

Ασύμμετρη Ελαστο-πλαστική Ολίσθηση Σώματος σε “Εγγύς – του – Ρήγματος” Παλμούς

Effect of Pre-Yielding Elasticity on Sliding Triggered by “Near-Fault” Wavelets

ΓΑΡΙΝΗ, Ε. Πολιτικός Μηχανικός, Υπ. Διδάκτωρ, Ε.Μ.Π.
ΓΚΑΖΕΤΑΣ, Γ. Πολιτικός Μηχανικός, Καθηγητής, Ε.Μ.Π.
ΓΕΡΟΥΛΥΜΟΣ, Ν. Πολιτικός Μηχανικός, Λέκτορας, Ε.Μ.Π.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ : Η ολίσθηση στερεού σώματος επί σεισμικώς-διεγειρομένου κεκλιμένου επιπέδου χρησιμοποιείται ως το μηχανικό ανάλογο υπολογισμού των ανελαστικών παραμορφώσεων τοίχων αντιστηρίξεως, πρανών, αναχωμάτων, καί θεμελίων. Στο παρόν άρθρο, η θεώρηση διεπιφάνειας που υπακούει στον απλό στερεο-πλαστικό νόμο τριβής του Coulomb επεκτείνεται με την θεώρηση ελαστο-πλαστικού νόμου. Για δεδομένη τιμή του συντελεστή τριβής ο νόμος αυτός χαρακτηρίζεται μόνον από μία παράμετρο, την μετακίνηση διαρροής dy , πέραν της οποίας αναπτύσσεται σταθερή δύναμη τριβής. Παρουσιάζεται η παραμετρική διερεύνηση της σεισμικής απόκρισης ενός τέτοιου συστήματος υποβαλλομένου σε παλμικές διεγέρσεις μορφής Ricker και ενός κύκλου ημιτόνου — ώστε να προσομοιωθούν εγγύς-του-ρήγματος σεισμικές εδαφικές δονήσεις.

ABSTRACT : The influence of elastic pre-yielding on the response of a mass resting on an inclined plane is investigated in this paper. The ultimate shearing capacity of the interface obeys Coulomb's friction law. The slope is subjected to near-fault triggering by two types of idealized wavelets: (i) a Ricker wavelet, representative of forward directivity affected motions, and (ii) an one-cycle sinusoidal wavelet, representative of fling-affected motions. The asymmetric sliding response is analyzed and the effect of a number of parameters is explored. They include: the critical acceleration ratio, a_c / a_H , the excitation frequency, f_o , and the magnitude of elastic pre-yielding displacement, dy .

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η δυναμική ολίσθηση στερεού σώματος, μάζας m , επί κεκλιμένου επιπέδου βρίσκει εφαρμογή επί του πρακτέου σε αρκετά προβλήματα της γεωτεχνικής σεισμικής μηχανικής. Ήδη από το 1965 την πρωτοεισηγάγε ο Newmark για τον υπολογισμό της σεισμικής απόκρισης χωμάτων φραγμάτων. Το σύστημα ολισθαίνοντος σώματος-κεκλιμένου επιπέδου χρησιμοποιήθηκε για την εκτίμηση των δυναμικών καθιζήσεων επιφανειακών θεμελίων, τον υπολογισμό παραμενοσών μετακινήσεων κατολισθαίνοντων πρανών, σεισμικών παραμορφώσεων σε τοίχους αντιστηρίξεων οπλισμένης γής. Οι Richards &

Elms (1979) έκαναν μια επιτυχή επέκταση στην εφαρμογή του συστήματος σε τοίχους βαρύτητας.

Οι συγγραφείς σε προηγούμενη μελέτη τους (Garini et al 2010, Gazetas et al 2009) παρουσίασαν αποτελέσματα σχετικά με την ασύμμετρη ολίσθηση σώματος διεγειρόμενου από εγγύς-του-ρήγματος καταγραφές. Τα συμπεράσματα που προέκυψαν είχαν βασιστεί στην παραδοχή της στερεο-πλαστικής συμπεριφοράς της διεπιφάνειας επιπέδου-σώματος. Στην πραγματικότητα όμως πρίν ξεκινήσει η ολίσθηση του σώματος, είναι αναπόφευκτη η ανάπτυξη ελαστικών μετακινήσεων στην διεπιφάνεια. Στο άρθρο αυτό διερευνάται υπό ρεαλιστικότερες συνθήκες η ολίσθηση επί

κεκλιμένου επιπέδου, θεωρώντας ελαστικό-ιδεωδώς πλαστικό τον νόμο δύναμης-παραμόρφωσης στην διεπιφάνεια (**Σχήμα 1**).

2. ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΔΙΕΓΕΡΣΗ

Προγενέστερες μελέτες υπολογισμού της δυναμικής απόκρισης στερεού σώματος επί κεκλιμένης βάσης χρησιμοποίησαν καταγραφές από σεισμούς των δεκαετιών '70 και '80. Ελάχιστες από τις καταγραφές αυτές ήταν από περιοχές εγγύς-του-ρήγματος. Σήμερα, υπάρχει διαθέσιμο ένα μεγάλο πλήθος από εγγύς-του-ρήγματος καταγραφές. Επίσης, έχει κατανοηθεί η επίδραση των χαρακτηριστικών της διάρρηξης στις εκάστοτε καταγραφές (πέραν του μεγέθους και της απόστασης).

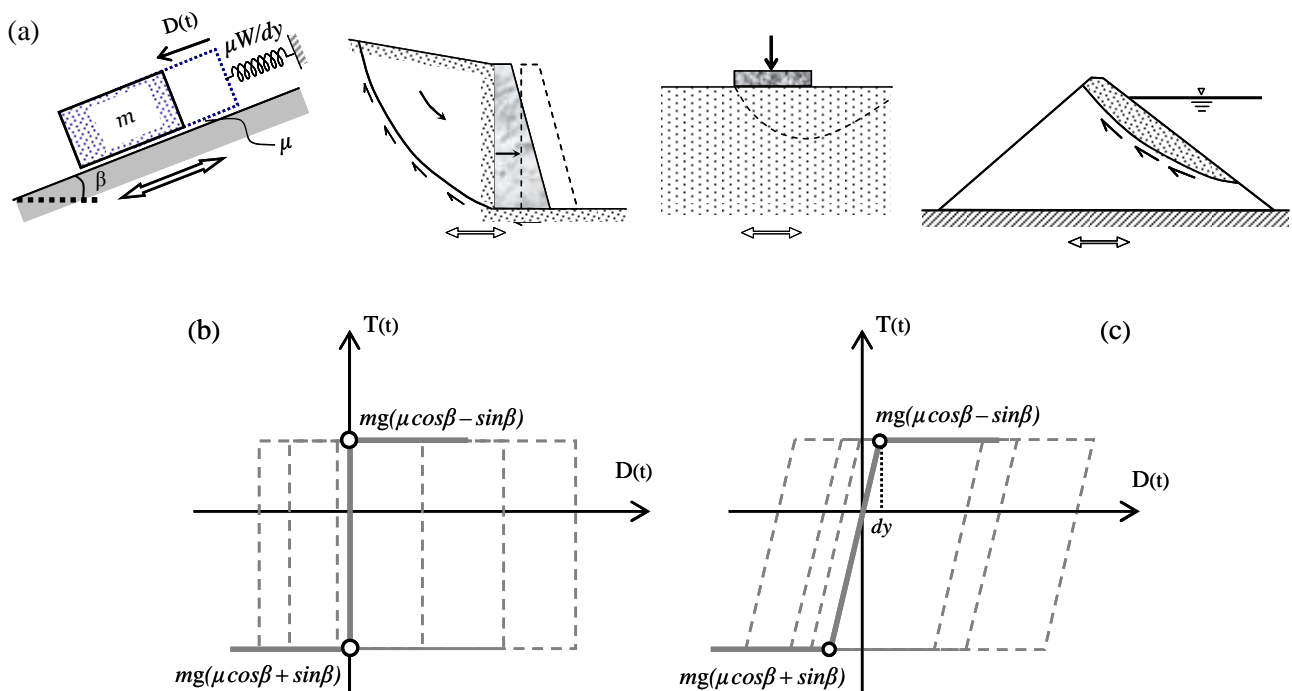
Έτσι γνωρίζουμε πλέον ότι σε περιοχές έντονης κατευθυντικότητας, το φαινόμενο της ενισχυτικής συμβολής των διαδιδόμενων σεισμικών κυμάτων έμπροσθεν του μετώπου διάδοσης, εμφανίζεται στα επιταχυνσιογραφήματα με παλμούς επιτάχυνσης μεγάλης περιόδου. Στην περίπτωση που η σεισμική

διάρρηξη φτάσει κοντά στην επιφάνεια του εδάφους, θα αφήσει το «αποτύπωμα» της στην καταγραφή μέσω παραμενουσών μετακινήσεων.

