

Πειραματική και αναλυτική μελέτη της δυναμικής συμπεριφοράς ομοιώματος μεσοβάθρου γεφυρών Ο/Σ στο πεδίο δοκιμών Euroseis-Test στη Βόλβη

Γ. Μάνος
Καθηγητής. Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών ΑΠΘ

Β. Κουρτίδης
Δρ. Πολιτικός Μηχανικός. ΑΠΘ

Β. Σούλης
Πολιτικός Μηχανικός. ΑΠΘ

Α. Σέξτος
Λέκτορας. Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών ΑΠΘ

Λέξεις κλειδιά: Γεφυροποιία, Αλληλεπίδραση εδάφους-ανωδομής, Πειραματική Μηχανική

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Στόχος της παρούσας εργασίας είναι η παρουσίαση της μετρηθείσας και αριθμητικώς εκτιμηθείσας δυναμικής συμπεριφοράς ομοιώματος μεσοβάθρου γεφυρών από Ο/Σ το οποίο μελετάται στο Ευρωπαϊκό πεδίο δοκιμών Euroseis-Test στη Βόλβη, πλησίον του επικέντρου του σεισμού μεγέθους 6.5 Ms της Θεσσαλονίκης (1978). Το πλεονέκτημα των δοκιμών πεδίου στη θέση αυτή είναι η ύπαρξη πραγματικών συνθηκών θεμελίωσης των ομοιωμάτων που κατασκευάζονται και η συνακόλουθη δυνατότητα ρεαλιστικής επί-τόπου διερεύνησης της αλληλεπίδρασης εδάδους-θεμελίωσης-ανωδομής. Το ομοίωμα μεσοβάθρου γέφυρας που εξετάζεται, έχει μελετηθεί πειραματικά στο Εργαστήριο Πειραματικής Αντοχής Υλικών και Κατασκευών του Α.Π.Θ. υπό οριζόντια ανακυκλιζόμενη φόρτιση η οποία επιβλήθηκε ταυτόχρονα με το αξονικό φορτίο προκειμένου να μετρηθεί και να διερευνηθεί η μεταλαστική συμπεριφορά του μεσοβάθρου. Ακολούθως, πραγματοποιήθηκε σειρά πειραμάτων χαμηλής έντασης στο πεδίο για μια περίοδο δύο ετών. Κατά την περίοδο αυτή, η θεμελίωση του ομοιώματος βρισκόταν ορισμένες φορές συνδεδεμένη με το κατάστρωμα μέσω χαλύβδινων καλωδίων ενώ σε συγκεκριμένες περιπτώσεις τοποθετήθηκε πρόσθετη μάζα επί του καταστρώματος. Μετρήθηκε η επιτάχυνση του καταστρώματος και μελετήθηκε η απόκριση του συστήματος στο πεδίο των συχνοτήτων προκειμένου να εξαχθούν οι σημαντικότερες ιδιομορφές για κάθε μια από τις προαναφερθείσες καταστάσεις (σύνδεσης με καλώδια και τοποθέτησης μάζας). Παράλληλα μετρήθηκε και ερμηνεύτηκε η συμπεριφορά του συστήματος βάθρου-θεμελίωσης στο πεδίο του χρόνου για διαφορετικά επίπεδα διέγερσης. Μέσω των εκτεταμένων μετρήσεων αλλά και της ικανοποιητικής αριθμητικής επιβεβαίωσης με τη χρήση προσομοιωμάτων πεπερασμένων στοιχείων, αποτιμήθηκε η επιρροή της ενδοσιμότητας της θεμελίωσης στη δυναμική συμπεριφορά του ομοιώματος.

