

Νέες Σχέσεις Υπολογισμού της Οριζόντιας Εξάπλωσης Λόγω Ρευστοποίησης σε Ελαφρώς Κεκλιμένα Εδάφη

New Relationships for Liquefaction-induced Lateral Spreading in Gently Sloping Ground

ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΣ ΒΑΛΣΑΜΗΣ Δρ. Πολιτικός Μηχανικός, Ε.Μ.Π.
ΒΑΣΙΛΙΚΗ ΔΗΜΗΤΡΙΑΔΗ Πολιτικός Μηχανικός, MSc.
ΓΙΩΡΓΟΣ ΜΠΟΥΚΟΒΑΛΑΣ Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Η ισχύουσα πρακτική υπολογισμού μετατοπίσεων λόγω ρευστοποίησης και πλευρικής εξάπλωσης του εδάφους βασίζεται σε εμπειρικές σχέσεις βασισμένες σε ιστορικά περιστατικά. Το παρόν άρθρο εστιάζεται στην αριθμητική διερεύνηση των βασικών παραμέτρων που επηρεάζουν την αναμενόμενη μέγιστη μετατόπιση του εδάφους, καθώς και στην ποσοτική εκτίμηση της επιρροή τους με την μορφή μιας απλής σχετικά αναλυτικής σχέσης. Για να εξασφαλιστεί η αξιοπιστία της αριθμητικής μεθοδολογίας, έγινε συστηματική σύγκριση με δεκαεφτά (17) προηγουμένως δημοσιευμένα πειράματα φυγοκεντριστή, με αριθμητικές αναλύσεις, καθώς και με μετρήσεις πεδίου από την βάση δεδομένων των Youd et al. (2002).

ABSTRACT: Liquefaction-induced lateral spreading can cause extensive damage and even failure to foundations and superstructures. The current practice lies upon empirical relations, obtained from statistical analysis of field measurements. This article employs a numerical investigation to explore the main parameters affecting the anticipated maximum ground surface displacement and to quantify their effect in the form of a simple analytical relation. To ensure the credibility of the numerical methodology, it has been thoroughly validated against seventeen (17) previously reported centrifuge experiments, a large number of numerical predictions, as well as field measurements from the Youd et al. (2002) data base.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Πρόσφατοι μεγάλοι σεισμοί (π.χ. Kobe 1995, Chi-Chi 1999, Nisqually 2001) έχουν δείξει ότι το φαινόμενο της οριζόντιας εξάπλωσης έχει μεγάλη πρακτική σημασία για τα τεχνικά έργα (κρηπιδοτόχοι, προβλήτες, γέφυρες, κλπ), λόγω επιβολής σημαντικών πλευρικών φορτίων. Είναι αυτονόητο ότι η αποτελεσματικότητα των σύγχρονων μεθόδων σχεδιασμού τεχνικών έργων εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την εκτίμηση των αναμενόμενων πλευρικών εδαφικών μετατοπίσεων λόγω ρευστοποίησης και την κατανομή τους με το βάθος. Η ισχύουσα σήμερα πρακτική υπολογισμού των εν λόγω μετατοπίσεων βασίζεται σε εμπειρικές σχέσεις προερχόμενες από στατιστική επεξεργασία

ιστορικών περιστατικών. Η προσέγγιση αυτή είναι βέβαια η πλέον άμεση όσον αφορά την εκδήλωση του φαινομένου, αλλά ενέχει σημαντική αβεβαιότητα για δύο κυρίως λόγους: την ύπαρξη κατά κανόνα ιστορικών περιστατικών με ελλιπή τεκμηρίωση και την αδυναμία συστηματικής διερεύνησης όλων των σημαντικών παραμέτρων του προβλήματος.

Έτσι, στο παρόν άρθρο επιχειρείται πιλοτικά μια εναλλακτική προσέγγιση. Συγκεκριμένα, πραγματοποιείται αριθμητική διερεύνηση των βασικών παραμέτρων που επηρεάζουν την εδαφική μετατόπιση λόγω οριζόντιας εξάπλωσης και προτείνεται ακολούθως μια απλή αναλυτική σχέση για την ποσοτική εκτίμησή της. Έμφαση δόθηκε επίσης, στην εκτίμηση της μεταβολής της μετατόπισης με το βάθος, σε περιπτώσεις

εδαφικών τομών με εναλλαγές ρευστοποιήσιμων και μη-ρευστοποιήσιμων εδαφικών στρώσεων.

Οι αριθμητικές αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν παραμετρικά, για σημαντικό εύρος ιδιοτήτων της σεισμικής διέγερσης, της ρευστοποιήσιμης εδαφικής στρώσης και της στρωματογραφίας. Η μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε έχει αναπτυχθεί πρόσφατα στο ΕΜΠ με σκοπό να προβλέπει τις μεγάλες μετατοπίσεις που προκαλεί η ρευστοποίηση του εδάφους (Ανδριανόπουλος, 2006). Η ακρίβεια της προτεινόμενης σχέσης καθώς και της αριθμητικής μεθοδολογίας εκτιμήθηκε μέσω της σύγκρισης με τα αποτελέσματα από δεκαεπτά (17) καλά τεκμηριωμένες δοκιμές σε φυγοκεντριστή καθώς και επίσης και από 256 μετρήσεις μετατοπίσεων από ιστορικά περιστατικά, από τη βάση δεδομένων των Youd et al. (2002).

