

**“Εξέταση της σεισμικής συμπεριφοράς δομικών στοιχείων  
αρχαίων μνημείων μέσα από τη μελέτη της δυναμικής απόκρισης  
ομοιωμάτων συμπαγών σωμάτων μεμονωμένων ή σε ομάδες”  
Συντονισμένο πρόγραμμα εφαρμοσμένης έρευνας**

A/A χρον. καταλ.: 141/2

Έτος ανάθεσης: 1992

Έτος περάτωσης: 1996

Επιστημονικός Υπεύθυνος: **Γεώργιος Χ. Μάνος**, Καθηγητής Α.Π.Θ.

**Π Ε Ρ Ι Λ Η Ψ Η**

Αντικείμενο του παρόντος ερευνητικού έργου είναι η μελέτη της συμπεριφοράς ομοιωμάτων δομικών στοιχείων των αρχαίων ελληνικών και ρωμαϊκών μνημείων που έχουν ως βασικό δομικό σύστημα την κιονοστοιχία. Στην εισαγωγή του δευτέρου μέρους του παρόντος ερευνητικού προγράμματος περιγράφεται το φυσικό πρόβλημα και γίνεται σχετική αναφορά στην υπάρχουσα βιβλιογραφία. Προσδιορίζονται επίσης οι βασικές αρχές μέσα από τις οποίες επιχειρείται στη συνέχεια η εξέταση αυτού του προβλήματος στα πλαίσια του παρόντος ερευνητικού προγράμματος. Η έρευνα αυτή γίνεται μέσα από την εξέταση της δυναμικής συμπεριφοράς ομοιωμάτων μονολιθικών και σφονδυλωτών μεμονωμένων κίωνων ή σε ομάδες που αποτελούν τμήματα κιονοστοιχιών. Τα ομοιώματα αυτά που στο εξής θα καλούνται και συμπαγή ή σφονδυλωτά στερεά σώματα μελετήθηκαν τόσο πειραματικά όσο και αριθμητικά στη Διάταξη Τεχνητών Σεισμών του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Α.Π.Θ. Η εξέτάσή τους έγινε για διαφόρων τύπων δυναμικές διεγέρσεις και μετρήθηκε ή και υπολογίστηκε η αντίστοιχη δυναμική απόκρισή τους. Η όλη ερευνητική προσπάθεια εξελίχθηκε σε τέσσερις φάσεις. Οι επιμέρους στόχοι και τα αποτελέσματα κάθε φάσης παρατίθενται στις επόμενες παραγράφους υπό μορφή σύντομης περίληψης ενώ εκτενής αναφορά γίνεται στο δεύτερο μέρος του παρόντος ερευνητικού προγράμματος. Επίσης στις παραγράφους που ακολουθούν γίνεται αναφορά και στα επιμέρους προβλήματα ή δυσκολίες στη διάρκεια εκτέλεσης αυτού του ερευνητικού προγράμματος καθώς και της σχετικής προβολής που έτυχαν τα αποτελέσματα από αυτήν την έρευνα.

