

Πειραματική και αριθμητική μελέτη αλληλεπίδρασης βάθρων γεφυρών και εδάφους θεμελίωσης Experimental and numerical study of soil-bridge pier interaction

Γεώργιος Χ. ΜΑΝΟΣ¹, Βλαδίσμηρος ΚΟΥΡΤΙΔΗΣ², Αναστάσιος ΣΕΞΤΟΣ³,
Σταύρος ΧΗΡΡΑΣ⁴

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Παρουσιάζονται συνοπτικά αποτελέσματα της μετρηθείσας και αναλυτικώς προβλεφθείσας απόκρισης ομοιώματος βάθρου γέφυρας που έχει κατασκευαστεί στο Ευρωπαϊκό Πεδίο Δοκιμών Euroseis-Test στην περιοχή Βόλβη της Θεσσαλονίκης. Η απόκριση του καταστώματος σε δυναμικά φορτία έχει μετρηθεί και μελετηθεί στο πεδίο των συχνοτήτων, ενώ πραγματοποιήθηκε εκτεταμένο πλαίσιο παραμετρικών αριθμητικών αναλύσεων συνεκτιμώντας την επιρροή της εδαφικής ενδοσιμότητας στο επίπεδο της θεμελίωσης. Το ίδιο κατά βάση πρόβλημα μελετήθηκε σε μικρότερης κλίμακας ομοίωμα στη σεισμική τράπεζα του Εργαστηρίου Αντοχής Υλικών του Α.Π.Θ. Η ευκαμψία του συστήματος θεμελίωσης-εδάφους προσεγγίστηκε αυτή τη φορά μέσω της ύπαρξης κατάλληλα διαμορφωμένου υποστρώματος άμμου εντός ενός είδους διατμητικού κιβωτίου (shear stack). Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων μετρώνται επιταχύνσεις τόσο επί του ομοιώματος όσο και εντός του σώματος της άμμου καθώς και τα δυναμικά χαρακτηριστικά του συστήματος. Παρατηρήθηκαν εδώ μη-γραμμικοί μηχανισμοί απόκρισης στην διεπιφάνεια θεμελίωσης και εγκιβωτισμένης άμμου στο εργαστήριο, πέραν από την ρηγμάτωση του βάθρου στη βάση του όπως και του αντίστοιχου ομοιώματος in-situ. Οι αντίστοιχες αριθμητικές προσομοιώσεις επικεντρώθηκαν στο να προσεγγίσουν τον μηχανισμό ανασηκώματος του θεμελίου και αυτόν της πλαστικοποίησης του εδάφους στη θλιβόμενη ζώνη. Πρόκειται για σχετικά πολύπλοκους ανελαστικούς μηχανισμούς για τους οποίους απαιτείται συστηματική εργαστηριακή προσπάθεια καταγραφής τους και στην συνέχεια επιβεβαίωση του βαθμού προσέγγισής τους μέσα από κατάλληλα αριθμητικά εργαλεία.

ABSTRACT :

The present paper summarizes the experimental and numerical results of a model bridge pier structure erected at the Euroseis European Test Site, in Thessaloniki, Greece. A similar model is also constructed at the Laboratory of Strength of Materials at Aristotle University of Thessaloniki over a shear stack filled with sand. Both models are excited by dynamic loads and their dynamic and seismic response is recorded and studied in detail in order to identify the effect of the flexible foundation subsoil and its dynamic interaction with the foundation and the pier. Moreover, a set of 2D/3D, elastic/inelastic numerical analyses is performed considering both material and geometrical nonlinearity leading to satisfactory agreement with the measured response. It is foreseen that the particular study, being one of the few cases where soil conditions are considered during the experimental campaign, the results obtained and their comparison with theoretical approaches contribute further towards the study of complex soil-structure interaction effects.

¹ Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσ/νίκης, email: gcmayos@civil.auth.gr

² Δρ. Πολιτικός Μηχανικός, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσ/νίκης

³ Λέκτορας, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, email: asextos@civil.auth.gr

⁴ Πολιτικός Μηχανικός, MSc, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

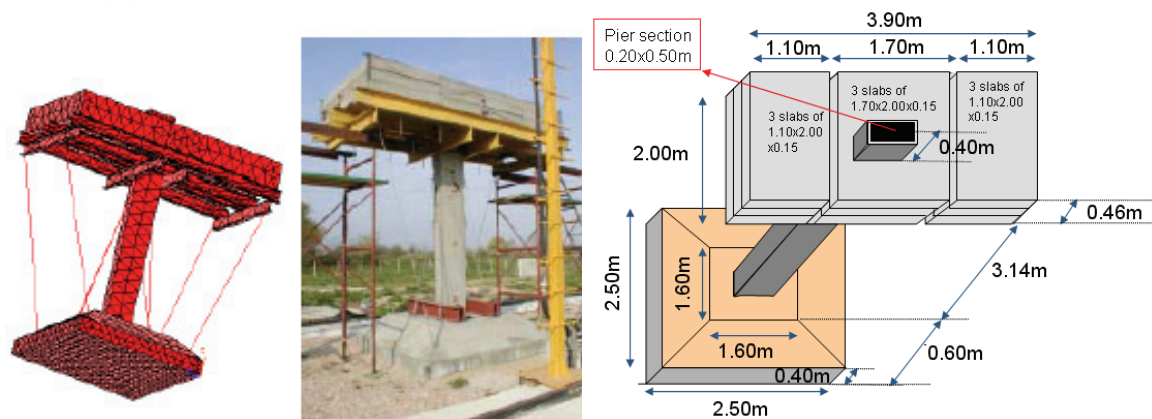
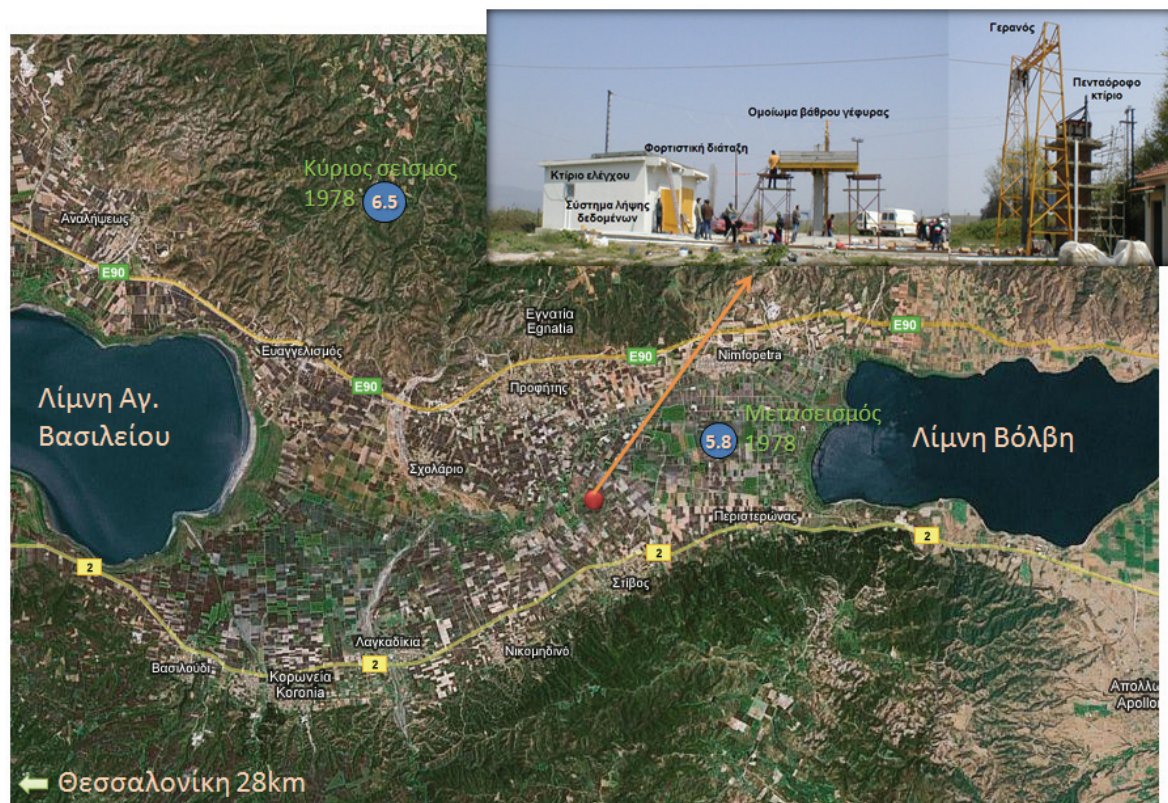
ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Παρά το γεγονός ότι το πρόβλημα της αλληλεπίδρασης εδάφους-θεμελίωσης-ανωδομής έχει μελετηθεί διεξοδικά, είναι γενικά αποδεκτό ότι απαιτείται εκτενέστερη διερεύνηση και υποστήριξη των αναλυτικών και αριθμητικών εργαλείων μέσα από πειραματικές μετρήσεις. Ειδικότερα όταν πρόκειται για την δυναμική-σεισμική ανελαστική απόκριση κατασκευών ή για περιπτώσεις όπου οι εδαφικές συνθήκες ευνοούν την αλληλεπίδραση της κατασκευής με το έδαφος. Στο πλαίσιο αυτό, έχει χρηματοδοτηθεί από την Ευρωπαϊκή Ένωση την τελευταία δεκαετία μια σειρά ερευνητικών προγραμμάτων για την επιτέλεση πειραμάτων στο Ευρωπαϊκό Πεδίο Δοκιμών Euroseis-Test (Manos 2004, Pitilakis 1999, <http://euroseis.civil.auth.gr>). Πρόκειται για ένα «φυσικό εργαστήριο», μοναδικό στην Ευρώπη και ένα από τα λίγα παγκοσμίως (Manos 2004) το οποίο βρίσκεται στην επικεντρική περιοχή του σεισμού της Θεσσαλονίκης το 1978, κοντά στη λίμνη Βόλβη. Οι βασικοί στόχοι των εν λόγω προγραμμάτων αλλά και ειδικότερα της παρούσης εργασίας είναι α) η πειραματική διερεύνηση της εδαφικής ενδοσιμότητας και απόσβεσης β) η χρήση ομοιωμάτων κατασκευών στο πεδίο για τη διερεύνηση του ευμενούς ή δυσμενούς ρόλου της εδαφικής ενδοσιμότητας στη δυναμική απόκριση των κατασκευών γ) η αποτίμηση της σχετικής σημασίας της ανελαστικής συμπεριφοράς διατομών Ο/Σ και των φαινομένων αλληλεπίδρασης όταν αυτά λαμβάνουν χώρα ταυτοχρόνως δ) η πειραματική μελέτη της αδρανειακής αλληλεπίδρασης, δηλαδή του κυματικού πεδίου που διαχέεται προς το έδαφος εξαιτίας της ταλάντωσης της κατασκευής ε) η αξιοποίηση της εργαστηριακής υποδομής του Εργαστηρίου Πειραματικής Αντοχής των Υλικών και Κατασκευών για την διακρίβωση της μετελαστικής συμπεριφοράς των δομικών στοιχείων Ο/Σ πριν τη μεταφορά τους στο πεδίο καθώς και για τη διερεύνηση τεχνικών ενίσχυσης και στ) η χρήση επί-τόπου μετρήσεων για την μελέτη της αξιοπιστίας των αναλυτικών και αριθμητικών εργαλείων που χρησιμοποιούνται. Παρά το γεγονός ότι δεν είναι δυνατή η ανάπτυξη ισχυρών διεγέρσεων επί-τόπου, όταν αυτό απαιτείται, όπως συμβαίνει στο εργαστήριο, η ύπαρξη ρεαλιστικών συνθηκών έδρασης των ομοιωμάτων ενισχύει σε μεγάλο βαθμό τη χρησιμότητα και τις δυνατότητες των πειραματικών διατάξεων στο Ευρωπαϊκό Πεδίο Δοκιμών Euroseis-Test, το οποίο και περιγράφεται συνοπτικά στην ενότητα που ακολουθεί.