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

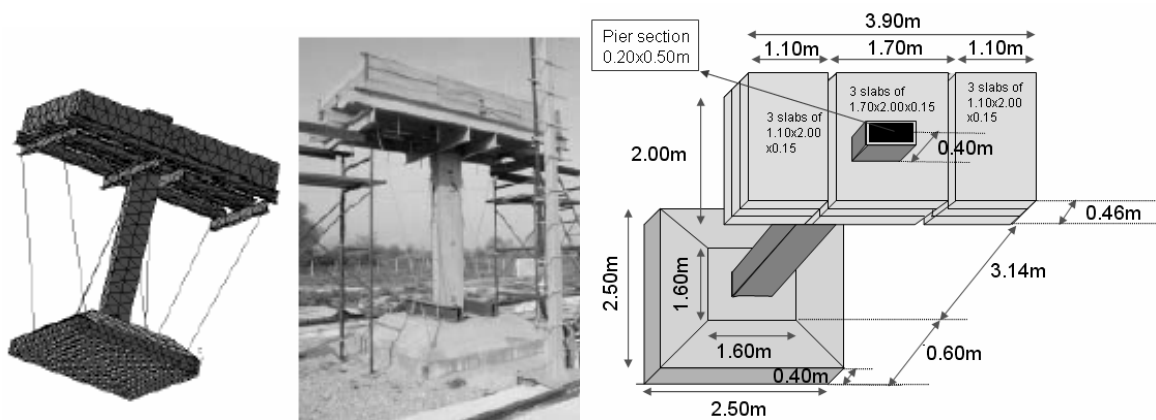
Παρά το γεγονός ότι το πρόβλημα της αλληλεπίδρασης εδάφους-θεμελίωσης-ανωδομής έχει μελετηθεί διεξοδικά, είναι γενικά αποδεκτό ότι απαιτείται εκτενέστερη διερεύνηση ιδιαίτερα δε, υποστήριξη των θεωρητικών και αναλυτικών εργαλείων μέσα από πειράματα. Η ανάγκη αυτή είναι ακόμη μεγαλύτερη για τη μελέτη κατασκευών που αποκρίνονται ανελαστικά ή σε περιπτώσεις όπου οι εδαφικές συνθήκες ευνοούν την αλληλεπίδραση της κατασκευής με το έδαφος. Παράλληλα, υπάρχει ιδιαίτερη έλλειψη από πειραματικά αποτελέσματα που να αφορούν στη δυναμική απόκριση κατασκευών θεμελιωμένων επί πραγματικού εδάφους. 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 στο επίκεντρο του σεισμού του 1978 της Θεσσαλονίκης, πλησίον της λίμνης Βόλβη. Οι βασικοί στόχοι των προγραμμάτων αλλά και της παρούσης εργασίας ειδικότερα 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 πεδίο δοκιμών Euroseis-Test, το οποίο και περιγράφεται συνοπτικά στην ενότητα που ακολουθεί.

2 ΤΟ ΠΕΔΙΟ ΔΟΚΙΜΩΝ EUROSEIS-TEST

2.1 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. Η συνολική μάζα του βάθρου είναι ίση προς 185.3KN, ενώ 95.3KN εξ αυτών είναι συγκεντρωμένα στο επίπεδο του καταστρώματος. 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 στο παρόν καμία σύγκριση της συμπεριφοράς των ομοιωμάτων αυτών. Λεπτομερής περιγραφή των μηχανικών ιδιοτήτων των υλικών, του οπλισμού καθώς και των αποτελεσμάτων της πειραματικής διερεύνησης των ομοιωμάτων των μεμονωμένων βάθρων που πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο είναι διαθέσιμη αλλού (Manos et al., 2004) και δεν παρέχεται στην παρούσα εργασία εξαιτίας περιορισμένου χώρου.



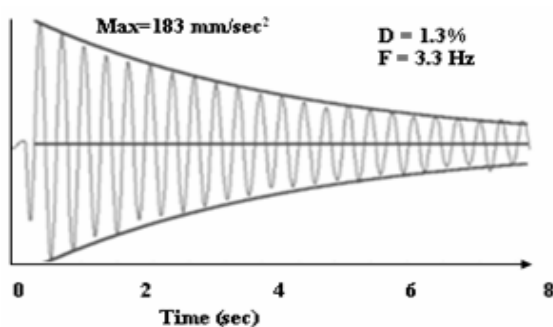
Σχήμα 1: Γεωμετρία του ομοιώματος βάθρου γέφυρας στο Euroseis-Test

3 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

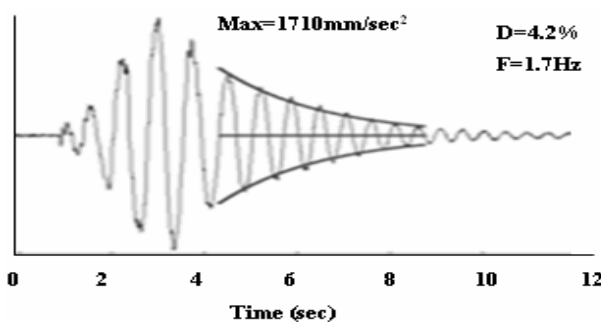
Για τη μέτρηση της δυναμικής συμπεριφοράς του βάρου χρησιμοποιήθηκαν επιταχυνσιογράφοι επί της κατασκευής καθώς και τέσσερις αισθητήρες πίεσης (pressure cells) οι οποίοι τοποθετήθηκαν κάτω από τη θεμελίωση για τη μέτρηση του εντατικού πεδίου εντός του εδάφους. Η αξιόπιστη λειτουργία του συνόλου των αισθητήρων δοκιμάστηκε διεξοδικά μέσα από μια σειρά πειραμάτων τα οποία διήρκεσαν από τον Απρίλιο του 2004 έως το Νοέμβριο του 2004. Με το πέρας των δοκιμών αυτών, τα τελικά επι-τόπου πειράματα πραγματοποιήθηκαν τον Μάιο και Ιούνιο του 2005. Χαρακτηριστικά αποτελέσματα από τα πειράματα αυτά παρουσιάζονται και σχολιάζονται παρακάτω.