2. ΕΜΠΕΙΡΙΚΕΣ ΣΧΕΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΟΡΙΖΟΝΤΙΑ ΕΞΑΠΛΩΣΗ

Με βάση τη συγκριτική αξιολόγηση οκτώ (8) ανεξάρτητων εμπειρικών σχέσεων εκτίμησης της μέγιστης επιφανειακής εδαφικής μετατόπισης (Valsamis, 2009), παρουσιάζονται ακολούθως οι δύο (2) επικρατέστερες, οι οποίες συμπληρώνονται, από δύο (2) προτάσεις για την κατανομή των μετατοπίσεων με το βάθος.

Συγκεκριμένα, οι Youd et al. (2002) για τον υπολογισμό της οριζόντιας μετατόπισης λόγω ρευστοποίησης στην περίπτωση ελαφρώς κεκλιμένου εδάφους πρότειναν την ακόλουθη εξίσωση:

$$\log D_H = -16.213 + 1.532M - 1.406 \log R^* - 0.012R + 0.338 \log S + 0.540 \log T_{15} + 3.413 \log(100 - F_{15}) - 0.795 \log(D_{5015} + 0.1mm) \quad (1)$$

όπου

- D_H (m) η οριζόντια εξάπλωση του εδάφους
- M το μέγεθος του σεισμού
- R (km) η κοντινότερη οριζόντια απόσταση του σημείου ανάλυσης από την σεισμική πηγή
- $R^* = R_o + R$ (km) όπου $R_o = 10^{(0.89M - 5.64)}$
- T_{15} (m) το αθροιστικό πάχος των μη-συνεκτικών εδαφικών στρώσεων κάτω από τον υδροφόρο ορίζοντα με διορθωμένο αριθμό κρούσεων $(N_1)_{60}$, λιγότερο από 15
- F_{15} (%) το μέσο ποσοστό λεπτόκοκκων των μη-συνεκτικών εδαφών εντός του πάχους T_{15}

- D_{5015} (mm) το μέσο μέγεθος κόκκων των μη-συνεκτικών εδαφών εντός του πάχους T_{15}

- S (%) η κλίση του εδάφους

Η δεύτερη που παρουσιάζεται προτάθηκε από τον Hamada (1999), και παρουσιάζει το συγκριτικό πλεονέκτημα ότι λαμβάνει υπόψη πιο αναλυτικά την επίδραση της έντασης του σεισμικού κραδασμού:

$$D_H = \frac{0.0125(H)^{0.5} g}{\bar{N}^{0.88}} \sum a_i^{0.48} T_i \quad (2)$$

όπου

- H (m) το πάχος της ρευστοποιημένης στρώσης
- θ (%) η κλίση του εδάφους
- \bar{N} η μέση τιμή του διορθωμένου αριθμού κρούσεων SPT του ρευστοποιημένου στρώματος.
- a_i (gal) η μέση οριζόντια επιτάχυνση στο i τμήμα του επιταχυνσιογραφήματος
- T_i (sec) η διάρκεια του i τμήματος του επιταχυνσιογραφήματος

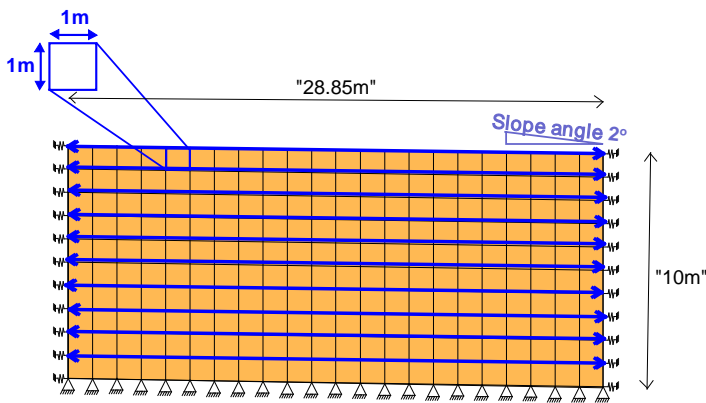
Η πρώτη σχέση εκτίμησης της μεταβολής της μετατόπισης με το βάθος, προτείνει γραμμική μείωση από τη μέγιστη τιμή, στην επιφάνεια του εδάφους, έως την μηδενική τιμή στο μέγιστο βάθος του ρευστοποιημένου εδάφους (Sento et al., 1999). Στη δεύτερη σχέση, η μείωση είναι ημιτονοειδής και να εκφραστεί ως (Ishihara & Cubrinovski 1998, Tokimatsu 1999, Towhata 2005):

$$D(z) = D_H \sin \frac{\pi(H - z)}{2H} \quad (3)$$

- όπου z (m) το βάθος της ανάλυσης και H (m) το πάχος της ρευστοποιημένης εδαφικής στρώσης.

3. ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΟΡΙΖΟΝΤΙΑΣ ΕΞΑΠΛΩΣΗΣ

Οι αριθμητικές αναλύσεις, για την παραμετρική διερεύνηση του προβλήματος, πραγματοποιήθηκαν με τη βοήθεια της μη-γραμμικής μέθοδου πεπερασμένων διαφορών, σε συνδυασμό με ένα εξελιγμένο καταστατικό προσομοίωμα, που προσομοιώνει την στατική