Προκειμένου να προσεγγίσουμε απλοποιητικά καταγραφές εγγύς-του-ρήγματος εφαρμόσαμε ως διεγέρσεις τυπικούς εξιδανικευμένους παλμούς. Οι παλμοί τύπου Ricker χρησιμοποιήθηκαν για να προσομοιώσουν επιταχυνσιογραφήματα με κατευθυντικότητα, και παλμοί ενός κύκλου ημιτόνου για καταγραφές με αλτηματικότητα. Οι εν λόγω παλμοί εφαρμόστηκαν με τέσσερις διαφορετικές συχνότητες:

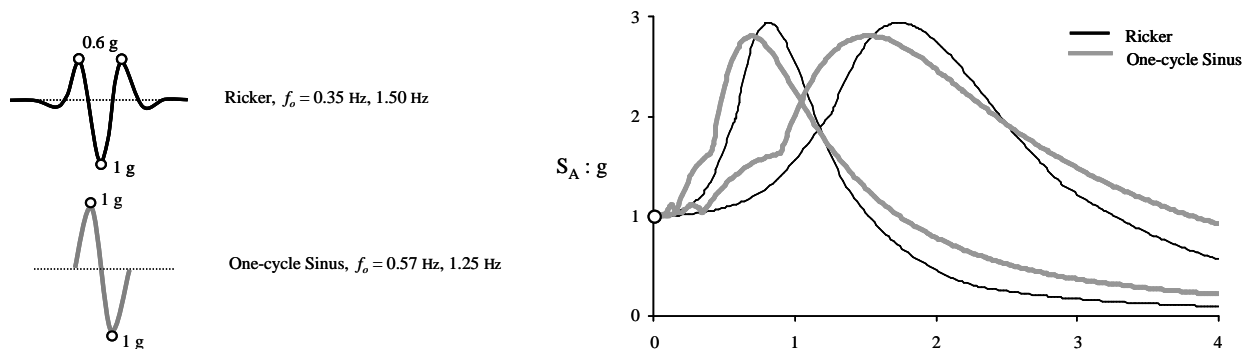
- Ricker: $f_0 = 0.35 \text{ Hz}, 0.75 \text{ Hz}, 1.5 \text{ Hz},$ and 3.5 Hz
- Sinusoidal: $f_0 = 0.57 \text{ Hz}, 1.25 \text{ Hz}, 2.5 \text{ Hz}, 6.67 \text{ Hz}$

Όπως απεικονίζεται και στο **Σχήμα 2**, οι συχνότητες των παλμών επιλέχθηκαν έτσι ώστε να ταιριάζουν κατά το δυνατόν τα φάσματα αποκρίσεως τους.



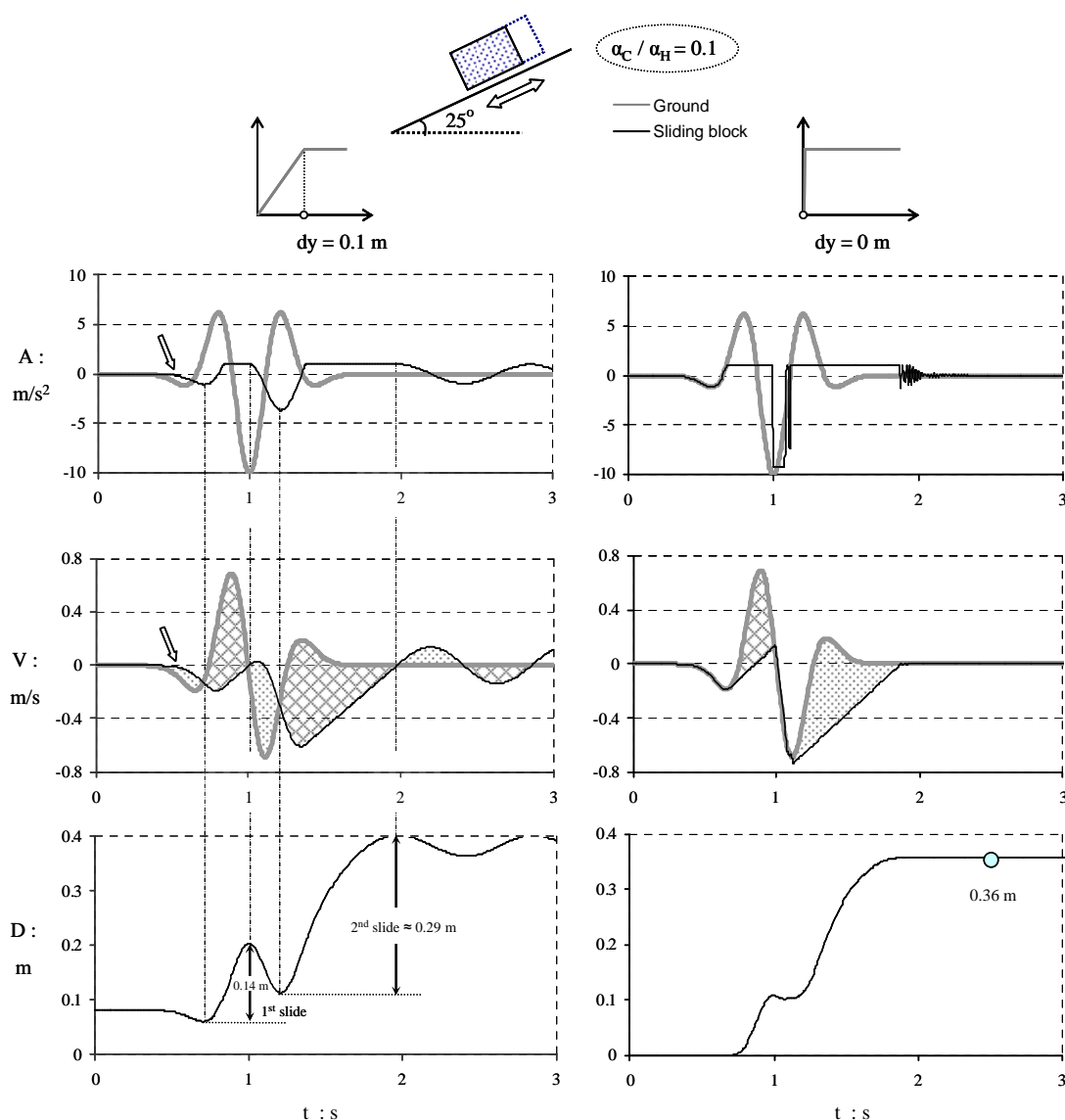
Σχήμα 1. (a) Αντικείμενο της μελέτης: στερεό σώμα επί κεκλιμένου επιπέδου υποβαλλόμενο σε διέγερση παράλληλη προς αυτό, (b) τελείως πλαστική συμπεριφορά της διεπιφάνειας ολισθήσεως, και (c) ελαστική-πλαστική συμπεριφορά της διεπιφάνειας.

