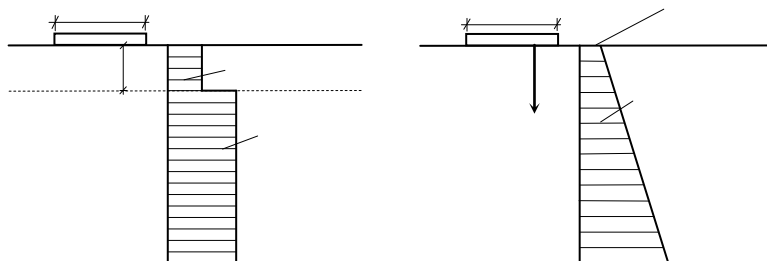


**ΟΡΓΑΝΙΣΜΟΣ ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΟΥ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΚΑΙ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ
(ΟΑΣΠ)**

Περίληψη
του ερευνητικού έργου με τίτλο:

**ΟΡΙΑΚΗ ΦΕΡΟΥΣΑ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΩΝ
ΘΕΜΕΛΙΩΣΕΩΝ ΛΟΓΩ ΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΔΡΑΣΕΩΝ**



Φορέας εκπόνησης :

Τομέας Γεωτεχνικής,
Σχολή Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ. Πολυτεχνείου

Επιστημονικός Υπεύθυνος :

Μ. Καββαδάς, Αναπλ. Καθηγητής ΕΜΠ

ΑΘΗΝΑ, Αύγουστος 2005

Περίληψη
του Ερευνητικού έργου με τίτλο:

ΟΡΙΑΚΗ ΦΕΡΟΥΣΑ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΩΝ ΘΕΜΕΛΙΩΣΕΩΝ ΛΟΓΩ ΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΔΡΑΣΕΩΝ

Η παρούσα περίληψη αφορά στο Ερευνητικό Έργο με τίτλο «Οριακή φέρουσα ικανότητα επιφανειακών θεμελιώσεων λόγω σεισμικών δράσεων» που χρηματοδοτήθηκε από τον ΟΑΣΠ και εντάσσεται στον Τομέα του Αντισεισμικού Σχεδιασμού και Προστασίας και ειδικότερα στη Θεματική Ενότητα «Αντισεισμική τεχνολογία : Εδαφοτεχνικά θέματα - αστοχίες εδαφών - αλληλεπίδραση εδάφους κατασκευής». Το ερευνητικό έργο εκπονήθηκε με επιστημονικό υπεύθυνο τον Μ. Καββαδά, Αναπλ. Καθηγητή ΕΜΠ και την ουσιαστική συμμετοχή του Αναπλ. Καθηγητή ΕΜΠ κ. Ι. Ψυχάρη.

Έναυσμα για το παρόν ερευνητικό έργο αποτέλεσε το γεγονός ότι η εκτίμηση της οριακής φέρουσας ικανότητας επιφανειακών θεμελιώσεων λόγω σεισμικών δράσεων στην ανωδομή δεν έχει διερευνηθεί επαρκώς. Αντιθέτως, έχει διερευνηθεί επαρκώς (κυρίως την δεκαετία 1980-90) η οιονεί-ελαστική συμπεριφορά των επιφανειακών θεμελιώσεων υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση πριν την αστοχία, με την ανάπτυξη των σχέσεων που δίνουν τις σύνθετες δυσκαμψίες για διάφορα σχήματα επιφανειακών θεμελιώσεων καθώς και την διατύπωση σχέσεων που δίνουν την απομείωση των μηχανικών χαρακτηριστικών του εδάφους θεμελίωσης λόγω ανακυκλιζόμενης φόρτισης και βεβαίως την οριακή περίπτωση της πλήρους «ρευστοποίησης». Κατά την εκτίμησή μας, ο κυριότερος λόγος για την υστέρηση αυτή είναι ότι, μέχρι σχετικά πρόσφατα, οι παρατηρηθείσες αστοχίες επιφανειακών θεμελιώσεων σε περιπτώσεις ισχυρών σεισμών ήταν σπάνιες και συνεπώς το ενδιαφέρον των ερευνητών είχε επικεντρωθεί στην οιονεί-ελαστική απόκριση των επιφανειακών θεμελιώσεων μέσω της προσομοίωσής τους ως ισοδύναμων γραμμικών ελατηρίων κατά την δυναμική ανάλυση των ανωδομών υπό σεισμικές δράσεις. Εξαιρεση βεβαίως αποτελούν οι περιπτώσεις αστοχίας λόγω ρευστοποίησης, οι οποίες όμως οφείλονται κυρίως στη δραστική μείωση (πρακτικώς μέχρι μηδενισμού) της διατμητικής αντοχής του εδάφους λόγω των αναπτυσσόμενων υπερπίεσεων πόρων και όχι σε μηχανισμό υπέρβασης της οριακής αντοχής του εδάφους λόγω των επιβαλλόμενων σεισμικών δράσεων από την ανωδομή. Η κατάσταση αυτή άρχισε να αλλάζει από το 1985 οπότε παρατηρήθηκαν αρκετές αστοχίες επιφανειακών θεμελιώσεων κατά τον σεισμό Michoacan-Guerero στο Μεξικό, και στη συνέχεια στο Kobe Ιαπωνίας (1995) και στον πρόσφατο καταστροφικό σεισμό της Νικομήδειας (Izmit) στην Τουρκία (17 Αυγούστου 1999). Κατά τον σεισμό της Τουρκίας, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι περιπτώσεις διαφορικών καθιζήσεων, περιστροφών, και

