

Εφαρμοσμένη Έρευνα με Τίτλο:

**ΣΥΛΛΟΓΗ - ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΑΡΑΜΕΝΟΥΣΩΝ ΣΕΙΣΜΙΚΩΝ
ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΩΣΗ ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΩΝ
ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΕΑΚ**

Περίληψη

Συντονιστής: Σταματόπουλος και Συνεργάτες ΕΠΕ
(πρώην Κοτζιάς - Σταματόπουλος Ε.Π.Ε)

ΙΟΥΛΙΟΣ 2003

Επιστημονικός Υπεύθυνος: Κωνσταντίνος Σταματόπουλος

Ισαύρων 5, 11471 Αθήνα. Τηλ: 3603911, 3624898, 3622855 - Fax: 3616919
- e-mail: kostama@athena.compulink.gr

Πίνακας Περιεχομένων

	Σελίδα
1. ΣΚΟΠΟΣ	3
1.1 Γενικά	3
1.2 Συζήτηση	3
2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ	5
2.1. Στάδιο 1. Συλλογή και εγγραφή στοιχείων	5
2.2 Στάδιο 2. Ανάλυση επακόλουθων της εδαφικής μετακίνησης και καθορισμός ανεκτών ορίων μετακίνησης	5
2.3 Στάδιο 3. Ερμηνεία μετακινήσεων με υπάρχουσες μεθόδους	6
2.4. Στάδιο 4. Ανάπτυξη ή βελτίωση υπάρχουσών εμπειρικών σχέσεων για τη πρόβλεψη της σεισμικής μετακίνησης λόγω αστοχίας	8
2.5 Στάδιο 5. Ανάπτυξη ή βελτίωση υπάρχουσών εμπειρικών σχέσεων για την πρόβλεψη της συνίζησης λόγω σεισμού	7
2.6 Στάδιο 6. Συγγραφή προτάσεων για αντισεισμικούς κανονισμούς και τελική έκθεση	8
3. ΒΑΣΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	9
3.1 Συνέπειες της εδαφικής μετακίνησης και καθορισμός ανεκτών ορίων μετακίνησης	9
3.2 Συμπεράσματα για την ακρίβεια της προσομοίωσης σώματος σε κεκλιμένο επίπεδο και νέα μεθοδολογία υπολογισμού της σεισμικής μετακίνησης λόγω αστοχίας σε διάτμηση	11
3.3 Συμπεράσματα για την ακρίβεια μεθόδων προσδιορισμού της επακόλουθης καθίζησης λόγω συνίζησης τόσο κορεσμένων όσο και ξηρών εδαφών.	17
4. ΧΡΗΣΙΜΟΤΗΤΑ	18
4.1 Γενικά	18
4.2. Προτάσεις	18
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	22

ΣΧΗΜΑΤΑ

Σχ. 1. Μοντέλο των Stamatopoulos et al (2000) σώματος σε δύο κεκλιμένα επίπεδα: (α) αρχική γεωμετρία, (β) γεωμετρία όταν η διανυόμενη απόσταση είναι u_2	23
Σχ. 2. Η γεωμετρία που εξετάζεται για την στροφή κτιρίων σε σεισμό.	24
Σχ. 3. Σχέση της αστράγγιστης αντοχής του εδάφους λόγω ρευστοποίησης, c_u συναρτήσει του N της επιτόπου δοκιμής SPT (Seed and Harder, 1990)	25
Σχ. 4. Επίδραση της μεταβολής της γεωμετρίας στη σεισμική μετακίνηση u με το μοντέλο του Stamatopoulos (1996).	26

1. ΣΚΟΠΟΣ

1.1 Γενικά

Σκοπός του ερευνητικού προγράμματος είναι να προταθούν απλές μέθοδοι που μπορεί να εφαρμόζει ο μηχανικός για τον αντισεισμικό σχεδιασμό βάσει της ανεκτής εδαφικής μετακίνησης. Για το παραπάνω είναι απαραίτητος ο ορθολογικός και τεκμηριωμένος καθορισμός (α) οριακών τιμών των μετατοπίσεων (για θεμελιώσεις, αντιστηρίξεις και πρηνή) και (β) απλών μεθόδων υπολογισμού των σεισμικών εδαφικών μετακινήσεων στον αντισεισμικό κανονισμό.

1.2 Συζήτηση

Λόγω σεισμού, εδαφικές στρώσεις στην ευρύτερη περιοχή του σεισμού δονούνται και εάν είναι αρκετά χαλαρές και η δόνηση αρκετά ισχυρή, είναι δυνατόν να υποστούν παραμένουσες παραμορφώσεις. Η τρωτότητα (δηλαδή οι ζημιές ή και καταστροφές) κτιρίων και άλλων κατασκευών με επιφανειακές θεμελιώσεις σε σεισμό, μπορεί να συσχετιστεί με αυτές τις παραμένουσες παραμορφώσεις του υπεδάφους. Επίσης η τρωτότητα εδαφικών κατασκευών μπορεί να συσχετισθεί με τις παραμορφώσεις της ίδιας της κατασκευής. Το μέγεθος της μετακίνησης που προκαλεί αστοχία διαφέρει μεταξύ διαφόρων τύπων κατασκευών.

Οι παραμένουσες εδαφικές παραμορφώσεις λόγω σεισμού προέρχονται τόσο από αστοχία σε διάτμηση, όσο και από πύκνωση του εδάφους (συνίζηση). Τόσο ο Ευρωκώδικας (European Pestandard, 1994), όσο και ο ΕΑΚ (ΟΑΣΠ, 1999) απαιτούν να υπολογισθεί η καθίζηση λόγω συνίζησης του εδάφους που ενδέχεται να προκληθεί από σεισμό, χωρίς όμως να καθορίζουν αυτές τις μεθόδους. Επίσης δεν δίδουν τιμές της ανεκτής μετακίνησης.

Γιά τον αντισεισμικό σχεδιασμό πρηνών, εδαφικών κατασκευών, τοίχων αντιστήριξης και θεμελιώσεων λόγω αστοχίας σε διάτμηση, ο γεωτεχνικός μηχανικός μπορεί να ακολουθήσει δύο μεθοδολογίες: (α) να εξασφαλίσει έναν ελάχιστο συντελεστή ασφαλείας, οριζόμενο ως ο λόγος της διατμητικής αντίστασης του υλικού διά των στατικών+σεισμικών διατμητικών τάσεων κατά μήκος πιθανής επιφάνειας ολίσθησης, και (β) να περιορίσει την εδαφική μετακίνηση που η κατασκευή θα υποστεί κατά τον σεισμό. Η πρώτη μεθοδολογία είναι απλούστερη. Χρησιμοποιείται στον ΕΑΚ. Η δεύτερη μεθοδολογία είναι προτιμητέα επειδή, όπως αναφέρθηκε, η τρωτότητα αυτών των κατασκευών σε σεισμό μπορεί να συσχετιστεί με αυτές τις παραμένουσες παραμορφώσεις του υπεδάφους.

Οι μέθοδοι πρόβλεψης της σεισμικής μετακίνησης λόγω αστοχίας σε διάτμηση βασίζονται στη προσομοίωση σώματος σε κεκλιμένο επίπεδο που αρχικά προτάθηκε από τον Newmark (1965). Βελτιωμένες προσομοιώσεις της σεισμικής μετακίνησης λόγω αστοχίας σε διάτμηση έχουν πρόσφατα προταθεί. Παραδείγματος χάριν μοντέλα που λαμβάνουν υπόψιν (α) την ελαστοπλαστική συμπεριφορά σε επιφάνειες ολίσθησης, (β) την επίδραση της κατακόρυφης επιτάχυνσης και (γ) τη κίνηση σωμάτων επί κεκλιμένων επιπέδων με διαφορετική κλίση αναφέρονται στη πρόσφατη βιβλιογραφία (π.χ. Stamatopoulos, 1996). Όμως η ακρίβεια αυτών των μοντέλων δεν έχει μελετηθεί συστηματικά.

Οι πλέον αξιόπιστες μετρήσεις της δυναμικής συμπεριφοράς του εδάφους είναι αυτές που γίνονται στο ύπαιθρο σε φυσική κλίμακα. Η μελέτη και παραμετρική

ανάλυση της δυναμικής συμπεριφοράς γίνεται επιπροσθέτως με μοντέλα στη δονητική τράπεζα ή στον φυγοκεντριστή. Επίσης, πρόσφατα ελαστο-πλαστικές δυναμικές αναλύσεις έχουν αναπτυχθεί που προβλέπουν με ακρίβεια τη δυναμική συμπεριφορά του εδάφους. Παραμετρικές αναλύσεις με αυτές τις μεθόδους διαφόρων προβλημάτων εδαφοδυναμικής υπάρχουν.

Λόγω των παραπάνω, η παρούσα έρευνα καθορίζει και τεκμηριώνει (α) οριακές τιμές των εδαφικών μετατοπίσεων (για θεμελιώσεις, αντιστηρίξεις και πρανή) και (β) απλές μεθόδους υπολογισμού αυτών των μετακινήσεων βασίζόμενη κυρίως σε μετρήσεις πεδίου. Επιπροσθέτως, μετρήσεις από μοντέλα ή αποτελέσματα αριθμητικών αναλύσεων χρησιμοποιούνται όπου δεν υπάρχουν αρκετά στοιχεία πεδίου.

2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Το ερευνητικό πρόγραμμα περιλαμβάνει έξι στάδια το περιεχόμενο των οποίων περιγράφεται παρακάτω:

2.1. Στάδιο 1. Συλλογή και εγγραφή στοιχείων

Συλλέχθηκαν περιπτώσεις σεισμικής εδαφικής αστοχίας για φυσικά πρηνή, θεμελιώσεις, εδαφικές κατασκευές (φράγματα και επιχώματα) και αντιστήριξεις. Επίσης συλλέχθηκαν περιπτώσεις καθίζησης (περίπου) οριζοντίου εδάφους λόγω συνίζησης σε σεισμό. Συνολικά συλλέχθηκαν 133 περιπτώσεις.

Καταγράφηκε η εδαφική μετακίνηση σε σχέση με: (α) την επιτόπου γεωμετρία, (β) τη γεωτεχνική στρωματογραφία και (γ) τα σεισμολογικά στοιχεία. Τα σεισμολογικά στοιχεία περιλαμβάνουν το μέγεθος του σεισμού και την απόσταση από την εστία του σεισμού ή το τεκτονικό ρήγμα. Αναφέρθηκε εάν υπάρχουν καταγραμμένες επιταχύνσεις στη περιοχή της αστοχίας. Η γεωτεχνική στρωματογραφία περιλαμβάνει τη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα, τον τύπο του εδάφους και την αντοχή ή παραμορφωσιμότητα του εδάφους, κυρίως από επιτόπου δοκιμές. Η κάθε περίπτωση εμπλουτίστηκε με παραστατικά σχήματα και φωτογραφίες. Επίσης αναφέρθηκαν οι βιβλιογραφικές αναφορές που περιγράφουν την κάθε περίπτωση.

Για την αποτελεσματική αποθήκευση και άντληση των σχετικών πληροφοριών σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε μία σχεσιακή βάση δεδομένων. Η υλοποίηση της βάσης δεδομένων έγινε στο λογισμικό MS ACCESS, που είναι ευρέως διαδεδομένο.