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

Μια τυπική πειραματική ακολουθία περιλαμβάνει ελεύθερες ταλαντώσεις του βάρου 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 οποία ακολούθως καταγράφεται από τα όργανα. 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. Η τυπική πειραματική ακολουθία περιελάμβανε αρκετά πειράματα σε κάθε διεύθυνση και, καθώς το ομοίωμα έφερε σκοπίμως καλώδια και ντίζες πρόσθετα πειράματα πραγματοποιήθηκαν με και χωρίς αυτά τα στοιχεία σύνδεσης. Παρακάτω παρατίθενται και σχολιάζονται οι πιο σημαντικές πτυχές της μετρηθείσας απόκρισης. Εν προκειμένω, στο Σχήμα 2α παρουσιάζεται η απόκριση (επιτάχυνση) του καταστρώματος του βάρου κατά την ελεύθερη του ταλάντωση εντός επιπέδου, για την περίπτωση του βάρου 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 βάρου. Κατασκευή με καλώδια, και πρόσθετη μάζα (κατακόρυφος άξονας: επιτάχυνση σε mm/sec²).

Πίνακας 1. Σύνοψη μητρηθείσας απόκρισης *

A/A Κανάλιου	Απόκριση	Από FFT (συχνότητα)	Μέγιστη επιτ/νση κατ/τος σε g Max 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

3.2. 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.

3.2.1 Δεύτερο πείραμα που οδήγησε στην αστοχία του βάθρου

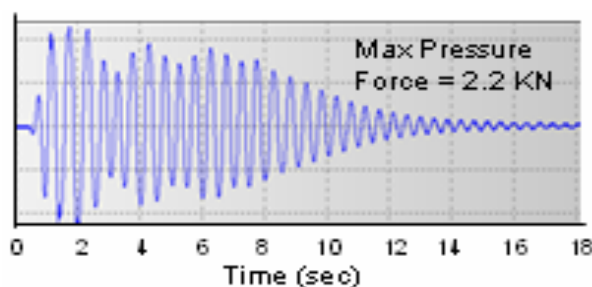
Κατά τη διάρκεια αυτών των πειραμάτων, τα διαγώνια καλώδια σύνδεσης και οι ντίζες ήταν ενεργοποιημένα προσδίδοντας πρόσθετη δυσκαμψία στο σύστημα. Στο Σχήμα 2β παρουσιάζεται η επιτάχυνση του καταστρώματος για εξαναγκασμένη ταλάντωση εντός επιπέδου μικρής προς μεσαίας έντασης, η οποία και προκάλεσε την αστοχία του βάθρου (Σχήμα 4α) για την περίπτωση κατασκευής με καλώδια, και πρόσθετη μάζα. 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 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.

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%.

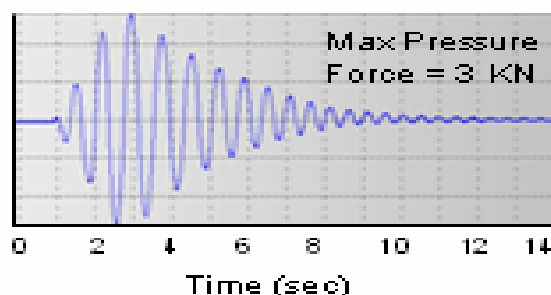
4 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΕΔΑΦΟΥΣ-ΘΕΜΕΛΙΩΣΗΣ-ΒΑΘΡΟΥ

4.1. Επισκόπηση των εναλλακτικών μεθόδων αριθμητικής προσομοίωσης

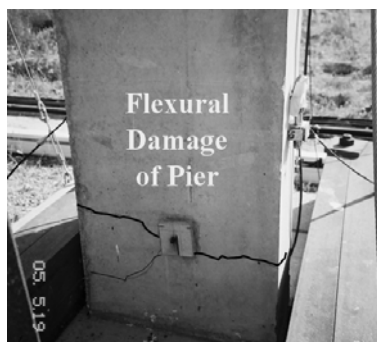
Στο πλαίσιο της αριθμητικής επίλυσης του προβλήματος της απόκρισης του συστήματος, μελετήθηκαν διαφορετικά προσομοιώματα με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, με στόχο την κατά το δυνατόν ακριβέστερη προσομοίωση του προβλήματος αλλά και την εύρεση της κατάλληλης ισορροπίας μεταξύ της ακρίβειας και της απλότητας της αριθμητικής προσέγγισης. Στο πλαίσιο αυτό, δημιουργήθηκαν διαφορετικά αριθμητικά προσομοιώματα προς επίλυση, αρχής γενομένης από απλά συστήματα βάθρου εδραζομένου επί ελατηριακών στηρίξεων, τα οποία