ΤΟ ΠΕΔΙΟ ΔΟΚΙΜΩΝ EUROSEIS-TEST

Γενικά

Στο πεδίο δοκιμών Euroseis-Test έχουν αναπτυχθεί δύο ομοιώματα κατασκευών: ένα πενταόροφο κτίριο και ένα βάθρο γέφυρας, η γεωμετρία του οποίου παρουσιάζεται στο Σχήμα 1. Το συγκεκριμένο ομοίωμα γέφυρας, κατασκευάστηκε το 2004 και μπορεί να θεωρηθεί ως παραπλήσιο με μια σειρά δοκιμών που μελετήθηκαν πειραματικά στα εργαστήρια της ELSA στο JRC (European Joint Research Center - Pinto, 1996), μικρότερης όμως κλίμακας και κατά συνέπεια μικρότερων διαστάσεων και κατ' αναλογία διαφορετικού οπλισμού. Για τον λόγο αυτόν και δεν επιχειρήται εδώ καμία σύγκριση της συμπεριφοράς των ομοιωμάτων αυτών. Λεπτομερής περιγραφή των μηχανικών ιδιοτήτων των υλικών, του οπλισμού, της μάζας, καθώς και των αποτελεσμάτων της πειραματικής διερεύνησης των ομοιωμάτων των μεμονωμένων βάθρων που πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο είναι διαθέσιμη αλλού (Manos et al., 2004).



Σχήμα 1. Ευρωπαϊκό Πεδίο Δοκιμών Euroseis-Test και γεωμετρία του ομοιώματος βάθρου γέφυρας.

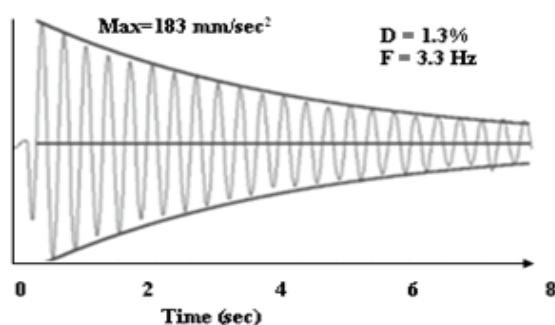
ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Για τη μέτρηση της δυναμικής συμπεριφοράς του βάθρου χρησιμοποιήθηκαν επιταχυνσιογράφοι επί της κατασκευής καθώς και τέσσερις αισθητήρες πίεσης (pressure cells) οι οποίοι τοποθετήθηκαν κάτω από τη θεμελίωση για τη μέτρηση του εντατικού πεδίου εντός του εδάφους. Η αξιόπιστη λειτουργία του συνόλου των αισθητήρων δοκιμάστηκε διεξοδικά μέσα από μια σειρά πειραμάτων τα οποία διεξήχθησαν το 2004. Τα τελικά επιτόπου πειράματα πραγματοποιήθηκαν στο μεγαλύτερο μέρος του 2005. Χαρακτηριστικά αποτελέσματα από τα πειράματα αυτά παρουσιάζονται και σχολιάζονται παρακάτω.

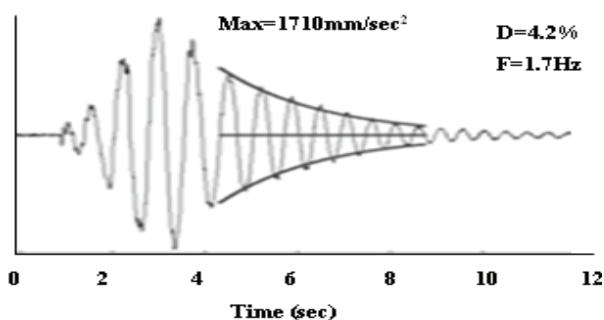
Τυπική πειραματική ακολουθία χαμηλής έντασης (low intensity pull-out tests)

Μια τυπική πειραματική ακολουθία περιλαμβάνει ελεύθερες ταλαντώσεις του βάθρου σχετικά μικρής έντασης οι οποίες επιτυγχάνονται με την επιβολή μιας ελεγχόμενης δύναμης επί του

καταστρώματος και την συνακόλουθη απόκλιση του από την αρχική θέση ισορροπίας. Η απότομη απελευθέρωση της κατασκευής από την επιβαλλόμενη δύναμη οδηγεί στην ελεύθερη ταλάντωση του συστήματος. Η δύναμη αυτή, επιβλήθηκε στην κατασκευή τόσο εντός επιπέδου (δηλ. κατά τον ισχυρό άξονα της διατομής) όσο και εκτός επιπέδου (δηλ. κατά τον ασθενή άξονα της διατομής). Το πλάτος της δύναμης αυτής δεν ξεπέρασε τα 2.2KN εντός επιπέδου και τα 1.4KN εκτός επιπέδου. Παρακάτω παρατίθενται και σχολιάζονται οι πιο σημαντικές πτυχές της μετρηθείσας απόκρισης. Εν προκειμένω, στο Σχήμα 2α παρουσιάζεται η απόκριση (επιτάχυνση) του καταστρώματος του βάθρου κατά την ελεύθερη του ταλάντωση εντός επιπέδου, για την περίπτωση του βάθρου ελεύθερου καλωδίων και χωρίς πρόσθετη μάζα (όπου με D συμβολίζεται η απόσβεση και με F η θεμελιώδης συχνότητα απόκρισης). Επισημαίνεται ότι το πλήρες σετ των μετρήσεων (Manos 2005) περιλαμβάνει μετρήσεις από όλα τα όργανα, διαφορετικά είδη απόκρισης (μετακινήσεις, επιταχύνσεις, εδαφική τάση), και για τις δύο διευθύνσεις διέγερσης (εντός και εκτός επιπέδου) και για όλες τις διαμορφώσεις της κατασκευής (με και χωρίς καλώδια, με και χωρίς πρόσθετη μάζα). Η μετρηθείσα οριζόντια επιτάχυνση συνοψίζεται στον Πίνακα 1 μαζί με τη θεμελιώδη συχνότητα απόκρισης, όπως αυτή προέκυψε από την ανάλυση των σημάτων στο πεδίο των συχνοτήτων.



Σχήμα 2α: Επιτάχυνση καταστρώματος για ελεύθερη ταλάντωση εντός επιπέδου μικρής έντασης. Κατασκευή με καλώδια, χωρίς πρόσθετη μάζα (κατακόρυφος άξονας: επιτάχυνση σε mm/sec²).



Σχήμα 2β. Επιτάχυνση καταστρώματος για ταλάντωση εντός επιπέδου μικρής προς μεσαίας έντασης, η οποία προκάλεσε την αστοχία του βάθρου. Κατασκευή με καλώδια, και πρόσθετη μάζα (κατακόρυφος άξονας: επιτάχυνση σε mm/sec²).

Πίνακας 1. Σύνοψη μετρηθείσας απόκρισης *

A/A	Κανάλιου	Απόκριση	Από FFT (συχνότητα)	Μέγιστη επιτ/νση Max	κατ/τος σε g Min
11	εντός επιπέδου	Επιτ/νση κατ/τος	3.29 Hz	0.01826	-0.01745
12	εκτός επιπέδου	Επιτ/νση κατ/τος	1.83Hz	0.01389	-0.01493

* Pull-out τεστ X-X και Y-Y. 6^{ης} Απριλίου 2004, Κατασκευή χωρίς πρόσθετη μάζα και ντίζες

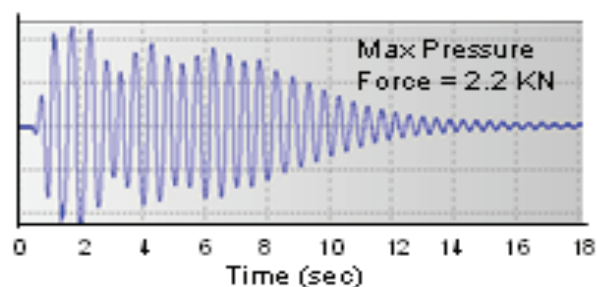
Τυπική πειραματική ακολουθία χαμηλής προς μεσαίας έντασης (low-to-medium intensity pull-out tests)

Εκτός της ανωτέρω σειράς πειραμάτων, πραγματοποιήθηκε και μια πειραματική ακολουθία μικρής προς μεσαίας έντασης η οποία και τελικώς προκάλεσε την αστοχία του βάθρου. Κατά την επιτέλεση των πειραμάτων αυτών, η συχνότητα μεταβλήθηκε εντός του εύρους από 1.5Hz έως 2.0Hz. Στο σχήμα 3 παρουσιάζονται ενδεικτικές μετρήσεις των τεσσάρων

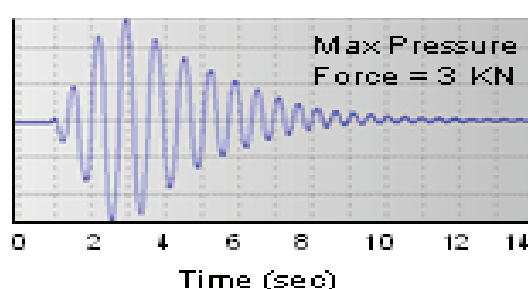
αισθητήρων πίεσης που ενσωματώθηκαν στο έδαφος, στις τέσσερις γωνίες κάτω από το θεμέλιο.