Figure 1. (a) The problem studied in the paper – sliding on inclined plane undergoing excitation parallel to the slope, (b) ideally rigid-plastic behavior of the interface, and (c) elastic-perfectly plastic sliding response studied here.



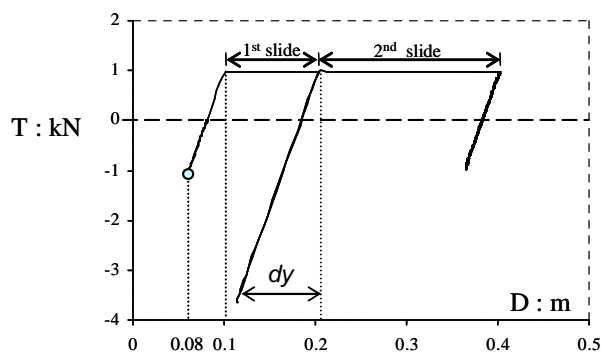
Σχήμα 2. Οι δύο τύποι εξιδανικευμένων παλμών και τα αντίστοιχα φάσματα απόκρισης τους (εδαφική επιτάχυνση αναφοράς: 1 g).

Figure 2. The two idealized time histories used as base excitation, with their response acceleration spectra (Reference ground acceleration: 1 g).



Σχήμα 3. Χρονοϊστορίες επιταχύνσεων, ταχυτήτων και μετατοπίσεων για την περίπτωση ελαστικής μετακίνησης “διαρροής” $dy = 0.1$ m (αριστερά), και για $dy = 0$ (στα δεξιά).

Figure 3. Acceleration, velocity, and displacement time histories for a maximum elastic deformation of $dy = 0.1$ m (left), and for $dy = 0$ (right).



Σχήμα 4. Γραφική παράσταση της αναπτυσσόμενης δύναμης επαφής, T , συναρτήσει της μετακίνησης του στερεού σώματος, D , για ελαστική παραμόρφωση $dy = 0.1$ m. Η ολίσθηση γίνεται επί κεκλιμένου επιπέδου γωνίας $\beta = 25^\circ$, όταν αυτό διεγείρεται από παλμό Ricker συχνότητας 1.5 Hz, και $a_c/a_H = 0.1$.

Figure 4. Force-displacement response for the case of an elasto-plastic sliding system with $dy = 0.1$ m, $\beta = 25^\circ$, $a_c/a_H = 0.1$ and a Ricker excitation of 1.5 Hz frequency.

3. ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ

3.1 Η επίδραση της ελαστικής παραμόρφωσης, dy

Το **Σχήμα 3** παρουσιάζει την απόκριση ολισθαίνοντος στερεού μάζας $m = 1$ Mgr επί κεκλιμένου επιπέδου γωνίας $\beta = 25^\circ$, υπό την μορφή χρονοϊστοριών επιτάχυνσης, ταχύτητας, και μετακίνησης. Το επίπεδο της βάσης διεγείρεται από έναν παλμό Ricker συχνότητας 1.5 Hz και μέγιστης επιτάχυνσης 1g.

Τα διαγράμματα στην δεξιά στήλη αντιστοιχούν στην περίπτωση της απολύτως πλαστικής διεπιφάνειας ολίσθησης σώματος-βάσης, για λόγο κρίσιμης πρὸς μέγιστη επιτάχυνση $a_c/a_H = 0.1$. Παρατηρήστε ότι το στερεό σώμα κινείται ακριβώς όπως η βάση του, έως ότου να ξεπεραστεί η κρίσιμη τιμή της επιτάχυνσης a_c . Μόλις η διέγερση ασκήσει στο σώμα επιτάχυνση μεγαλύτερη από την κρίσιμη, το στερεό αρχίζει να ολισθαίνει είτε στην κατηφόρα (η συνήθης περίπτωση), είτε στην ανηφόρα (σπανίως).

Τα διαγράμματα στην αριστερή στήλη του **Σχήματος 3**, παρουσιάζουν την περίπτωση που έχουμε μία ελαστική μετακίνηση του σώματος προτού αυτό ολισθήσει. Η ελαστική παραμόρφωση που μπορεί να αναπτύξει το σύστημα είναι 0.1 m. Συνέπεια αυτής της ελαστικής προ-ολισθαίνουσας φάσης δείχνεται στο **Σχήμα 3** με βέλος. Στο σημείο αυτό να τονίσουμε ότι ενώ η ολίσθηση (δηλαδή η πλαστική μετατόπιση) συμβαίνει κυρίως σε μία διεύθυνση (στην κατηφόρα), η ελαστική μετακίνηση παρατηρείται εξίσου και στις δύο

διευθύνσεις κινήσεως. Επομένως, αν και μετά το 1 sec δεν πραγματοποιείται καμμία ολίσθηση στην ανηφόρα, αντιθέτως συμβαίνουν ελαστικές μετακινήσεις στην διεύθυνση αυτή (βλέπε **Σχήμα 3**).