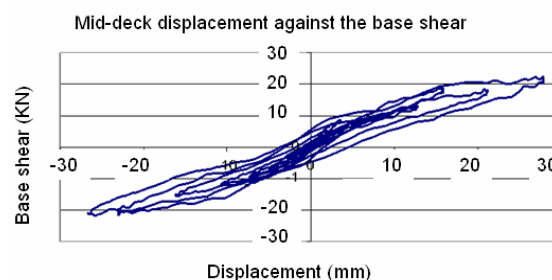
Σχήμα 3α: Δύναμη επί του αισθητήρα πίεσης κατά την ελεύθερη ταλάντωση εντός επιπέδου μικρής έντασης (low intensity pull-out test). Κατασκευή με καλώδια, χωρίς πρόσθετη μάζα.



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



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.

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

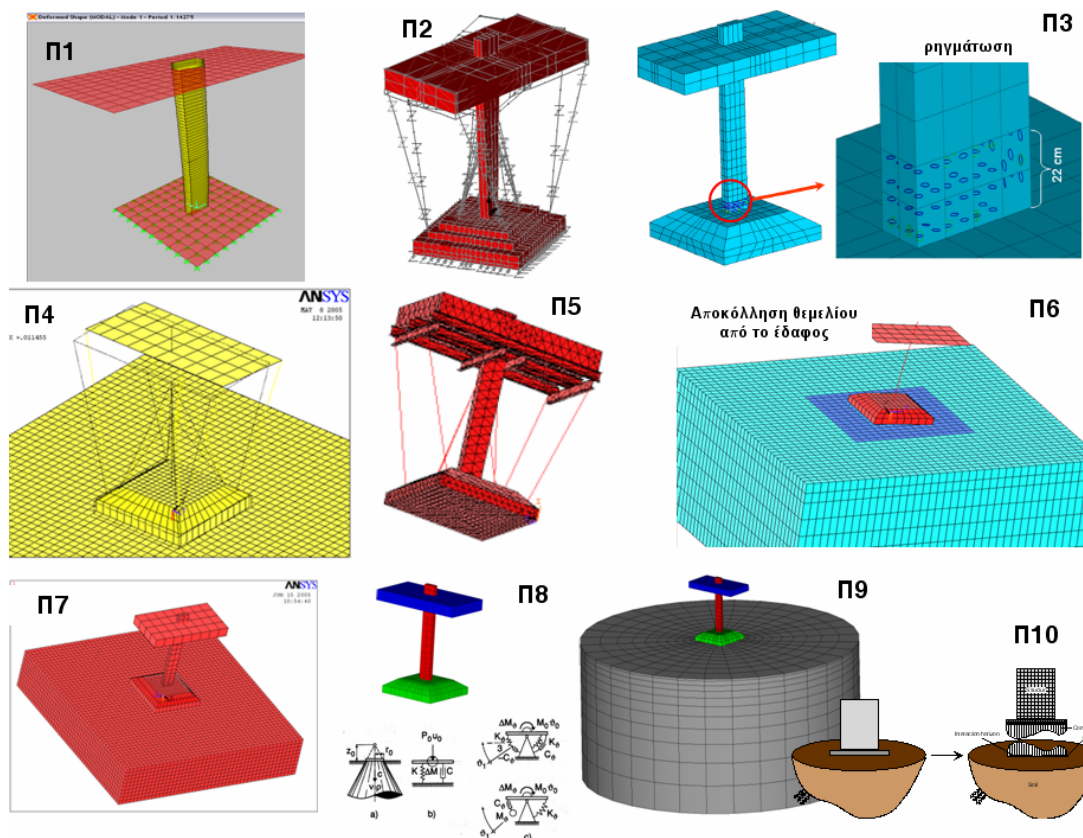
Ταλάντωση	Με Καλώδια & Ντίζες	Χωρίς Καλώδια & Ντίζες
Εκτός επιπέδου	1.709 Hz	1.099 Hz
Εντός επιπέδου	2.539 Hz	2.344 Hz
Στροφική	2.783 Hz	-