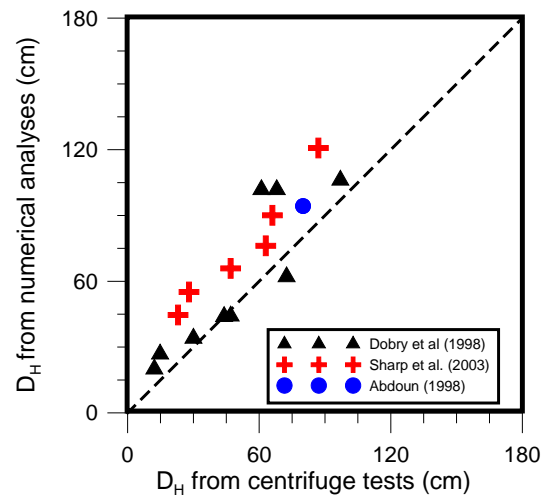


Σχήμα 1. Κάνναβος προσομοίωσης
Figure 1. Used grid in the simulation

και δυναμική συμπεριφορά μη-συνεκτικών εδαφών, συμπεριλαμβανομένης της ρευστοποίησης. Το εν λόγω προσομοίωμα έχει αναπτυχθεί από τους Papadimitriou et al. (2001), Andrianopoulos et al. (2006a, 2006b και 2007), Ανδριανόπουλος (2006) και η ικανότητά του να προβλέπει τις σχετικά μεγάλες μετατοπίσεις που προκαλούνται από την οριζόντια εξάπλωση, επιβεβαιώθηκε εκ προοιμίου με την επιτυχή αναπαραγωγή των αποτελεσμάτων πειραμάτων σε φυγοκεντρική που παρουσιάζονται στον Πίνακα 1, των Taboada & Dobry (1998), Abdoun (1998) και Sharp et al. (2003).

Η διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για την αριθμητική προσομοίωση των πειραμάτων παρουσιάζεται στο Σχήμα 1. Αποτελείται από 280 ίσου μεγέθους ζώνες (στοιχεία), διαστάσεων 1.0m x 1.0m, με τα πλευρικά τοιχώματα να συνδέονται μεταξύ τους, ώστε να εξασφαλίζεται ότι θα έχουν τις ίδιες οριζόντιες μετατοπίσεις, όπως ακριβώς συμβαίνει στο διατμητικό κουτί (laminar box) που χρησιμοποιήθηκε στα πειράματα φυγοκεντρική για τον εγκιβωτισμό του εδάφους. Η σεισμική διέγερση επιβλήθηκε ως χρονοϊστορία επιτάχυνσης στη βάση της εδαφικής τομής.

Στο Σχήμα 2, συγκρίνονται οι προβλεπόμενες και οι καταγραφείσες μέγιστες μετατοπίσεις από όλα τα πειράματα του Πίνακα 1. Οι συγκρίσεις παρουσιάζουν αρκετά καλή, ποιοτική αλλά και ποσοτική συμφωνία. Η τάση των αριθμητικών προβλέψεων να υπερεκτιμούν ελαφρά τις καταγραφές ενδέχεται να είναι αποτέλεσμα της τεχνητής



Σχήμα 2. Σύγκριση αριθμητικής προσομοίωσης και φυγοκεντρική
Figure 2. Numerical predictions vs centrifuge measurements.

παρεμπόδισης της μετατόπισης του εδάφους, που επιβάλλεται από την ελαστική μεμβράνη (latex), η οποία χρησιμοποιείται στις δοκιμές για την στεγανοποίηση του κάδου φυγοκέντρησης.

Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε παραμετρική διερεύνηση της επιρροής, στη μέγιστη οριζόντια εδαφική μετατόπιση, των εξής γεωτεχνικών και σεισμικών παραμέτρων:

- ο της κλίσης της επιφάνειας του εδάφους ($i = 0.6 \div 8.0^\circ$),
- ο της αλληλουχίας των εδαφικών στρώσεων (3 περιπτώσεις στρωματογραφίας),
- ο του συνολικού πάχους έως το επίπεδο εκδήλωσης μετατοπίσεων ($H_{Tot} = 4-12m$),
- ο της σχετικής πυκνότητας της ρευστοποιήσιμης στρώσης ($D_r = 35 \div 90\%$),
- ο της μέγιστης τιμής της οριζόντιας επιτάχυνσης ($a_{max} = 0.04 \div 0.82g$),
- ο της συχνότητας της διέγερσης ($f = 1 \div 10Hz$),
- ο του ποσοστού των λεπτόκοκκων ($FC = 0-35\%$), και
- ο της επιβαλλόμενης διέγερσης.

Συγκεκριμένα, σε σχέση με την τελευταία παράμετρο, από τις συνολικά εκατόν είκοσι (120) αριθμητικές αναλύσεις, οι πενήντα τρεις (53), πραγματοποιήθηκαν υπό την επιβολή ημιτονοειδούς χρονοϊστορίας επιτάχυνσης αποτελούμενης από 22 κύκλους. Στις υπόλοιπες εξήντα εφτά (67) χρησιμοποιήθηκαν δύο τεχνητές χρονοϊστορίες (VELACS Arulmoli et al. 1992, Sharp et al.

2003), οι οποίες μπορούν να χαρακτηριστούν ως «ψευδο-ημιτονοειδείς» και πέντε (5) πραγματικές διεγέρσεις: Αίγιο 1995, Kobe 1995 (JMA, N-S & E-W) και Λευκάδα 2003 (TRANS & LONG).

Πίνακας 1: Περίληψη των πειραμάτων φυγοκεντριστή

Table 1: Summary of centrifuge test results.