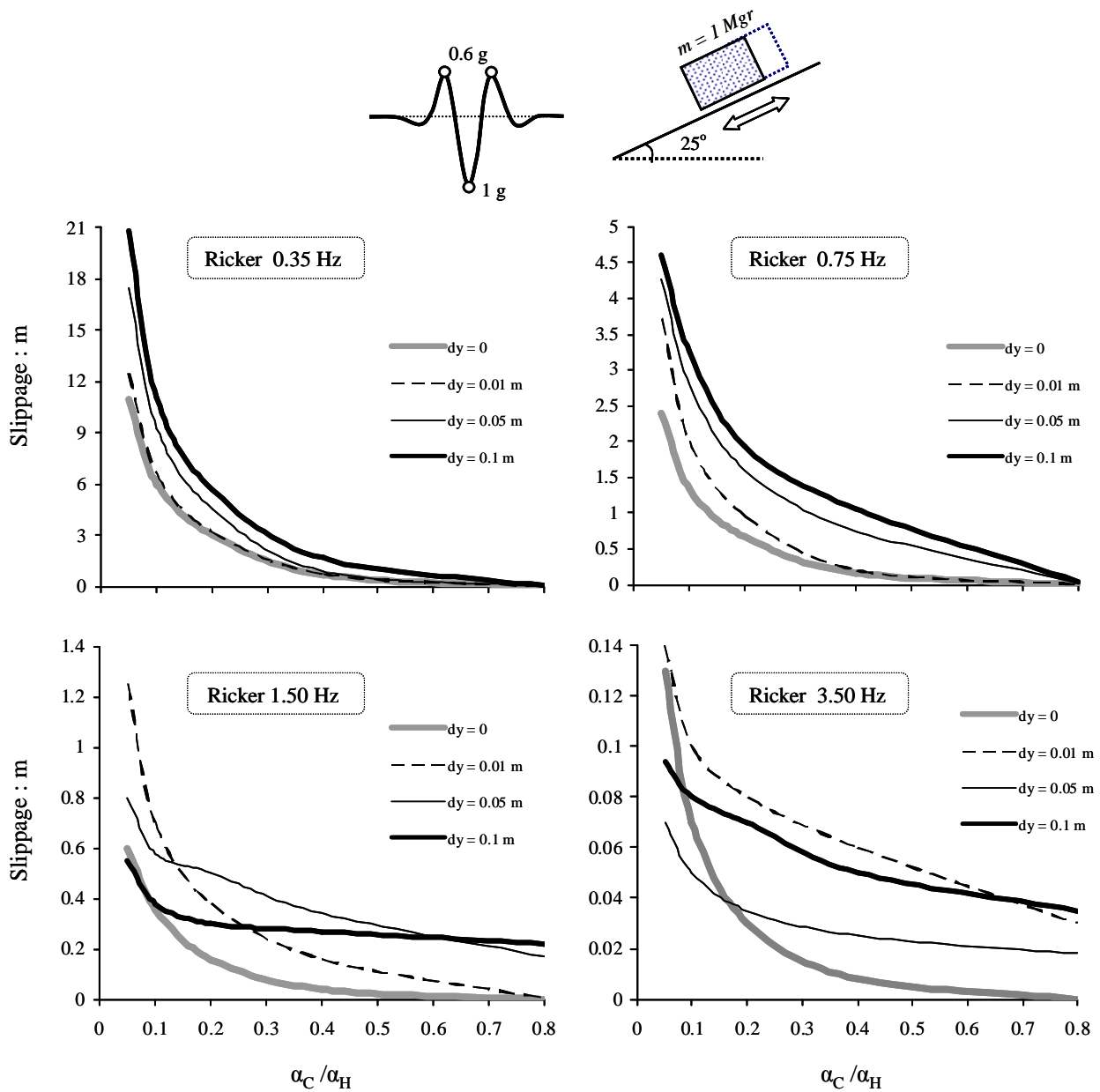
Επιπροσθέτως, το στερεό σώμα δέν ηρεμεί μετά το πέρας του παλμού στα 1.5 sec όπως συμβαίνει στην περίπτωση της απολύτως πλαστικής ολίσθησης, αλλά συνεχίζει να ταλαντώνεται ελαστικά για μερικά ακόμη δευτερόλεπτα. Τούτο αποδεικνύεται και από το **Σχήμα 4**, στο οποίο παρουσιάζεται η μεταβολή της δύναμης τριβής συναρτήσει της μετακίνησης. Οι μετακινήσεις που αντιστοιχούν σε ολίσθηση (πλαστική παραμόρφωση) είναι τα οριζόντια τμήματα, ενώ οι ελαστικές μετακινήσεις είναι τα ευθύγραμμα κεκλιμένα τμήματα. Έχουμε λοιπόν δύο ολισθήσεις και πολλές (σε πλήθος όχι σε μέγεθος) ελαστικές μετακινήσεις πριν και μετά τις ολισθήσεις αυτές.

3.2 Η επίδραση της συχνότητας διεγέρσεως, f_0 , και του λόγου επιταχύνσεων, a_c/a_H

Το **Σχήμα 5** περιγράφει την επιρροή του λόγου της κρίσιμης πρὸς την μέγιστη επιτάχυνση, a_c/a_H , στην ασύμμετρη ολίσθηση για τέσσερις τιμές ελαστικής μετακίνησης, dy , και για επίσης τέσσερις συχνότητες, f_0 . Όπως και αναμένονταν, αυξανόμενου του λόγου επιταχύνσεων a_c/a_H , οι προκύπτουσες ολισθήσεις μειώνονται. Το γεγονός της ελάττωσης των ολισθήσεων όσο μεγαλώνει η κρίσιμη επιτάχυνση ολίσθησης και άρα ο λόγος a_c/a_H (αφού η μέγιστη τιμή της εξωτερικώς

