

## **Στοιχεία του Ερευνητικού Προγράμματος**

<b><u>Τίτλος:</u></b>	ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΡΡΟΗΣ ΤΩΝ ΣΥΝΔΕΣΜΩΝ ΣΤΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΩΝ ΑΡΧΑΙΩΝ ΜΝΗΜΕΙΩΝ ΤΗΣ ΚΛΑΣΣΙΚΗΣ - ΕΛΛΗΝΙΣΤΙΚΗΣ ΚΑΙ ΡΩΜΑΪΚΗΣ ΠΕΡΙΟΔΟΥ ΣΕ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΣΕΙΣΜΟΥ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΩΝ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΤΟΥΣ
<b><u>Χρηματοδοτικός Φορέας:</u></b>	Οργανισμός Αντισεισμικού Σχεδιασμού και Προστασίας (ΟΑΣΠ)
<b><u>Ανάδοχος Φορέας:</u></b>	Εργαστήριο Πειραματικής Αντοχής Υλικών και Κατά- σκευών, (ΕΠΑΥΚ)Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών ΑΠΘ
<b><u>Περίοδος Υλοποίησης:</u></b>	2002 – 2004
<b><u>Επιστημονικός Υπεύθυνος:</u></b>	Γεώργιος Χ. Μάνος Δρ Πολιτικός Μηχανικός Καθηγητής ΑΠΘ Διευθυντής ΕΠΑΥΚ
<b><u>Αν. Επιστημονικός Υπεύθυνος:</u></b>	Μίλτων Δημοσθένους Δρ Πολιτικός Μηχανικός Κύριος Ερευνητής ΙΤΣΑΚ
<b><u>Ερευνητική Ομάδα:</u></b>	Βλαδίμηρος Κουρτίδης Δρ Πολιτικός Μηχανικός  Μπιλάλ Γιασίν Δρ Πολιτικός Μηχανικός  Βασίλειος Σούλης Πολιτικός Μηχανικός, Msc Υποψήφιος Διδάκτωρ



## Πρόλογος

Το τεύχος αυτό αποτελεί την Τελική Έκθεση του Ερευνητικού Προγράμματος με τίτλο «Διερεύνηση της επιρροής των συνδέσμων στη συμπεριφορά των αρχαίων μνημείων της κλασσικής – ελληνιστικής και ρωμαϊκής περιόδου σε περίπτωση σεισμού και προτάσεις μεθοδολογιών αποκατάστασής τους». Το τεύχος αυτό συνοδεύεται από σειρά παραρτημάτων καθώς και CD στο οποίο είναι καταχωρημένη η τελική έκθεση υπό ηλεκτρονική μορφή.

Το πρόγραμμα αυτό χρηματοδοτήθηκε από τον Οργανισμό Αντισεισμικού Σχεδιασμού και Προστασίας (ΟΑΣΠ) με ανάδοχο φορέα το Εργαστήριο Πειραματικής Αντοχής Υλικών και Κατασκευών (ΕΠΑΥΚ) του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου της Θεσσαλονίκης (ΑΠΘ). Η διεκπεραίωση της οικονομικής διαχείρισης του προγράμματος έγινε μέσω της Επιτροπής Ερευνών του ΑΠΘ. Το πειραματικό μέρος αυτού του προγράμματος έγινε στις εργαστηριακές διατάξεις του πιο πάνω εργαστηρίου και κυρίως στη Διάταξη Τεχνητών Σεισμών (Σεισμική Τράπεζα) και στο Μεταλλικό Πλαίσιο Αντίδρασης του ιδίου εργαστηρίου.

Για την τελική διατύπωση αυτής της έκθεσης έχουν ληφθεί υπόψη αφενός το σύνολο των ερευνητικών εργασιών που έγιναν στα πλαίσια του εν λόγω ερευνητικού προγράμματος αφετέρου δε οι επισημάνσεις και σχόλια που έγιναν από την ειδική επιτροπή παρακολούθησης του προγράμματος που ορίστηκε από τον ΟΑΣΠ.