ανατροπών των θεμελιώσεων δεκάδων κτιρίων στην πόλη Adapazarı. Τα κτίρια αυτά παρέμεναν δομοστατικώς ακέραια. Καθ' όλες τις ενδείξεις οι παραμορφώσεις αυτές οφείλονται εν μέρει μόνον στην ανάπτυξη υδατικών υπερπιέσεων στις ιλυο-αμμώδεις στρώσεις του υπεδάφους, κυρίως όμως στις σημαντικές οριζόντιες δυνάμεις και ροπές που η ανωδομή επέβαλε στην θεμελίωση (και προκάλεσαν υπέρβαση της οριακής φέρουσας ικανότητας των θεμελιώσεων, ουσιαστικά ανεξαρτήτως της όποιας συνεισφοράς της μείωσης της διατμητικής αντοχής του εδάφους). Τα φορτία αυτά φαίνεται ότι οδήγησαν σε υπέρβαση του οριακού φορτίου του θεμελίου (στις περιπτώσεις ανατροπής) ή σε μεγάλες μόνιμες παραμορφώσεις (στις περιπτώσεις στροφών), τα οποία είναι και τα θέματα της προτεινόμενης έρευνας.

Αστοχίες επιφανειακών θεμελιώσεων λόγω σεισμού μπορούν να οφείλονται στους εξής λόγους (και συνήθως σε συνδυασμό τους) :

1. Υψηλές σεισμικές δράσεις που υπερβαίνουν σημαντικά τις τιμές σχεδιασμού της θεμελίωσης, κυρίως σε λυγηρά κτίρια (πολυ-όροφα με μικρές διαστάσεις κατόψεως) και σεισμικά γεγονότα που διεγείρουν έντονα την πρώτη ιδιομορφή του κτιρίου.
2. Μείωση της διατμητικής αντοχής του εδαφικού σχηματισμού λόγω :
 - (α) επαναλαμβανόμενης φόρτισης (ολιγοκυκλική «κόπωση»), και
 - (β) ανάπτυξης υδατικών υπερπιέσεων πόρωνσε σχέση με την αντοχή του εδαφικού σχηματισμού υπό μονοτονική φόρτιση (ακόμη και υπό αστράγγιστες συνθήκες) η οποία συνήθως χρησιμοποιείται κατά την ανάλυση της φέρουσας ικανότητας των επιφανειακών θεμελιώσεων.
3. Ανεπάρκεια των συμβατικών μεθόδων ανάλυσης της φέρουσας ικανότητας επιφανειακών θεμελιώσεων για την περίπτωση σεισμικών δράσεων που μπορεί να οφείλεται :
 - (α) Στις πολύ μεγάλες εκκεντρότητες της φόρτισης των θεμελίων λόγω σεισμικών επιφορτίσεων (σε σχέση με τις τιμές επί τη βάση των οποίων έχουν βαθμονομηθεί οι συνήθεις μέθοδοι ανάλυσης). Θα πρέπει να σημειωθεί ότι δυναμικές αναλύσεις πεδίων σε ελαστική θεμελίωση με μερική αποκόλληση λόγω μεγάλης εκκεντρότητας, δείχνουν ότι, ανάλογα και με τη γωνία στροφής του πεδίου, μπορεί η ενεργός επιφάνεια έδρασης να είναι πολύ μικρή και, επομένως, να υπάρχει μεγάλος κίνδυνος αστοχίας του εδάφους.
 - (β) Στην ύπαρξη σημαντικής τέμνουσας στη βάση του πεδίου (που μπορεί να ενεργοποιήσει και φαινόμενα ολίσθησης πέραν της κλασσικής αστοχίας)

Το παρόν ερευνητικό πρόγραμμα αναφέρεται κυρίως στον τελευταίο παράγοντα (ανεπάρκεια συμβατικών μεθόδων ανάλυσης) και για την διερεύνησή του ακολουθεί την εξής μεθοδολογία:

- (1) Παρουσιάζονται κλασσικές μέθοδοι υπολογισμού της οριακής φέρουσας ικανότητας επιφανειακών θεμελιώσεων υπό κεντρική, έκκεντρη και λοξή φόρτιση σε ομοιογενή εδάφη. Τέτοιες μέθοδοι είναι :
 - a. Η τροποποιημένη μέθοδος Meyerhof και Brinch-Hansen (όπως περιλαμβάνεται στο DIN 4017 και στον Ελληνικό Αντισεισμικό Κανονισμό ΕΑΚ 2000), καθώς και η περαιτέρω τροποποίησή της (στον συντελεστή λοξότητας της φόρτισης) όπως αναφέρεται στο τελικό κείμενο του Ευρωκώδικα 7 (2004).

b. Η μέθοδος υπολογισμού της οριακής φέρουσας ικανότητας επιφανειακών θεμελιώσεων που περιλαμβάνεται στο πληροφοριακό Παράρτημα F του Ευρωκώδικα 8, όπως αναπτύχθηκε από τον Pecker (π.χ. Pecker, 1996) και βελτιώθηκε μεταγενέστερα.