Όνομα πειράματος	D_r (%)	i (°)	a_{max} (βόσm) (g)	N_{cycle}	$H_{liq.}$ (m)	D_h (cm)
M2-1	40-45	2	0.18	21.5	10.0	44.0
M2-2	40-45	1.94	0.23	22	10.0	47.0
M2-3	40-45	2.18	0.46	22.5	10.0	97.0
M2-4	40-45	2.07	0.19	22	10.0	61.0
M2-5	40-45	2	0.25	22	10.0	68.0
M2a-3	40-45	0.6	0.28	21.5	10.0	12.2
M2a-4	40-45	0.6	0.26	22	10.0	14.8
M2b-5	40-45	0.8	0.40	22.5	10.0	30.0
M2c-6	40-45	3.95	0.17	21.5	10.0	72.5
LAM1	40	2	0.3	40.5	6.0	80.0
LAM2	40	2	0.3	40.5	6.0	80.0
L45V-2-10	45	2	0.23	20	10.0	66.0
L45V-4-10	45	2	0.41	20	10.0	87.0
L65V-2-10	65	2	0.20	20	10.0	28.0
L65V-4-10	65	2	0.38	20	10.0	63.0
L75V-2-10	75	2	0.21	20	10.0	23.0
L75V-4-10	75	2	0.38	20	10.0	47.0

4. ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΠΡΟΒΛΕΨΕΩΝ

Η επεξεργασία των αποτελεσμάτων των πενήντα τριών (53) αριθμητικών αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν με ημιτονοειδή διεγερση οδήγησε στην ακόλουθη εξίσωση:

$$D_h = d_1 \cdot (a_{max})^{d_2} [T(N_{cyc} - N_L)]^{d_3} [(N_{1,60})_{cs}]^{d_4} (H_{Tot})^{d_5} (\tan i)^{d_6} (1 - FC)^{d_7} \quad (4)$$

όπου $d_1=1.6$, $d_2=0.5$, $d_3=0.8$, $d_4=-1$, $d_5=1$, $d_6=0.5$ και $d_7=3$ και

a_{max} η μέγιστη επιβαλλόμενη επιτάχυνση στη βάση

$(N_{cyc}-N_L)$ ο αριθμός των κύριων κύκλων μετά την πρώτη εκδήλωση ρευστοποίησης

T η δεσπόζουσα περίοδος της διεγερσης

$(N_{1,60})_{cs}$ ο διορθωμένος αριθμός κρούσεων SPT

FC το ποσοστό λεπτόκοκκων

i η εδαφική κλίση και

H_{Tot} το συνολικό πάχος όλων των εδαφικών στρώσεων πάνω από το επίπεδο εκδήλωσης μετατοπίσεων

Η Εξίσωση (4) επεκτάθηκε ακολούθως σε πραγματικές σεισμικές διεγέρσεις, αντικαθι-

τώντας τη μέγιστη επιτάχυνση a_{max} με τη μέση επιτάχυνση της διεγερσης a_{mean} , όπου:

$$a_{mean} = \frac{1}{t_d} \int_0^{t_d} |a(t)| dt \quad (5)$$

και t_d η χρονική διάρκεια της δόνησης.

Για τις μη-ημιτονοειδείς διεγέρσεις, που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτή την ανάλυση βρέθηκε ότι $a_{mean} = (0.10 \div 0.63) a_{max}$. Η αντίστοιχη μέση τιμή για ισχυρούς σεισμούς εκτιμήθηκε ίση με $a_{mean} = 0.50 a_{max}$. Λαμβάνοντας υπόψη ότι για την ημιτονοειδή δόνηση ισχύει, $a_{mean} = 0.63 a_{max}$, η Εξίσωση 4 τελικά λαμβάνει τη μορφή:

$$D_h = 2.1 \cdot (a_{mean})^{0.5} [T(N_{cyc} - N_L)]^{0.8} [(N_{1,60})_{cs}]^{-1} (H_{Tot}) (\tan i)^{0.5} (1 - FC)^3 \quad (6)$$

5. ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΩΝ ΣΧΕΣΕΩΝ

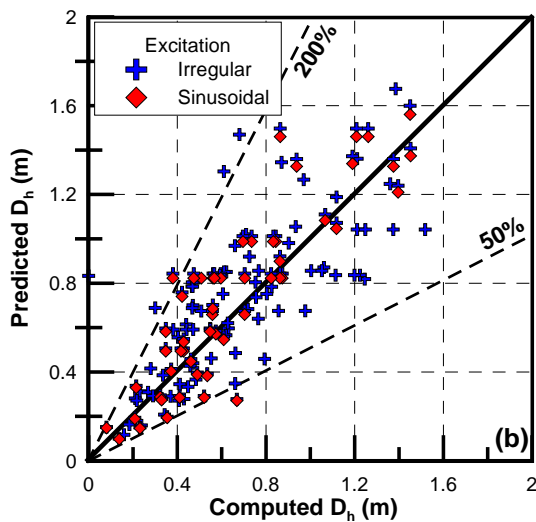
Η ένα-προς-ένα σύγκριση των αποτελεσμάτων όλων των αριθμητικών αναλύσεων με τις αντίστοιχες τιμές μετατοπίσεων που προκύπτουν από την Εξίσωση 6 παρουσιάζεται στο Σχήμα 3. Η παρατηρούμενη συμφωνία είναι ικανοποιητική, δεδομένου ότι το 95% των προβλεπόμενων εδαφικών μετατοπίσεων κυμαίνεται από 50 έως 200% των υπολογιζόμενων τιμών.

Πέραν της σύγκρισης του Σχήματος 3, η αξιολόγηση της προτεινόμενης σχέσης, περιέλαβε συγκρίσεις με:

- μετρήσεις από ιστορικά περιστατικά συγκεντρωμένα από τους Youd et al. (2002), στο Σχήμα 4α, και
- τα αποτελέσματα από τα πειράματα σε φυγοκεντριστή του Πίνακα 1, στο Σχήμα 4β.