Από τη θέση αυτή θα ήθελα να ευχαριστήσω τον ΟΑΣΠ για τη χρηματοδότηση αυτού του ερευνητικού προγράμματος καθώς και την Επιτροπή Ερευνών του ΑΠΘ για την διεκπεραίωση των εργασιών οικονομικής διαχείρισης του προγράμματος. Ευχαριστίες επίσης οφείλονται και στα μέλη της ερευνητικής ομάδας που εργάστηκαν για την ολοκλήρωση αυτού του προγράμματος, Δρ Μίλτων Δημοσθένους, Πολιτικό Μηχανικό, Κύριο ερευνητή του ΙΤΣΑΚ, Δρ Βλαδίμηρο Κουρτίδη, Πολιτικό Μηχανικό, στέλεχος του ΕΠΑΥΚ, Δρ Γιασίν Μπιλάλ, Πολιτικό Μηχανικό και Βασίλειο Σούλη, Πολιτικό Μηχανικό, Msc, Υποψήφιο Διδάκτορα του Α.Π.Θ. Τέλος, ευχαριστίες οφείλονται και προς το Τεχνικό Προσωπικό του Εργαστηρίου Πειραματικής Αντοχής Υλικών και Κατασκευών του ΑΠΘ, κ. Δημήτριο Ρήτο και Θωμά Κουκουφτόπουλο για τη συνεισφορά τους σε όλα τα στάδια των πειραματικών δοκιμών.

Ο Επιστημονικώς Υπεύθυνος

Δρ Γεώργιος Χ. Μάνος

Πολιτικός Μηχανικός  
Καθηγητής ΑΠΘ  
Διευθυντής ΕΠΑΥΚ

Θεσσαλονίκη, Ιανουάριος, 2007



## **ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ**

Στοιχεία του Ερευνητικού Προγράμματος	i
Πρόλογος	iii
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	v
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	vii
SUMMARY	xi

### **ΦΑΣΗ 1<sup>η</sup>**

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή – Περιγραφή του προβλήματος.

Κεφάλαιο 2: Διερεύνηση της τεχνολογίας των συνδέσμων σε αρχαία μνημεία της αρχαϊκής, κλασσικής, ελληνιστικής και ρωμαϊκής περιόδου.

### **ΦΑΣΗ 2<sup>η</sup>**

Κεφάλαιο 3: Πειραματική διερεύνηση της επιρροής των συνδέσμων σε μαρμάρινα ομοιώματα υπό κλίμακα σε οριζόντιες στατικές και εναλλασσόμενες δυναμικές φορτίσεις.

Κεφάλαιο 4: Πειραματική μελέτη της συμπεριφοράς δύο σφονδύλων με ή χωρίς συνδέσμους.

### **ΦΑΣΗ 3<sup>η</sup>**

Κεφάλαιο 5: Πειραματική μελέτη της συμπεριφοράς δύο χαλύβδινων σφονδύλων στη σεισμική τράπεζα.

Κεφάλαιο 6: Πειραματική ακολουθία μαρμάρινων κιόνων με μαρμάρινο επιστύλιο στη σεισμική τράπεζα.

### **ΦΑΣΗ 4<sup>η</sup>**

Κεφάλαιο 7: Αριθμητική προσομοίωση της συμπεριφοράς δύο σφονδύλων χωρίς ή με κεντρικό σύνδεσμο κάτω από οριζόντια στατικά φορτία.

Κεφάλαιο 8: Υπολογιστική διερεύνηση της ολίσθησης μεταξύ δύο σφονδύλων που υποβάλλονται σε δυναμικές διεγέρσεις

### **ΦΑΣΗ 5<sup>η</sup>**

Κεφάλαιο 9: Συνοπτική παράθεση και αξιολόγηση των αποτελεσμάτων όλων των προηγούμενων φάσεων – Συσχέτιση τους με την επίδραση των συνδέσμων στη συμπεριφορά των αρχαίων μνημείων σε περίπτωση σεισμού.