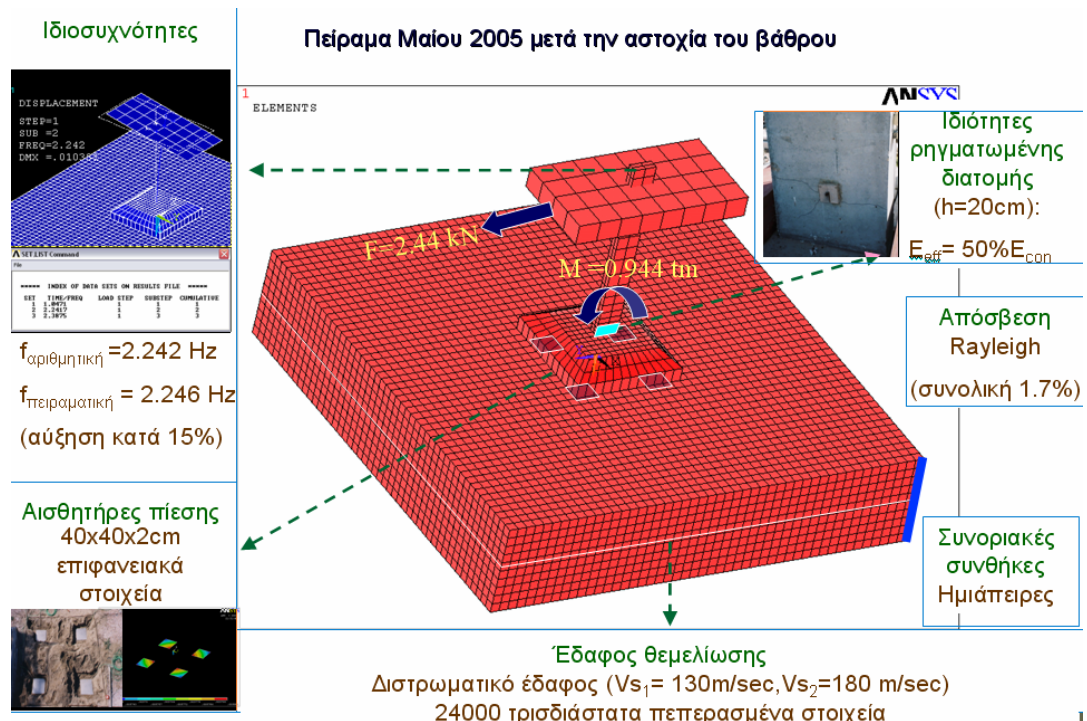
επεκτάθηκαν με την πλήρη τρισδιάστατη προσομοίωση του εδάφους κάτω και γύρω από το θεμέλιο ή/και ακόμα τη σύζευξη των μεθόδων πεπερασμένων και συνοριακών στοιχείων (Boundary Element / Finite Element Method, BEM/FEM). Ο στόχος ήταν η εύρεση του βέλτιστου προσομοιώματος το οποίο μπορεί, σε ανεκτό υπολογιστικό 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 δυνητικής ανασήκωσης 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 τρισδιάστατου εδαφικού ομοιώματος, πρόσθετων ενσωματωμένων επιφανειακών στοιχείων στις θέσεις των αισθητήρων πίεσης (με δυσκαμψία ίση προς αυτή των οργάνων) καθώς και ισοδύναμα μειωμένες ελαστικές ιδιότητες στις βάσεις του βάθρου για την προσομοίωση της πλαστικής άρθρωσης (χρήση κώδικα ANSYS).
- Π8: Τρισδιάστατο προσομοίωμα (Manos et al., 2006a) επί ελαστικής έδρας 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.



Σχήμα 5: Εναλλακτικά προσομοιώματα πεπερασμένων στοιχείων



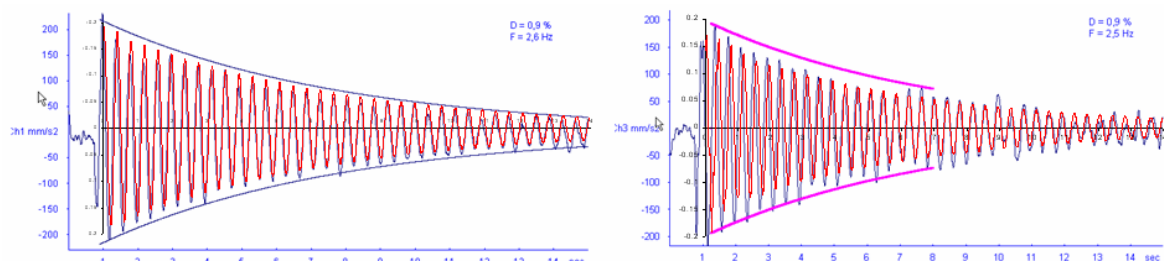
Σχήμα 6: Τρισδιάστατο αριθμητικό προσομοίωμα του συστήματος εδάφους-θεμελίωσης-ανωδομής (Π7)