Οι ανωτέρω μέθοδοι συγκρίνονται μεταξύ τους για διάφορες τιμές της εκκεντρότητας και λοξότητας της φόρτισης προκειμένου να επιβεβαιωθεί η συμβατότητά τους και οι τυχόν σχετικές αποκλίσεις τους. Επιπλέον, τα αποτελέσματα των αναλυτικών μεθόδων συγκρίνονται με αριθμητικές αναλύσεις με τη μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων (πρόγραμμα PLAXIS – για λωριδωτό πέδιλο) και την μέθοδο των Πεπερασμένων Διαφορών (πρόγραμμα FLAC-3D – για τετραγωνικά, ορθογωνικά και λωριδωτά πέδιλα) υπό κεντρική, έκκεντρη και λοξή φόρτιση. Σκοπός των ανωτέρω συγκρίσεων είναι να βαθμονομηθεί η ακρίβεια των αριθμητικών αναλύσεων (σε σχέση με τις αναλυτικές μεθόδους) προκειμένου στη συνέχεια οι αριθμητικές μέθοδοι να χρησιμοποιηθούν για τη συναγωγή συμπερασμάτων στην περίπτωση θεμελιώσεων επί ανομοιογενούς εδάφους (όπου δεν υπάρχουν αναλυτικές επιλύσεις για σύγκριση).

(2) Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα αριθμητικών αναλύσεων (με πεπερασμένα στοιχεία και πεπερασμένες διαφορές) για την οριακή φέρουσα ικανότητα επιφανειακών θεμελιώσεων (τετραγωνικά, ορθογωνικά και λωριδωτά πέδιλα) υπό κεντρική, έκκεντρη και λοξή φόρτιση σε ανομοιογενείς σχηματισμούς και συγκεκριμένα :

a. Σε δίστρωτο σχηματισμό (με διαφορετική τιμή της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής στην ανώτερη και κατώτερη στρώση και ποικίλα πάχη της ανώτερης στρώσης) και

b. Σε εδαφικό σχηματισμό με γραμμικώς αυξανόμενη διατμητική αντοχή με το βάθος (προκειμένου να προσομοιωθούν οι συνήθεις συνθήκες κανονικά στερεοποιημένων αργίλων).

Τα αποτελέσματα των αναλύσεων παρουσιάζονται με μορφή κανονικοποιημένων νομογραφημάτων ώστε να μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε ευρύ φάσμα περιπτώσεων.

(3) Σχολιάζεται η επιρροή των σεισμικών δράσεων στην απομείωση των μηχανικών ιδιοτήτων του εδάφους κάτω από το θεμέλιο, κυρίως μέσω της ανάπτυξης υπερπιέσεων πόρων. Το θέμα αυτό, αν και δεν σχετίζεται με το αντικείμενο της παρούσας έρευνας, έχει μεγάλη σημασία επειδή η απομείωσης της αντοχής του εδάφους επηρεάζει δραστικά την φέρουσα ικανότητα (μέχρι πρακτικού μηδενισμού της στην περίπτωση της ρευστοποίησης).

(4) Διερευνάται η επιρροή της μερικής ανύψωσης των επιφανειακών πεδίων στην οριακή φέρουσα ικανότητα.

Η πρακτική χρησιμότητα των ανωτέρω διερευνήσεων τεκμηριώνεται από το γεγονός ότι στον Ελληνικό Αντισεισμικό Κανονισμό (Ε.Α.Κ.–2000) δεν έχει δοθεί πλήρης γενική απάντηση στα θέματα του οριακού φορτίου (φέρουσας ικανότητας) επιφανειακών θεμελιώσεων (πεδίων, πεδιλοδοκών και κοιτοστρώσεων), αν και οι συγκεκριμένοι τρόποι θεμελίωσης αποτελούν τον πλέον συνηθισμένο τρόπο θεμελίωσης των οικοδομικών έργων. Με βάση το ανωτέρω σκεπτικό, κύριος σκοπός της έρευνας είναι η ποσοτική διερεύνηση της επιρροής των ακολούθων παραγόντων στην αστοχία των επιφανειακών θεμελιώσεων :

1. Του μεγέθους των σεισμικών δράσεων, δηλαδή :

(α) της **σχετικής εκκεντρότητας** της φόρτισης που εκφράζεται μέσω της αδιάστατης παραμέτρου : $\hat{e} = M / (N B)$, ή των δύο παραμέτρων :

$$\hat{e}_B = \frac{M_B}{N B} \quad \text{και} \quad \hat{e}_L = \frac{M_L}{N L}$$

σε περίπτωση διπλής εκκεντρότητας της επιβαλλόμενης φόρτισης, και

(β) της **σχετικής λοξότητας** της φόρτισης που εκφράζεται μέσω της αδιάστατης παραμέτρου : $\hat{i} = Q / N$, ή των δύο παραμέτρων :

$$\hat{i}_B = \frac{Q_B}{N} \quad \text{και} \quad \hat{i}_L = \frac{Q_L}{N}$$

σε περίπτωση διπλής λοξότητας της επιβαλλόμενης φόρτισης,

όπου M, Q, N είναι η ροπή, τέμνουσα και κατακόρυφη δράση στη στάθμη έδρασης της θεμελίωσης και B, L είναι το πλάτος και μήκος (L > B) του θεμελίου αντιστοίχως.