Δεύτερο πείραμα που οδήγησε στην αστοχία του βάθρου

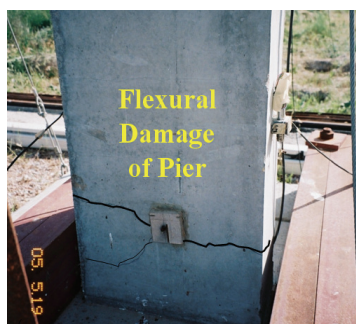
Στο Σχήμα 2β παρουσιάζεται η επιτάχυνση του καταστρώματος για εξαναγκασμένη ταλάντωση εντός επιπέδου μικρής προς μεσαίας έντασης, η οποία και προκάλεσε την αστοχία του βάθρου (Σχήμα 4α). Συγκρίνοντας την απόκριση του καταστρώματος για τις δύο περιπτώσεις διέγερσης (Σχήματα 2α και 2β) είναι φανερό η επιρροή της αστοχίας στη βάση του βάθρου στην συνολική απόκριση του συστήματος. Συγκεκριμένα, η μετρηθείσα απόσβεση είναι ίση προς 4.2%, δηλαδή αρκετά μεγαλύτερη από το 1.3% του αρχικού συστήματος. Το γεγονός αυτό βέβαια μπορεί να αποδοθεί τόσο στη ρηγμάτωση και μη-γραμμική συμπεριφορά του βάθρου όσο και στην πρόσθετη (εξαιτίας της ισχυρότερης διέγερσης) απόσβεση στη διεπιφάνεια εδάφους-θεμελίου. Παράλληλα, στα Σχήματα 3α και 3β φαίνεται ότι η μέγιστη πίεση που καταγράφηκε στον αισθητήρα πίεσης στην περίπτωση της ταλάντωσης μικρής προς μεσαίας έντασης, η οποία προκάλεσε την αστοχία του βάθρου, είναι 30% μεγαλύτερη της αντίστοιχης που μετρήθηκε κατά τη διάρκεια της χαμηλής σε ένταση διέγερσης. Η μη-γραμμική απόκριση του βάθρου είναι παράλληλα φανερό και στο Σχήμα 4β όπου παρουσιάζεται το διάγραμμα τέμνουσας βάσης-μετακίνησης στο κέντρο του καταστρώματος κατά τη διάρκεια του 2ου πειράματος χαμηλής προς μέτριας έντασης και για το οποίο προκύπτει ότι η απόκριση του συστήματος αρχίζει να αποκλίνει της γραμμικής-ελαστικής για ένα επίπεδο τέμνουσας βάσης ίσο προς 15kN.



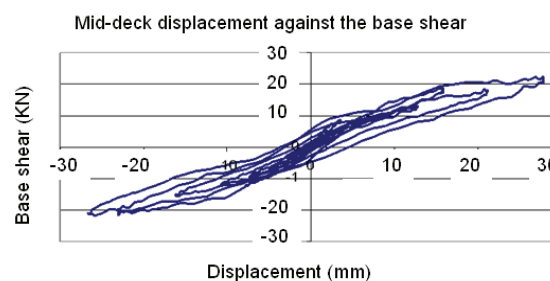
Σχήμα 3α: Δύναμη επί του αισθητήρα πίεσης κατά την ελεύθερη ταλάντωση εντός επιπέδου μικρής έντασης.



Σχήμα 3β: Δύναμη επί του αισθητήρα πίεσης κατά την ταλάντωση εντός επιπέδου μικρής προς μεσαίας έντασης, που προκάλεσε την αστοχία του βάθρου.



Σχήμα 4α: Καμπτική αστοχία του βάθρου, πλησίον της βάσης του, κατά το πείραμα της 19ης Μαΐου 2005.



Σχήμα 4β: Διάγραμμα τέμνουσας βάσης-μετακίνησης στο κέντρο του καταστρώματος κατά τη διάρκεια του 2ου πειράματος χαμηλής προς μέτριας έντασης. Κατασκευή με καλώδια και ντίζες.

Στους Πίνακες 2 και 3 συνοψίζονται οι ιδιοσυχνότητες των ταλάντωσης (εντός επιπέδου, εκτός επιπέδου και στροφική) πριν και μετά την αστοχία του βάθρου για τις περιπτώσεις με και χωρίς καλώδια και ντίζες όπου παρατηρείται μεταβολή των ιδιοσυχνοτήτων της τάξης του 15%.

Πίνακας 2. Μητρηθείσα απόκριση αρχικού φορέα

Ταλάντωση	Με Καλώδια & Ντίζες	Χωρίς Καλώδια & Ντίζες
Εκτός επιπέδου	1.929 Hz	-
Εντός επιπέδου	2.800 Hz	2.600 Hz
Στροφική	-	-



Πίνακας 3. Μητρηθείσα απόκριση του φορέα μετά την αστοχία

Ταλάντωση	Με Καλώδια & Ντίζες	Χωρίς Καλώδια & Ντίζες
Εκτός επιπέδου	1.709 Hz	1.099 Hz
Εντός επιπέδου	2.539 Hz	2.344 Hz
Στροφική	2.783 Hz	-



ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΕΔΑΦΟΥΣ-ΘΕΜΕΛΙΩΣΗΣ-ΒΑΘΡΟΥ

Επισκόπηση των εναλλακτικών μεθόδων αριθμητικής προσομοίωσης

Στο πλαίσιο της αριθμητικής επίλυσης του προβλήματος της απόκρισης του συστήματος, μελετήθηκαν διαφορετικά προσομοιώματα με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, με στόχο την κατά το δυνατόν ακριβέστερη προσομοίωση του προβλήματος αλλά και την εύρεση της κατάλληλης ισορροπίας μεταξύ της ακρίβειας και της απλότητας της αριθμητικής προσέγγισης. Στο πλαίσιο αυτό, δημιουργήθηκαν διαφορετικά αριθμητικά προσομοιώματα προς επίλυσης, αρχής γενομένης από απλά συστήματα βάθρου εδραζομένου επί ελατηριακών στηρίξεων, τα οποία επεκτάθηκαν με την πλήρη τρισδιάστατη προσομοίωση του εδάφους κάτω και γύρω από το θεμέλιο ή/και ακόμα τη σύζευξη των μεθόδων πεπερασμένων και συνοριακών στοιχείων (Boundary Element / Finite Element Method, BEM/FEM). Ο στόχος ήταν η εύρεση του βέλτιστου προσομοιώματος το οποίο μπορεί, σε ανεκτό υπολογιστικό χρόνο, να παρέχει αξιόπιστα αποτελέσματα αναφορικά με την (γραμμική και μη-γραμμική) απόκριση τόσο του βάθρου όσο και του περιβάλλοντος εδάφους. Τα προσομοιώματα τα οποία εξετάστηκαν συνοψίζονται παρακάτω και παρουσιάζονται στο Σχήμα 5:

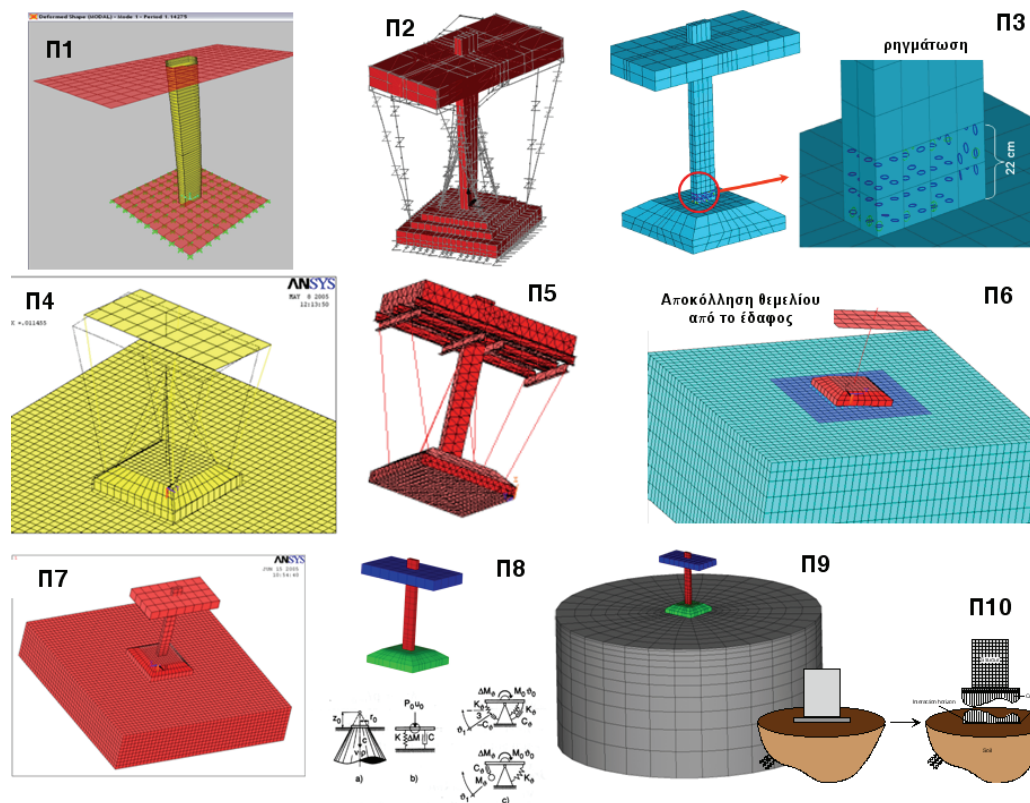
- Π1: Απλό προσομοίωμα όπου το βάθρο προσομοιώνεται ως γραμμικός φορέας με κατάλληλη κατανομή μάζας, με την πρόσθετη δυνατότητα συνεκτίμησης της πλαστικής άρθρωσης στη βάση του μέσω στροφικού ελατηρίου (χρήση κώδικα SAP2000).
- Π2: Τρισδιάστατο προσομοίωμα από χωρικά πεπερασμένα στοιχεία όπου η θεμελίωση εδράζεται επί ελατηρίων (χρήση κώδικα LUSAS).
- Π3: Τρισδιάστατο προσομοίωμα από χωρικά πεπερασμένα στοιχεία με δυνατότητες ρηγμάτωσης / συντριβής του σκυροδέματος (Manos et al., 2006b)., εδραζόμενου επί ενδόσιμης θεμελίωσης προσομοιωμένης με κατάλληλα ελατήρια (χρήση κώδικα ANSYS)
- Π4: Τρισδιάστατο προσομοίωμα όπου το έδαφος προσομοιώνεται με χωρικά πεπερασμένα στοιχεία, το βάθρο ως γραμμικό στοιχείο και το κατάστρωμα με

επιφανειακά στοιχεία, κατάλληλα συνδεδεμένα με νόμους σύζευξης ώστε να λειτουργούν ως ένα οιασδήποτε πλήρες χωρικό σύστημα (χρήση κώδικα ANSYS).