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.). 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 Π7 (Σχήμα 6) διότι αφενός παρείχε αξιόπιστα αποτελέσματα στο πεδίο των συχνοτήτων και του χρόνου, αφετέρου δε, προκειμένου να είναι δυνατή:

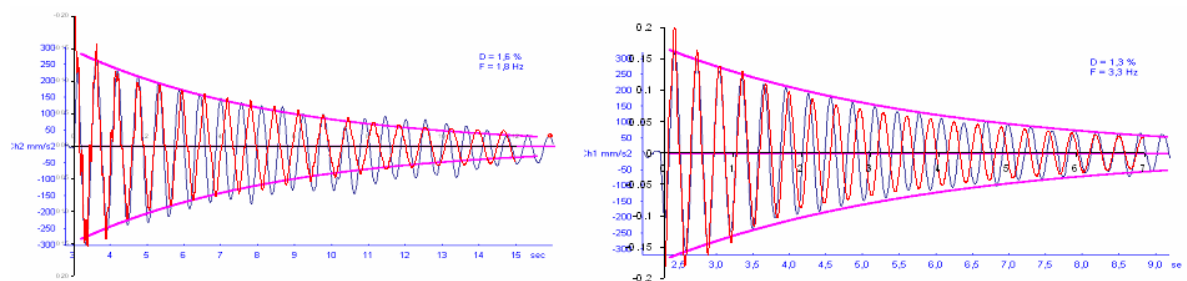
- η επέκταση της διερεύνησης της ανελαστικής συμπεριφοράς του βάθρου χωρίς να απαιτείται αυτό να «συμψηφιστεί» με λιγότερο ακριβείς παραδοχές αναφορικά με την ενδοσιμότητα του εδάφους ώστε να εξισορροπηθεί ο απαιτούμενος υπολογιστικός χρόνος.
- η ανάκτηση αριθμητικών αποτελεσμάτων απόκρισης του εδάφους 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.

4.2. 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 30cm 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.



Σχήμα 7: Πείραμα χαμηλής έντασης διέγερσης της 20ης Οκτωβρίου 2004. Οριζόντια (αρ.) και κατακόρυφη (δεξ.) επιτάχυνση καταστρώματος. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης φαίνονται με έντονη γραμμή.



Σχήμα 8: Πείραμα χαμηλής προς μεσαίας έντασης διέγερσης της 13ης Μαΐου 2005. Οριζόντια (αρ.) και κατακόρυφη (δεξ.) επιτάχυνση καταστρώματος.

Παράλληλα, εξασφαλίστηκε μέσω παραμετρικών αναλύσεων και ελέγχων ότι οι συνοριακές συνθήκες δεν εισάγουν παρασιτικά κύματα στο υπό εξέταση σύστημα και δεν αλλοιώνουν τα αποτελέσματα. Στα Σχήματα 7 και 8 παρουσιάζεται η σύγκριση πειραματικών και αναλυτικών αποτελεσμάτων (σε επίπεδο επιτάχυνσης καταστρώματος) για δύο διαφορετικές πειραματικές ακολουθίες (20 Οκτ. 2004 & 13 Μαΐου 2005).

5 ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

5.1. 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 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.

5.2. 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. 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 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 διέγερση. Επισημαίνεται πως καθώς οι τάσεις εντός των πεπερασμένων στοιχείων με τα οποία προσομοιώνεται το έδαφος δεν ακολουθούν γραμμική κατανομή κάτω από την επιφάνεια του θεμελίου, Σχήμα 11, απαιτήθηκε η λήψη μιας μέσης τιμής τάσης, και κατ' επέκταση δύναμης, όλων των σημείων αριθμητικής ολοκλήρωσης των αντίστοιχων πεπερασμένων στοιχείων. 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 τριασδιάστατου 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.