2. Της μεθόδου ανάλυσης της φέρουσας ικανότητας επιφανειακών θεμελιώσεων και ειδικότερα της μεθόδου που προτείνεται στον Ε.Α.Κ. 2000 (και στον Ευρωκώδικα 7) και της μεθόδου που προτείνεται στον Ευρωκώδικα 8.

3. Της ανομοιογένειας του εδάφους θεμελίωσης (μεταβολή της διατμητικής αντοχής με το βάθος).

Οι ανωτέρω αριθμητικές διερευνήσεις γίνονται μέσω :

(1) Της σύγκρισης των κλασσικών μεθόδων υπολογισμού της οριακής φέρουσας ικανότητας επιφανειακών θεμελιώσεων υπό κεντρική, έκκεντρη και λοξή φόρτιση σε ομοιογενή εδάφη, δηλαδή της μεθόδου που προτείνεται στον ΕΑΚ-2000 (και στον Ευρωκώδικα 7) και της μεθόδου που προτείνεται στον Ευρωκώδικα 8), με αριθμητικές αναλύσεις με τη μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων (πρόγραμμα PLAXIS – για λωριδωτό πέδιλο) και την μέθοδο των Πεπερασμένων Διαφορών (πρόγραμμα FLAC-3D για τετραγωνικά, ορθογωνικά και λωριδωτά πέδιλα). Σκοπός της σύγκρισης είναι να βαθμονομηθεί η ακρίβεια των αριθμητικών αναλύσεων (σε σχέση με τις αναλυτικές μεθόδους) προκειμένου στη συνέχεια οι αριθμητικές μέθοδοι να χρησιμοποιηθούν για τη συναγωγή συμπερασμάτων στην περίπτωση θεμελιώσεων επί ανομοιογενούς εδάφους (όπου δεν υπάρχουν αναλυτικές επιλύσεις για σύγκριση). Τα αποτελέσματα των ανωτέρω συγκρίσεων είναι πολύ ικανοποιητικά (ακρίβεια $\pm 5\%$) για τιμές της σχετικής εκκεντρότητας (e/B) που πλησιάζουν μέχρι το 0.40 και αποδεικνύουν ότι οι ανωτέρω αριθμητικές μέθοδοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν με αξιοπιστία για την εκτίμηση της οριακής φέρουσας ικανότητας επιφανειακών θεμελιώσεων με μεγάλες εκκεντρότητες και σημαντική λοξότητα φόρτισης.

(2) Της εκτέλεσης μεγάλου αριθμού αριθμητικών αναλύσεων με τις ανωτέρω μεθόδους σε ανομοιογενείς εδαφικούς σχηματισμούς (υπό συνθήκες αστράγγιστης φόρτισης) και συγκεκριμένα :

a. Σε δίστρωτο σχηματισμό (με διαφορετική τιμή της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής στην ανώτερη και κατώτερη στρώση και ποικίλα πάχη της ανώτερης στρώσης) και

b. Σε εδαφικό σχηματισμό με γραμμικώς αυξανόμενη διατμητική αντοχή με το βάθος (προκειμένου να προσομοιωθούν οι συνήθεις συνθήκες κανονικά στερεοποιημένων αργίλων).

Τα αποτελέσματα αυτών των αναλύσεων παρουσιάζονται με μορφή κανονικοποιημένων νομογραφημάτων ώστε να μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε ευρύ φάσμα περιπτώσεων.