Κεφάλαιο 10: Τελικά συμπεράσματα - προτάσεις



## **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

### **ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΡΡΟΗΣ ΤΩΝ ΣΥΝΔΕΣΜΩΝ ΣΤΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΩΝ ΑΡΧΑΙΩΝ ΜΝΗΜΕΙΩΝ ΤΗΣ ΚΛΑΣΣΙΚΗΣ - ΕΛΛΗΝΙΣΤΙΚΗΣ ΚΑΙ ΡΩΜΑΪΚΗΣ ΠΕΡΙΟΔΟΥ ΣΕ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΣΕΙΣΜΟΥ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΩΝ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΤΟΥΣ**

Η παρούσα ερευνητική προσπάθεια στοχεύει στο να διερευνήσει την επιρροή αρχαίου τύπου συνδέσμου (εμπόλια – κεντρικός πόλος) στη σεισμική συμπεριφορά μνημειακών δομημάτων της Κλασσικής-Ελληνιστικής-Ρωμαϊκής περιόδου. Για τον σκοπό αυτό μελετήθηκε στο εργαστήριο η απόκριση φυσικών ομοιωμάτων μελών αυτού του τύπου των φορέων, όταν αυτά υποβάλλονται σε μια ποικιλία φορτίσεων που έχει σαν στόχο να προσομοιώσει την εντατική κατάσταση που αναπτύσσεται όταν αυτά τα μέλη υποβάλλονται σε σεισμικές διεγέρσεις.

#### **Φυσικά ομοιώματα που χρησιμοποιήθηκαν**

- Ομοίωμα δύο μαρμάρινων σφονδύλων, με ή χωρίς συνδέσμους.
- Ομοίωμα δύο χαλύβδινων σφονδύλων, με ή χωρίς συνδέσμους.
- Ομοίωμα μικρής κλίμακας κιονοστοιχίας, που αποτελούνταν από τέσσερεις κίονες και ένα επιστύλιο, με ή χωρίς συνδέσμους.

Το ομοίωμα με τους δύο χαλύβδινους σφονδύλους επιλέχθηκε επειδή μέσω αυτού απαιτούνταν μικρότερου επιπέδου οριζόντιες δυνάμεις για να προκληθεί ολίσθηση μεταξύ των σφονδύλων ώστε μ' αυτόν τον τρόπο να μελετηθεί η συμπεριφορά των συνδέσμων, αντί της χρησιμοποίησης των μαρμάρινων σφονδύλων που, πέραν αυτού, εμφάνιζαν αλλοιώσεις στην διεπιφάνεια ολίσθησης μετά από αριθμό πειραμάτων.

Ο τύπος του αρχαίου συνδέσμου που μελετήθηκε ήταν ο κεντρικός τύπος συνδέσμου μεταξύ σφονδύλων με εμπόλια και πόλους έχοντας διαστάσεις αναλογικές πρωτότυπων συνδέσμων με γεωμετρική κλίμακα μείωσης των διαστάσεων αντίστοιχη με αυτή που εφαρμόστηκε για τους σφονδύλους. Οι πληροφορίες για τους συνδέσμους αντλήθηκαν τόσο από την βιβλιογραφία καθώς και από επί τόπου παρατηρήσεις.

Οι σύνδεσμοι που δοκιμάστηκαν στο εργαστήριο κατασκευάστηκαν από ποικιλία υλικών, με τα εμπόλια να έχουν μία συγκεκριμένη γεωμετρία. Κατάλληλες υποδοχές κατασκευάστηκαν στα φυσικά ομοιώματα των σφονδύλων και της κιονοστοιχίας ώστε τα συγκεκριμένα εμπόλια να ταιριάζουν απόλυτα στις εν λόγω υποδοχές. Οι κεντρικοί σύνδεσμοι κατασκευάστηκαν από ξύλο (τριών διαφορετικών τύπων). Εδώ όμως μελετήθηκε η επιρροή της διαμέτρου του πόλου που μεταβλήθηκε από 10 mm έως 40 mm κατά την διάρκεια της πειραματικής διερεύνησης που εκτελέστηκε.