Δεδομένου ότι η βάση ιστορικών περιστατικών των Youd et al. (2002) περιλαμβάνει κυρίως «σεισμολογικά» δεδομένα για τα ιστορικά περιστατικά που έχουν αναλύσει, υιοθετήθηκαν οι ακόλουθες παραδοχές για την εκτίμηση των αντίστοιχων «γεωτεχνικών» δεδομένων που απαιτούνται για την εφαρμογή της προτεινόμενης σχέσης:

(α) Ο διορθωμένος αριθμός κρούσεων SPT για το ρευστοποιημένο έδαφος θεωρήθηκε ίσος με $(N_{1,60})_{cs}=7$. Η εν λόγω τιμή εκτιμήθηκε ως λογική, μιας και οι Youd et al. (2002) θεώρησαν ρευστοποιήσιμα τα εδάφη με $(N_{1,60})<15$.



Σχήμα 3. Σύγκριση αναλυτικών και υπολογιζόμενων μετατοπίσεων (D_h) από την Εξίσωση 8.

Figure 3. Comparison between predicted and computed displacements.

(β) Η μέγιστη επιβαλλόμενη επιτάχυνση στη βάση a_{max} υπολογίστηκε από το σεισμικό μέγεθος M και την επικεντρική απόσταση R , των Youd et al. (2002), σύμφωνα με τη σχέση απομείωσης των Sabetta & Pugliese (1987):

$$\log a_{max} = 0.31 \times M_S - \log[R^2 + 5.8^2]^{1/2} + 0.17 \times S - 1.56 \quad (7)$$

όπου M_S είναι το σεισμικό μέγεθος, R η επικεντρική απόσταση και S μια σταθερά ίση με τη μονάδα (1) για έδαφος και μηδέν (0) για βράχο

(γ) Η μέση επιτάχυνση a_{mean} εκτιμήθηκε συντηρητικά ίση με το μισό της μέγιστης επιβαλλόμενης επιτάχυνσης a_{max} , υπό την παραδοχή ισχυρών σεισμικών δονήσεων.

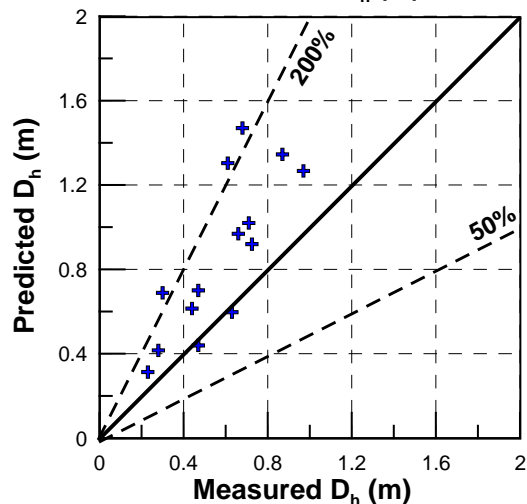
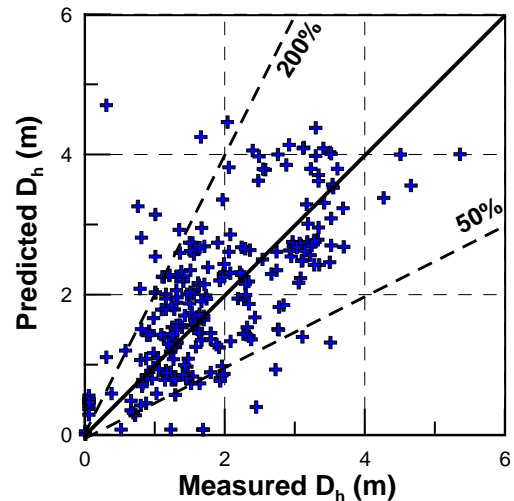
(δ) Το συνολικό πάχος όλων των στρώσεων πάνω από το επίπεδο εκδήλωσης μετατοπίσεων H_{Tot} επιλέχθηκε ίσο με το διπλάσιο του πάχους T_{15} των εν δυνάμει ρευστοποιήσιμων εδαφικών στρώσεων με $(N_{1,60}) < 15$.

(ε) Η χρονική διάρκεια t_d κάθε σεισμικής κίνησης προέκυψε από το δεδομένο σεισμικό εύρος M , σύμφωνα με τη σχέση των Chang & Krinitzky (1977):

$$t_d = 0.2859e^{0.673M} \quad (8)$$

Από την σύγκριση στα Σχήματα 4α και 4β, προκύπτει ότι το 90% των προβλέψεων κυμαίνεται από 50 έως 200% των επιτόπου μετρήσεων, με μέση απόκλιση 50% και το συντελεστή συσχέτισης R^2 να ανέρχεται στο 51%.

Συγκριτικά αναφέρεται ότι αντίστοιχη αξιολόγηση της αναλυτικής σχέσης των Youd et al (2002) έναντι ιστορικών περιστατικών οδήγησε σε συγκρίσιμη διασπορά, παρά το γεγονός ότι η διατύπωσή της βασίστηκε στην απ'ευθείας στατιστική επεξεργασία δεδομένων από τα ίδια ιστορικά περιστατικά, χωρίς την αβεβαιότητα των παραδοχών (α) – (ε). Συγκεκριμένα, το 90% των υπολογιζόμενων εδαφικών μετατοπίσεων κυμαίνεται από 50% έως 200% των προβλεπόμενων ορίων και ο συντελεστής συσχέτισης R^2 ισούται με 83.6%.