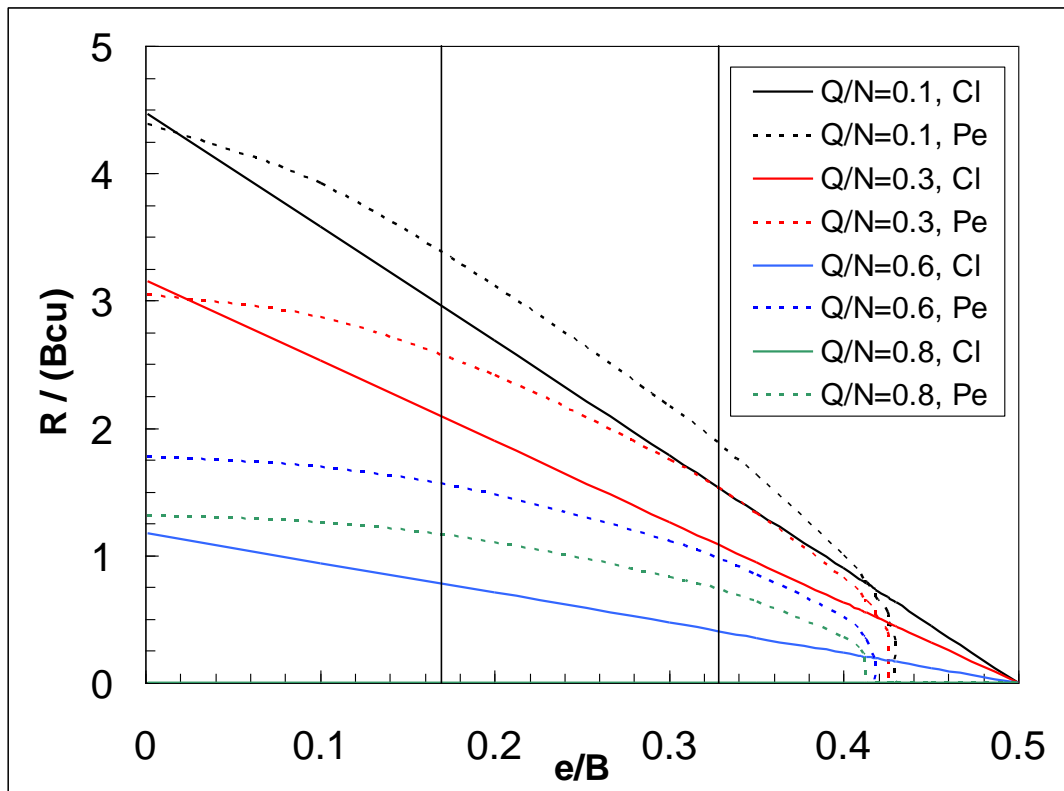
Οι αριθμητικές διερευνήσεις γίνονται με την παραδοχή αστράγγιστης διατμητικής αντοχής του εδάφους θεμελίωσης (δηλαδή αναλύσεις τύπου $\varphi=0$), με το σκεπτικό ότι η εκ σεισμού προκαλούμενη ανακυκλιζόμενη φόρτιση επιφανειακών θεμελιώσεων είναι αρκετά ταχεία ώστε η απόκριση του εδάφους να είναι πρακτικώς αστράγγιστη ακόμη και σε λεπτόκοκκους μή-συνεκτικούς σχηματισμούς (π.χ. ιλεις και λεπτόκοκκες ιλυώδεις άμμους). Περιπτώσεις χονδρόκοκκων μη-συνεκτικών σχηματισμών (π.χ. χονδρόκοκκες άμμοι και αμμοχάλικα), στους οποίους η παραδοχή της αστράγγιστης φόρτισης δεν είναι ικανοποιητική, δεν προκαλούν συνήθως πρόβλημα υπέρβασης φέρουσας ικανότητας του εδάφους θεμελίωσης¹ και συνεπώς δεν εξετάζονται στο πλαίσιο της παρούσας διερεύνησης.

Από τις ανωτέρω αριθμητικές αναλύσεις προέκυψαν τα εξής αποτελέσματα - συμπεράσματα :

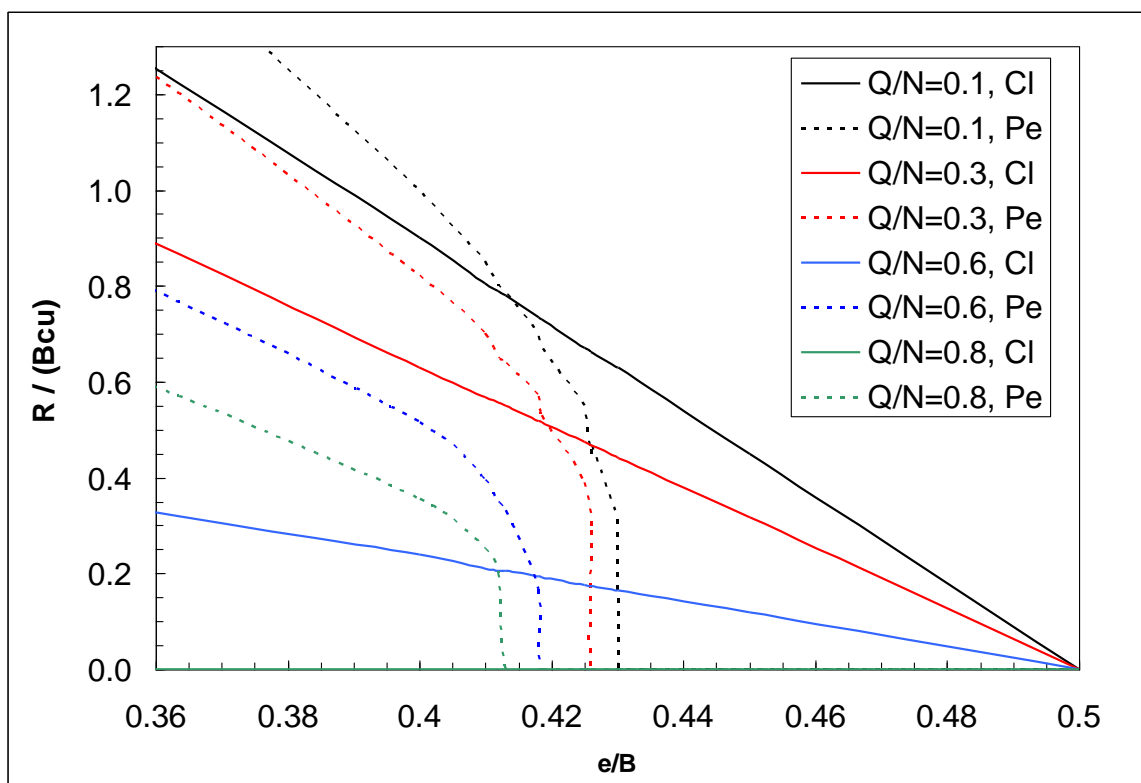
1. Σύγκριση της μεθόδου του Ευρωκώδικα 7 (EC-7, που πρακτικώς ταυτίζεται με τη μέθοδο του ΕΑΚ 2000 και τη μέθοδο του DIN 4017) και της μεθόδου του Ευρωκώδικα 8 (Pecker, 1996)