2.2 Στάδιο 2. Ανάλυση επακόλουθων της εδαφικής μετακίνησης και καθορισμός ανεκτών ορίων μετακίνησης

Η θέσπιση ορίων στις τιμές των μετακινήσεων έγινε με την ακόλουθη διαδικασία: Πρώτα εξετάσαμε υπό ποιές συνθήκες (i) εδαφικές κατασκευές, (ii) τοίχοι αντιστήριξης, (iii) θεμελιώσεις κτιρίων ή άλλων κατασκευών και (iv) φυσικά πρηνή συμπεριφέρονται «ευμετακίνητα», δηλαδή μπορούν να μετακινηθούν σε σεισμό χωρίς να θραυσθούν. Σχεδιασμός "ευμετακίνητων" κατασκευών μπορεί να γίνει βάσει ανεκτών ορίων μετακίνησης.

Κατόπιν για τις παραπάνω περιπτώσεις, καθορίστηκαν (α) επίπεδα βλαβών και το επίπεδο βλαβών σχεδιασμού, και (β) η ανεκτή μετακίνηση τύπων εδαφικών κατασκευών, τοίχων αντιστήριξης θεμελιώσεων και φυσικών πρηνών, για συγκεκριμένο επίπεδο βλαβών. Όσον αφορά το (β), για καθεμία από τις περιπτώσεις που αναφέρθηκαν προηγουμένως, πρώτα αναφέρονται (i) οι τύποι αυτών των περιπτώσεων για τις οποίες βρέθηκαν αρκετά στοιχεία πεδίου, και άρα μπορούν να εξετασθούν, και (ii) βιβλιογραφικές αναφορές που προτείνουν την ανεκτή μετακίνηση υπό στατικές ή σεισμικές συνθήκες, εάν υπάρχουν. Κατόπιν περιγράφονται οι περιπτώσεις που βρέθηκαν στη βάση δεδομένων, και γίνεται μελέτη και στατιστική τους επεξεργασία ώστε να καθορισθεί η κρίσιμη παραμέτρος της μετακίνησης και να συσχετισθεί η ανεκτή σεισμική μετακίνηση αυτής της παραμέτρου με το επίπεδο βλαβών. Τέλος βάσει όλων των παραπάνω καθορίζεται η τιμή της ανεκτής μετακίνησης συναρτήσει του επιπέδου βλαβών.

2.3 Στάδιο 3. Ερμηνεία μετακινήσεων με υπάρχουσες μεθόδους

Στην δημοσιευμένη βιβλιογραφία απλές μέθοδοι υπολογίζουν τη σεισμική εδαφική μετακίνηση συνήθως σε δύο βήματα: πρώτα εκτιμάται η ασκούμενη σεισμική διέγερση (επιτάχυνση) στη συγκεκριμένη θέση και κατόπιν υπολογίζεται η επακόλουθη σεισμική μετακίνηση λόγω αστοχίας σε διάτμηση ή/και συνίζηση λόγω πύκνωσης. Συγκεκριμένα:

- Η ασκούμενη επιτάχυνση εκτιμάται είτε με εμπειρικές μεθόδους που προβλέπουν τη μείωση της επιτάχυνσης συναρτήσει της απόστασης από το σεισμικό ρήγμα και (πιθανώς) την επίδραση των τοπικών γεωτεχνικών συνθηκών, είτε με μονοδιάστατες δυναμικές αναλύσεις.

- Οι μέθοδοι πρόβλεψης της σεισμικής μετακίνησης λόγω αστοχίας σε διάτμηση βασίζονται στη προσομοίωση σώματος-επί-κεκλιμένου-επίπεδου. Βελτιωμένες προσομοιώσεις της σεισμικής μετακίνησης λόγω αστοχίας σε διάτμηση έχουν πρόσφατα προταθεί. Παραδείγματος χάριν μοντέλα που λαμβάνουν υπόψιν (α) την ελαστοπλαστική συμπεριφορά σε επιφάνειες ολίσθησης, (β) την επίδραση της κατακόρυφης επιτάχυνσης και (γ) τη κίνηση σωμάτων επί κεκλιμένων επιπέδων με διαφορετική κλίση αναφέρονται στη πρόσφατη βιβλιογραφία.

- Οι μέθοδοι που προβλέπουν τη καθίζηση λόγω συνίζησης για δεδομένη σεισμική διέγερση βασίζονται (α) στη συμπίεστικότητα του εδάφους που υπολογίζεται συνήθως βάσει επιτόπου δοκιμών και (β) στο πάχος της συμπίεστης στρώσης.

Στο παρόν στάδιο πρώτα καταγραφηκαν από την δημοσιευμένη βιβλιογραφία μέθοδοι προσδιορισμού της ασκούμενης σεισμικής διέγερσης σε συγκεκριμένη θέση και της επακόλουθης σεισμικής μετακίνησης λόγω αστοχίας σε διάτμηση ή καθίζησης λόγω συνίζησης τόσο “ξηρών” όσο και κορεσμένων εδαφών. Κατόπιν έγινε προσπάθεια να προβλεφθούν οι καταγραφείσες σεισμικές παραμένουσες παραμόρφώσεις στις περιπτώσεις που συλλέχθηκαν στο στάδιο 1, στις οποίες υπάρχει επαρκής για πρόβλεψη γνώση των γεωτεχνικών συνθηκών. Στη περίπτωση σεισμικής μετακίνησης λόγω προσωρινής αστοχίας οι προβλέψεις έγιναν τόσο με τη προσομοίωση σώματος-σε-κεκλιμένο-επίπεδο, όσο και με τις πιο εξελιγμένες παραλλαγές της προσομοίωσης

2.4. Στάδιο 4. Ανάπτυξη ή βελτίωση υπάρχουσών εμπειρικών σχέσεων για τη πρόβλεψη της σεισμικής μετακίνησης λόγω αστοχίας

2.4.1. Γενικά

Η μελέτη της βάσης δεδομένων επιτόπου καταγραφών σεισμικής μετακίνησης έδειξε περιπτώσεις κατά τις οποίες υπάρχουσες απλές μέθοδοι για τη πρόβλεψη της σεισμικής μετακίνησης λόγω αστοχίας δεν επαρκούν. Αυτές οι περιπτώσεις αφορούν (i) τη σεισμική μετακίνηση πρανών λόγω ρευστοποίησης και (ii) τη σεισμική στροφή κτιρίων λόγω ρευστοποίησης. Σε αυτές τις περιπτώσεις αναπτύχθηκαν νέες μέθοδοι.

2.4.2. Σεισμική μετακίνηση πρανών λόγω ρευστοποίησης

Η μελέτη της βάσης δεδομένων επιτόπου καταγραφών σεισμικής μετακίνησης έδειξε ότι σε πολλές περιπτώσεις φραγμάτων, εδαφικών επιχωμάτων, κρηπιδότοιχων, αλλά και φυσικών πρανών, σε σεισμό παρατηρείται μεγάλη μετακίνηση σε επιφάνεια ολίσθησης, λόγω της ρευστοποίησης που προκαλεί ο σεισμός στο έδαφος. Η επιφάνεια ολίσθησης μπορεί να προσεγγισθεί με δύο ευθύγραμμα τμήματα, από τα οποία το κάτω είναι περίπου οριζόντιο και το πάνω έχει μία κλίση. Το κάτω τμήμα είναι κάτω από τη στάθμη του νερού, και ρευστοποιείται. Άρα, ενεργοποιείται η αστράγγιστη διατμητική αντοχή. Το άνω τμήμα είτε (α) βρίσκεται όλο πάνω από τη στάθμη του νερού, είτε (β) βρίσκεται όλο ή εν μέρει πάνω από τη στάθμη του νερού.

Επειδή η μετακίνηση στο πρόβλημα που εξετάζεται είναι μεγάλη, η μεταβολή της γεωμετρίας επηρεάζει τα αποτελέσματα. Οι Stamatoroulos et al (2000) προτείνουν μοντέλο σώματος που ολισθαίνει σε δύο επίπεδα (Σχ. 1), όπου τόσο στις δύο εξωτερικές επιφάνειες ολίσθησης, όσο και στην εσωτερική, υπάρχει μόνον αντοχή συνοχής. Το μοντέλο χρησιμοποιήθηκε για τη πρόβλεψη της μετακίνησης λόγω σεισμού τριών φραγμάτων. Για αντοχή εληφθη η αστάγγιστη διατμητική, c_u , που είτε είναι παρόμοια, είτε διαφορετική στις δύο επιφάνειες ολίσθησης.

Το παραπάνω μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην παραπάνω περίπτωση (α), αλλά όχι στην (β), όπου η αντοχή μπορεί να περιλαμβάνει τόσο τριβή, όσο και συνοχή. Στο νέο μοντέλο, παρόμοια με το μοντέλο των Stamatoroulos et al (2000) λαμβάνεται εδαφική μάζα που ολισθαίνει σε επιφάνεια ολίσθησης αποτελούμενη από δύο ευθύγραμμα τμήματα. Όμως, αντίθετα από τους Stamatoroulos et al (2000), τόσο στις δύο εσωτερικές επιφάνειες ολίσθησης, όσο και στην εσωτερική, η αντίσταση του εδάφους έχει δύο συνιστώσες: τριβής και συνοχής.

2.4.3. Σεισμική στροφή κτιρίων λόγω ρευστοποίησης

Η βάση δεδομένων έδειξε ότι σε παλαιότερους, αλλά και πρόσφατους σεισμούς (π.χ. Niigata, Luzon, Adapazari), υψηλά κτίρια θεμελιωμένα με εννιαία θεμελίωση στρέφονται δραματικά κατά τη διάρκεια του σεισμού. Αυτή η στροφή μπορεί να είναι τόσο μεγάλη που το κτίριο να καταστεί ακατοίκητο, ή ακόμη και να ανατραπεί. Αυτό το φαινόμενο έχει παρατηρηθεί σε υψηλά και μικρού πλάτους κτίρια θεμελιωμένα σε μικρό βάθος σε κορεσμένα αμμώδη εδάφη που χάνουν την αντοχή τους σε σεισμό.

Η κρίσιμη επιτάχυνση θεμελίων έχει διερευνηθεί με διάφορες μεθόδους (π.χ. Soubra, 1999). Αυτές οι μέθοδοι μπορούν να εφαρμοσθούν για τη πρόβλεψη της σεισμικής καθίζησης με τη προσομοίωση σώματος σε κεκλιμένο επίπεδο. Όμως, οι μέθοδοι (α) δεν μπορούν να λάβουν υπόψη με εύχρηστο τρόπο την οποιαδήποτε θέση της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα, που είναι καίρια στη επίδραση των επιτόπου συνθηκών στη σεισμική καθίζηση και (β) δεν υπολογίζουν την σεισμική στροφή του θεμελίου.