**Φάση Α (διάρκεια 12 μήνες)**

Η φάση Α περιλαμβάνει την πειραματική μελέτη των ομοιωμάτων των μεμονωμένων κίωνων. Για το σκοπό αυτό κατασκευάστηκαν τρεις διαφορετικές γεωμετρικές μορφές κίωνων τόσο σε μονολιθική όσο και σφονδυλωτή μορφή. Τα ομοιώματα αυτά, που είναι ένας κώλουρος κώνος, ένας κύλινδρος και ένα ορθογωνικό πρίσμα, σε κλίμακα 1:20 προσομοιώνουν πρωτότυπες μορφές αρχαίων κίωνων. Εξετάστηκαν οι περιπτώσεις των μονολιθικών (ολόσωμων) και σφονδυλωτών κίωνων με συνθήκες ελεύθερης έδρασης καθώς και ενός μονολιθικού όταν αυτός ήταν αγκυρωμένος στη βάση έδρασής του. Από την πειραματική μελέτη διαπιστώθηκε ότι κυρίαρχες μορφές απόκρισης αυτού του είδους των αρχαίων κίωνων, που εδώ εξετάστηκαν μέσα από τη μελέτη των πιο πάνω ομοιωμάτων, είναι η λικνιστική απόκριση και η απόκριση σε ολίσθηση. Οι μορφές αυτές προσδιορίζουν άνω όρια της απόκρισης των επιταχύνσεων ενώ η αστοχία τους που εν γένει προσδιορίζεται από την ανατροπή τους, οφείλεται στην ανάπτυξη σχετικών μετατοπίσεων μεταξύ των σφονδύλων ή στη βάση καθώς και γωνιών λικνισμού που οδηγούν σε ανατροπή τόσο του σφονδυλωτού όσο και του μονολιθικού κίονα. Η πιο πάνω εξέταση έγινε για τις περιπτώσεις ελεύθερων λικνιστικών ταλαντώσεων για τα μονολιθικά ομοιώματα καθώς και ημιτονοειδών και σεισμικών διεγέρσεων της βάσης έδρασης τους τόσο για τα μονολιθικά όσο και

για τα σφονδυλωτά ομοιώματα. Από αυτή την εξέταση μελετήθηκαν η λικνιστική απόκριση τους (καταγραφή των γωνιών λικνισμού) καθώς και η απόκριση των επιταχύνσεών τους. Ιδιαίτερα για τα σφονδυλωτά ομοιώματα καταγράφηκε η κατανομή των επιταχύνσεων καθ' ύψος των σφονδύλων για διάφορα επίπεδα και συχνότητες διέγερσης. Μελετήθηκε επίσης το θέμα της ευσταθούς λικνιστικής απόκρισης (λικνισμός χωρίς ανατροπή) καθώς και της ασταθούς απόκρισης (ανατροπή) τόσο των μονολιθικών όσο και των σφονδυλωτών ομοιωμάτων. Η εξέταση αυτή έγινε για ένα εύρος συχνοτήτων ημιτονοειδής διέγερσης και για διάφορα πλάτη διέγερσης καθώς επίσης και σε σεισμικές διέγερσεις με βάση πρωτότυπες καταγραφές για διάφορα επίπεδα έντασης της διέγερσης. Τέλος εξετάστηκαν πειραματικά, με τη βοήθεια ειδικής διάταξης που κατασκευάστηκε γι' αυτό το σκοπό, τα φορτία που μεταβιβάζονται στη βάση έδρασης των πιο πάνω ομοιωμάτων λόγω της ταυτόχρονης απόκρισης τους σε ολίσθηση και λικνισμό καθώς και της περίπτωσης ενός μονολιθικού ομοιωματος όταν ήταν πακτωμένο στη βάση του.

### **Φάση Β (Διάρκεια 6 μήνες)**

Στόχος της φάσης αυτής ήταν η ανάπτυξη ενός λογισμικού ικανού να προβλέπει το ιστορικό της λικνιστικής απόκρισης ενός συμπαγούς σώματος (μονολιθικού κίονα) για διάφορες μορφές διέγερσης της βάσης του καθώς και σε ελεύθερες λικνιστικές ταλαντώσεις. Γι' αυτό, εξετάστηκαν διάφοροι μέθοδοι αριθμητικής ολοκλήρωσης των εξισώσεων της λικνιστικής κίνησης. Επίσης έγιναν σχετικές διερευνήσεις της τιμής του βήματος αριθμητικής ολοκλήρωσης ώστε να προκύπτουν αξιόπιστα αποτελέσματα. Οι εξισώσεις που περιγράφουν αυτή την κίνηση στη γενική τους μορφή, όπου λαμβάνεται υπόψη και η διέγερση της βάσης, δεν έχουν αναλυτική επίλυση γι' αυτό γίνεται χρήση των αριθμητικών μεθόδων ολοκλήρωσης.