- Π5: Τρισδιάστατο προσομοίωμα από χωρικά πεπερασμένα στοιχεία με λεπτομερή προσομοίωση των πρόσθετων μεταλλικών στοιχείων διατομής C220 που έχουν χρησιμοποιηθεί για την εξασφάλιση της μονολιθικότητας της σύνδεσης βάθρου-καταστρώματος και βάθρου-θεμελίωσης (χρήση κώδικα ANSYS)
- Π6: Τρισδιάστατο προσομοίωμα (Χήρας, 2005) από χωρικά πεπερασμένα στοιχεία, εδραζόμενου επί ενδόσιμου εδάφους προσομοιωμένου με χωρικά πεπερασμένα στοιχεία και συνδεδεμένου με τη θεμελίωση μέσω κατάλληλων μη-γραμμικών ελατηρίων τα οποία λειτουργούν αποκλειστικά σε θλίψη για την προσομοίωση της δυννητικής αναστήκωσης του πεδίου και της αποκόλλησής του από το έδαφος (χρήση κώδικα ANSYS)
- Π7: Παραλλαγή του ανωτέρω προσομοιώματος (Σχήμα 6) με την προσθήκη συνοριακών στοιχείων ημιχώρου στα όρια του τριασδιάστατου εδαφικού ομοιώματος, πρόσθετων ενσωματωμένων επιφανειακών στοιχείων στις θέσεις των αισθητήρων πίεσης (με δυσκαμψία ίση προς αυτή των οργάνων) καθώς και ισοδύναμα μειωμένες ελαστικές ιδιότητες στη βάση του βάθρου για την προσομοίωση της πλαστικής άρθρωσης (χρήση κώδικα ANSYS).
- Π8: Τρισδιάστατο προσομοίωμα (Manos et al., 2006a) επί ελαστικής έδρασης η οποία χρησιμοποιεί την θεωρία κώνου κατά Wolf (χρήση κώδικα ANSYS).
- Π9: Παραλλαγή του τρισδιάστατου προσομοιώματος Π7 με διαφορετική διακριτοποίηση και συνοριακές συνθήκες (χρήση κώδικα ANSYS) .
- Π10: Τρισδιάστατο προσομοίωμα όπου το εγγύς εδαφικό πεδίο προσομοιώνεται με χωρικά πεπερασμένα στοιχεία ενώ το μακρινό εδαφικό πεδίο με συνοριακά στοιχεία (μέθοδος FEM/BEM, Renault and Meskouris, 2005 και Manos et al., 2005).

Στις περιπτώσεις όπου η εδαφική ενδοσιμότητα προσομοιώνεται με τη χρήση γραμμικών ελατηρίων, έχουν χρησιμοποιηθεί οι σχέσεις που προτείνονται στην βιβλιογραφία (Mylonakis et al., 2002) και τα εδαφικά χαρακτηριστικά που προσδιορίστηκαν αφενός από επί-τόπου μετρήσεις, αφετέρου από την μετρημένη απόκριση του 6-όροφου κτιρίου που βρίσκεται πλησίον του βάθρου. Επισημαίνεται ότι επί του παρόντος, ως βέλτιστο από άποψη ακρίβειας, κρίνεται εκείνο το προσομοίωμα το οποίο συμφωνεί σε μεγαλύτερο βαθμό με την μετρηθείσα απόκριση του φυσικού ομοιώματος στο πεδίο του χρόνου και των συχνοτήτων και ειδικότερα α) τις ιδιοσυχνότητές του και β) το πλάτος της μετακίνησης και επιτάχυνσης του καταστρώματος υπό χαμηλής έντασης διέγερση. Επιπρόσθετα, σημειώνεται ότι υπήρξε μια κατ' αρχήν τροποποίηση των ιδιοτήτων των καλωδίων, του σκυροδέματος και του εδάφους με βάση αυτές τις μετρήσεις. Παρ' όλα αυτά, η τροποποίηση αυτή ήταν μικρής έκτασης ενώ διατηρήθηκε ενιαία σε όλα τα προσομοιώματα, κατά συνέπεια η σχετική απόκλιση των προσομοιωμάτων είναι ανεξάρτητη των επιλογών επί των μηχανικών χαρακτηριστικών. Συμπερασματικά, από την συγκριτική αποτίμηση των αριθμητικώς προσδιοριζόμενων ιδιοσυχνοτήτων σε σχέση με τις μετρήσεις (Manos et al., 2006) παρατηρείται ότι σε γενικές γραμμές, σε επίπεδο ιδιοσυχνοτήτων, όλα τα αριθμητικά και πειραματικά αποτελέσματα βρίσκονται σε καλή συμφωνία. Βέβαια, παράλληλα προκύπτει η αναγκαιότητα διερεύνησης της επιρροής της εδαφικής ενδοσιμότητας με την αξιοποίηση των μετρήσεων των αισθητήρων πίεσης που έχουν τοποθετηθεί μέσα στο έδαφος, ενώ η συνολική (μη-γραμμική) συμπεριφορά του συστήματος εδάφους-θεμελίωσης-βάθρου θα πρέπει να μελετηθεί διεξοδικότερα.

Είναι επίσης αξιοσημείωτο, το γεγονός ότι περισσότερο σύνθετα και λεπτομερή προσομοιώματα (ειδικότερα ως προς τη διακριτοποίηση του εδάφους), δεν οδηγούν κατ' ανάγκη σε ακριβέστερα αποτελέσματα, τουλάχιστον όχι σε βαθμό ανάλογο της πρόσθετης πολυπλοκότητάς τους. Μια πιθανή αιτία είναι ότι απλά ελατηριακά συστήματα είναι απλούστερο να ευθυγραμμιστούν με τα αποτελέσματα των μετρήσεων σε αντίθεση με σύνθετα τρισδιάστατα προσομοιώματα όπου αυτομάτως υπεισέρχονται ζητήματα που συνδέονται με πρόσθετη αβεβαιότητα (π.χ. επιλογή της ακριβούς εδαφικής διαστρωμάτωσης, προβλήματα συνοριακών συνθηκών κ.α.).



Σχήμα 5. Εναλλακτικά προσομοιώματα πεπερασμένων στοιχείων

Τελικώς, μετά από εκτενή αποτίμηση των αποτελεσμάτων της αριθμητικής ανάλυσης και σύγκρισής τους με τα πειραματικά αποτελέσματα (τόσο για χαμηλής όσο και για χαμηλής προς μέσης έντασης διέγερση), επιλέχθηκε το προσομοίωμα P7 (Σχήμα 6) διότι αφενός παρείχε αξιόπιστα αποτελέσματα στο πεδίο των συχνотήτων και του χρόνου, αφετέρου μέσω αυτού του προσομοιώματος ήταν δυνατή:

- η επέκταση της διερεύνησης της ανελαστικής συμπεριφοράς του βάθρου χωρίς να απαιτείται αυτό να «συμψηφιστεί» με λιγότερο ακριβείς παραδοχές αναφορικά με την ενδοσιμότητα του εδάφους ώστε να εξισορροπηθεί ο απαιτούμενος υπολογιστικός χρόνος.
- η ανάκτηση αριθμητικών αποτελεσμάτων απόκρισης του εδάφους υπό και γύρω από την θεμελίωση για τη μελέτη της αδρανειακής αλληλεπίδρασης εδάφους-ανωδομής.
- η επέκταση της αριθμητικής μελέτης προς την διεξοδικότερη διερεύνηση της μη-γραμμικής συμπεριφοράς του εδάφους.

Αριθμητική προσομοίωση του συστήματος μετά την αστοχία του βάθρου

Επιπροσθέτως των ανωτέρω αναλύσεων, πραγματοποιήθηκε και δεύτερη ομάδα αριθμητικών προσομοιώσεων για την περίπτωση των πειραμάτων που ακολούθησαν την αστοχία του βάθρου. Για τον σκοπό αυτόν αξιοποιήθηκε το τρισδιάστατο προσομοίωμα Π7 στο οποίο χρησιμοποιήθηκε μειωμένη κατά 50% τιμή του μέτρου ελαστικότητας του σκυροδέματος σε μια περιοχή ύψους περίπου 300mm από τη βάση του βάθρου προκειμένου να ληφθεί υπόψη η ρηγμάτωση της συγκεκριμένης ζώνης και να ταυτοποιηθεί η παρατηρηθείσα αύξηση κατά 15% της ιδιοπεριόδου του συστήματος. Από την ανάλυση προέκυψαν, εκτός των μεγεθών απόκρισης του βάθρου καθεαυτού, οι δυνάμεις επί των αισθητήρων πίεσης καθώς και το εσωτερικό εντατικό πεδίο του εδάφους υπό στατική και δυναμική διέγερση.

Παράλληλα, εξασφαλίστηκε μέσω παραμετρικών αναλύσεων και ελέγχων ότι οι συνοριακές συνθήκες δεν εισάγουν παρασιτικά κύματα στο υπό εξέταση σύστημα και δεν αλλοιώνουν τα αποτελέσματα. Η σύγκριση πειραματικών και αναλυτικών αποτελεσμάτων (σε επίπεδο επιτάχυνσης καταστρώματος) για δύο διαφορετικές πειραματικές ακολουθίες (20 Οκτ. 2004 & 13 Μαΐου 2005) παρουσιάζεται με λεπτομέρεια αλλού (Manos et al., 2006a, Manos et al., 2006b).

Αποτίμηση της συμπεριφοράς του εδάφους με τη χρήση μετρήσεων

Στροφική δυσκαμψία του συστήματος εδάφους-θεμελίωσης-βάθρου

Έχοντας μετρήσει επί-τόπου τη δυναμική απόκριση του βάθρου και της θεμελίωσης υπό χαμηλής και χαμηλής προς μέσης έντασης διέγερση, καθώς και έχοντας αποκτήσει ένα καλό επίπεδο συμφωνίας μεταξύ των αριθμητικών και των πειραματικών αποτελεσμάτων, κρίθηκε ενδιαφέρον να συγκριθεί η πειραματικώς προσδιοριζόμενη στροφική (rocking) δυσκαμψία του συστήματος εδάφους-θεμελίωσης-βάθρου ως προς τους δύο κύριους άξονες, με την αντίστοιχη θεωρητική λύση από τη βιβλιογραφία. Εν προκειμένω συγκρίνεται η στροφική δυσκαμψία που προέκυψε από τις μετρήσεις και η οποία είναι ίση προς:

$$K_{r,πειρ} = M/\theta = 9.44\text{kNm}/2.72 \times 10^{-5} \text{ rad} = 347000 \text{ kNm/rad} \quad (1)$$

με την θεωρητικώς υπολογιζόμενη δυσκαμψία η οποία προκύπτει ίση προς (Mylonakis et al., 2002):

$$K_{r,θεωρ} = 0.45GB^3/(1-\nu) = 261000 \text{ kNm/rad} \quad (2)$$

Παρατηρείται ότι οι τιμές αυτές δε διαφέρουν περισσότερο από 30%, απόκλιση που θεωρείται ανεκτή αν συνεκτιμηθούν οι εξιδανικεύσεις της θεωρητικής λύσης, όπως για παράδειγμα η παραδοχή ομογενούς ελαστικού ημιχώρου, η γραμμική-ελαστική συμπεριφορά του εδάφους και η πλήρης επαφή στη διεπιφάνεια εδάφους και θεμελίωσης, καθώς και τυχόν ατέλειες της πειραματικής διαδικασίας.