Στη παρούσα έρευνα εξετάζεται μηχανισμός αστοχίας που προβλέπει την στροφή κτιρίων δίνεται στο Σχ. 2: Η επιφάνεια ολίσθησης κάτω από το θεμέλιο λαμβάνεται κυκλική και λόγω της ροπής του κτιρίου που ασκείται κατά τη διάρκεια του σεισμού, το θεμέλιο στρέφεται. Η κατασκευή θεωρείται έχουσα σχήμα ορθογωνίου μεγάλου μήκους. Το κέντρο του κύκλου ολίσθησης θεωρείται συμπίπτει με μία των κορυφών της βάσης έδρασης της κατασκευής που ευρίσκεται σε ορισμένο βάθος από την επιφάνεια του εδάφους. Παρόμοια με την ανάλυση ευστάθειας πρηνών κατά Fellenius κατά την ανάλυση του κύκλου ολίσθησης σε κατακόρυφα στοιχεία οι οριζόντιες εσωτερικές δυνάμεις στις επιφάνειες μεταξύ των στοιχείων αγνοούνται. Άνωθεν της στάθμης υδροφόρου ορίζοντα το έδαφος θεωρείται να έχει μόνο αντίσταση τριβής (ϕ') και κάτω από αυτήν να έχει μόνον αντίσταση συνοχής (c_u).

2.5 Στάδιο 5. Ανάπτυξη ή βελτίωση υπαρχουσών εμπειρικών σχέσεων για την πρόβλεψη της συνίζησης λόγω σεισμού

2.5.1. Κορεσμένα εδάφη

Σε κορεσμένα εδάφη οι μέθοδοι Tokimatsu-Seed (1987) και Ishihara and Yoshimine (1992) συσχετίζουν την ογκομετρική παραμόρφωση με (α) τη πυκνότητα της άμμου και την κυκλική τάση, ή/και (β) τον συντελεστή ασφαλείας για ρευστοποίηση, $FS_{\text{ρευστ}}$. Αυτές οι σχέσεις μπορούν να επιβεβαιωθούν με εργαστηριακές δοκιμές. Ειδικότερα, εκτελέσθηκε σειρά εργαστηριακών δοκιμών απλής διάτμησης και ανακυκλιζόμενης

φόρτισης σε Ελληνική άμμο με διαφορετικές πυκνότητες. Σε αυτές τις δοκιμές ασκήθηκε ανακυκλιζόμενη φόρτιση υπό συνθήκες σταθερού όγκου μέχρι τη ρευστοποίηση, και μετά θα μετρήθηκε η μεταβολή του όγκου κατά την εκτόνωση της υπερπίεσης των πόρων. Βάσει και αυτών των δοκιμών καθορίστηκε συντελεστής ασφαλείας για την πρόβλεψη της συνίζησης λόγω σεισμού με τις παραπάνω μεθόδους.

2.5.2. Ξηρά εδάφη

Η μέθοδος Tokimatsu-Seed (1987) χρησιμοποιείται για τη πρόβλεψη της συνίζησης λόγω σεισμού σε ξηρούς άμμους. Προβλέπει την ογκομετρική παραμόρφωση συναρτήσει της ασκούμενης κυκλικής παραμόρφωσης της πυκνότητας και του αριθμού των κύκλων. Για να επιβεβαιωθεί η ακρίβεια αυτής της σχέσης, εκτελέστηκε σειρά εργαστηριακών δοκιμών απλής διάτμησης και ανακυκλιζόμενης φόρτισης σε διαφορετικές πυκνότητες σε Ελληνικό έδαφος. Ειδικότερα, χρησιμοποιήθηκε το ίδιο έδαφος που χρησιμοποιήθηκε και στα κορεσμένα εδάφη. Βάσει και αυτών των δοκιμών καθορίστηκε συντελεστής ασφαλείας για την πρόβλεψη της συνίζησης λόγω σεισμού με τη μέθοδο Tokimatsu-Seed (1987).

2.6 Στάδιο 6. Συγγραφή προτάσεων για αντισεισμικούς κανονισμούς και τελική έκθεση

Βάσει των αποτελεσμάτων των παραπάνω σταδίων 2, 3, 4 και 5, δόθηκαν προτάσεις για πιθανή ενσωμάτωση στον Ελληνικό (και Ευρωπαϊκό) Αντισεισμικό Κανονισμό.

3. ΒΑΣΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

3.1 Συνέπειες της εδαφικής μετακίνησης και καθορισμός ανεκτών ορίων μετακίνησης

3.1.1. Περιπτώσεις που μπορεί να εφαρμόζεται σχεδιασμός βάσει της μετακίνησης,

Ανάλυση της βάσης δεδομένων έδειξε ότι σχεδιασμός βάσει της μετακίνησης μπορεί να εφαρμόζεται (α) σε εδαφικές κατασκευές (δηλαδή χωμάτινα φράγματα και άλλα επιχώματα), (β) σε τοίχους βαρύτητας, κρηπιδότοιχους και σε άλλους τύπους τοίχων αντιστήριξης υπό την προϋπόθεση ότι ο τοίχος έχει σχεδιασθεί σωστά ώστε να μην θραύεται λόγω των δυνάμεων που ασκούνται λόγω του σεισμού στον τοίχο και (γ) σε φυσικά εδαφικά πρηνή που δεν περιλαμβάνουν απόκρημνους βράχους.

Όσον αφορά κτίρια, γεωτεχνικός τους σχεδιασμός βάσει της ανεκτής μετακίνησης είναι εφικτός μόνον στα κτίρια που έχουν ενιαία θεμελίωση (π.χ. γενική κοιτόστρωση). (Σε κτίρια σε μεμονομέναπέδιλα η επιτρεπόμενη καθίζηση είναι πολύ μικρή, και επειδή ο υπολογισμός της καθίζησης περιλαμβάνει πολλές αβεβαιότητες, σχεδιασμός βάσει εδαφικής μετακίνησης δεν είναι εφικτός).

3.1.2. Τιμές ανεκτής μετακίνησης

Στον πίνακα 1 δίνονται οι κατηγορίες σεισμικών βλαβών κατασκευών. Στον πίνακα 2 δίνονται οι κατηγορίες σεισμικών βλαβών φυσικών εδαφών χωρίς κατασκευές. Η προτεινόμενη ανεκτή μέγιστη σεισμική καθίζηση φραγμάτων με ύψος < 20 m, επιχωμάτων ποταμών, οδικών επιχωμάτων και σιδηροδρομικών επιχωμάτων δίνεται στους πίνακες 3 ως 6. Η προτεινόμενη ανεκτή μέγιστη σεισμική μετακίνηση κρηπιδότοιχων και “ευμετακίνητων” τοίχων αντιστήριξης πλην κρηπιδότοιχων που στηρίζουν ακόρεστο έδαφος δίνεται στους πίνακες 7 και 8. Ο πίνακας 9 δίνει την ανεκτή σεισμική καθίζηση και στροφή ενιαίων θεμελιώσεων και δεξαμενών. Τέλος ο πίνακας 10 δίνει την ανεκτή μετακίνηση φυσικών πρηνών χωρίς κατασκευές.

Πίνακας 1. Κατηγορίες σεισμικών βλαβών κατασκευών

Κατηγορία	Συνέπεια
A	Περιορισμένες βλάβες ή βλάβες εύκολα επισκευάσιμες μετά το σεισμό (π.χ. ρωγμές) που όμως δεν εμποδίζουν τη βασική λειτουργία-χρήση της κατασκευής, ούτε αποτελούν απειλή για την ευστάθειά της
B	Βλάβες που καθιστούν προβληματική και ίσως επικίνδυνη την βασική λειτουργία-χρήση της κατασκευής, των οποίων όμως η επισκευή είναι δυνατή και οικονομικά συμφέρουσα

Πίνακας 2. Κατηγορίες σεισμικών βλαβών φυσικών εδαφών χωρίς κατασκευές

Κατηγορία	Συνέπεια
A'	Μηδενικές ή μικρές αλλοιώσεις στο περιβάλλον και στο φυσικό έδαφος
B'	Μέτριες αλλοιώσεις στο περιβάλλον και στο φυσικό έδαφος
Γ'	Απαραδέκτες αλλοιώσεις στο περιβάλλον και στο φυσικό έδαφος

Πίνακας 3. Προτεινόμενη ανεκτή μέγιστη σεισμική καθίζηση φραγμάτων με ύψος < 20 m, συναρτήσει του ύψους του φράγματος, H.

Επίπεδο βλαβών (βλέπε πίνακα 8.1.1)	Μέγιστη καθίζηση του φράγματος	Μέγιστη καθίζηση του φράγματος ύψους 20m
B	0.05(H)	100 cm
A	0.01(H)	20 cm

Πίνακας 4. Προτεινόμενη ανεκτή μέγιστη σεισμική καθίζηση επιχωμάτων ποταμών συναρτήσει του ύψους του επιχώματος, H.

Επίπεδο βλαβών (βλέπε πίνακα 8.1.1)	Μέγιστη καθίζηση του επιχώματος	Μέγιστη καθίζηση επιχωμάτων ποταμών για H=10m
B	0.05(H)	50cm
A	0.01(H)	10 cm

Πίνακας 5. Προτεινόμενη ανεκτή μέγιστη σεισμική καθίζηση οδικών επιχωμάτων

Επίπεδο βλαβών (βλέπε πίνακα 8.1.1)	Μέγιστη καθίζηση του επιχώματος (cm)
B	20
A	2.5

Πίνακας 6. Προτεινόμενη ανεκτή μέγιστη σεισμική καθίζηση σιδηροδρομικών επιχωμάτων

Επίπεδο βλαβών (βλέπε πίνακα 1)	Μέγιστη καθίζηση του επιχώματος (cm)
B	20
A	1.2

Πίνακας 7. Προτεινόμενη μέγιστη ανεκτή οριζόντια μετακίνηση κρηπιδότοιχων

Επίπεδο βλαβών (βλέπε πίνακα 1)	Κρηπιδότοιχος αποβάθρας με γεραμούς και άλλες κατασκευές (cm)	Κρηπιδότοιχος χωρίς κατασκευές (cm)
B	20	50
A	5	10

Πίνακας 8. Προτεινόμενη μέγιστη ανεκτή οριζόντια μετακίνηση “ευμετακίνητων” τοίχων αντιστήριξης πλην κρηπιδότοιχων που στηρίζουν ακόρεστο έδαφος

Επίπεδο βλαβών (βλέπε πίνακα 1)	Τοίχος ύψους h που αντιστήριζει οδόστρωμα ή σιδηροτροχιά σε απόσταση μικρότερη από 2*h. Μετακίνηση του τοίχου (cm)	Τοίχος ύψους h που αντιστήριζει οδόστρωμα ή σιδηροτροχιά σε απόσταση μεγαλύτερη από 2*h. Μετακίνηση του τοίχου (cm)
B	20	50
A	5	10

Πίνακας 9. Προτεινόμενη ανεκτή μέγιστη σεισμική καθίζηση και στροφή ενιαίων θεμελιώσεων και δεξαμενών.

