. Javaheri (2002). "Three dimensional elasto-plastic dynamic response of a rockfill dam" 12th ECEE, CDRom paper 764.

Seed, H.B., Booker, J.R. (1977) "Stabilization of Potential Liquefiable Sand Deposits Using Gravel Drains." J. Geotechnical Engineering Division; 103(GT7): 757-768

Lin, J.S. and Whitman, R.V. (1986) "Earthquake induced displacements of sliding blocks", Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 112, No. 1, pp. 44-59.

Makdisi F. I., Seed, H.B. (1978) "Simplified procedure for estimating dam and embankment earthquake - induced deformations." J. Geotechnical Engineering Division, ASCE; 104(GT7): 849-867.

Newmark, N.M. (1965) "Effect of earthquakes on dams and embankments." Geotechnique; 15(2)

Rathje E.M. & J. D. Bray (1999). "An examination of simplified earthquake - induced displacements procedures for earth structures", Canadian Geotechnical Journal, Vol.36, pp. 72-87.

Swaigood J. E. (1998) "Seismically-Induced Deformation of Embankment Dams." Proc 6th U.S. Nat. Conf on Earth. Eng., Seattle, USA.

Xenaki, V.C. & Athanasopoulos G.A. "Dynamic properties and liquefaction resistance of soil materials used in earthfill dams - results of laboratory tests". Int. Conf on cyclic behavior of soils and liquefaction phenomena, 31/03-02/04/2004, Bochum, Germany.