Σχήμα 4. Σύγκριση των προβλέψεων με (α) μετρήσεις πεδίου [Youd et al.(2002)] (β) αποτελέσματα φυγοκεντριστή.

Figure 4. Comparison to (a) field-measurements (b) centrifuge test results.

6. ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΩΝ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΕΩΝ ΜΕ ΤΟ ΒΑΘΟΣ

Τα Σχήματα 5α έως 5γ αφορούν στη μεταβολή των εδαφικών μετατοπίσεων με το βάθος, για μονο-στρωματική, δι-στρωματική και τετρα-στρωματική εδαφική τομή αντίστοιχα. Σε όλα τα σχήματα:

- Η οριζόντια μετατόπιση $D(z)$ έχει κανονικοποιηθεί ως προς τη μέγιστη οριζόντια μετατόπιση D_H , ενώ το βάθος z είναι κανονικοποιημένο ως προς το αντίστοιχο μέγιστο βάθος του ρευστοποιημένου εδάφους H_{max} .
- Οι ορισμοί των z και H_{max} αποδίδονται σχηματικά, καθώς εξαρτώνται από τη δεδομένη κάθε φορά στρωματογραφία.
- Εκτός των προτεινόμενων μεταβολών από την βιβλιογραφία και των αριθμητικών προβλέψεων, στη σύγκριση περιλαμβάνεται και μία διαθέσιμη μέτρηση από πείραμα σε φυγοκεντριστή (Sharp et al. 2003)

Τα αριθμητικά αποτελέσματα που παρατίθενται στο Σχήμα 5 προέκυψαν από μια βασική ανάλυση με $a_{max}=0.12g$, $f=2Hz$, $i=2^\circ$ και $D_r=45\%$, και τρεις παραμετρικές αναλύσεις με $a_{max}=0.30g$, $f=1Hz$ και $D_r=75\%$ αντίστοιχα.

Για την ομοιόμορφη εδαφική τομή, όλα τα διαφορετικά σετ δεδομένων συγκλίνουν στην ημιτονοειδή κατανομή με το βάθος. Ωστόσο, υπό την παρουσία ενός μη-ρευστοποιήσιμου εδαφικού στρώματος στην επιφάνεια (δι-στρωματική τομή), οι αριθμητικές προβλέψεις διαφοροποιούνται, προς μια περισσότερο γραμμική κατανομή. Η εικόνα περιπλέκεται για την πολυστρωματική εδαφική τομή, όπου οι εδαφικές μετατοπίσεις παραμένουν πρακτικώς σταθερές στα όρια των μη-ρευστοποιήσιμων στρώσεων, ενώ μεταβάλλονται σχεδόν γραμμικά εντός των ρευστοποιήσιμων στρώσεων.

Για την πρόβλεψη της μεταβολής των μετατοπίσεων με το βάθος στην περίπτωση πολυστρωματικής εδαφικής τομής είναι απαραίτητο να εκτιμηθούν αρχικά τα ποσοστά m και n της οριζόντιας επιφανειακής μετατόπισης που οφείλονται στην κατώτερη και στην ανώτερη ρευστοποιήσιμη εδαφική στρώση αντίστοιχα:

$$m = \frac{D_{H,L}}{D_H} \quad (9)$$

$$n = (1 - m) = \frac{D_{H,U}}{D_H} \quad (10)$$

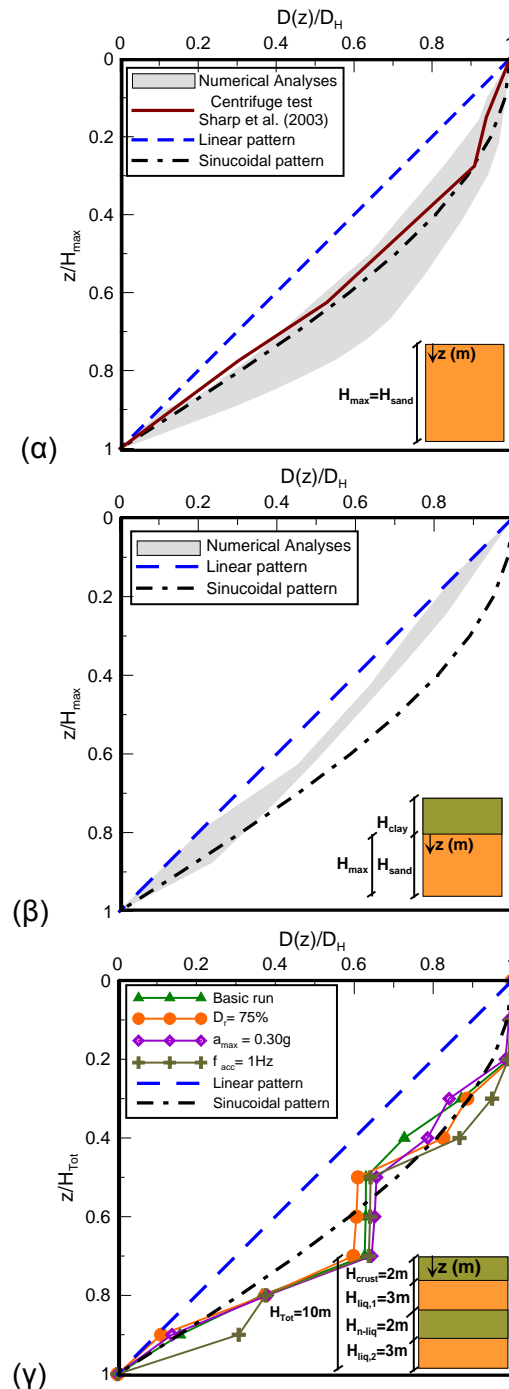
όπου

$D_{H,L}$ η μετατόπιση στην κατώτερη

ρευστοποιήσιμη εδαφική στρώση

D_H η μέγιστη επιφανειακή μετατόπιση

$D_{H,U}$ η μετατόπιση στην ανώτερη ρευστοποιήσιμη εδαφική στρώση



Σχήμα 5. Μεταβολή των μετατοπίσεων με το βάθος για (α) ομοιόμορφη (β) 2-στρωματική εδαφική τομή και (γ) τυπική 4-στρωματική γεωμετρία.