Τύπος θεμελίωσης	Επίπεδο βλαβών B (βλέπε πίνακα 1)	Επίπεδο βλαβών A (βλέπε πίνακα 1)
κτίριο με ενιαία θεμελίωση	25 cm, 3°	5 cm, 1°
θεμέλιο δεξαμενών	30 cm, 3°	7 cm, 2°

Πίνακας 10. Προτεινόμενη ανεκτή μέγιστη οριζόντια μετακίνηση φυσικών πρανών χωρίς κατακευές

Επίπεδο βλαβών (πίνακας 2)	Μέγιστη (περίπου) οριζόντια μετακίνηση κατωτέρου τμήματος του πρανούς (cm)
B'	300
A'	30

3.2 Συμπεράσματα για την ακρίβεια της προσομοίωσης σώματος σε κεκλιμένο επίπεδο και νέα μεθοδολογία υπολογισμού της σεισμικής μετακίνησης λόγω αστοχίας σε διάτμηση

3.2.1. Συμπεράσματα για την ακρίβεια της προσομοίωσης σώματος σε κεκλιμένο επίπεδο, και παραλλαγών της

Οι μέθοδοι πρόβλεψης της σεισμικής μετακίνησης λόγω αστοχίας σε διάτμηση βασίζονται στη προσομοίωση σώματος σε κεκλιμένο επίπεδο. Σε αυτή τη προσομοίωση, ένα σώμα βρίσκεται σε κεκλιμένο επίπεδο στο οποίο ασκείται οριζόντια σεισμική επιτάχυνση $a(t)$. Η εξίσωση της σχετικής κίνησης του σώματος είναι

$$\frac{d^2u}{dt^2} = (a(t) - a_{c-\sigma}) \frac{\cos(\varphi-\beta) \cos\beta}{\cos\varphi} \quad \text{για} \quad \frac{du}{dt} > 0 \quad (1)$$

όπου

$$a_{c-\sigma} = \frac{W \sin(\varphi-\beta) + c L \cos\varphi}{m \cos(\varphi-\beta)} \quad (2)$$

Στις παραπάνω σχέσεις u είναι η οριζόντια σχετική μετακίνηση του σώματος, με τη κατωφερική μετακίνηση θετική, $a_{c-\sigma}$ είναι η κρίσιμη (οριζόντια) επιτάχυνση για ολίσθηση του σώματος, m είναι η μάζα του σώματος που ολισθαίνει ανά μονάδα μήκους (κάθετη στο χαρτί), W είναι το βάρος του σώματος ανά μονάδα μήκους, β είναι η γωνία του κεκλιμένου επιπέδου με την οριζόντιο, φ και c είναι η γωνία τριβής και η συνοχή στην επιφάνεια ολίσθησης και L είναι το μήκος της επιφάνειας ολίσθησης του σώματος.

Η εξίσωση (1) που δίνει τη κίνηση σώματος σε κεκλιμένο επίπεδο μπορεί να εκφρασθεί ως

$$d^2u/dt^2 = A g (a(t) - a_{c-\sigma}) \quad \text{για} \quad du/dt > 0$$

Όμως, στην βιβλιογραφία συνήθως η εξίσωση επιλύεται με τη προσέγγιση $A=1$:

$$d^2u/dt^2 = (a(t) - a_{c-\sigma}) \quad \text{για} \quad du/dt > 0 \quad (3)$$

Πράγματι, για τυπικά πρανή οι τιμές των γωνιών β και φ είναι τέτοιες που ο συντελεστής A είναι κοντά στη μονάδα, και η παραπάνω προσέγγιση δεν δίνει σημαντικό σφάλμα.

Στην εξίσωση (3), η παραμένουσα μετακίνηση εξαρτάται από τη κρίσιμη οριζόντια επιτάχυνση που προκαλεί την ολίσθηση, και χαρακτηριστικά της ασκούμενης διέγερσης. Εμπειρικές σχέσεις έχουν προταθεί που υπολογίζουν τη σεισμική μετακίνηση βάσει των παραπάνω (π.χ. Ambraseys and Menu, 1988).

Ποιοτικές συγκρίσεις της βάσης δεδομένων με προβλέψεις έδειξαν ότι η μεθοδολογία ευστάθειας πρηνών για την εύρεση της κρίσιμης επιτάχυνσης a_c και της προσομοίωσης σώματος σε κεκλιμένο επίπεδο, ή παραλλαγών της για την εκτίμηση της σεισμικής μετακίνησης για δεδομένη κρίσιμη επιτάχυνση και ασκούμενη ταλάντωση μπορούν να αποτελέσουν απλές μεθόδους υπολογισμού της σεισμικής μετακίνησης (i) φυσικών πρηνών, (ii) φραγμάτων, (iii) ορισμένων τύπων τοίχων αντιστήριξης, (iv) επιχώματων, (v) κρηπιδότοιχων, και (vi) θεμελιώσεων.

Η ύπαρξη εδαφικής στρώσης επηρεάζει καίρια την εδαφική ταλάντωση. Ενδεικτικά αναφέρουμε ότι σε περίπτωση που αναλύθηκε στο παρόν πρόγραμμα, παρατηρείται σημαντική ενίσχυση των επιταχύνσεων, μέχρι και 400%. Ισοδύναμες-γραμμικές μονοδιάστατες αναλύσεις τύπου "Shake" (Schnabel et al, 1972) έχουν προταθεί για τη προσομοίωση αυτού του φαινομένου. Η μείωση του μέτρου διάτμησης και η αύξηση του συντελεστή απόσβεσης με τη παραμόρφωση γίνεται με τις σχέσεις των Vucetic and Dobry (1991), που δίνονται στον πίνακα 11. Οι νέες αναλύσεις, αλλά και άλλες αναλύσεις που βρέθηκαν στη βιβλιογραφία, έδειξαν ότι ισοδύναμες-γραμμικές μονοδιάστατες αναλύσεις τύπου "Shake" (Schnabel et al, 1972) όταν η μείωση του μέτρου διάτμησης και η αύξηση του συντελεστή απόσβεσης με τη παραμόρφωση γίνεται με τις σχέσεις των Vucetic and Dobry (1991), μπορούν να εφαρμοσθούν για την εκτίμηση της σεισμικής ταλάντωσης με απλές μεθόδους. Λάθος εκτιμάται ότι θα υπάρχει όταν (α) η γεωμετρία δεν είναι περίπου μονοδιάστατη, (β) αναπτύσσονται σημαντικές υπερπίεσεις πόρων και (γ) βρισκόμαστε κοντά στον συντονισμό. Εξαιρώντας τις έντονα δι-διάστατες ή τρι-διάστατες γεωμετρίες, εκτιμάται ότι η γραμμική μέθοδος υπερεκτιμά την εδαφική κίνηση, άρα είναι συντηρητική. Το λάθος στη μέγιστη επιτάχυνση, a_m , εκτιμάται ότι δεν θα υπερβαίνει το 30%.

Οι στατιστικές αναλύσεις των αναλυτικών λύσεων πρόβλεψης της σεισμικής μετακίνησης λόγω προσωρινής αστοχίας με τη προσομοίωση του σώματος σε κεκλιμένο επίπεδο, αλλά και οι προβλέψεις της σεισμικής μετακίνησης περιπτώσεων που υπάρχουν στη βιβλιογραφία, έδειξαν ότι η σεισμική μετακίνηση που προβλέπεται επηρεάζεται αρκετά όχι μόνον από τη μέγιστη επιτάχυνση, αλλά και από άλλα χαρακτηριστικά της σεισμικής διέγερσης. Συμπεραίνουμε ότι η εκτέλεση δυναμικής ανάλυσης για την εύρεση της κατάλληλης σεισμικής επιτάχυνσης είναι επιβεβλημένη.

Επειδή η σεισμική μετακίνηση λόγω αστοχίας σε διάτμηση αντιστοιχεί σε αστοχία του εδάφους, συνιστάται η κρίσιμη επιτάχυνση να αντιστοιχεί στην τελική τιμή της αντοχής (δηλαδή σε μεγάλη παραμόρφωση). Με αυτήν την τιμή της κρίσιμης επιτάχυνσης, και για ασκούμενη επιτάχυνση που υπολογίσθηκε με ισοδύναμες-γραμμικές μονοδιάστατες αναλύσεις τύπου "Shake", οι προβλέψεις έδειξαν ότι οι εμπειρικές σχέσεις υπολογισμού της σεισμικής μετακίνησης που έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία παρουσιάζουν τεράστιες διαφορές στη πρόβλεψη. Ενδεικτικά αναφέρουμε ότι για τον τοίχο αντιστήριξης που μελετήθηκε από τους Lopez-Caballero και Modaressi (Lopez-Caballero and Modaressi, 2002), ο λόγος της πρόβλεψης με τις εμπειρικές μεθόδους προς τη μέτρηση της σεισμικής μετακίνησης κυμαίνετο μεταξύ των τιμών 29083 και 0.7. Επίσης, σε διαφορετικά προβλήματα διαφορετικές μέθοδοι προβλέπουν τη μετακίνηση. Αντίθετα, οι προβλέψεις έδειξαν ότι η σεισμική μετακίνηση λόγω αστοχίας για δεδομένη σεισμική ταλάντωση και κρίσιμη επιτάχυνση προβλέπεται με σχετικά ικανοποιητική ακρίβεια με αριθμητική ολοκλήρωση της ασκούμενης ταλάντωσης που υπολογίζεται με δυναμική ανάλυση τύπου SHAKE σε αντιπροσωπευτική θέση της επιφάνειας ολίσθησης.

Λεπτομερέστερη σύγκριση με προβλέψεις αριθμητικών μεθόδων έδειξε ότι για λόγους κρίσιμης προς τη μέγιστη ασκούμενη επιτάχυνση, $0 < a_c/a_m < 0.2$, η απλοποιημένη μέθοδος που αναφέρθηκε παραπάνω συνήθως υπερεκτιμά την

μετακίνηση λόγω προσωρινής αστοχίας, επειδή (α) η επιτάχυνση και ταχύτητα της σεισμικής ταλάντωσης υπερεκτιμάται με την ελαστική δυναμική ανάλυση, και άρα είναι συντηρητική και (β) δεν λαμβάνεται υπόψη η μεταβολή γεωμετρίας κατά την ολίσθηση. Αντίθετα, σε λόγους $a_c/a_m > 0.2$, η μέθοδος προβλέπει μικρότερη σεισμική μετακίνηση, πιθανώς επειδή δεν λαμβάνει υπόψη την ελαστικο-πλαστική συμπεριφορά του εδάφους.

Ειδικότερα, σε πρηνή που ολισθαίνουν λόγω σεισμού η μείωση της “μέσης” κλίσης κατά τη διάρκεια της σχετικής μετακίνησης του πρηνούς είναι ο κανόνας και οφείλεται στο ότι σώματα κινούνται προς θέσεις μικρότερης δυναμικής ενέργειας. Σε αυτή τη περίπτωση η προσομοίωση σώματος σε κεκλιμένο επίπεδο δίνει μεγαλύτερες (δηλαδή συντηρητικές) τιμές της σεισμικής μετακίνησης. Μοντέλα σώματος κινουμένου σε δύο ή περισσότερα κεκλιμένα επίπεδα προβλέπουν αυτή τη μείωση. Τα μοντέλα έδειξαν ότι αυτή η επίδραση δεν είναι αμελητέα όταν η σεισμική μετακίνηση είναι μεγάλη σε σχέση με το μήκος της επιφάνειας ολίσθησης, δηλαδή όταν $a_c/a_m < 0.3$, εκτός για πρηνή με μήκος μεγαλύτερο των 100m.