#### **Φορτιστικές διατάξεις που αξιοποιήθηκαν:**

α) Αρχικά το σύστημα που των δύο σφονδύλων (μαρμάρινων ή χαλύβδινων) με ή χωρίς συνδέσμους, υποβλήθηκε σε μικρής ταχύτητας κυκλικά μεταβαλλόμενες οριζόντιες

φορτίσεις, ώστε να προκληθεί ολίσθηση στην διεπιφάνεια μεταξύ των σφονδύλων. Ταυτόχρονα με αυτήν την οριζόντια φόρτιση οι σφόνδυλοι υποβαλλόταν σε κατακόρυφα φορτία που δημιουργούσαν μία εντατική κατάσταση με την ανάπτυξη ορθών τάσεων στην διεπιφάνεια μεταξύ των σφονδύλων. Τα κατακόρυφα αυτά φορτία ήταν διαφόρων επιπέδων και αναπτύχθηκαν μέσω της προσαρμογής πρόσθετου βάρους στον άνω σφόνδυλο.

β) Το ίδιο σύστημα των δύο σφονδύλων, με ή χωρίς συνδέσμους, προσαρμόστηκε στο μεταλλικό πλαίσιο αντίδρασης του εργαστηρίου Αντοχής των Υλικών του Α.Π.Θ.. Εδώ το επιθυμητό επίπεδο κατακόρυφου φορτίου αναπτύχθηκε μέσω ενός σερβο-υδραυλικού εμβόλου ηλεκτρονικά ελεγχόμενου. Ταυτόχρονα, επιβλήθηκαν και πάλι κυκλικά μεταβαλλόμενες οριζόντιες στατικές φορτίσεις ώστε να προκληθεί ολίσθηση στην διεπιφάνεια μεταξύ των σφονδύλων. Εκτελέστηκε ένας μεγάλος αριθμός πειραμάτων μεταβάλλοντας, εκτός από το είδος της διεπιφάνειας ολίσθησης (μαρμάρινη ή χαλύβδινη) και τον τύπο του εμπολίου (μεταλλικό ή ξύλινο) καθώς και τον τύπο και την διάμετρο του πόλου.

γ) Το ίδιο δομικό υποσύνολο, όπως και προηγουμένως στο β) εξετάστηκε ξανά μέσω της σεισμικής τράπεζας του Α.Π.Θ. , όπου υποβλήθηκε σε οριζόντιες τεχνητές σεισμικές διεγέρσεις της βάσης. Και πάλι μελετήθηκε η επιρροή της παρουσίας ή μη συνδέσμων μεταξύ των σφονδύλων στην απόκριση του συστήματος.

δ) Τέλος, μελετήθηκε ένα μικρής κλίμακας φυσικό ομοίωμα μιας μαρμάρινης κιονοστοιχίας τεσσάρων κιόνων με ένα επιστύλιο, που υποβλήθηκε στη σεισμική τράπεζα του Α.Π.Θ. σε οριζόντιες τεχνητές σεισμικές διεγέρσεις. Και πάλι μελετήθηκε η επιρροή της παρουσίας ή μη συνδέσμων μεταξύ των κιόνων και της μαρμάρινης βάσης στην απόκριση του συστήματος.

Τα βασικά συμπεράσματα-παρατηρήσεις αναφορικά με την συμπεριφορά των φυσικών ομοιωμάτων που εξετάστηκαν και με την επιρροή των συνδέσμων στην απόκρισή τους παρατίθενται συνοπτικά κατωτέρω:

- 1) Η παρουσία των συνδέσμων περιορίζει, ως ένα βαθμό, την απόκριση ολίσθησης μεταξύ των σφονδύλων. Αυτό οδηγεί σε μια αύξηση της φέρουσας ικανότητας σε οριζόντια φορτία. Η αύξηση της διαμέτρου του πόλου, όταν συνδυάζεται με τα κατάλληλα εμπολία, οδηγεί σε σημαντική αύξηση της φέρουσας ικανότητας σε οριζόντια φορτία καθώς και σε ικανά ποσά απόσβεσης ενέργειας κατά την διάρκεια της ανακυκλιζόμενης φόρτισης.
- 2) Αυτού του τύπου ο σύνδεσμος μπορεί να έχει θετική επιρροή, ως ένα βαθμό, κατά την διάρκεια μιας σεισμικής διέγερσης-απόκρισης τέτοιων δομικών συστημάτων, περιορίζοντας μεγάλες παραμένουσες μετακινήσεις ολίσθησης και λικνισμού, που μπορεί να οδηγήσουν σε γεωμετρικά ασταθή συστήματα. Η απόσβεση ενέργειας εντός του συνδέσμου, είναι ένας άλλος μηχανισμός με θετική επιρροή, όταν αυτός μπορεί να ενεργοποιηθεί. Στα πειράματα των δύο σφονδύλων ο μηχανισμός αυτός διερευνήθηκε σε βάθος ενώ στα πειράματα του ομοιώματος της κιονοστοιχίας ο

μηχανισμός αυτός δεν ενεργοποιήθηκε σε αξιόλογο βαθμό. Αυτό θα πρέπει να αποδοθεί στους περιορισμούς του φυσικού ομοιώματος που χρησιμοποιήθηκε. Μια αντίστοιχη μελλοντική διερεύνηση αναμένεται να ρίξει αφετέρου φως στην επιρροή των συνδέσμων σε τέτοιας μορφής δομικά σύνολα.

- 3) Ο συντελεστής τριβής που μετρήθηκε από τα πειράματα των στατικών ή των δυναμικών φορτίσεων δεν παρουσιάζει σημαντικές μεταβολές. Αντίθετα μεγάλες μεταβολές του συντελεστή τριβής μετρήθηκαν κατά την διάρκεια πειραμάτων στατικής φόρτισης, ειδικότερα για τους μαρμάρινους σφονδύλους που οφείλεται σε αλλοιώσεις της διεπιφάνειας ολίσθησης λόγω της εκτεταμένης πειραματικής ακολουθίας.
- 4) Η αριθμητική προσομοίωση της σύνθετης συμπεριφοράς ολίσθησης δύο σφονδύλων με ή χωρίς κεντρικό σύνδεσμο, κάτω από στατικές οριζόντιες φορτίσεις άριστα επιτυχής. Επιτεύχθηκε προσέγγιση στην πιο σημαντική μορφή απόκρισης που παρατηρήθηκε πειραματικά. Ειδικότερα έγινε ικανοποιητική προσέγγιση της επιρροής της διαμέτρου του πόλου να έχει σαν αποτέλεσμα, όπως αναφέρθηκε την σημαντική αύξηση της φέρουσας ικανότητας του συστήματος των δύο σφονδύλων. Επίσης αναπτύχθηκε και στις αριθμητικές προσομοιώσεις, μη γραμμική συμπεριφορά που οφείλεται αφενός στην ολίσθηση αφετέρου στη δημιουργία λόγω της παραλαμβανόμενης εντάσεως, μερικής πλαστικοποίησης, τόσο του πόλου, όσο και του εμπολίου. Τέλος η αναλυτική πρόβλεψη της απόκρισης ολίσθησης δύο σφονδύλων που υποβάλλονται σε ημιτονοειδής διεγέρσεις της βάσης συμφωνεί σε ικανοποιητικό βαθμό με την παρατηρηθείσα συμπεριφορά.



## **SUMMARY**

### **INFLUENCE OF CONNECTIONS BETWEEN STRUCTURAL MEMBERS IN THE SEISMIC BEHAVIOR OF ANCIENT MONUMENTS OF THE CLASSIC – HELLENISTIC AND ROMAN PERIOD**

This research effort was aimed to investigate the influence that ancient type connections (empolia – pole) have on the seismic response of ancient monuments of the classic-Hellenistic-roman period. Towards these objective physical models of members of this type of monuments were subjected to a variety of loading conditions in order to simulate the state of stress these members will be subjected under seismic actions.

#### **The physical models that were utilized included:**

- Models of two marble column drums, with or without connections.
- Models of two steel column drums, with or without connections.
- Small scale model of a colonnade consisting of four columns and an epistyle (with or without connections).