Στην περίπτωση όμως που θεωρείται μηδενική η διέγερση της βάσης και το σώμα εκτελεί ελεύθερη λικνιστική ταλάντωση, κάτω από ορισμένες παραδοχές, είναι δυνατή η εύρεση της αναλυτικής λύσης του προβλήματος. Σε πρώτη φάση αναπτύχθηκε ένα λογισμικό το οποίο επιλύει το πρόβλημα στην πιο πάνω περίπτωση που επιδέχεται αναλυτική λύση, δηλ. για ελεύθερη λικνιστική ταλάντωση. Στη συνέχεια, το βήμα και οι αριθμητικές μέθοδοι που διερευνήθηκαν, ελέγχθηκαν μέσα από τη σύγκριση των αριθμητικών αποτελεσμάτων με τα αντίστοιχα αναλυτικά αποτελέσματα σε ελεύθερες λικνιστικές ταλαντώσεις του στερεού σώματος. Έτσι λοιπόν, έγινε κατορθωτή η ανάπτυξη ενός λογισμικού η αξιοπιστία του οποίου ελέγχθηκε στη φάση αυτή πριν χρησιμοποιηθεί στη φάση Δ του παρόντος ερευνητικού προγράμματος για τη σύγκριση αριθμητικών και πειραματικών αποτελεσμάτων. Τέλος θα πρέπει να αναφερθεί ότι το λογισμικό αυτό μπορεί να προβλέψει τόσο την περίπτωση ελεύθερης λικνιστικής ταλάντωσης όσο και την περίπτωση που η βάση του σώματος διεγείρεται με ημιτονοειδή, σεισμική ή τυχαία διέγερση. Σ' αυτές τις περιπτώσεις όμως, θα πρέπει να είναι γνωστό το ιστορικό της διέγερσης.

### **Φάση Γ (Διάρκεια 24 μήνες)**

Στόχος αυτής της φάσης ήταν η πειραματική μελέτη της δυναμικής απόκρισης ομοιωμάτων τμημάτων κιονοστοιχιών. Είναι γνωστό ότι κατά την αρχαιότητα γινόταν χρήση συνδέσμων στην κατασκευή διαφόρων δομημάτων ανάμεσα στα οποία και οι κατασκευές που εξετάζονται στα πλαίσια αυτού του ερευνητικού προγράμματος. Γι' αυτό σε πρώτο στάδιο έγινε μελέτη αυτών των συνδέσμων, μέσα από βιβλιογραφικές πηγές και επιτόπου επισκέψεις σε αρχαία μνημεία, με στόχο να αξιολογηθεί η επιρροή τους στη συνολική σεισμική απόκριση ενός μνημείου. Από αυτή την εξέταση διαπιστώθηκε ότι το πρόβλημα αυτό θα πρέπει να τύχει ευρύτερης διερεύνησης, γεγονός που ξεφεύγει από τα πλαίσια του παρόντος ερευνητικού προγράμματος. Αποφασίστηκε ωστόσο, η κατασκευή των υπό εξέταση ομοιωμάτων κιονοστοιχιών να γίνει χωρίς τη χρήση συνδέσμων, γεγονός που έχει ρεαλιστική βάση, σύμφωνα με την πιο πάνω διερεύνηση που έχει γίνει. Κατασκευάστηκε λοιπόν, μια κιονοστοιχία από τέσσερις συνολικά κίονες που σε κλίμακα 1:20 αντιπροσωπεύει τμήμα της κιονοστοιχίας πραγματικών κατασκευών. Λόγω της σχετικής πολυπλοκότητας του προβλήματος καθώς και του ότι μέχρι