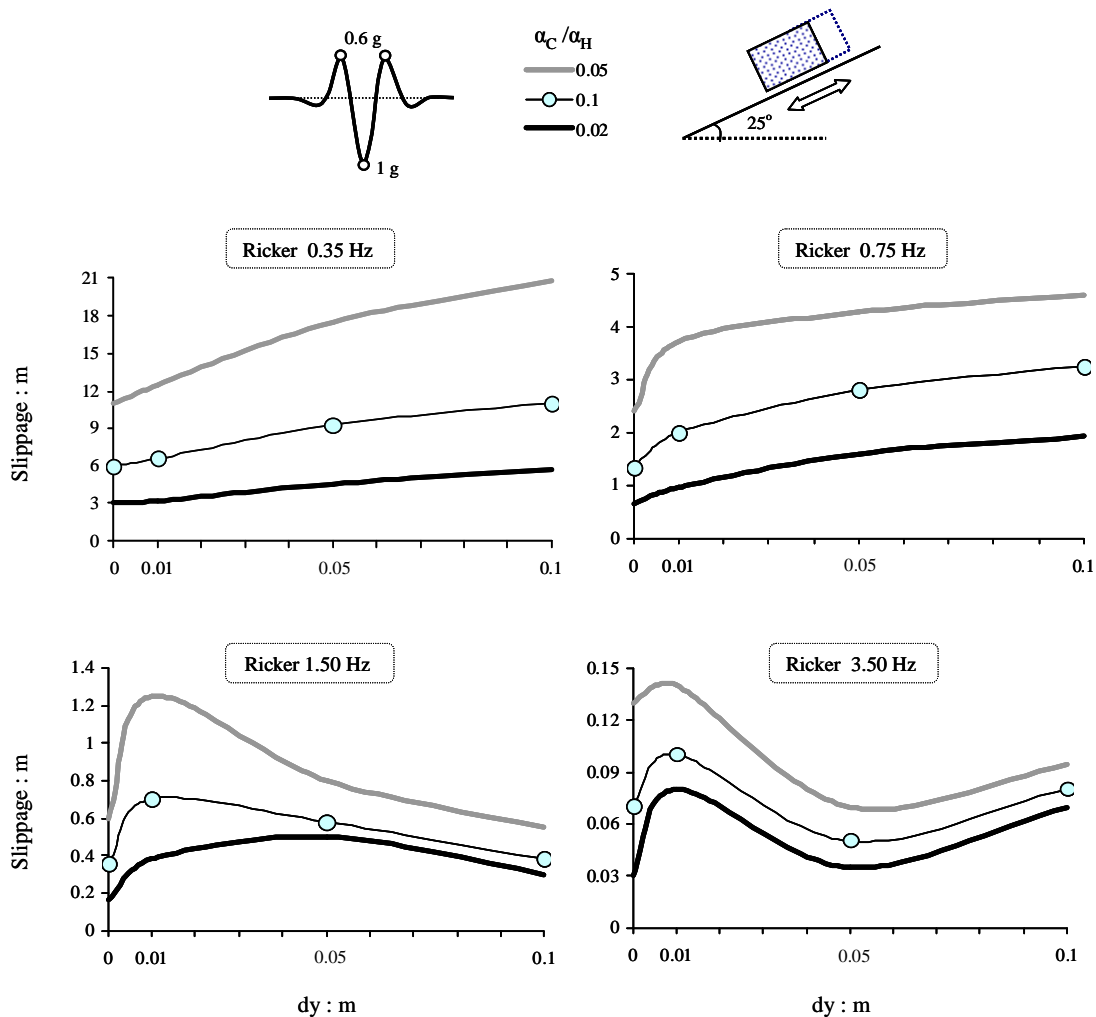
επιβαλλόμενης επιτάχυνσης είναι σταθερή και ίση με 1g), είναι ανεξάρτητο της ύπαρξης ή μη ελαστικής παραμόρφωσης. Εξάλλου, παρατηρούμε ότι η ύπαρξη ελαστικής παραμόρφωσης μπορεί τόσο να αυξήσει όσο και να μειώσει τις τελικές παραμένουσες μετακινήσεις.

Στο **Σχήμα 6** δίδεται η επίδραση της συχνότητας της διέγερσης, f_0 , στην ολίσθηση. Ανεξαρτήτως των άλλων παραμέτρων, όταν αυξάνεται η συχνότητα της διέγερσης μειώνεται η προκαλούμενη ολίσθηση.



Σχήμα 5. Επίδραση της ελαστικής συνιστώσας της μετακίνησης, dy , στην απόκριση στερεού σώματος επί κεκλιμένου επιπέδου υποβαλλόμενου σε παλμό Ricker μέγιστης επιτάχυνσης 1 g για διαφορετικές τιμές της συχνότητας.

Figure 5. Influence of maximum elastic deformation, dy , on asymmetric sliding response triggered by Ricker wavelets of maximum acceleration 1 g and of different frequencies.



Σχήμα 6. Επίδραση της συχνότητας διεγέρσεως, f_0 , στην ασύμμετρη ολίσθηση για διάφορες τιμές του λόγου, α_C / α_H , και της ελαστικής μετακίνησης dy (Διέγερση: παλμός Ricker).

Figure 6. Effect of characteristic frequency, f_0 , and of α_C / α_H ratio on maximum slippage with respect to elastic deformation, dy (Excitation: single Ricker wavelet).

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν γραφικώς στο άρθρο (μέσω των σχημάτων) προσφέρουν μία πρώτη κατανόηση στο φαινόμενο της δυναμικής ολίσθησης παρουσία ελαστικών παραμορφώσεων στην διεπιφάνεια ολισθήσεως κεκλιμένου επιπέδου και στερεού σώματος.