Οι ανωτέρω δύο μέθοδοι (EC-7 και EC-8) συγκρίνονται μεταξύ τους για διάφορες τιμές της εκκεντρότητας ($e = M/N$) και λοξότητας της φόρτισης (Q/N , $Q =$ τέμνουσα, $N =$ ορθή δύναμη) προκειμένου να επιβεβαιωθεί η συμβατότητά τους και οι τυχόν σχετικές αποκλίσεις τους. Τα αποτελέσματα των συγκρίσεων φαίνονται στα ακόλουθα δύο σχήματα που παρουσιάζουν τα διαγράμματα του οριακού φορτίου (R) λωριδωτού πεδίου στην επιφάνεια ομοιογενούς και καθαρώς συνεκτικού εδάφους (αστράγγιστη διατμητική αντοχή c_u), αδιαστατοποιημένου με το πλάτος του πεδίου και την τιμή της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής c_u . Η γραφική παράσταση γίνεται ως προς την ανηγμένη εκκεντρότητα της φόρτισης (e/B). Παρουσιάζονται διάφορες καμπύλες που αφορούν σε διάφορες τιμές της λοξότητας της φόρτισης, εκφρασμένης μέσω του λόγου της οριζόντιας (τέμνουσας) δύναμης (Q) προς την αντίστοιχη ορθή δύναμη (N). Οι πλήρεις γραμμές (ευθείες) παρουσιάζουν τα αποτελέσματα της μεθόδου του ΕΑΚ 2000 ενώ οι εστιγμένες καμπύλες παρουσιάζουν τα αντίστοιχα αποτελέσματα της μεθόδου του Ευρωκώδικα 8 (μέθοδος Pecker).

¹ Επειδή η φέρουσα ικανότητα ελέγχεται από τις ενέργες παραμέτρους διατμητικής αντοχής με αποτέλεσμα να είναι αρκετά μεγαλύτερη από την αντίστοιχη τιμή της σε περίπτωση όπου η αντοχή του εδάφους ελέγχεται από την αστράγγιστη διατμητική αντοχή.



Το δεύτερο διάγραμμα παρουσιάζει απλώς την λεπτομέρεια του πρώτου διαγράμματος στην περιοχή των ανηγμένων εκκεντροτήτων κοντά στην οριακή τιμή 0.50.



Από τη σύγκριση των δύο μεθόδων προκύπτει ότι οι διαφορές των δύο μεθόδων είναι σχετικώς μικρές για τιμές της ανηγμένης εκκεντρότητας που δεν υπερβαίνουν

το 1/3. Για μεγαλύτερες τιμές της ανηγμένης εκκεντρότητας, οι δύο μέθοδοι διαφέρουν σημαντικά. Ειδικώς, η μέθοδος του ΕΑΚ-2000 δίνει μη-μηδενικές τιμές του οριακού φορτίου (αλλά αρκετά μικρές) ακόμη και για τιμές της ανηγμένης εκκεντρότητας που κοντά στο 0.50, ενώ η μέθοδος του Ευρωκώδικα 8 δεν επιτρέπει τιμές της ανηγμένης εκκεντρότητας μεγαλύτερες από 0.42 περίπου.

1. Φέρουσα ικανότητα πεδίων σε δίστρωτο έδαφος :

Με βάση τα αποτελέσματα μεγάλου αριθμού αριθμητικών αναλύσεων, προτείνεται η ακόλουθη προσεγγιστική μέθοδος για τον υπολογισμό της οριακής φέρουσας ικανότητας επιφανειακών θεμελιώσεων διαστάσεως $B \times L$ ($L > B$), υπό κεντρική ή έκκεντρη φόρτιση σε δίστρωτο σχηματισμό όπου :

d = πάχος της ανώτερης εδαφικής στρώσης

c_{u1} = αστράγγιστη διατμητική αντοχή της ανώτερης εδαφικής στρώσης (πάχους d)

c_{u2} = αστράγγιστη διατμητική αντοχή της κατώτερης εδαφικής στρώσης (μεγάλου πάχους)

1. Υπολογίζεται η ισοδύναμη (μέση) αστράγγιστη διατμητική αντοχή \hat{c}_u του σχηματισμού από τη σχέση :

$$\text{Εάν } d = 0 : \hat{c}_u = c_{u2}$$

$$\text{Εάν } 0 < d < 0.6 B : \hat{c}_u = c_{u1} \left(\frac{d}{0.6 B} \right) + c_{u2} \left(1 - \frac{d}{0.6 B} \right)$$

$$\text{Εάν } d > 0.6 B : \hat{c}_u = c_{u1}$$

Από την ανωτέρω σχέση προκύπτει ότι το βάθος επιρροής της θεμελίωσης (όσον αφορά στην οριακή φέρουσα ικανότητα) είναι της τάξεως του 0.6 B.