Steel column drums were better suited for the experimental sequence as they did not required large levels of horizontal forces in order to introduce sliding between the drums and thus study the influence and behavior of the connection in-place between the drums, instead of the marble drums. Moreover, the marble drums developed changes at the sliding surfaces after repeated sliding experiments.

The studied ancient type connection was a central connection with empolia and central pole between the two drums with dimensions having an analogy to prototype connections similar to the one used to reduce the dimensions of the model drums. Information on this type of ancient type connections was found in the literature as well as from an in-situ survey.

The tried in the laboratory connections were formed with a variety of materials and geometry for the central part. Thus, for the external part (empolia) lead as well as wooden inserts were formed that could fit exactly in the specially formed cavities that were made in the central part of the drums. The dimensions of these inserts (empolia) were kept constant throughout the largest part of the investigation. The central part of the connection (pole) was made mainly of various types of wood. The influence that the size of the pole (diameter) exercised on the observed behavior was studied by introducing poles with a variety of diameters ranging from 10mm to 40mm.

#### **The experimental sequence utilized the following types of loading facilities:**

- a) Initially, the system of two drums (marble or steel), with or without connections, were subjected to low velocity cyclic horizontal forces in order to introduce sliding displacements between these drums. Various levels of stress normal to the sliding surface were introduced by attaching extra weight on the top drum.

- b) The same system of two drums, with or without connections, was attached on a strong reaction frame whereby a desired level of stress normal to the sliding surface could be introduced simultaneously with applying a horizontal force leading the top drum to slide against the bottom. A large number of experiments was conducted here by varying, apart from the type of sliding surface, the type of connection in terms of type of empolia (metal or wood) and type and size (diameter) of the central pole.
- c) Next, the same as in b) system of two drums, with or without connections, was attached on the shaking table of Aristotle University and was subjected to horizontal simulated motions with a variety of intensity. Again, the influence of the presence of the central connection was studied here.
- d) Finally, a small physical model of a colonnade, consisting of four marble columns and an epistyle also made of marble, was studied at the shaking table. This physical model was also subjected to a variety of simulated horizontal motions of varying intensity. Again, during these test the connections of the four model to their marble base slab was studied by performing similar experiments with or without these connections.

**The following summarize the most important behavioral characteristics that were observed from the whole investigation.**

- 1) The presence of the connections inhibits, up to a degree, the sliding between the drums. This can lead to an increase in the bearing capacity of the sustained horizontal load by a such type structural system. Moreover, an increase in the diameter of the central pole, when combined with the proper empolia, can result to a significant increase of this bearing capacity. In addition, significant amounts of energy can be dissipated during the cycling displacements of such connections.
- 2) This type of connection can have beneficial effects during the seismic response of assemblies formed by drums and epistylia, by inhibiting again, up to a degree, large sliding and rocking displacements, thus preventing the development of geometrically unstable structural formations. The beneficial effect of energy dissipation is also another positive factor, that could not be observed as being mobilized during this investigation with the shaking table and the colonnade, although its occurrence was very clear during the tests with the two drums (both at the strong reaction frame and at the shaking table. This must be attributed to the limitations of the physical model of the marble colonnade utilized during this experimental sequence. A future sequence, which will be based on all the knowledge gained here, could be more successful in this aspect.
- 3) The coefficient of friction between the static and the dynamic experiments of the same system of two drums did not exhibit significant variations. On the contrary, significant variations were observed in the value of the coefficient of friction due to

changes of the sliding surface introduced by the extended forcing sequence and the large numbers of repeated experiments.

- 4) The numerical simulation of the complex sliding behavior of two drums with or without central connection, with characteristics similar to the ones studied experimentally, under monotonic horizontal static force was successful in reproducing the most important aspects of this complex observed response. In particular, the influence of the diameter of the pole in increasing the bearing capacity to horizontal forces of such an assembly as well as the development of non-linear behavior due to sliding as well as the plastification of the empolia and pole was successfully approximated by this numerical simulation. The analytical simulation of the sliding behavior of the two drums under sinusoidal input motions agrees well with the observed behavior during this experimental sequence.