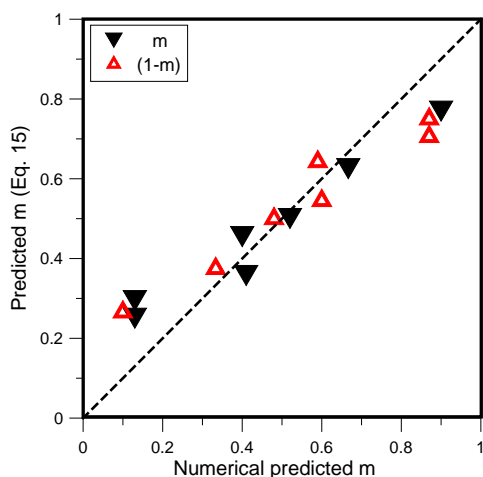
Figure 5. Displacement variation with depth for different soil profiles.

Από τη στατιστική ανάλυση των αριθμητικών προβλέψεων, προκύπτει ότι το ποσοστό συμμετοχής της ανώτερης ρευστοποιήσιμης στρώσης m περιγράφεται προσεγγιστικά ως:

$$m = \frac{I}{I + 0.60(H_U / H_L)} \quad (11)$$

όπου H_U και H_L υποδηλώνουν το πάχος του ανώτερου και κατώτερου ρευστοποιήσιμου στρώματος αντίστοιχα.

Η ακρίβεια της Εξίσωσης (11) αξιολογείται στο Σχήμα 6, σε σύγκριση με αποτελέσματα πλήθους αριθμητικών αναλύσεων, με έντονα μεταβλητές τετρα-στρωματικές εδαφικές τομές.



Σχήμα 6. Σύγκριση προσεγγιστικών και αριθμητικών προβλέψεων για 4-στρωματικές εδαφικές τομές

Figure 6. Comparison between numerical and predicted displacements for 4-layered geometry.

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η παρούσα εργασία οδήγησε στα ακόλουθα συμπεράσματα πρακτικού ενδιαφέροντος:

(α) Οι κύριες παράμετροι που ελέγχουν τις εδαφικές μετατοπίσεις λόγω οριζόντιας εξάπλωσης, είναι η μέση εδαφική επιτάχυνση (a_{mean}), η διάρκεια της σεισμικής δόνησης μετά την πρώτη εκδήλωση ρευστοποίησης ($t_d - t_{liq}$) ή αντίστοιχα το γινόμενο της περιόδου με τους κύκλους φόρτισης μετά την πρώτη ρευστοποίηση $[T \cdot (N_{cyc} - N_{liq})]$ των κύκλων φόρτισης, ο διορθωμένος αριθμός κρούσεων SPT $[(N_{1,60})_{cs}]$, το συνολικό πάχος όλων των στρώσεων έως το επίπεδο ολίσθησης (H_{Tot}), η κλίση της εδαφικής επιφάνειας (i) κ α το ποσοστό λεπτόκοκκων (FC) των

ρευστοποιημένων εδαφικών στρώσεων. Η συντριπτική πλειοψηφία των σχετικών εμπειρικών σχέσεων που χρησιμοποιούνται σήμερα, λαμβάνουν υπόψη μόνο ελάχιστες από τις παραπάνω παραμέτρους.

(β) Συγκρινόμενη με τις αριθμητικές προβλέψεις, η προτεινόμενη σχέση δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα για επιφανειακές εδαφικές μετατοπίσεις έως 1.40m. Αντίστοιχα καλή συμφωνία παρατηρείται ανάμεσα στην προτεινόμενη σχέση και τις μετρήσεις πεδίου από τους Youd et al.(2002), για εδαφικές μετατοπίσεις έως και 4m, ενώ ικανοποιητική συμφωνία μεταξύ της προτεινόμενης σχέσης και των αποτελεσμάτων των πειραμάτων σε φυγοκεντριστή, παρατηρείται για εδαφικές μετατοπίσεις έως και 0.8m.

(γ) Η μεταβολή των εδαφικών μετατοπίσεων από την ελεύθερη επιφάνεια έως την βάση του τελευταίου ρευστοποιήσιμου στρώματος είναι πρακτικά ημιτονοειδής για ομοιόμορφες εδαφικές τομές, αλλά τείνει προς την γραμμική αυξανόμενη της παρουσίας μη ρευστοποιήσιμων εδαφικών στρώσεων, στην ελεύθερη επιφάνεια αλλά και μεταξύ των ρευστοποιήσιμων στρώσεων.

7. ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε το ΙΚΥ (Ίδρυμα Κρατικών Υποτροφιών) και την Ελληνική Γενική Γραμματεία Έρευνας και Τεχνολογίας (ΓΓΕΤ) για τη χρηματοδότηση της παρούσας έρευνας.

8. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Abdoun T. H. (1997) "Modelling of seismically induced lateral spreading of multi-layered soil and its effect on pile foundations", PHD Thesis, Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, New York.
- Andrianopoulos, K.I. (2006), "Numerical modeling of static and dynamic behavior of elastoplastic soils", PHD Thesis, Department of Geotechnical Engineering, School of Civil Eng., N.T.U.A. (in Greek).
- Andrianopoulos, K.I., Papadimitriou, A.G., Bouckovalas, G.D. (2006a), "Numerical analysis of geo-structures in a liquefaction regime", Proceedings, 1st European Conf. on Earthquake Engineering and Seismology, Geneva, September, paper No. 1245
- Andrianopoulos, K.I., Papadimitriou, A.G. and Bouckovalas, G.D. (2006b), "Implementation of a bounding surface model for seismic response of sands", Proceedings of the 4th International FLAC Symposium on Numerical Modeling in Geomechanics, Madrid, Spain

- Andrianopoulos, K.I., Papadimitriou, A.G. and Bouckovalas, G.D. (2007), "Use of a new bounding surface model for the analysis of earthquake-induced liquefaction phenomena", paper no 1443, Proceedings of 4th International Conf. on Earthquake Geot. Eng.
- Arulmoli, K., Muraleetharan, K.K., Hossain, M.M. and Fruth, L.S. (1992), "VELACS: verification of liquefaction analyses by centrifuge studies; Laboratory Testing Program – Soil Data Report", Research Report, The Earth Technology Corporation
- Aydan O., Atak O.V., Ulusay R., Hamada H, and Bardet P.J. (2005), "Ground deformations and lateral spreading around the shore of Sapanca lake induced by the 1999 Kocaeli earthquake", Proceedings of Geotechnical Earthquake Engineering Satellite Conf. Osaka, Japan, 10 September.
- Bartlett F. S. and Youd T. L. (1995), "Empirical prediction of liquefaction-induced lateral spread", Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 121, No. 4, April, pp 317-329.
- Chang, F. and Krinitzsky, E.L. (1977), "Duration, spectral content and predominant period of strong motion earthquake records from western United States", Miscellaneous Paper 5-73-1, U.S. Army Corps of Engineers Waterways Experiment Station, Vicksburg, Mississippi.
- Hamada M. (1999), "Similitude law for liquefied-ground flow", Proceedings of the 7th U.S.-Japan Workshop on Earthquake Resistant design of lifeline facilities and countermeasures against soil liquefaction, pp. 191-205.
- Ishihara K. & Cubrinovski M. (1998), "Soil-pile interaction in liquefied deposits undergoing lateral spreading", XI Danube-European Conference, Croatia, May 1998
- Papadimitriou A., Bouckovalas G. and Dafalias Y. (2001), "A plasticity model for sand under small and large cyclic strains", J. of Geot. and Geoenviron. Eng., Vol.127, No. 11
- Rauch F. A. and Martin II R. J. (2000), "EPOLLS model for predicting average displacements on lateral spreads," J. of Geot. and Geoenviron. Eng., Vol. 126, No. 4, April, pp 360-371.
- Sabetta, F. and A. Pugliese (1987), "Attenuation of peak horizontal acceleration and velocity from Italian strong-motion records", Bull. Seism. Soc. Am., 77, pp. 1491-1513.
- Sento N., Goto K., Namba S., Kobayashi K., Ohoka H. & Tokimatsu K. (1999), "Case study for pile foundation damaged by soil liquefaction at inland site of artificial island", Second international conf. on earthquake Geot. Eng., 21-25th June 1999, Lisbon, Portugal
- Shamoto Y., Zhang J. and Tokimatsu K. (1998), "New charts for predicting large residual post-liquefaction ground deformation," Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 17, February 18, pp 427-438.
- Sharp K. M., Dobry R. and Abdoun T. (2003) "Liquefaction centrifuge modelling of sands of different permeability", J. of Geot. and Geoenviron. Eng., Vol. 129, No. 12, December 1, pp 1083-1091.
- Taboada V.M. and Dobry R. (1998) "Centrifuge modeling of earthquake-induced lateral spreading in sand", J. of Geot. and Geoenviron. Eng., ASCE, Vol 124, No 12, pp. 1195-1206.
- Towhata I. (2005) "Development of geotechnical earthquake engineering in Japan", Heritage lecture, 16th International Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (16ICSMGE), Osaka, Japan, pp. 251-291.
- Tokimatsu K. (1999), "Performance of pile foundations in laterally spreading soils", Proc. 2nd Intl. Conf. Earthquake Geotechnical Engineering (P. Seco e Pinto, ed.), Lisbon, Portugal, June 21-25, Vol 3, pp. 957-964
- Valsamis A. (2009), "Numerical simulation of single pile response under liquefaction-induced lateral spreading", PHD thesis, Department of Geotechnical Engineering, School of Civil Eng., N.T.U.A.
- Youd L. T., Hansen M. C. and Bartlett F. S. (2002), "Revised multilinear regression equations for prediction of lateral spread displacement", J. of Geot. and Geoenviron. Eng., Vol. 128, No. 12, December 1, pp 1007-1017.
- Zhang G., Robertson K. P. and Brachman I. W. R. (2004), "Estimating liquefaction-induced lateral displacements using the standard penetration test or cone penetration test," J. of Geot. and Geoenviron. Eng., Vol 130, No. 8, August 1, pp 861-871.
- Zhang J. and Zhao X.J. (2005), "Empirical models for estimating liquefaction-induced lateral spread displacement," Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 25, pp 439-450.