2. Η αδιάστατη τιμή της οριακής φέρουσας ικανότητας (R) για την περίπτωση απλής εκκεντρότητας κατά την διεύθυνση του πλάτους B , δίνεται από τη σχέση:

$$\frac{R}{B L \hat{c}_u} = (\pi + 2) \left(1 - 2 \frac{e}{B} \right) \left[1 + 0.2 \left(\frac{B}{L} \right) \left(1 - 2 \frac{e}{B} \right) \right] i_c$$

$$\text{όπου : } i_c = 0.5 \left(1 + \sqrt{1 - \frac{\frac{R}{B L \hat{c}_u}}{1 - 2 \frac{e}{B}}} \right) \text{ και } i = Q / R$$

και (e) είναι η εκκεντρότητα της φόρτισης κατά την διεύθυνση του πλάτους (B).

Η ανωτέρω σχέση προσεγγίζει τα αποτελέσματα των αριθμητικών επιλύσεων με ακρίβεια $\pm 5\%$ για τιμές της ανηγμένης εκκεντρότητας (e/B) έως 0.35 περίπου, ενώ για μεγαλύτερες τιμές της ανηγμένης εκκεντρότητας οι αποκλίσεις φθάνουν το $\pm 15\%$. Με το σκεπτικό ότι ανηγμένες εκκεντρότητες άνω του 0.35 είναι μάλλον

ασυνήθεις, η ανωτέρω προσεγγιστική σχέση θεωρείται πολύ ικανοποιητική. Σημειώνεται ότι στην περίπτωση ομοιογενούς εδάφους, η ανωτέρω σχέση μεταπίπτει στην γνωστή αναλυτική σχέση του ΕΑΚ 2000 θέτοντας $c_u = \hat{c}_u$.

2. Φέρουσα ικανότητα πεδίων σε έδαφος με γραμμικώς αυξανόμενη διατμητική αντοχή :

Με βάση τα αποτελέσματα μεγάλου αριθμού αριθμητικών αναλύσεων, προτείνεται η ακόλουθη προσεγγιστική μέθοδος για τον υπολογισμό της οριακής φέρουσας ικανότητας επιφανειακών θεμελιώσεων διαστάσεως $B \times L$ ($L > B$), υπό κεντρική ή έκκεντρη φόρτιση σε εδαφικό σχηματισμό με γραμμικώς αυξανόμενη (με το βάθος) αστράγγιστη διατμητική αντοχή κατά τη σχέση : $c_u = c_{u0} + \lambda z$,

όπου :

c_{u0} = αστράγγιστη διατμητική αντοχή στην επιφάνεια του εδάφους ($z=0$)

z = βάθος από την επιφάνεια του εδάφους

λ = συντελεστής αύξησης της διατμητικής αντοχής με το βάθος (σε kPa/m)

Η αδιάστατη τιμή της οριακής φέρουσας ικανότητας (R) για την περίπτωση απλής εκκεντρότητας κατά την διεύθυνση του πλάτους B , δίνεται από τη σχέση:

$$\frac{R}{BLc_{u0}} = (\pi + 2) \left(1 - 2 \frac{e}{B}\right) \left[1 + 0.2 \left(\frac{B}{L}\right) \left(1 - 2 \frac{e}{B}\right)\right] i_c A$$

$$\text{όπου : } i_c = 0.5 \left(1 + \sqrt{1 - \frac{\left(\frac{R}{BLc_{u0}}\right)}{\left(1 - 2 \frac{e}{B}\right)}}\right) \text{ και } i = Q / R$$

$$\text{και : } A = 1 + \left\{0.125 - 0.70 \left(\frac{e}{B}\right)^2\right\} \left(\frac{\lambda B}{c_{u0}}\right)$$

ενώ, e είναι η εκκεντρότητα της φόρτισης κατά την διεύθυνση του πλάτους (B). Η ανωτέρω σχέση ισχύει για τιμές της ανηγμένης εκκεντρότητας έως 0.4226 (δηλαδή για $e / B < 0.4226$), με το σκεπτικό ότι για μεγαλύτερες τιμές της ανηγμένης εκκεντρότητας η φέρουσα ικανότητα δεν ορίζεται (κατά την μέθοδο του Ευρωκώδικα 8).

Στην ανωτέρω σχέση, η επιρροή της αύξησης της διατμητικής αντοχής με το βάθος εμφανίζεται μέσω του αδιάστατου συντελεστή A . Στην περίπτωση ομοιογενούς εδάφους, οπότε $\lambda = 0$, η ανωτέρω σχέση μεταπίπτει στην γνωστή αναλυτική σχέση του ΕΑΚ 2000, αφού $A = 1$. Επίσης, για ανηγμένη εκκεντρότητα $e / B = 0.4226$ (δηλαδή τη μέγιστη τιμή για την οποία ορίζεται η φέρουσα ικανότητα), ισχύει $A = 1$.

Η ανωτέρω σχέση προσεγγίζει τα αποτελέσματα των αριθμητικών επιλύσεων με ακρίβεια $\pm 5\%$ για τιμές της ανηγμένης εκκεντρότητας (e/B) έως 0.35 περίπου, ενώ για μεγαλύτερες τιμές της ανηγμένης εκκεντρότητας (έως 0.4226) οι αποκλίσεις

φθάνουν το $\pm 20\%$. Με το σκεπτικό ότι ανηγμένες εκκεντρότητες άνω του 0.35 είναι μάλλον ασυνήθεις, η ανωτέρω προσεγγιστική σχέση θεωρείται πολύ ικανοποιητική.