Τα εδάφη είναι ελαστο-πλαστικά υλικά, και όχι άκαμπτα-τέλεια-πλαστικά όπως η απλή μέθοδος που αναφέρθηκε παραπάνω θεωρεί. Μετακίνηση λαμβάνει χώρα τόσο λόγω (α) αστοχίας, και (β) της ελαστο-πλαστικής φόρτισης-αποφόρτισης-επαναφόρτισης. Η άκαμπτη-τέλεια-πλαστική απλοποιημένη μέθοδος του σώματος σε κεκλιμένο επίπεδο υπολογίζει μόνον τη σεισμική μετακίνηση λόγω του (α). Συμπεραίνεται ότι η πραγματική μετακίνηση μπορεί να είναι μεγαλύτερη από αυτήν που προβλέπεται από την άκαμπτη-τέλεια-πλαστική απλοποιημένη μέθοδο. Αυτό φάνηκε σε συγκρίσεις με τα αποτελέσματα αριθμητικών μεθόδων με ελαστο-πλαστικά μοντέλα.

Τέλος, οι αναλύσεις έδειξαν ότι πολύ μεγάλη μετακίνηση (>3m) σχετίζεται με εκτεταμένη μείωση της αντοχής του εδάφους λόγω του σεισμού π.χ. εξ' αιτίας ρευστοποίησης. Αυτές οι αναλύσεις έδειξαν επίσης ότι σε αυτή τη περίπτωση για τη πρόβλεψη της σεισμικής μετακίνησης, (α) μεταβολές της γεωμετρίας του πρηνούς επηρεάζουν καίρια τα αποτελέσματα και πρέπει να ληφθούν υπόψη, ενώ (β) επειδή η σεισμική μετακίνηση σχετίζεται με στατική αστάθεια, η ασκούμενη σεισμική ταλάντωση δεν επηρεάζει καίρια τα αποτελέσματα. Οι αναλύσεις έδειξαν επίσης ότι η προσομοίωση σώματος σε δύο κεκλιμένο επίπεδα μπορεί να υπολογίσει με σχετική ακρίβεια τη σεισμική μετακίνηση υπό τη προϋπόθεση ότι η γεωμετρία της ολίσθησης είναι σχετικά απλή. Η αστράγγιστη αντοχή του εδάφους είναι η κρίσιμη παράμετρος για τη σωστή πρόβλεψη.

Πίνακας 11. Μεταβολή του μέτρου διάτμησης και του συντελεστή απόσβεσης με τη διατμητική παραμόρφωση συναρτήσει του δείκτη πλαστικότητας (βάσει των Vucetic and Dobry, 1991).

G/G_0 , β (%)

γ	PI=0	15	30	50	100
10^{-5}	0.97, 0	0.99, 0	1.0, 0	1.0, 0	1.0, 1
10^{-4}	0.72, 6	0.81, 5	0.91, 4	0.96, 3	1.0, 2
10^{-3}	0.28, 15	0.4, 12	0.54, 9	0.68, 6	0.81, 4
10^{-2}	0.04, 24	0.08, 20	0.16, 16	0.26, 13	0.35, 10

3.2.2. Προτεινόμενη μεθοδολογία υπολογισμού της σεισμικής μετακίνησης για αντισεισμικό σχεδιασμό

(α). Γενικά

Από τα αποτελέσματα της παρούσας έρευνας, συμπεραίνεται ότι η μεθοδολογία της προσομοίωσης σώματος σε κεκλιμένο επίπεδο, ή παραλλαγών της, μπορούν να αποτελέσουν απλές μεθόδους υπολογισμού της σεισμικής μετακίνησης (i) φυσικών πρανών, (ii) φραγμάτων, (iii) ορισμένων τύπων τοίχων αντιστήριξης, (iv) επιχώματων, (v) κρηπιδοτόιχων, και (vi) θεμελιώσεων. Διαφορετική μεθοδολογία πρέπει να χρησιμοποιηθεί για (α) φυσικά πρανά, φράγματα, τοίχους αντιστήριξης, επιχώματα και κρηπιδοτόιχους και (β) ενιαίες θεμελιώσεις σε άμμους που ρευστοποιούνται που δίνονται παρακάτω.

(β) Φυσικά πρανά, φράγματα, τοίχοι αντιστήριξης, επιχώματα και κρηπιδοτόιοι

Για τον ακριβή προσδιορισμό της σεισμικής μετακίνησης για αντισεισμικό σχεδιασμό είναι απαραίτητα τα παρακάτω στάδια: (Α) Υπολογισμός της κρίσιμης επιτάχυνσης, (Β) Υπολογισμός δυναμικής ταλάντωσης, και (Γ) Υπολογισμός της σεισμικής μετακίνησης με τη μεθοδολογία που αναφέρεται παρακάτω.

- Υπολογισμός της κρίσιμης επιτάχυνσης

Στη γενική περίπτωση οποιασδήποτε μάζας m που θεωρείται ως απαραμόρφωτη μέχρι μία τάση και τέλεια πλαστική υπάρχει κάποια τιμή της οριζόντιας επιτάχυνσης, που συμβολίζεται ως a_c και λέγεται κρίσιμη (οριζόντια) επιτάχυνση για την οποία επικρατεί οριακή ισορροπία. Η εύρεση της κρίσιμης επιτάχυνσης, μπορεί να γίνει με προγράμματα ευστάθειας πρανών. Σε περίπτωση που το πρόγραμμα υπολογίζει μόνον το συντελεστή ασφαλείας και έχει την δυνατότητα άσκησης οριζόντιας δύναμης (π.χ. λόγω σεισμού), η κρίσιμη επιτάχυνση μπορεί να υπολογισθεί ως ο συντελεστής οριζόντιας αδρανειακής δύναμης που δίνει συντελεστή ασφαλείας ίσο με την μονάδα.

Για τον υπολογισμό της κρίσιμης επιτάχυνσης, για αντοχή συνιστάται να λαμβάνεται πάντα η τελική τιμή της, σε μεγάλη παραμόρφωση. Σε ξηρό έδαφος, καθώς και κάτω από την στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα σε χάλικες να λαμβάνεται η αντοχή σε συνθήκες πλήρους στράγγισης. Σε κορεσμένους αργίλους και σε άμμους κάτω από του υδροφόρο ορίζοντα να υπολογίζεται η κρίσιμη επιτάχυνση τόσο σε συνθήκες πλήρους στράγγισης, όσο και με συνοχή ίση με την αστράγγιστη αντοχή του εδάφους και γωνία τριβής ίση με το μηδέν. Ως τιμή δε της κρίσιμης επιτάχυνσης να λαμβάνεται η μικρότερη των δύο τιμών. Η αντοχή του ρευστοποιημένου εδάφους μπορεί να εκτιμηθεί είτε εργαστηριακά, είτε συναρτήσει του N της δοκιμής SPT, σύμφωνα με το κάτω όριο της σχέσης των Seed and Harder (1990) και δίνεται στο Σχ. 3. Για αργίλους η αστράγγιστη αντοχή του εδάφους συνιστάται να υπολογίζεται με εργαστηριακές δοκιμές στην αναμενόμενη ταχύτητα διάτμησης του σεισμού.

Το ειδικό βάρος του εδάφους πρέπει να λαμβάνεται με τιμή ανάλογη με τη θέση του υδροφόρου ορίζοντα ακριβώς πριν τον σεισμό.

- Υπολογισμός δυναμικής ταλάντωσης με ισοδύναμες-γραμμικές μονοδιάστατες αναλύσεις

Η εκτέλεση δυναμικής ανάλυσης είναι επιβεβλημένη. Συνιστώνται κατ' ελάχιστον ισοδύναμες-γραμμικές μονοδιάστατες αναλύσεις τύπου "Shake". Η μείωση του μέτρου διάτμησης και η αύξηση του συντελεστή απόσβεσης με τη παραμόρφωση να γίνεται με τις σχέσεις των Vucetic and Dobry (1991), που δόθηκαν στον πίνακα 11.

Οι κρίσιμες παράμετροι γι' αυτές τις αναλύσεις είναι (α) το βάθος της εδαφικής στρώσης, (β) το μέτρο διάτμησης σε μικρή παραμόρφωση και (γ) ο τύπος του εδάφους με το βάθος. Για την εύρεση του βάθους της εδαφικής στρώσης και του τύπου του εδάφους με το βάθος χρειάζονται γεωτρήσεις. Το μέτρο διάτμησης σε μικρή παραμόρφωση μπορεί να βρεθεί με γεωφυσικές μεθόδους ή, εάν τέτοιες δεν υπάρχουν, συναρτήσει του N της δοκιμής του SPT. Οι γεωτρήσεις προτείνεται να έχουν βάθος μέχρι να συναντηθεί ο υποκείμενος βράχος, ή κατ' ελάχιστον 25m.

Στο βραχώδες υπόβαθρο συνιστάται να ασκείται ταλάντωση που έχει μετρηθεί ή είναι ενδεικτική της περιοχής, κανονικοποιημένη στη μέγιστη επιτάχυνση κατά ΕΑΚ. Η ασκούμενη ταλάντωση να υπολογίζεται σε αντιπροσωπευτική θέση της επιφάνειας ολίσθησης. Σε περιπτώσεις έντονου διδιάστατου αναγλύφου, να χρησιμοποιούνται συντελεστές αύξησης της επιτάχυνσης, όπως δίνονται π.χ. στον Ευρωκώδικα (European Prestandard, 1994).

- Υπολογισμός της σεισμικής μετακίνησης

Ο υπολογισμός της σεισμικής μετακίνησης έχει πρακτικό ενδιαφέρον μόνον στην περίπτωση που $a_c > 0$. Στη περίπτωση που $a_c < 0$ έχουμε στατική αστάθεια που σχετίζεται με εκτεταμένη μείωση της αντοχής του εδάφους λόγω του σεισμού (π.χ. εξ' αιτίας ρευστοποίησης) και υπερβολικά μεγάλη σεισμική μετακίνηση.

Στη περίπτωση που $a_c > 0$, συνιστάται η σεισμική μετακίνηση λόγω αστοχίας για δεδομένη σεισμική ταλάντωση και κρίσιμη επιτάχυνση να γίνεται με αριθμητική ολοκλήρωση της διαφορικής εξίσωσης (3) που περιγράφει προσεγγιστικά την κίνηση της προσομοίωσης σώματος σε κεκλιμένο επίπεδο. Οι εμπειρικές σχέσεις που προβλέπουν τη σεισμική μετακίνηση της προσομοίωσης σώματος σε κεκλιμένο επίπεδο να χρησιμοποιούνται μόνον ως πρώτες εκτιμήσεις της σεισμικής μετακίνησης. Από τις εμπειρικές μεθόδους συνιστάται να χρησιμοποιείται η μέθοδος των Ambraseys and Menu (1988). Ο λόγος είναι ότι η μέθοδος βασίζεται σε μεγάλη βάση δεδομένων επιταχυνσιογραφμάτων

Τα εδάφη είναι ελαστο-πλαστικά υλικά, και όχι άκαμπτα-τέλεια-πλαστικά όπως οι παραπάνω υπολογισμοί θεώρησαν. Η άκαμπτη-τέλεια-πλαστική απλοποιημένη μέθοδος του σώματος σε κεκλιμένο επίπεδο δεν υπολογίζει τη σεισμική μετακίνηση λόγω της ελαστο-πλαστικής φόρτισης-αποφόρτισης-επαναφόρτισης του εδάφους. Προτείνεται για τον αντισεισμικό σχεδιασμό να αυξάνεται η πρόβλεψη της άκαμπτης-τέλεια-πλαστικής μεθόδου κατά 18cm όταν ο λόγος a_d/a_m είναι μικρότερος από 0.6 και κατά 10cm όταν ο λόγος a_d/a_m είναι μεγαλύτερος από 0.6 και μικρότερος της μονάδας.