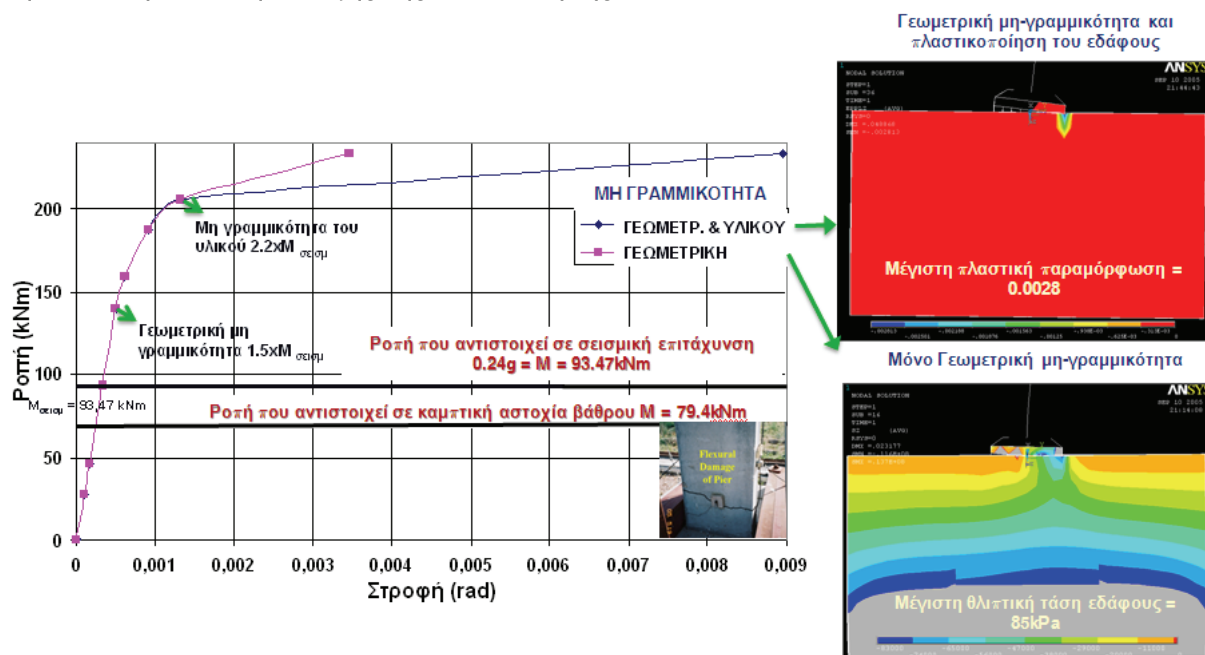
Σε αντίστοιχη συμφωνία οδηγούν και τα αποτελέσματα της αριθμητικής ανάλυσης στην ελαστική περιοχή. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 7, η αριθμητικώς προσδιορισθείσα στροφική δυσκαμψία του συστήματος είναι ίση προς:

$$K_{r,αριθμ} = M/\theta = 9.3\text{kNm}/3.1 \times 10^{-5} \text{ rad} = 300000 \text{ kNm/rad} \quad (3)$$

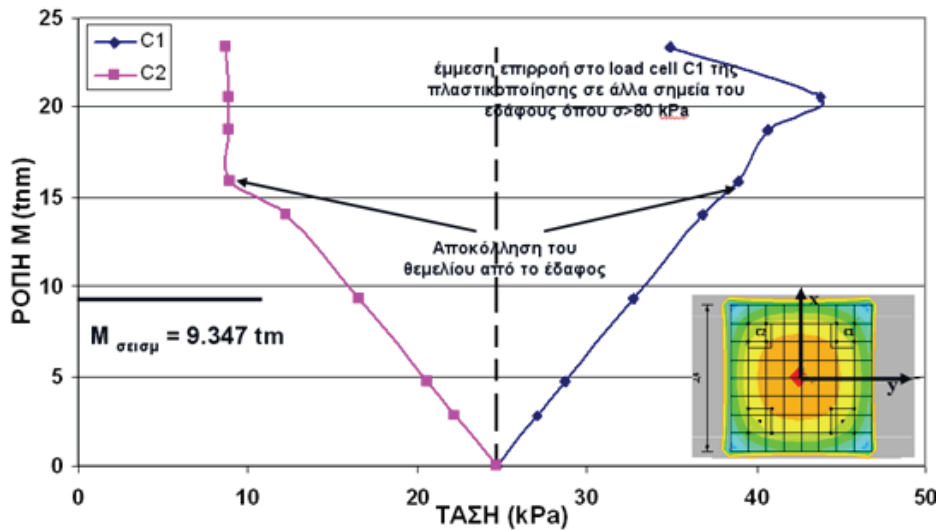
Θα πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι στο πλαίσιο της αριθμητικής επίλυσης του προβλήματος, συνεκτιμήθηκαν και δύο πρόσθετοι παράγοντες οι οποίοι προσαξάνουν εν γένει τη

στροφική ενδοσιμότητα, εν προκειμένω: (α) η δυνατότητα αποκόλλησης του θεμελίου από το έδαφος (γεωμετρική μη-γραμμικότητα) και η συνακόλουθη μη-γραμμική αύξηση των τάσεων επί του υποκείμενου του ενεργού πεδίου εδάφους και (β) η πλαστικοποίηση του εδάφους και η μη δυνατότητα παραλαβής εφελκυστικών τάσεων. Το φαινόμενο της αποκόλλησης ελήφθη αριθμητικώς υπόψη με τη χρήση μονόπλευρων ελατηριακών συνδέσμων και συγκεκριμένα μοναξονικών ελατηρίων που τοποθετήθηκαν στη διεπιφάνεια θεμελίου-εδάφους και λειτουργούν αποκλειστικά σε σύνθλιψη. Η πλαστικοποίηση του εδάφους από την άλλη, κατέστη εφικτή με την ενεργοποίηση μη-γραμμικών νόμων αστοχίας (Drucker Prager) και τη χρήση των εδαφικών σταθερών που προκύπτουν από τη γεωτεχνική μελέτη (συνοχή $c=80\text{kPa}$, γωνία τριβής $\phi=6^\circ$ και γωνία διόγκωσης $\psi=0^\circ$, που αντιστοιχούν σε ταχύτητα διάδοσης διατμητικών κυμάτων $V_s=135\text{m/sec}^2$, αστράγγιστη διατμητική αντοχή $C_u=120\text{kPa}$ και ειδικό βάρος $\gamma=18\text{kN/m}^3$). Το κριτήριο αστοχίας Drucker-Prager ορίζει μια κωνική επιφάνεια αστοχίας στο χώρο, σύμφωνα με την οποία οι πλαστικές παραμορφώσεις εκκινούν μόλις οι τάσεις υπερβούν την τάση διαρροής η οποία όμως μεγαλώνει όσο μεγαλώνει η υδροστατική πίεση $\sigma_m=(\sigma_1+\sigma_2+\sigma_3)/3$. Η διεύθυνση των τάσεων καθορίζεται από τον νόμο διόγκωσης, ενώ όταν το υλικό βρεθεί υπό εφελκυσμό τότε διαθέτει μικρότερη αντοχή καθώς μειώνεται η επιφάνεια αστοχίας.

Παρατηρείται στο Σχήμα 7, ότι η σεισμική φόρτιση που αντιστοιχεί σε εδαφική επιτάχυνση $0.24g$ δεν οδηγεί σε αποκόλληση του θεμελίου ούτε σε σημαντικές εδαφικές πλαστικοποιήσεις, οι οποίες εκκινούν (με αυτή τη διαδοχική σειρά) σε επίπεδο 1.5 και 2.2 φορές το εν λόγω σεισμικό φορτίο. Η εικόνα αυτή αποτυπώνεται και στο Σχήμα 8 όπου παρουσιάζονται οι αριθμητικώς εκτιμώμενες τάσεις επί των αισθητηρίων εντός του εδάφους (load cells) στα δύο άκρα του θεμελίου C_1 και C_2 . Η παρατήρηση αυτή περί της ακολουθίας με την οποία ενεργοποιούνται οι μη-γραμμικοί μηχανισμοί που σχετίζονται με τη θεμελίωση και το έδαφος έχει ιδιαίτερη σημασία καθώς οριοθετεί το επίπεδο των $93.47 \times 1.5 = 140\text{kNm}$ ως τη σεισμική φόρτιση έναρξης της αποκόλλησης του θεμελίου.



Σχήμα 7. Αριθμητική εκτίμηση της στροφικής δυσκαμψίας του συστήματος συνεκτιμώντας τη γεωμετρική μη-γραμμικότητα (αποκόλληση του θεμελίου από το έδαφος) και την πλαστικοποίηση του εδάφους.

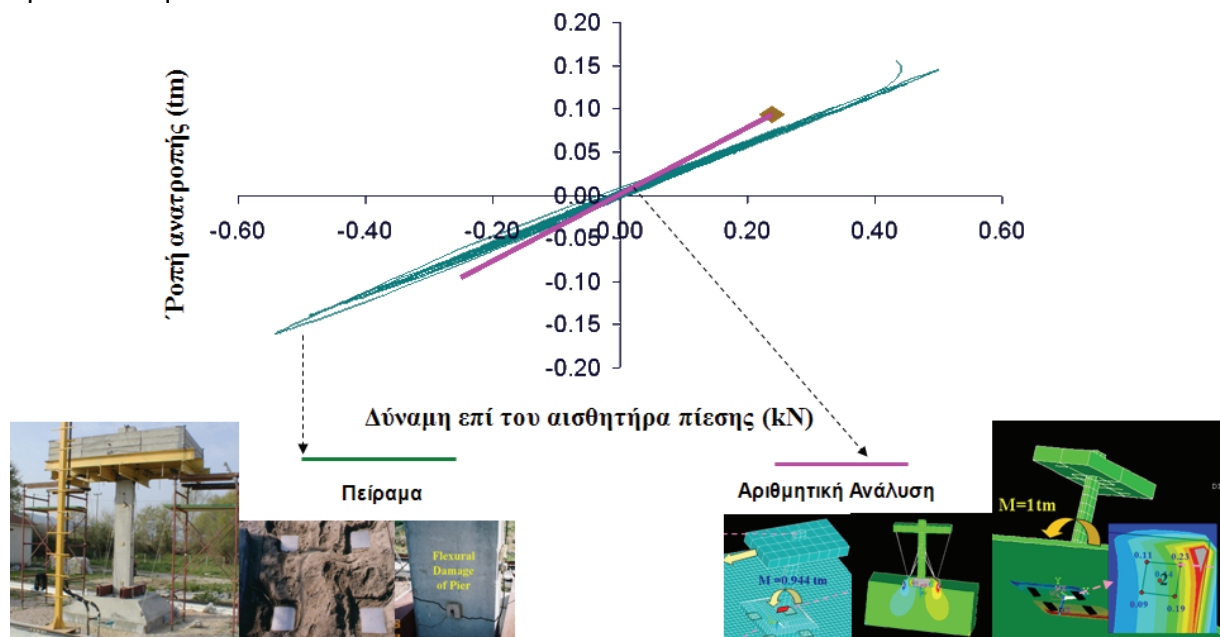


Σχήμα 8. Διάγραμμα τάσεων στο επίπεδο των αισθητηρίων εδάφους σε σχέση με την εξωτερική ροπή επί του θεμελίου