6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΙΚΗ ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

6.1. Δυναμική συμπεριφορά του συστήματος υπό χαμηλής έντασης διέγερση

6.1.1 Μεταβολή της δυσκαμψίας

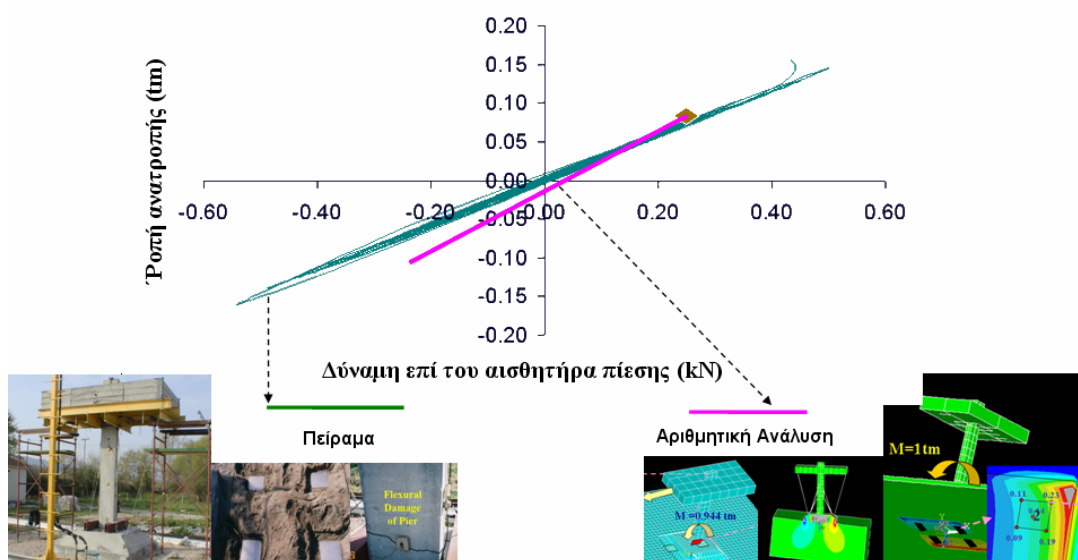
Πριν την αστοχία του βάθρου: Οι μετρηθείσες ιδιοσυχνότητες του συστήματος για την περίπτωση βάθρου με πρόσθετη μάζα προέκυψαν ίσες προς 2.80Hz (εντός επιπέδου) και 1.93Hz (εκτός επιπέδου) αντιστοίχως (βάθρο με καλώδια και ντίζες). Όταν τα στοιχεία αυτά σύνδεσης αφαιρέθηκαν, τότε οι ιδιοσυχνότητες του συστήματος έγιναν 2.60Hz (εντός επιπέδου) και 1.12Hz (εκτός επιπέδου).

Μετά την αστοχία του βάθρου: Οι μετρηθείσες ιδιοσυχνότητες του συστήματος για την περίπτωση βάθρου με πρόσθετη μάζα προέκυψαν ίσες προς 2.54Hz (εντός επιπέδου) και 1.71Hz (εκτός επιπέδου), αντιστοίχως (βάθρο με καλώδια και ντίζες). Όταν τα στοιχεία αυτά σύνδεσης αφαιρέθηκαν, τότε οι ιδιοσυχνότητες του συστήματος έγιναν 2.34Hz (εντός επιπέδου) και 1.10Hz (εκτός επιπέδου). Και πάλι, η συνολική δυσκαμψία του συστήματος ενέχει την επιρροή της εδαφικής ενδοσιμότητας.