Σε πρηνή που ολισθαίνουν λόγω σεισμού η μείωση της “μέσης” κλίσης κατά τη διάρκεια της σχετικής μετακίνησης του πρηνούς είναι συχνά ο κανόνας και οφείλεται στο ότι σώματα κινούνται προς θέσεις μικρότερης δυναμικής ενέργειας. Σε αυτή τη περίπτωση η προσομοίωση σώματος σε κεκλιμένο επίπεδο δίδει μεγαλύτερες (δηλαδή συντηρητικές) τιμές της σεισμικής μετακίνησης. Προτείνεται στη περίπτωση που (α) υπάρχει διαφορά στη κλίση μεταξύ του άνω και του κάτω τμήματος της επιφάνειας ολίσθησης μεγαλύτερη από περίπου 10° και (β) στη βάση της πιθανής ολίσθησης υπάρχει χώρος ώστε το πρηνές να κινηθεί χωρίς να χαθεί μάζα, να χρησιμοποιούνται οι μειωτικοί συντελεστές συναρτήσεως της επιφάνειας ολίσθησης και του λόγου a_c/a_m που προτείνονται από τον Stamatopoulos (1996) και δίνονται στο Σχ. 4. Ειδικότερα, συντηρητικά, προτείνονται οι καμπύλες με τη μεγαλύτερη τιμή του συντελεστή για κάθε λόγο a_c/a_m . Στη περίπτωση που στη βάση της πιθανής ολίσθησης δεν υπάρχει χώρος ώστε το πρηνές να κινηθεί χωρίς να χαθεί μάζα, οι μειωτικοί συντελεστές να λαμβάνονται ίσοι με τη μονάδα.

(γ) Ενιαίες θεμελιώσεις σε άμμους που ρευστοποιούνται.

Στις ενιαίες θεμελιώσεις σε άμμους που ρευστοποιούνται για αντισεισμικό σχεδιασμό πρέπει να υπολογισθεί (α) η καθίζηση και (β) η στροφή τους και να συγκριθεί με την επιτρεπόμενη. Συνιστάται να χρησιμοποιηθεί η μέθοδος των Acacio et al (2001) για την εκτίμηση της καθίζησης, και η μέθοδος που αναπτύχθηκε στο παρόν ερευνητικό πρόγραμμα για τη πρόβλεψη της στροφής των ενιαίων θεμελιώσεων σε άμμους που ρευστοποιούνται λόγω του σεισμού. Επειδή η καθίζηση και στροφή εξαρτώνται καίρια από τη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα, συνιστάται να λαμβάνεται συντηρητικά στάθμη 1m υψηλότερα από τη μέγιστη αναμενόμενη. Η αντοχή του ρευστοποιηθέντος εδάφους και η σεισμική κίνηση να υπολογίζεται με τη μεθοδολογία που δόθηκε στο (β) παραπάνω.

3.3 Συμπεράσματα για την ακρίβεια μεθόδων προσδιορισμού της επακόλουθης καθίζησης λόγω συνίζησης τόσο κορεσμένων όσο και ξηρών εδαφών και προτάσεις για σχεδιασμό.

3.3.1 Κορεσμένες συνθήκες

Αναφέρθηκε ότι σε κορεσμένα εδάφη, οι προβλέψεις της δυναμικής συνίζησης γίνονται τόσο με την μέθοδο Tokimatsu-Seed, όσο και με την μέθοδο Ishihara and Yoshimine. Σύγκριση της μετρηθείσας επιτόπου με την υπολογισθείσα συνίζηση (α) στις περιπτώσεις που συλλέχθηκαν στη βιβλιογραφία και (β) σε περιπτώσεις που προβλέφθηκαν στην παρούσα έρευνα με τις δύο μεθόδους δίνει ότι ο λόγος της υπολογισθείσας προς τη μετρηθείσα συνίζηση κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 0.5 και 1.5. Επίσης, συγκρίθηκε η υπολογισθείσα συνίζηση με τη μέθοδο του Ishihara, σε σχέση με τη μέθοδο των Tokimatsu and Seed και παρατηρήθηκε ότι η μέθοδος του Ishihara and Yoshimine προβλέπει μικρότερη καθίζηση για καθίζηση μικρότερη από περίπου 0.13m, και μεγαλύτερη για καθίζηση μεγαλύτερη από περίπου 0.13m.

Επιπροσθέτως, στη παρούσα έρευνα η ορθότητα αυτών των σχέσεων μελετήθηκε με σειρά εργαστηριακών δοκιμών απλής διάτμησης και ανακυκλιζόμενης φόρτισης σε Ελληνικό έδαφος και φάνηκε ότι οι προβλέψεις συμφωνούν περισσότερο με αυτές τις μεθόδους Tokimatsu-Seed. Σε όλες τις περιπτώσεις πυκνότητας, η εκτίμηση της μεθόδου είναι μεγαλύτερη από 0.6 φορές τη μέτρηση.

Βάσει όλων των παραπάνω, προτείνεται συντηρητικά στον ΕΑΚ να υπολογίζεται η δυναμική συνίζηση τόσο με την μέθοδο Tokimatsu-Seed, όσο και με την μέθοδο του Ishihara and Yoshimine. Να λαμβάνεται η μέγιστη προβλεφθείσα καθίζηση των δύο μεθόδων και με συντελεστή ασφαλείας ίσο με 2.

3.3.2. Ξηρές συνθήκες

Αναφέρθηκε ότι σε ξηρά εδάφη, οι προβλέψεις της δυναμικής συνίζησης γίνονται με την μέθοδο Tokimatsu-Seed. Σύγκριση της επιτόπου μετρηθείσας σε σεισμό με την υπολογισθείσα συνίζηση έδειξε ότι η μέθοδος προέβλεψε με επιτυχία την επιτόπου μετρηθείσα εδαφική συνίζηση. Ο λόγος της υπολογισθείσας προς τη μετρηθείσα συνίζηση κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 1.1 και 0.5.

Επιπροσθέτως, στην παρούσα έρευνα της μεθόδου μελετήθηκε από σειρά εργαστηριακών δοκιμών απλής διάτμησης και ανακυκλιζόμενης φόρτισης σε Ελληνικό έδαφος υπό ξηρές συνθήκες. Σε όλες τις περιπτώσεις πυκνότητας και ανακύκλισης, η απόκλιση ήταν μικρότερη από 50%.

Βάσει όλων των παραπάνω, προτείνεται συντηρητικά στον ΕΑΚ να υιοθετηθεί η μέθοδος Tokimatsu-Seed με συντελεστή ασφαλείας ίσο με 2.

4. ΧΡΗΣΙΜΟΤΗΤΑ

4.1 Γενικά

Βάσει των αποτελεσμάτων της παρούσας έρευνας, προτείνονται διατάξεις για τον ΕΑΚ. Χωρίζονται στα εξής κεφάλαια: (α) Περιπτώσεις που μπορεί να εφαρμόζεται σχεδιασμός βάσει της μετακίνησης, (β) τιμές ανεκτής μετακίνησης και (γ) απλές μέθοδοι υπολογισμού της σεισμικής μετακίνησης.

Οι μέθοδοι που αναφέρονται αντιστοιχούν σε αυτές που μπορεί να χρησιμοποιήσει ο μηχανικός στην κοινή του πρακτική. Θεωρείται ότι ο "μηχανικός" μπορεί να εκτελέσει μονοδιάστατη γραμμική δυναμική ανάλυση με το πρόγραμμα "SHAKE" (ή παρόμοια προγράμματα), "ευστάθεια πρηνών" με προγράμματα που υπάρχουν στο εμπόριο, υπολογισμούς της σεισμικής μετακίνησης με τη προσομοίωση σώματος σε κεκλιμένο επίπεδο ή παραλλαγών της με απλά αντίστοιχα προγράμματα, και απλούς υπολογισμούς καθίζησης λόγω συνίζησης.

4.2. Προτάσεις

4.2.1. Περιπτώσεις που μπορεί να εφαρμόζεται σχεδιασμός βάσει της μετακίνησης,

Σχεδιασμός βάσει της μετακίνησης μπορεί να εφαρμόζεται (α) σε εδαφικές κατασκευές (δηλαδή χωμάτινα φράγματα και άλλα επιχώματα), (β) σε τοίχους βαρύτητας, κρηπιδότοιχους και σε άλλους τύπους τοίχων αντιστήριξης υπό την προϋπόθεση ότι ο τοίχος έχει σχεδιασθεί σωστά ώστε να μην θραύεται λόγω των δυνάμεων που ασκούνται λόγω του σεισμού στον τοίχο και (γ) σε φυσικά εδαφικά πρηνή που δεν περιλαμβάνουν απόκρημνους βράχους.

Όσον αφορά κτίρια, γεωτεχνικούς τους σχεδιασμός βάσει της ανεκτής μετακίνησης είναι εφικτός μόνον για τα κτίρια έχουν ενιαία θεμελίωση (π.χ. γενική κοιτόστρωση). (Σε κτίρια σε μεμονομένα πέδιλα η επιτρεπόμενη καθίζηση είναι πολύ μικρή, και επειδή ο υπολογισμός της καθίζησης περιλαμβάνει πολλές αβεβαιότητες, σχεδιασμός βάσει εδαφικής μετακίνησης δεν είναι εφικτός).

4.2.2 Τιμές ανεκτής μετακίνησης

Στον πίνακα 1 δίνονται οι κατηγορίες σεισμικών βλαβών κατασκευών. Στον πίνακα 2 δίνονται οι κατηγορίες σεισμικών βλαβών φυσικών εδαφών χωρίς κατασκευές. Για κατασκευές συνιστάται να χρησιμοποιείται επίπεδο βλαβών σχεδιασμού Α ή Β ανάλογα με τη σπουδαιότητα της κατασκευής. Αντίστοιχα, για πρηνή χωρίς κατασκευές συνιστάται να χρησιμοποιείται επίπεδο βλαβών σχεδιασμού Α' ή Β' ανάλογα με την οικονομική και αισθητική αξία του φυσικού πρηνούς.

Η προτεινόμενη ανεκτή μέγιστη σεισμική καθίζηση φραγμάτων με ύψος $\leq 20\text{ m}$, επιχωμάτων ποταμών, οδικών επιχωμάτων και σιδηροδρομικών επιχωμάτων δίνεται στους πίνακες 3 ως 6. Η προτεινόμενη ανεκτή μέγιστη σεισμική μετακίνηση κρηπιδότοιχων και "ευμετακίνητων" τοίχων αντιστήριξης πλην κρηπιδότοιχων που στηρίζουν άκροεστο έδαφος δίνεται στους πίνακες 7 και 8. Ο πίνακας 9 δίνει την ανεκτή σεισμική καθίζηση και στροφή ενιαίων θεμελιώσεων και δεξαμενών. Τέλος ο πίνακας 10 δίνει την ανεκτή μετακίνηση φυσικών πρηνών χωρίς κατασκευές.

4.2.3 Μέθοδοι υπολογισμού σεισμικής μετακίνησης

Η σεισμική καθίζηση αποτελείται από δύο συνιστώσες: (i) τη μετακίνηση λόγω αστοχίας σε διάτμηση και (ii) τη δυναμική συνίζηση. Αυτές οι δύο συνιστώσες πρέπει να προστίθενται. Μέθοδοι υπολογισμού των δύο αυτών συνιστωσών δίνονται παρακάτω.