σήμερα δεν έχει γίνει παρόμοια έρευνα, για την ολοκλήρωση αυτής της πειραματικής διερεύνησης απαιτήθηκε αφενός η κατασκευή ειδικών βοηθητικών εργαστηριακών διατάξεων και αφετέρου η αντιμετώπιση για πρώτη φορά αρκετών προβλημάτων. Για τους λόγους αυτούς, αλλά και για να προσεγγιστεί το πρόβλημα καλύτερα, η μελέτη αυτή περιορίστηκε σε μια κιονοστοιχία δύο κίωνων. Η πειραματική αυτή μελέτη περιλάμβανε τόσο πειράματα ελεύθερων λικνιστικών ταλαντώσεων όσο και ημιτονοειδείς και σεισμικές διεγέρσεις της βάσης. Από την εξέταση αυτή έγινε δυνατή η καταγραφή της απόκρισης των επιταχύνσεων και των μετατοπίσεων τόσο των κίωνων της κιονοστοιχίας όσο και του επιστυλίου. Ακολουθώντας, τα αποτελέσματα από αυτή τη μελέτη συγκρίθηκαν με τα αποτελέσματα του μεμονωμένου κίονα, για αντίστοιχες περιπτώσεις διέγερσης, και διατυπώθηκαν σχετικά συμπεράσματα αναφορικά με τη δυναμική απόκριση τέτοιων συστημάτων.

#### **Φάση Δ (Διάρκεια 12 μήνες)**

Στη φάση αυτή καταβλήθηκε προσπάθεια αριθμητικής μελέτης των συμπαγών σωμάτων που εξετάστηκαν πειραματικά στη φάση Α. Η μελέτη αυτή έγινε με τη βοήθεια του λογισμικού που αναπτύχθηκε στη φάση Β. Εξετάστηκαν και τα τρία συμπαγή σώματα, δηλ. ο κώλουρος κώνος, ο κύλινδρος και το ορθογωνικό πρίσμα. Σε πρώτο στάδιο μελετήθηκε η ευσταθής και ασταθής απόκριση αυτών των σωμάτων σε ημιτονοειδείς διεγέρσεις και για διάφορα πλάτη διέγερσης και προσδιορίστηκαν οι περιοχές συχνότητας και πλάτους διέγερσης, στις οποίες τα σώματα αυτά παρακολουθούν την κίνηση της βάσης χωρίς να λικνίζονται, αναπτύσσουν ευσταθή λικνιστική απόκριση ή ανατρέπονται. Τα αποτελέσματα από αυτή την αριθμητική εξέταση συγκρίνονται με τα αντίστοιχα πειραματικά αποτελέσματα με τα οποία είναι σε πολύ καλή συμφωνία. Σε δεύτερο στάδιο μελετήθηκε η απόκριση στο χρόνο και των τριών σωμάτων τόσο σε ημιτονοειδείς όσο και σε σεισμικές διεγέρσεις χρησιμοποιώντας ως διέγερση τις αντίστοιχες καταγραφές από την πειραματική ακολουθία. Τα αποτελέσματα από αυτή τη μελέτη συγκρίνονται στη συνέχεια με τα αντίστοιχα πειραματικά αποτελέσματα τόσο στο πεδίο του χρόνου όσο και σε μέγιστες τιμές της γωνίας λικνισμού όπου διαπιστώθηκε πολύ καλή συμφωνία.

#### **Επιστημονικά επιτεύγματα και παρουσίαση των αποτελεσμάτων αυτής της έρευνας**

Οι εργασίες που διεξήχθησαν στα πλαίσια του παρόντος ερευνητικού έργου στη Διάταξη Τεχνητών Σεισμών του Α.Π.Θ., συνέβαλαν στην κατανόηση του τρόπου συμπεριφοράς αρχαίων κίωνων και κιονοστοιχιών σε σεισμικές διεγέρσεις και στην ανάπτυξη σχετικής τεχνογνωσίας. Τα σημαντικότερα συμπεράσματα που προκύπτουν από την έρευνα που έχει γίνει είναι:

- Οι κυρίαρχες μορφές απόκρισης των συμπαγών και σφονδυλωτών ομοιωμάτων αρχαίων κίωνων σε σεισμικές διεγέρσεις είναι ο λικνισμός και η ολίσθηση είτε μεταξύ των σφονδύλων είτε στη βάση έδρασής τους. Πρόκειται για έντονα μη γραμμικές μορφές απόκρισης.
- Οι δύο μορφές απόκρισης συνυπάρχουν τόσο στην περίπτωση των συμπαγών σωμάτων όσο και στην περίπτωση των σφονδυλωτών.
- Καθοριστικές παράμετροι της απόκρισης σε ολίσθηση είναι ο στατικός και δυναμικός συντελεστής τριβής μεταξύ των επιφανειών των σωμάτων και για τη λικνιστική απόκριση ο συντελεστής αποκατάστασης ή κρούσης και η φυσική λικνιστική συχνότητα. Η απόκριση των στερεών σωμάτων σε ολίσθηση και λικνισμό επηρεάζεται σημαντικά από τις τιμές αυτών των παραμέτρων όπου τυχόν μεταβολή τους μεταβάλλει σημαντικά και την απόκριση αυτών των σωμάτων.
- Η απόκριση των επιταχύνσεων των στερεών σωμάτων τόσο σε ολίσθηση όσο και σε λικνισμό παρουσιάζει άνω όρια ενώ εν γένει η αστοχία τους καθορίζεται από την ανατροπή τους που οφείλεται σε σχετικά μεγάλες μετατοπίσεις ή γωνίες λικνισμού.
- Η ευσταθής απόκρισή τους εξαρτάται τόσο από το επίπεδο της διέγερσης όσο και από το περιεχόμενο των

συχνοτήτων αυτής. Γενικώς, τόσο για τη συμπαγή όσο και για τα σφονδυλωτά σώματα διαπιστώθηκε ότι αυξανόμενη της συχνότητας διέγερσης απαιτούνται μεγαλύτερα πλάτη διέγερσης για να επέλθει ανατροπή των σωμάτων.

- Τα εντατικά μεγέθη που αναπτύσσονται στη βάση έδρασης αυτών των σωμάτων συναρτώνται άμεσα με το επίπεδο της απόκρισης τους.
- Επίσης, ένα ομοίωμα κιονοστοιχίας από δύο κίονες, που έχει μελετηθεί πειραματικά σε δυναμικές διεγέρσεις, παρουσίασε παρόμοια συμπεριφορά με τα ομοιώματα μεμονωμένων κίωνων (συμπαγή και σφονδυλωτά σώματα).

Όπως έχει αναφερθεί κατά τη διάρκεια εκτέλεσης του παρόντος ερευνητικού προγράμματος έχει αναπτυχθεί σχετική τεχνογνωσία η οποία συνοψίζεται στα παρακάτω θέματα:

- Ανάπτυξη λογισμικού ικανού να προβλέψει την απόκριση των ελεύθερα εδραζομένων στερεών σωμάτων σε δυναμικές διεγέρσεις της βάσης του.
- Απόκτηση τεχνογνωσίας όσον αφορά την πειραματική μελέτη στερεών σωμάτων σε δυναμικές διεγέρσεις και αντιμετώπιση σχετικών προβλημάτων στη λήψη πειραματικών μετρήσεων.
- Συγκέντρωση βιβλιογραφίας που αναφέρεται στα πιο πάνω θέματα καθώς και στην κατανόηση της σεισμικής συμπεριφοράς αρχαίων μνημείων.

Μέρος των αποτελεσμάτων αυτού του ερευνητικού προγράμματος έχει παρουσιαστεί και δημοσιευθεί σε πρακτικά διεθνών συνεδρίων για την προστασία και συντήρηση αρχαίων μνημείων. Οι συμμετέχοντες σ' αυτά τα συνέδρια σχολίασαν πολύ ευνοϊκά τα αποτελέσματα που προέκυψαν απ' αυτό το ερευνητικό και επικρότησαν την όλη μεθοδολογία που εφαρμόζεται. Αξιοσημείωτο ήταν επίσης το ιδιαίτερο ενδιαφέρον που επέδειξαν για τα αποτελέσματα αυτού του ερευνητικού έργου οι υπεύθυνοι μηχανικοί διαφόρων επιτροπών συντήρησης αρχαίων μνημείων. Το σύνολο των αποτελεσμάτων αυτού του ερευνητικού έργου πρόκειται να δημοσιευθούν σε επιστημονικά περιοδικά και να ανακοινωθούν σε διεθνή συνέδρια.