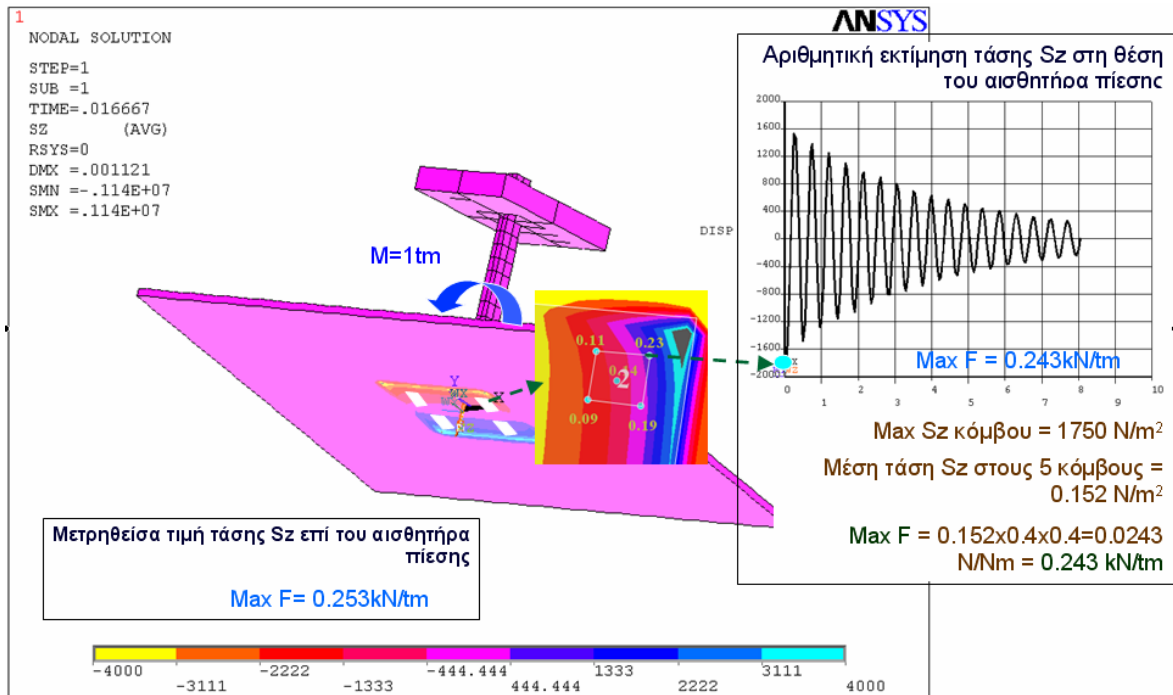
6.1.2 Μεταβολή της απόσβεσης

Πριν την αστοχία του βάθρου: Η μετρηθείσα απόσβεση, όπως προέκυψε από το φθίνων πλάτος της ελεύθερης ταλάντωσης είναι της τάξης του 0.9% έως 1.6%.

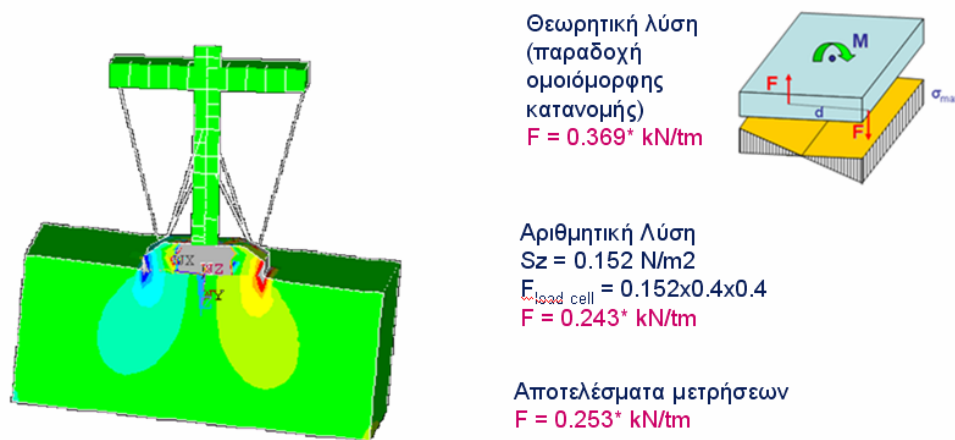
Μετά την αστοχία του βάθρου: Η μετρηθείσα απόσβεση, η οποία προέκυψε όπως ανωτέρω, είναι της τάξης του 1.2% έως 1.9%, ελαφρά αυξημένη σε σχέση με τη κατάσταση πριν την αστοχία



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). Βάθρο με καλώδια και ντίζες



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



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

6.1.3 Αριθμητική προσομοίωση

Η διαφορετικής πολυπλοκότητας αριθμητική προσομοίωση της δυναμικής απόκρισης του συστήματος εδάφους-θεμελίωσης-βάθρου υπό χαμηλής έντασης διέγερση πριν και μετά την αστοχία του βάθρου 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.

6.2. Δυναμική συμπεριφορά του συστήματος υπό χαμηλής προς μέσης έντασης διέγερση

Η μη-γραμμική συμπεριφορά του υπό εξέταση ομοιώματος βάθρου η οποία παρατηρήθηκε επί τόπου, είχε παρατηρηθεί ήδη και κατά τη διάρκεια των εργαστηριακών δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο της Αντοχής των Υλικών και Κατασκευών του Α.Π.Θ. (Manos et al., 2004). Και στις δύο περιπτώσεις η κύρια μορφή απόκρισης ήταν η καμπτική όπως και η συνακόλουθη μορφή αστοχίας η οποία όπως αναμενόταν με βάση το σχεδιασμό του στοιχείου, πραγματοποιήθηκε στη βάση του βάθρου.

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.

Η μη-γραμμική συμπεριφορά του βάθρου 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 βάθρου. 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. Τέλος, 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.

7 ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- Manos, G.A., Kourtides, V., Yasin, B. & Soulis, V.J. (2004). "Dynamic and Earthq. 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. *Jrnl of Earthq.Eng.* Vol. 3(3): 381-409.
- Renault, P. & Meskouris, K. (2005), 'A coupled BEM/FEM approach for the numerical simulation of bridge structures', EURO-DYN 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.