Στην περίπτωση (i) διαφορετική μεθοδολογία πρέπει να χρησιμοποιηθεί για (α) φυσικά πρανή, φράγματα, τοίχους αντιστήριξης, επιχώματα και κρηπιδοτόιχους και (β) ενιαίες θεμελιώσεις σε άμμους που ρευστοποιούνται που δίνονται παρακάτω.

(α). Μετακίνηση λόγω αστοχίας σε διάτμηση σε φυσικά πρανή, φράγματα, τοίχους αντιστήριξης, επιχώματα και κρηπιδοτόιχους

Για τον ακριβή προσδιορισμό της σεισμικής μετακίνησης για αντισεισμικό σχεδιασμό είναι απαραίτητα τα παρακάτω στάδια: (Α) Υπολογισμός της κρίσιμης επιτάχυνσης, (Β) Υπολογισμός δυναμικής ταλάντωσης, και (Γ) Υπολογισμός της σεισμικής μετακίνησης με τη μεθοδολογία που αναφέρεται παρακάτω.

- Υπολογισμός της κρίσιμης επιτάχυνσης

Στη γενική περίπτωση οποιασδήποτε μάζας m που θεωρείται ως απαραμόρφωτη μέχρι μία τάση και τέλεια πλαστική υπάρχει κάποια τιμή της οριζόντιας επιτάχυνσης, που συμβολίζεται ως a_c και λέγεται κρίσιμη (οριζόντια) επιτάχυνση για την οποία επικρατεί οριακή ισορροπία. Η εύρεση της κρίσιμης επιτάχυνσης, μπορεί να γίνει με προγράμματα ευστάθειας πρανών. Σε περίπτωση που το πρόγραμμα υπολογίζει μόνον το συντελεστή ασφαλείας και έχει την δυνατότητα άσκησης οριζόντιας δύναμης (π.χ. λόγω σεισμού), η κρίσιμη επιτάχυνση μπορεί να υπολογισθεί ως ο συντελεστής οριζόντιας αδρανειακής δύναμης που δίνει συντελεστή ασφαλείας ίσο με την μονάδα.

Για τον υπολογισμό της κρίσιμης επιτάχυνσης για αντοχή συνιστάται να λαμβάνεται πάντα η τελική τιμή της, σε μεγάλη παραμόρφωση. Σε ξηρό έδαφος, καθώς και κάτω από την στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα σε χάλικες να λαμβάνεται η αντοχή σε συνθήκες πλήρους στράγγισης. Σε κορεσμένους αργίλους και σε άμμους κάτω από του υδροφόρο ορίζοντα να υπολογίζεται η κρίσιμη επιτάχυνση τόσο σε συνθήκες πλήρους στράγγισης, όσο και με συνοχή ίση με την αστράγγιστη αντοχή του εδάφους και γωνία τριβής ίση με το μηδέν. Ως τιμή δε της κρίσιμης επιτάχυνσης να λαμβάνεται η μικρότερη των δύο τιμών. Η αντοχή του ρευστοποιημένου εδάφους μπορεί να εκτιμηθεί είτε εργαστηριακά, είτε συναρτήσει του N της δοκιμής SPT, σύμφωνα με το κάτω όριο του S_{ch} 3 (Seed and Harder, 1990). Για αργίλους η αστράγγιστη αντοχή του εδάφους συνιστάται να υπολογίζεται με εργαστηριακές δοκιμές στην αναμενόμενη ταχύτητα διάτμησης του σεισμού.

Το ειδικό βάρος του εδάφους πρέπει να λαμβάνεται με τιμή ανάλογη με τη θέση του υδροφόρου ορίζοντα ακριβώς πριν τον σεισμό.

- Υπολογισμός δυναμικής ταλάντωσης με ισοδύναμες-γραμμικές μονοδιάστατες αναλύσεις

Η εκτέλεση δυναμικής ανάλυσης είναι επιβεβλημένη. Συνιστώνται κατ' ελάχιστον ισοδύναμες-γραμμικές μονοδιάστατες αναλύσεις τύπου "Shake" (Schnabel et al, 1972). Η μείωση του μέτρου διάτμησης και η αύξηση του συντελεστή απόσβεσης με τη παραμόρφωση να γίνεται με τις σχέσεις των Vucetic and Dobry (1991).

Οι κρίσιμες παράμετροι γι' αυτές τις αναλύσεις είναι (α) το βάθος της εδαφικής στρώσης, (β) το μέτρο διάτμησης σε μικρή παραμόρφωση και ο τύπος του εδάφους με το βάθος. Για την εύρεση του βάθους της εδαφικής στρώσης και του τύπου του εδάφους με το βάθος χρειάζονται γεωτρήσεις. Το μέτρο διάτμησης σε μικρή

παραμόρφωση μπορεί να βρεθεί με γεωφυσικές μεθόδους ή ή, εάν τέτοιες δεν υπάρχουν, συναρτήσει του N της δοκιμής του SPT. Οι γεωτρήσεις προτείνεται να έχουν βάθος μέχρι να συναντηθεί ο υποκείμενος βράχος, ή κατ' ελάχιστον 25m.

Στο βραχώδες υπόβαθρο συνιστάται να ασκείται ταλάντωση που έχει μετρηθεί ή είναι ενδεικτική της περιοχής, κανονικοποιημένη στη μέγιστη επιτάχυνση κατά ΕΑΚ. Η ασκούμενη ταλάντωση να υπολογίζεται σε αντιπροσωπευτική θέση της επιφάνειας ολίσθησης. Σε περιπτώσεις έντονου διδιάστατου αναγλύφου, να χρησιμοποιούνται συντελεστές αύξησης της επιτάχυνσης, όπως δίνονται π.χ. στον Ευρωκώδικα (European Prestandard,1994).

- Υπολογισμός της σεισμικής μετακίνησης

Ο υπολογισμός της σεισμικής μετακίνησης έχει πρακτικό ενδιαφέρον μόνον στην περίπτωση που $a_c > 0$. Στη περίπτωση που $a_c < 0$ έχουμε στατική αστάθεια, κάτι που απαγορεύεται.

Στη περίπτωση που $a_c > 0$, συνιστάται η σεισμική μετακίνηση λόγω αστοχίας για δεδομένη σεισμική ταλάντωση και κρίσιμη επιτάχυνση να γίνεται με αριθμητική ολοκλήρωση της διαφορικής εξίσωσης (3) που περιγράφει προσεγγιστικά την κίνηση της προσομοίωσης σώματος σε κεκλιμένο επίπεδο. Οι εμπειρικές σχέσεις που προβλέπουν τη σεισμική μετακίνηση της προσομοίωσης σώματος σε κεκλιμένο επίπεδο να χρησιμοποιούνται μόνον ως πρώτες εκτιμήσεις της σεισμικής μετακίνησης. Συνιστάται να χρησιμοποιείται η μέθοδος των Ambraseys and Menu (1988).

Τα εδάφη είναι ελαστο-πλαστικά υλικά, και όχι άκαμπτα-τέλεια-πλαστικά όπως οι παραπάνω υπολογισμοί θεώρησαν. Η άκαμπτη-τέλεια-πλαστική απλοποιημένη μέθοδος του σώματος σε κεκλιμένο επίπεδο δεν υπολογίζει τη σεισμική μετακίνηση λόγω της ελαστο-πλαστικής φόρτισης-αποφόρτισης-επαναφόρτισης του εδάφους. Προτείνεται για τον αντισεισμικό σχεδιασμό να αυξάνεται η πρόβλεψη της άκαμπτης-τέλεια-πλαστικής μεθόδου κατά 18cm όταν ο λόγος a_c/a_m είναι μικρότερος από 0.6 και κατά 10cm όταν ο λόγος a_c/a_m είναι μεγαλύτερος από 0.6 και μικρότερος της μονάδας.

Σε πρηνή που ολισθαίνουν λόγω σεισμού η μείωση της "μέσης" κλίσης κατά τη διάρκεια της σχετικής μετακίνησης του πρηνούς είναι συχνά ο κανόνας και οφείλεται στο ότι σώματα κινούνται προς θέσεις μικρότερης δυναμικής ενέργειας. Σε αυτή τη περίπτωση η προσομοίωση σώματος σε κεκλιμένο επίπεδο δίδει μεγαλύτερες (δηλαδή συντηρητικές) τιμές της σεισμικής μετακίνησης. Προτείνεται στη περίπτωση που (α) υπάρχει διαφορά στη κλίση μεταξύ του άνω και του κάτω τμήματος της επιφάνειας ολίσθησης μεγαλύτερη από περίπου 10° και (β) στη βάση της πιθανής ολίσθησης υπάρχει χώρος ώστε το πρηνές να κινηθεί χωρίς να χαθεί μάζα, να χρησιμοποιούνται οι μειωτικοί συντελεστές του Σχ. 4. Ειδικότερα, συντηρητικά, προτείνονται οι καμπύλες με τη μεγαλύτερη τιμή του συντελεστή για κάθε λόγο a_c/a_m . Στη περίπτωση που στη βάση της πιθανής ολίσθησης δεν υπάρχει χώρος ώστε το πρηνές να κινηθεί χωρίς να χαθεί μάζα, οι μειωτικοί συντελεστές να λαμβάνονται ίσοι με τη μονάδα.

(β). Ενιαίες θεμελιώσεις σε άμμους που ρευστοποιούνται.

Στις ενιαίες θεμελιώσεις σε άμμους που ρευστοποιούνται για αντισεισμικό σχεδιασμό πρέπει να υπολογισθεί (α) η καθίζηση και (β) η στροφή τους και να συγκριθεί με την επιτρεπόμενη. Συνιστάται να χρησιμοποιηθεί η μέθοδος των Acacio et al (2001). για την εκτίμηση της καθίζησης, και η μέθοδος που αναπτύχθηκε στο παρόν ερευνητικό πρόγραμμα για τη πρόβλεψη της στροφής των ενιαίων θεμελιώσεων σε άμμους που

ρευστοποιούνται λόγω του σεισμού. Επειδή η καθίζηση και στροφή εξαρτώνται καίρια από τη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα, συνιστάται να λαμβάνεται συντηρητικά στάθμη 1m υψηλότερα από τη μέγιστη αναμενόμενη. Η αντοχή του ρευστοποιηθέντος εδάφους και η σεισμική κίνηση να υπολογίζεται με τη μεθοδολογία που δόθηκε στην (α) παραπάνω.