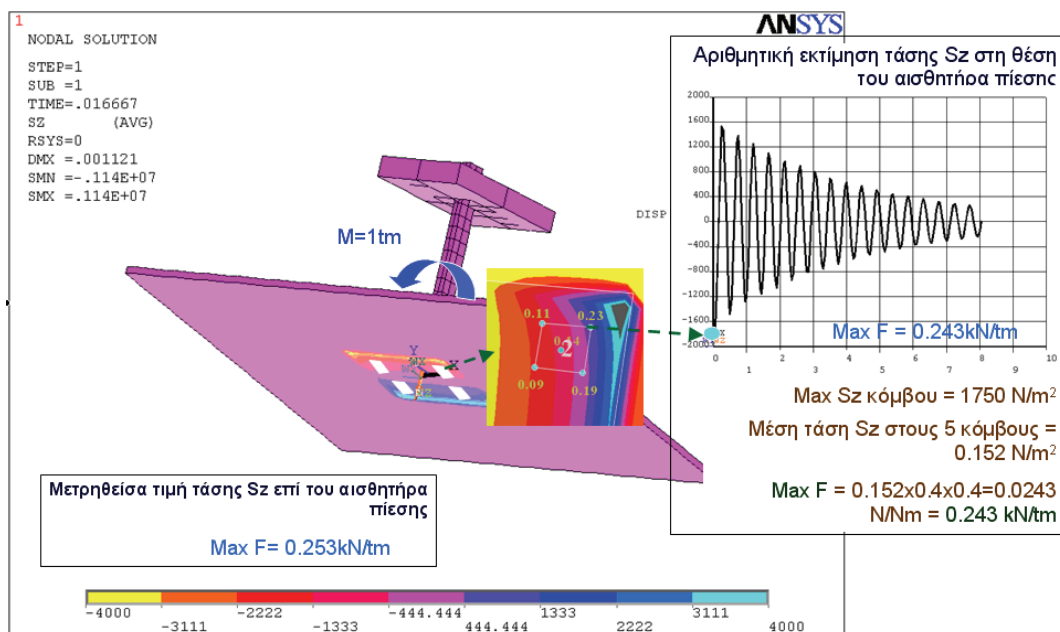
Το όριο αυτό επιβεβαιώνεται με βάση τη μετρηθείσα συμπεριφορά, καθώς όπως φαίνεται στο Σχήμα 4β, το βάθος αστόχησε καμπτικά για τιμή τέμνουσας βάσης ίσης προς 20kN (και ροπή $M=79.4\text{kNm}$) χωρίς να παρατηρηθεί αποκόλληση του πεδίλου από το έδαφος.

Εδαφική απόκριση

Στο Σχήμα 9 παρουσιάζεται το διάγραμμα της επιβαλλόμενης ροπής με τη μετρηθείσα δύναμη στον αισθητήρα πίεσης εντός του εδάφους (σε βάθος 150mm από την επιφάνεια) καθώς και η σύγκριση με τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων στο ίδιο βάθος. Παρατηρείται ότι η συμφωνία μεταξύ πειραματικών και αριθμητικών αποτελεσμάτων είναι αρκετά καλή.

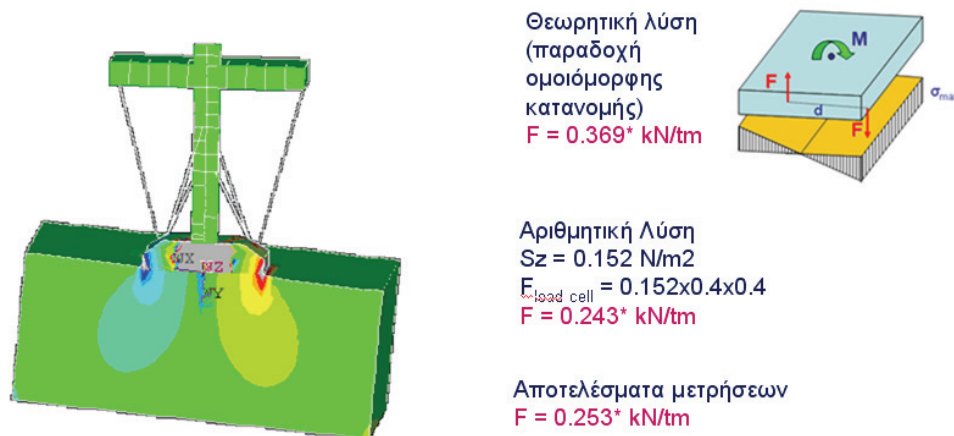


Σχήμα 9. Διάγραμμα της επιβαλλόμενης ροπής με τη μετρηθείσα δύναμη στον αισθητήρα πίεσης εντός του εδάφους. Πείραμα της 8ης Ιουνίου (μετά την αστοχία του βάθρου).



Σχήμα 10. Σύγκριση μεταξύ της πειραματικής και αριθμητικής προσδιοριζόμενης μέγιστης δύναμης επί των αισθητήρων πίεσης

Οι μετρήσεις των αισθητήρων πίεσης, εκφρασμένες σε όρους δύναμης, συγκρίθηκαν επίσης με τις αντίστοιχες τάσεις (και δυνάμεις) που υπολογίστηκαν επί των επιφανειακών στοιχείων με τη χρήση των οποίων προσομοιώθηκαν οι αισθητήρες πίεσης στο σύνθετο προσομοίωμα Π7. Και πάλι η συμφωνία μεταξύ των μετρήσεων και της ανάλυσης είναι καλή καθώς η μέγιστη μετρηθείσα δύναμη επί του αισθητήρα πίεσης ανά μοναδιαία επιβαλλόμενη ροπή ισούται προς 0.253 kN/tm ενώ η αντίστοιχη αριθμητική αναλογία δύναμης-εξωτερικής ροπής είναι ίση προς 0.243 kN/tm (Σχήμα 10). Επισημαίνεται πως οι τιμές αυτές αφορούν την περίπτωση χαμηλής προς μέσης έντασης διέγερσης και πως οι τάσεις εντός των πεπερασμένων στοιχείων με τα οποία προσομοιώνεται το έδαφος δεν ακολουθούν γραμμική κατανομή κάτω από την επιφάνεια του θεμελίου (Σχήμα 11). Για λόγους σύγκρισης υπολογίστηκε η τιμή μιας «μέσης» τάσης (δύναμης), μέσω των τιμών όλων των σημείων αριθμητικής ολοκλήρωσης των πεπερασμένων στοιχείων που αντιστοιχούν σε ένα αισθητήρα πίεσης. Είναι επίσης ιδιαίτερα ενδιαφέρον το γεγονός ότι εάν είχε πραγματοποιηθεί η συνήθης στην πράξη θεώρηση της γραμμικής κατανομής των εδαφικών (κατακορύφων) τάσεων κάτω από το θεμέλιο, η τελική εκτίμηση της δύναμης επί των αισθητήρων πίεσης θα ήταν κατά 50% μεγαλύτερη τόσο από τη μετρημένη τιμή όσο και από αυτήν που εκτιμάται με τη χρήση του τριαξιαστάτου αριθμητικού προσομοιώματος. Κρίνεται συνεπώς ότι το σύνθετο προσομοίωμα Π7 όχι μόνο επέτρεψε την αξιόπιστη πρόβλεψη της απόκρισης του συστήματος, αλλά ταυτόχρονα παρείχε μια ικανοποιητικά ρεαλιστική εικόνα του εντατικού πεδίου του εδάφους στο χώρο υπό στατική και δυναμική διέγερση, η οποία δύναται μελλοντικά να αξιοποιηθεί για την έμμεση αποτίμηση του εύρους της αναμενόμενης πλαστικοποίησης του εδάφους κάτω από το θεμέλιο για διαφορετικά επίπεδα διέγερσης.



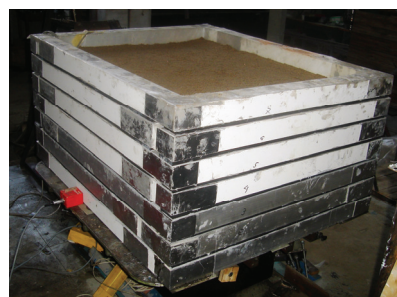
Σχήμα 11. Σύγκριση μεταξύ της απλουστευτικής θεώρησης της γραμμικής κατανομής των πιέσεων κάτω από τη θεμελίωση και της κατανομής που προκύπτει από την αριθμητική ανάλυση

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΚΑΙ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΕΥΣΤΡΕΦΙΑΣ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΒΑΘΡΟ-ΘΕΜΕΛΙΩΣΗ-ΕΔΑΦΟΥΣ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΟΜΟΙΩΜΑΤΟΣ ΒΑΘΡΟΥ ΕΠΙ ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΟΥ ΚΙΒΩΤΙΟΥ (SHEAR STACK)

Παρόμοια πειραματική διάταξη με το ομοίωμα βάθρου στο πεδίο δοκιμών Euroseis-Test, αλλά σε μικρότερη κλίμακα, μελετήθηκε στη σεισμική τράπεζα του Εργαστηρίου Αντοχής Υλικών του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Α.Π.Θ. (Σχήμα 12) και πάλι συνεκτιμώντας την ευκαμψία του συστήματος θεμελίωσης-εδάφους, αυτή τη φορά μέσω της ύπαρξης κατάλληλα διαμορφωμένου στρώματος άμμου εγκιβωτισμένης εντός ελαστικού περιβάλλοντος διατμητικού κιβωτίου (shear stack). Κατά τη διάρκεια της σεισμικής διέγερσης μετρήθηκαν επιταχύνσεις τόσο επί του ομοιώματος όσο και εντός του σώματος του εδάφους (Σχήμα 13) καθώς και τα δυναμικά χαρακτηριστικά του συστήματος. Παράλληλα πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του προγράμματος Abaqus, σειρά ελαστικών και ανελαστικών, δισδιάστατων και τρισδιάστατων αναλύσεων πεπερασμένων στοιχείων αντίστοιχα, προκειμένου να ταυτοποιηθούν τα πειραματικώς προσδιοριζόμενα δυναμικά χαρακτηριστικά αλλά και η δυναμική και σεισμική απόκριση του συστήματος. Εκτός από τα δισδιάστατα αριθμητικά προσομοιώματα, μορφώθηκε και ένα τρισδιάστατο προσομοίωμα (Σχήμα 14), για το οποίο χρησιμοποιήθηκαν έξι διαφορετικά υλικά, δηλαδή ένα για τα τέσσερα ξύλινα τοιχώματα, ένα για τις τέσσερις στρώσεις αφρώδους υλικού στα τέσσερα