Συμπερασματικά, η κυριότερη επίδραση της ελαστικής μετακίνησης είναι η αύξηση των μετατοπίσεων στην ανηφόρα, καθώς οι ελαστικές παραμορφώσεις αναπτύσσονται και στις δύο διευθύνσεις ολισθήσεως αδιακρίτως.

5. ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα εργασία έγινε στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος “DARE”, χρηματο-

δοτούμενο από το European Research Council (ERC) Advanced Grant “Ideas” [Grant Agreement 228254].

6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Abrahamson, N. A. (2000), Effects of rupture directivity on probabilistic seismic hazard analysis, *Proceedings, 6th International Conference on Seismic Zonation*, Palm Springs, California, Earthquake Engineering Research Institute.
- Bolt, B.A. (2004), *Earthquakes*, W. H. Freeman & Co, Fifth Edition, New York.
- Boore, M. D. (2001), Effect of baseline corrections on displacements and response spectra for several Recordings of

- the 1999 Chi-Chi, Taiwan, Earthquake, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 91, No. 5, pp. 1199-1211.
- Bray, J.D., and Rathje, E.M. (1998), Earthquake-Induced Displacements of Solid-Waste Landfills, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol. 124, pp. 242-253.
- Constantinou, M. C., and Gazetas, G. (1987), Probabilistic Seismic Sliding Deformations of Earth Dams and Slopes, *Proceedings of the Specialty Conference on Probabilistic Mechanics and Structural Reliability*, ASCE, Berkeley, pp. 318-321.
- Constantinou, M.C., Gazetas, G., and Tadjbakhsh, I. (1984). Stochastic Seismic Sliding of Rigid Mass Against Asymmetric Coulomb Friction, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 12, pp. 777-793.
- Garini E. and Gazetas G. (2007), "Sliding of Rigid Block on Sloping Plane: The Surprising Role of the Sequence of Long-Duration Pulses", *Proceedings of 2nd Japan-Greece Workshop on Seismic Design, Observation, and Retrofit of Foundations*, Tokyo, Japan, pp. 79-104.
- Garini E., Gazetas G., and Anastasopoulos I. (2010) "Accumulated asymmetric slip caused by motions containing severe directivity and fling pulses", *Géotechnique*, Vol. 60, No. 6.
- Gazetas G., Garini E., Anastasopoulos I., and Georgarakos T. (2009) "Effects of near-fault ground shaking on sliding systems", *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, 135, No. 12, pp 1906-1921.
- Gazetas, G., and Uddin, N. (1994), Permanent deformation on pre-existing sliding surfaces in dams, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol.120, No.11, pp. 2041 – 2061.
- Kramer, S. L., and Lindwall, N. W. (2002). Dimensionality and Directionality Effects of Newmark Stability Analysis, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol. 130, pp. 303-315.
- Kramer, S. L., and Smith, M. (1997). Modified Newmark Model for Seismic Displacements of Compliant Slopes, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol. 123, pp. 635 – 644.
- Makdisi, F.I., and Seed, H.B. (1978), Simplified Procedure For Estimating Dam And Embankment Earthquake Induced Deformations, *Journal of Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol. 104, 849 – 867.
- Makris, N., and Psychogios T. (2006), Dimensional response analysis of yielding structures with first mode dominated response, *Earthquake Engineering Structural Dynamics*, Vol.35, pp. 1203-1224.
- Makris, N., and Roussos, Y.S. (2000), Rocking Response of Rigid Blocks Under Near-Source Ground Motions, *Géotechnique*, 50, No. 3, pp. 243-262.
- Newmark, N. M. (1965), Effects of Earthquakes on Dams and Embankments, *Géotechnique*, Vol. 15, No. 2, pp. 139-160.
- Richards, R., and Elms, D.G. (1979), Seismic Behaviour of Gravity Retaining Walls, *Journal of Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol. 105, pp. 449-464.
- Singh, J.P. (1988), Earthquake Ground Motions: Implications for Designing Structures and Reconciling Structural Damage, *Earthquake Spectra*, Vol. 1, pp. 239-270.
- Somerville, P.G., Saikia, C., Wald, D., and Graves, R. (1996), Implications of the Northridge earthquake for strong ground motions from thrust faults, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 86, pp. 115 - 125.
- Yegian, M. K., Harb, J. N., and Kadakal, U. (1998), Dynamic Response Analysis Procedure for Landfills and Geosynthetic Liners, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol. 124 (10), pp. 1027-1033.