(γ). Δυναμική συνίζηση

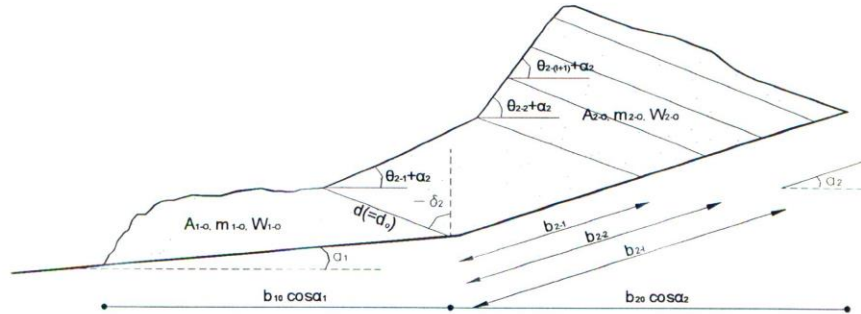
Σε άμμους κάτω από τον υδροφόρο ορίζοντα προτείνεται να υπολογίζεται η δυναμική συνίζηση τόσο με την μέθοδο Tokimatsu-Seed (1987), όσο και με την μέθοδος του Ishihara and Yoshimine (1992). Να λαμβάνεται η μέγιστη των δύο μεθόδων προβλεφθείσα καθίζηση και με συντελεστή ασφαλείας ίσο με 2. Σε αργίλους ο υπολογισμός της δυναμικής συνίζησης να γίνεται με την εκτέλεση εργαστηριακών δοκιμών απλής διάτμησης με ανακυκλιζόμενη φόρτιση και εκτόνωση της πίεσης των πόρων.

Σε άμμους πάνω από τον υδροφόρο ορίζοντα συνιστάται η μέθοδος που προτείνεται από τους Tokimatsu-Seed (1987) με συντελεστή ασφαλείας 2.

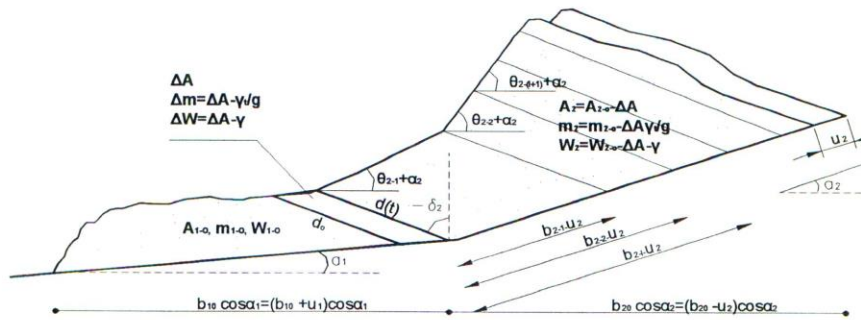
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Οργανισμός Αντισεισμικού Σχεδιασμού και Προστασίας (Ο.Α.Σ.Π.), "Ελληνικός Αντισεισμικός Κανονισμός", Ο.Α.Σ.Π., Σεπτέμβριος, 1999.
- Acacio A. A., Kobayashi Y., Towhata I., Bautista R. T, Ishihara K. "Subsidence of building foundation resting upon liquefied subsoil: case studies and assessment", Soils and Foundations, 41, 6, Dec. 2001, pages 111-128
- Ambraseys N. and Menu J, "Earthquake induced ground displacements, Earthquake engineering and structural dynamics, 1988, 16, 7, 985-1006.
- European Prestandard "Eurocode 8 - Design provisions of earthquake resistance of structures - Part 5: Foundations, retaining structures and geotechnical aspects", 1994.
- Ishihara, K. and Yoshimine, M. (1992). "Evaluation of settlements in sand deposits following liquefaction during earthquakes". Soils and Foundations, 32, 173-88.
- Lopez-Caballero F. and Modaressi A. (2002). "Importance of site effects in seismic induced displacements of gravity walls", 12th European Conference on Earthquake Engineering, Elsevier Science Ltd.
- Newmark N. M. "Effect of earthquakes on dams and embankments", Geotechnique, Vol. 15, No. 2, London, England, June, 1965, pp. 139-160.
- Schnabel, P. B., Lysmer J., Seed H. B., "SHAKE: A computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites". Report No. EERC 72-12. Earthquake Engineering Research Centre, University of California, Berkeley, California, 1972.
- Seed R. B., Harder L. F.(1990): "SPT-based analysis of cyclic pore pressure and undrained residual soil strength," In J. M. Duncan editor. Proceedings, H. Boldon Seed Memorial Symposium, University of California, Berkeley; Vol. 2, pp.351-376.
- Soubra A.H."Upper-bound solutions for bearing capacity of foundations", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 125, 1, Jan. 1999, pages 59-68
- Stamatopoulos, C.A. (1996) "Sliding System Predicting Large Permanent Co-Seismic Movements of Slopes", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 25, pp 1075-1093
- Stamatopoulos C., Velgaki E. and Sarma S. (2000), "Sliding-block back analysis of earthquake-induced slides" Soils and foundations, The Japanese Geotechnical Society, Vol. 40, No. 6, 61-75, Dec.
- Tokimatsu, K., and Seed H. B. "Evaluation of settlements in sand due to earthquake shaking", Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 113, No. 8, 1987.
- Vucetic M. And Dobry R. "Effect of soil plasticity on cyclic response, Journal of the Geotechnical Division, ASCE, 117 (1). 1991.

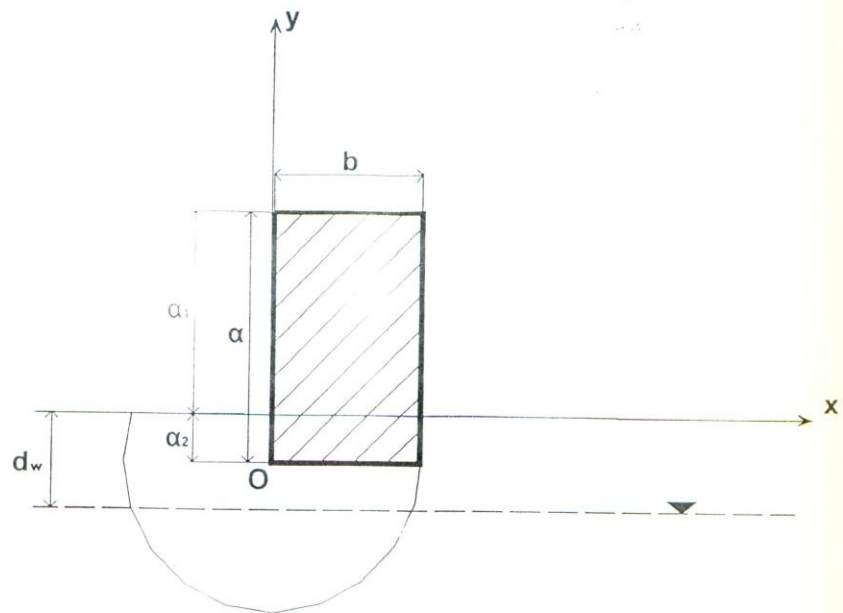
(α)



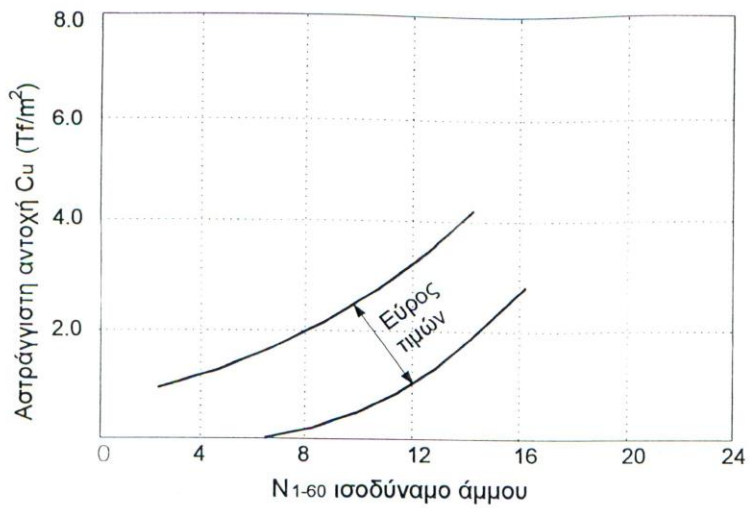
(β)



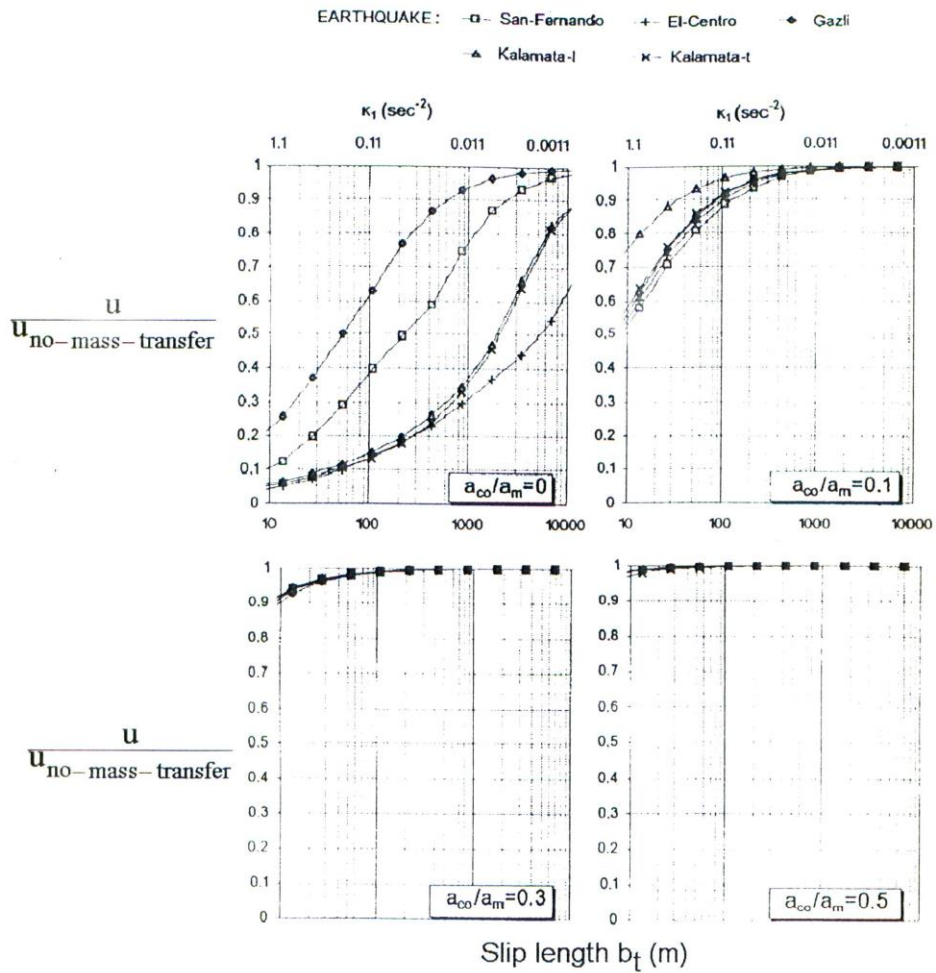
Σχ. 1. Μοντέλο των Stamatopoulos et al (2000) σώματος σε δύο κεκλιμένα επίπεδα: (α) αρχική γεωμετρία, (β) γεωμετρία όταν η διανύμενη απόσταση είναι u_2



Σχ. 2. Η γεωμετρία που εξετάζεται για την στροφή κτιρίων σε σεισμό.



Σχ. 3. Σχέση της αστράγγιστης αντοχής του εδάφους λόγω ρευστοποίησης, c_u συναρτήσει του N της επιτόπου δοκιμής SPT (Seed and Harder, 1990)



Σχ. 4. Επίδραση της μεταβολής της γεωμετρίας στη σεισμική μετακίνηση u με το μοντέλο του Stamatopoulos (1996).