1^ο Κιβώτιο, Ξύλινα τοιχώματα



2^ο Κιβώτιο, διάτρητες διατομές αλουμινίου (Shear Stack)



Φυσικό ομοίωμα πυλώνα υπό κλίμακα επί του 2^{ου} Κιβωτίου

Σχήμα 12. Διαδοχικές φάσεις του φυσικού ομοιώματος του πυλώνα υπό κλίμακα εδραζόμενο σε στρώση άμμου εγκιβωτισμένης εντός κιβωτίου διάτμησης (Shear Stack)

Πίνακας 4. Συγκριτικά αποτελέσματα δυναμικών χαρακτηριστικών συστήματος με τη χρήση διαφορετικών (δισδιάστατων και τρισδιάστατων) αριθμητικών προσομοιωμάτων

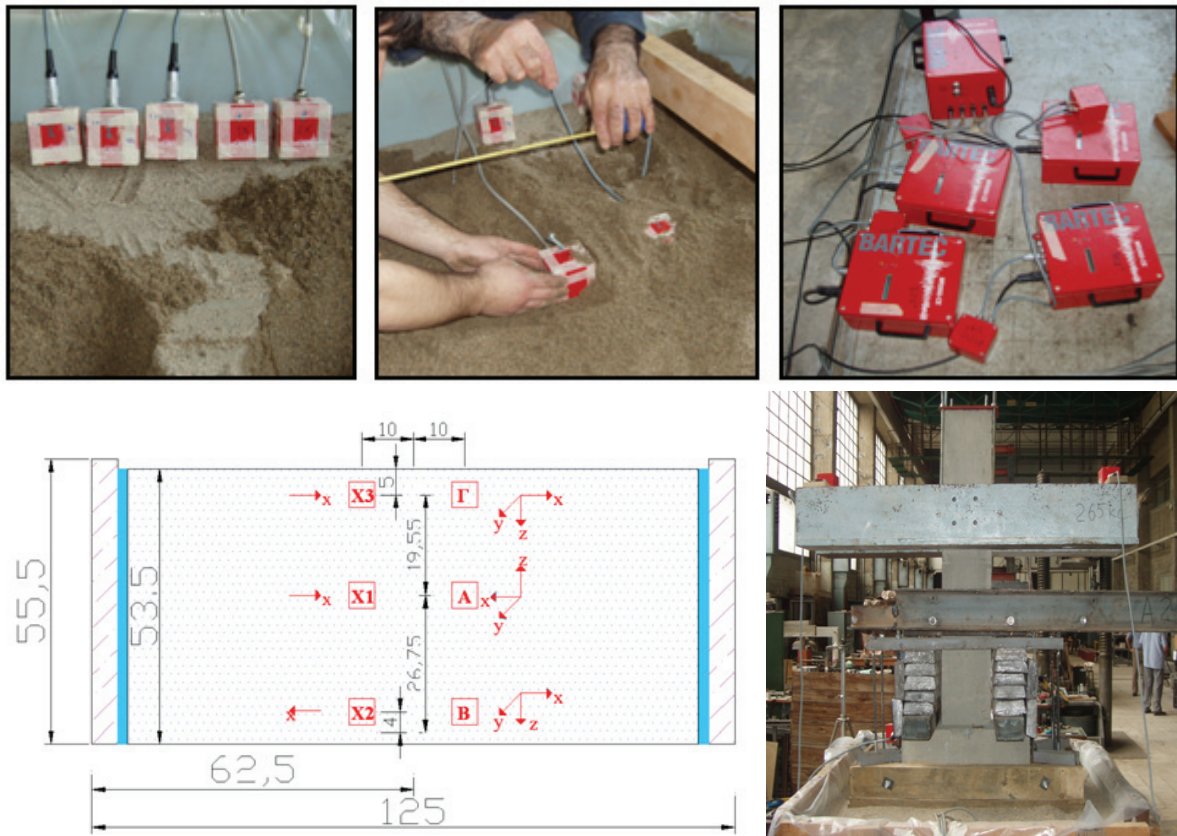
ABAQUS (3D)		ABAQUS (2D)		SAP2000 (2D)*	
Ιδιοσυχνότητα (Hz)	Ενεργ. Ποσοστό Μάζας (%)	Ιδιοσυχνότητα (Hz)	Ενεργ. Ποσοστό Μάζας (%)	Ιδιοσυχνότητα (Hz)	Ενεργ. Ποσοστό Μάζας (%)
1η		4,46	55,1	4,69	52,37
2η		10,40	0.00	16,31	29,55
3η		13,08	3,72	22,65	0.00
4η		26,54	3,68	34,68	12,38
5η	3,98	60,7	32,04	0.00	44,30
* Καφετζόπουλος και Σκανδαλάκης		Πειραματική τιμή 1^{ης} Ιδιοσυχνότητας 4.4Hz			

κατακόρυφα σύνορα του 1^{ου} κιβωτίου, ένα για κάθε μια από τις τρεις οριζόντιες στρώσεις άμμου, ένα για το υλικό του πυλώνα καθώς και η άκαμπτη βάση. Διενεργήθηκε τόσο ιδιομορφική όσο και αρμονική ανάλυση, η τελευταία για τρεις διαφορετικές συχνότητες διέγερσης (10, 17 και 25Hz) διαφορετικού μεταξύ τους πλάτους.

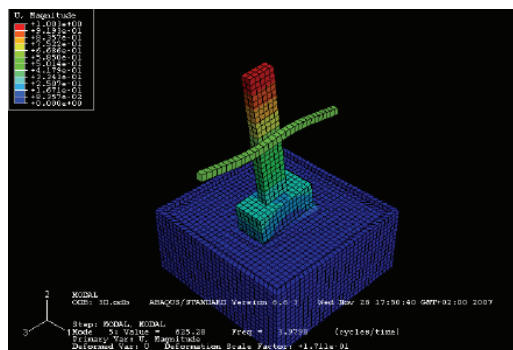
Στον Πίνακα 4 συνοψίζονται τα δυναμικά χαρακτηριστικά του συστήματος ομοιώματος βάθρου και διατμητικού κιβωτίου. Παρατηρείται ικανοποιητική συμφωνία μεταξύ των αναλύσεων παρά τη χρήση διαφορετικού λογισμικού και την προσομοίωση σε δύο και τρεις διαστάσεις υπό την προϋπόθεση ότι κάθε φορά συγκρίνονται οι αντίστοιχες ιδιομορφές (εν προκειμένω, οι πρώτες τέσσερις ιδιομορφές του τρισδιάστατου προσομοιώματος, που αναγράφονται στη 2^η στήλη του πίνακα 4, αφορούν σπειροειδή ταλάντωση του εδάφους εντός του κιβωτίου). Αντίστοιχα παρατηρείται ικανοποιητική συμφωνία με την πειραματικώς προσδιορισθείσα ιδιοπερίοδο του συστήματος η οποία προέκυψε ίση προς 4.4Hz. Μέσω τον πειραμάτων της σεισμικής τράπεζας έγινε δυνατό να αναπτυχθούν μη-γραμμικοί μηχανισμοί απόκρισης στην διεπιφάνεια θεμελίωσης και άμμου στο εργαστήριο, πέραν από την ρηγμάτωση του βάθρου στη βάση του όπως και του αντίστοιχου ομοιώματος in-situ, δοθέντων των αβεβαιοτήτων που συναρτώνται με τη διάδοση των σεισμικών κυμάτων εντός του σώματος της άμμου και τις συνθήκες στα όρια του διατμητικού κιβωτίου αλλά και της επαφής του πεδίου με την επιφάνεια του εδαφικού υποστρώματος. Η μέγιστη τιμή της ροπή ανατροπής στη βάση του θεμελίου κατά την διάρκεια του ισχυρής τεχνητής σεισμικής διέγερσης πειράματος που προκάλεσε την ρηγμάτωση του βάθρου, όπως αυτή αποτιμήθηκε μέσω των μετρημένων μεγεθών απόκρισης επιτάχυνσης του ομοιώματος του βάθρου, βρέθηκε να είναι της τάξεως των 20KNm.

Πέραν της ιδιομορφικής και αρμονικής ανάλυσης, επιδιώχθηκε η προσομοίωση της πλαστικής συμπεριφοράς του εδάφους στο πλαίσιο μονότονης γραμμικής και μη-γραμμικής στατικής ανάλυσης (pushover) προκειμένου να προσδιοριστεί η σχέση επιβαλλόμενης εξωτερικής ροπής και στροφής του θεμελίου με και χωρίς την αστοχία της άμμου αντίστοιχα. Για το σκοπό αυτόν, χρησιμοποιήθηκε το κριτήριο αστοχίας Drucker-Prager ενώ προσομοιώθηκε (σε μεμονωμένες αναλύσεις) και η δυνατότητα αποκόλλησης ή/και ολίσθησης του θεμελίου πάνω στην άμμο μέσω κατάλληλων επιφανειών επαφής. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 15, στην ελαστική περιοχή υπάρχει ικανοποιητική συμφωνία μεταξύ της ελαστικής αριθμητικής ανάλυσης, της ανελαστικής αριθμητικής ανάλυσης και της θεωρητικής λύσης (Gazetas, 1991) ενώ η ενεργοποίησή της πλαστικοποίησης του εδάφους, οδηγεί σε σημαντική συνολική μείωση της δυσκαμψίας του συστήματος μετά την πρώτη διαρροή η

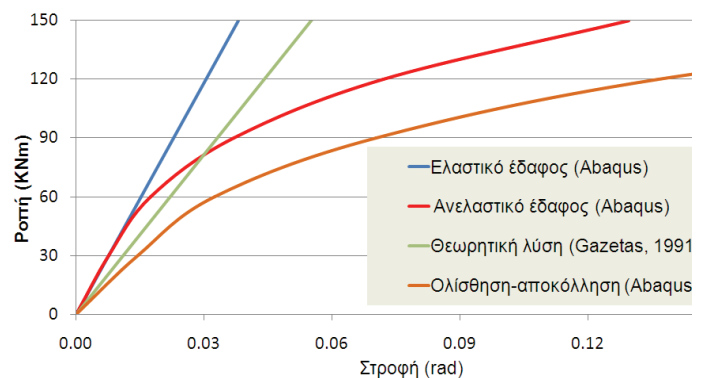
οποία πραγματοποιείται για τιμή ροπής ίσης περίπου προς 45KNm. Παράλληλα παρατηρείται μειωμένη αρχική δυσκαμψία όταν λαμβάνεται υπόψη η αποκόλληση (ανύψωση) του θεμελίου η οποία, αριθμητικώς τουλάχιστον, δείχνει να επισυμβαίνει για σχετικά μικρές τιμές εξωτερικής φόρτισης. Επισημαίνεται ότι η αριθμητική ανάλυση επαναλήφθηκε παραμετρικά για τέσσερα διαφορετικά (ομοιόμορφα και μη) εδαφικά προφίλ (Βάιος, 2007) στη προσπάθεια να μελετηθεί η επιρροή αυτής της παραμέτρου στη συμπεριφορά του φυσικό ομοίωμα που προφανώς κατασκευάστηκε θεμελιωμένο σε στρώμα άμμου χωρίς μεταβολή των ιδιοτήτων του κατά τη διάρκεια της πειραματικής ακολουθίας.