Τέλος, όσον αφορά στην επιρροή της αποκόλλησης, γίνεται μία διερεύνηση της επιρροής όλων των παραμέτρων, που επηρεάζουν τη δυναμική απόκριση πεδίων με μερική αποκόλληση από το έδαφος, στις ακραίες τιμές της απόκρισης και συγκεκριμένα στη μέγιστη γωνία στροφής, στο ελάχιστο μήκος επαφής και στη μέγιστη τάση εδάφους που αναπτύσσεται στο άκρον του πεδίου (τάση αιχμής). Αρχικά γίνεται μία διερεύνηση της επιρροής της αδιάστατης έκφρασης κάθε παραμέτρου χωριστά, για ημιτονική διέγερση, και στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για ένα παράδειγμα ενός πλαισίου υπό σεισμική διέγερση. Τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την ανάλυση είναι:

1. Η ελαστικότητα του εδάφους, που καθορίζεται από την τιμή του δείκτη k_0 της θεμελίωσης Winkler, επηρεάζει σημαντικά το ελάχιστο μήκος επαφής αλλά και την τάση εδάφους, αφού αλλάζει τις ιδιοπεριόδους των στροφικών και των κατακόρυφων ταλαντώσεων και μπορεί να οδηγήσει σε φαινόμενα συντονισμού. Σε περιπτώσεις που δεν υπάρχει κίνδυνος συντονισμού, η ελαστικότητα της θεμελίωσης δεν φαίνεται να επηρεάζει τα αποτελέσματα.
2. Όπως ήταν αναμενόμενο, η στροφική ακαμψία του υποστυλώματος που συνδέεται με το πέδιλο είναι σημαντική. Μείωση της στροφικής ακαμψίας του υποστυλώματος, σε σύγκριση με τη στροφική ακαμψία του εδάφους, οδηγεί σε μεγαλύτερη ροπή πεδίου με αποτέλεσμα την αύξηση του ποσοστού αποκόλλησης και των τάσεων εδάφους.
3. Φαινόμενα συντονισμού παρατηρούνται όταν η συχνότητα διέγερσης είναι κοντά σε κάποια από τις ιδιοσυχνότητες του συστήματος για στροφικές ή κατακόρυφες ταλαντώσεις με αποτέλεσμα η απόκριση του πεδίου να μεγαλώνει σημαντικά, με αντίστοιχη μείωση του μήκους επαφής και αύξηση των τάσεων του εδάφους. Σε αυτές τις περιπτώσεις, η ψευδοστατική ανάλυση υποεκτιμά σημαντικά την απόκριση, αφού βασίζεται στις μέγιστες μόνο τιμές των σεισμικών φορτίων και δεν λαμβάνει υπόψη φαινόμενα συντονισμού.
4. Αξιοσημείωτη είναι η εμφάνιση φαινομένων συντονισμού και σε μία τρίτη περιοχή περιόδων διέγερσης, αρκετά μεγαλύτερων από τις ιδιοπεριόδους των στροφικών και των κατακόρυφων ταλαντώσεων, που δεν είναι εύκολο να εξηγηθεί και χρήζει περαιτέρω διερεύνησης.
5. Η επιρροή της απόσβεσης της θεμελίωσης περιορίζεται κυρίως στη γωνία στροφής, ενώ το ελάχιστο μήκος επαφής και οι τάσεις εδάφους επηρεάζονται πολύ λιγότερο.
6. Η παραμετρική διερεύνηση δείχνει ότι η ψευδοστατική ανάλυση υποεκτιμά, γενικώς, τα αποτελέσματα, ακόμη και σε περιοχές συχνοτήτων διέγερσης μακράν του συντονισμού, Υπάρχουν όμως περιπτώσεις που η στατική θεώρηση οδηγεί σε εξαιρετικά δυσμενή αποτελέσματα, πολύ δυσμενέστερα αυτών της δυναμικής ανάλυσης. Τέτοιες περιπτώσεις είναι:
 - Για μεγάλες τιμές της μέγιστης σεισμικής ροπής M_E , κοντά στις τιμές που αντιστοιχούν σε ανατροπή του πεδίου.
 - Για μεγάλες τιμές αξονικού σεισμικού φορτίου του υποστυλώματος, N_E . Ενώ οι δυναμικές αναλύσεις δείχνουν πολύ μικρή επιρροή της απόκρισης από το αξονικό φορτίο του υποστυλώματος, η ψευδοστατική θεώρηση οδηγεί σε

υπερβολικά μεγάλες τιμές της τάσης εδάφους, εάν το φορτίο N_E είναι εφελκυστικό. Αντίθετα, για θλιπτικό αξονικό φορτίο τα αποτελέσματα είναι εναντίον της ασφάλειας. Γι' αυτό το λόγο προτείνεται η ψευδοστατική ανάλυση να εφαρμόζεται αμελώντας το σεισμικό αξονικό φορτίο του υποστυλώματος ($N_E=0$). Η θεώρηση αυτή φαίνεται να οδηγεί στα καλύτερα δυνατά αποτελέσματα.