Σχήμα 13. Τοποθέτηση επιταχυνσιογράφων εντός της στρώσης της εγκιβωτισμένης άμμου καθώς και στο επίπεδο τόσο της θεμελίωσης όσο και του καταστρώματος του ομοιώματος του πυλώνα



Σχήμα 14. Αριθμητική αποτίμηση των δυναμικών χαρακτηριστικών του συστήματος εγκιβωτισμένης άμμου – θεμελίωσης – πυλώνα (Βάιος, 2007)



Σχήμα 15. Σχέση εξωτερικής ροπής – στροφής του θεμελίου (άμμος, $c=0\text{kPa}$, $\phi=33^\circ$). Βάιος (2007)

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΙΚΗ ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Δυναμική συμπεριφορά του συστήματος πυλώνα-θεμελίου-εδάφους in-situ

α) Οι μετρηθείσες ιδιοσυχνότητες του συστήματος προέκυψαν ίσες προς 2.80Hz (εντός επιπέδου) και 1.93Hz (εκτός επιπέδου) αντιστοίχως. Μετά την αστοχία του βάρου οι μετρηθείσες ιδιοσυχνότητες του συστήματος προέκυψαν ίσες προς 2.54Hz (εντός επιπέδου) και 1.71Hz (εκτός επιπέδου). Η συνολική δυσκαμψία του συστήματος ενέχει την επιρροή της εδαφικής ενδοσιμότητας. Για διεγέρσεις χαμηλής έντασης η μετρηθείσα απόσβεση πριν την αστοχία του βάρου είναι της τάξης του 0.9% έως 1.6% ενώ μετά την αστοχία του βάρου είναι της τάξης του 1.2% έως 1.9%, δηλαδή σημειώνεται μια ελαφρά αύξηση.

β) Η μη-γραμμική συμπεριφορά του φυσικού ομοιώματος όπως παρατηρήθηκε επί τόπου, είχε παρατηρηθεί και κατά τη διάρκεια των εργαστηριακών δοκιμών (Manos et al., 2004). Και στις δύο περιπτώσεις η κύρια μορφή απόκρισης ήταν η καμπτική όπως και η συνακόλουθη μορφή αστοχίας που πραγματοποιήθηκε στη βάση του βάρου. Παράλληλα, παρατηρήθηκε σημαντική αύξηση της ισοδύναμης απόσβεσης (από 1.6% στο 4.2%) κατά τη διάρκεια της χαμηλής προς μέσης έντασης διέγερση η οποία συνοδεύτηκε από τη ρηγμάτωση της διατομής σε σχέση με την απόσβεση κατά την χαμηλής έντασης διέγερση.

γ) Η μη-γραμμική συμπεριφορά του βάρου είναι ακόμα εμφανής στο διάγραμμα της μεταβολής της οριζόντιας μετακίνησης στο μέσο του καταστρώματος με την τέμνουσα βάσης για την περίπτωση του 2^{ου} (και πλέον ισχυρού) πειράματος που οδήγησε στην αστοχία του βάρου. Θα πρέπει βεβαίως να σημειωθεί ότι η επιρροή της αλληλεπίδρασης εδάφους-θεμελίωσης-ανωδομής στην ανελαστική απόκριση της τελευταίας είναι ένα σύνθετο πρόβλημα το οποίο πρέπει να διερευνηθεί περαιτέρω.

Αριθμητική προσομοίωση του συστήματος πυλώνα-θεμελίου-εδάφους in-situ

δ) Η απόκριση του συστήματος υπό χαμηλή προς μέσης έντασης διέγερση η οποία προέκυψε από την τρισδιάστατη αριθμητική προσομοίωση του συστήματος βρίσκεται σε καλή συμφωνία με την μετρηθείσα απόκριση. Ικανοποιητική είναι και η σύγκριση της αριθμητικής πρόβλεψης της μέγιστης δύναμης επί των αισθητήρων πίεσης σε σχέση με τα πειραματικά αποτελέσματα

ε) Η διαφορετικής πολυπλοκότητας αριθμητική προσομοίωση της δυναμικής απόκρισης του συστήματος εδάφους-θεμελίωσης-βάρου υπό χαμηλής έντασης διέγερση πριν και μετά την αστοχία του βάρου κρίνεται ικανοποιητική. Ειδικότερα έναντι των μετρήσεων που παρουσιάζονται στην παρούσα εργασία, παρατηρήθηκε καλή συμφωνία μεταξύ των αριθμητικών και των πειραματικών αποτελεσμάτων. Πολύ καλή συμφωνία παρατηρήθηκε και αναφορικά με τη μέγιστη στο χρόνο δύναμη επί των αισθητήρων πίεσης. Παράλληλα, προέκυψε ότι περισσότερο σύνθετα και λεπτομερή προσομοιώματα (ειδικότερα ως προς τη διακριτοποίηση του εδάφους), δεν οδηγούν κατ' ανάγκη σε ακριβέστερα αποτελέσματα, τουλάχιστον όχι σε βαθμό ανάλογο της πρόσθετης πολυπλοκότητάς τους.

Πειραματική και αριθμητική διερεύνηση του συστήματος εγκιβωτισμένης άμμου – θεμελίωσης – πυλώνα στο εργαστήριο.

στ) Μέσω των πειραμάτων της σεισμικής τράπεζας έγινε δυνατό να αναπτυχθούν μη-γραμμικοί μηχανισμοί απόκρισης στην διεπιφάνεια θεμελίωσης και άμμου στο εργαστήριο, πέραν από την ρηγμάτωση του βάρου στη βάση του όπως και του αντίστοιχου ομοιώματος

in-situ, δοθέντων των αβεβαιοτήτων που συναρτώνται με τη διάδοση των σεισμικών κυμάτων εντός του σώματος της άμμου και τις συνθήκες στα όρια του διατμητικού κιβωτίου αλλά και της επαφής του πεδίου με την επιφάνεια του εδαφικού υποστρώματος

ζ) Η αριθμητική προσομοίωση επικεντρώθηκε στο να προσεγγίσει τόσο την μερική αποκόλληση του θεμελίου όσο και την ανελαστική συμπεριφορά της στρώσης της άμμου στη θλιβόμενη περιοχή. Πρόκειται για πολύπλοκους μηχανισμούς που απαιτούν συστηματική μελέτη για την ποσοτικοποίησή τους αξιοποιώντας τις δυνατότητες τόσο της σεισμικής τράπεζας όσο και του Ευρωπαϊκού Πεδίου Δοκιμών στη Βόλβη. Όλα τα παραπάνω αποτελούν αντικείμενο που χρήζει περαιτέρω ενδελεχούς έρευνας. Η δυνατότητα συνεκτίμησης της αποκόλλησης του θεμελίου από το έδαφος (γεωμετρική μη-γραμμικότητα) και της πλαστικοποίησης του εδάφους και των αλληλεπιδράσεων που προκύπτουν θα αποτελέσει ένα χρήσιμο εργαλείο πρόβλεψης της εντατικής κατάστασης στο εδάφος, στη θεμελίωση και στην ανωδομή για πραγματικές κατασκευές, όπου τα φαινόμενα αυτά δεν είναι τις ποιά πολλές φορές εύκολο να παρατηρηθούν, πολλώ δε μάλλον να μετρηθούν.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Βάιος, Χ. (2007) «Ανελαστικά φαινόμενα σε βάθρα γεφυρών», *Διπλωματική Εργασία*, Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα Σπουδών ΑΣΤΕ, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.
- Gazetas, G. (1991) "Formulas & Charts for impedance functions of surface and embedded foundation", *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, 177, No. 9, pp.1363-1381.
- Καφετζόπουλος, Δ. Και Σκανδαλάκης, Κ. (2006) «Μελέτη της δυναμικής και σεισμικής απόκρισης ομοιώματος μεσοβάθρου στη σεισμική τράπεζα και σύγκριση με αντίστοιχη αριθμητική προσομοίωση», *Διπλωματική Εργασία*, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.
- Manos, G., Kourtides, V., Yasin, B. & Soulis, V.J. (2004) "Dynamic and Earthquake Response of Model Structures at the Volvi – Greece European Test Site" *13th WCEE*, Vancouver, No.787.
- Manos, G., Kourtidis, V., Soulis, V., Sextos, A., Renault, P. and Yassin, B. (2005) "Numerical and experimental soil-structure-interaction of a bridge pier model at the Volvi-Greece European Test Site", *6th European Conference on Structural Dynamics*, Eurodyn 2005, Paris, II, 1335-1340.
- Manos, G.C., Kourtides, V., Soulis, V., Sextos, A. and Renault, P. (2006a) "Study of the dynamic response of a bridge pier model structure at the Volvi - Greece European Test Site", *8th National Conference on Earthquake Engineering*, San Fransisco, 18-22 April 2006, San Francisco, U.S.
- Manos, G., Kourtidis, V., Sextos, A., Renault, P. and Soulis, V., (2006b) "Dynamic and Seismic behaviour of Model Structures at the European Test Site", *Ninth International Conference on Recent Advances in Structural Dynamics*, Southampton, U.K.
- Mylonakis, G., Gazetas, G., Nikolaou, S. & Chauncey, A. (2002) "Development of Analysis and Design Procedures for Spread Footings", *Technical Report*, MCEER-02-0003.
- Pinto A. V., editor (1996). Pseudodynamic and Shaking Table Tests on R.C. Bridges. *ECOEST PREC*8 Report No. 8*.
- Pitilakis, K., et al. (1999). Geotechnical and geophysical description of EURO-SEISTEST, using field, laboratory tests and moderate strong motion records. *Journal of Earthquake Engineering*, Vol. 3(3), 381-409.
- Renault, P. & Meskouris, K. (2005) "A coupled BEM/FEM approach for the numerical simulation of bridge structures", *EURODYN 2005*, 1267-1272.
- Χήρας, Σ. (2005) «Ανελαστική δυναμική συμπεριφορά βάθρων γεφυρών υπό πραγματικές συνθήκες εδαφικής ενδοσιμότητας – Εφαρμογή στο μεσόβαθρο του Euroseis-Test», *Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία*, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Α.Π.Θ.