

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

5. ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΕΚΤΙΜΗΣΗ τών “ΕΝΕΡΓΩΝ” ΦΑΣΜΑΤΙΚΩΝ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΕΩΝ : ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ

5.1 Αντίστροφη Ανάλυση Βλαφθέντος Υδατοπύργου Δεκελείας

5.1.1. Γενική Περιγραφή

Ο εν-λόγω υδατόπυργος βρίσκεται στην άκρη τών εγκαταστάσεων τής Σχολής Ικάρων, στο Τατόι, δίπλα στο υπό-κατασκευήν Ολυμπιακό Χωριό. Ο φέρων οργανισμός τού δομήματος είναι από οπλισμένο σκυρόδεμα, και αποτελείται από τέσσερις πτερυγοτοίχους παραβολικής μορφής καί έναν κεντρικό πυρήνα σωληνοειδούς διατομής. Οι πτερυγότοιχοι συνδέονται μονολιθικώς με τον κεντρικό πυρήνα. Το συνολικό ύψος τού υδατοπύργου είναι 27 m, ενώ τής δεξαμενής 7 m. Την ημέρα του σεισμού η δεξαμενή είχε νερό έως την στάθμη τών 6 m.

5.1.2 Συμπεριφορά τού Υδατοπύργου στον Σεισμό τής 7-9-99

Κατά την αυτοψία μας εντοπίσαμε σημαντική *ρηγμάτωση* τών δύο πτερυγοτοιχών στις ακραίες τους “ίνες” με ταυτόχρονο λυγισμό τού οπλισμού. Οι βλάβες αυτές περιορίζονται στην στάθμη τών 7-8 m περίπου από την επιφάνεια τού εδάφους, στους δύο από τους τέσσερις πτερυγοτοιχούς όπως φαίνεται στην επισυναπτόμενη φωτογραφία. Από τις ζημιές συμπεραίνουμε (με σύμφωνη γνώμη καί άλλων ειδικών) ότι ο χάλυβας υπέστη λυγισμό σε αξονική παραμόρφωση μικρότερη από την παραμόρφωση διαρροής του. Στο Σχήμα 5.1 δείχνεται φωτογραφικά ο υπό-εξέτασιν υδατόπυργος, καθώς και οι προαναφερθείσες βλάβες του. Το Σχήμα 5.2 παρουσιάζει κατακόρυφη τομή του υδατοπύργου.

Παρατηρήσαμε ότι ο υδατόπυργος, παρά την συμμετρία του,

υπέστη βλάβες μόνον κατά την μία διεύθυνση (δηλαδή σε δύο από τους τέσσερις πτερυγοτόιχους), γεγονός που μας επιτρέπει να εκτιμήσουμε ότι η κυρίαρχη διεύθυνση τής σεισμικής δόνησης ήταν περίπου $B120^\circ N$ --- δηλαδή περίπου παράλληλη προς το επίπεδο του ρήγματος.

5.1.3 Μεθοδολογία αναλύσεων

Για την προσομοίωση τής τριδιάστατης γεωμετρίας τού υδατοπύργου, έγινε χρήση του λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων Abaqus και Patran. Στο προσομοίωμα ο υδατόπυργος αντικαταστάθηκε από στοιχεία κελύφους, ενώ το νερό από τριδιάστατα (3-Δ) υβριδικά στοιχεία συνεχούς μέσου. Με το προσομοίωμα αυτό εκτελέσθηκαν οι εξής αναλύσεις :

- ανάλυση ιδιομορφών
- αριθμητική ανάλυση εν-χρόνω τής σεισμικής απόκρισης.
- στατική ανάλυση με μοναδιαία οριζόντια δύναμη στο κέντρο τής ενεργού μάζας (με βάση την πρώτη ιδιομορφή) τού υδατοπύργου.

Σκοπός τής ανάλυσης αυτής είναι να προσδιορισθεί η σχέση που συνδέει την επιτάχυνση στήν μάζα τού δομήματος με τις αναπτυσσόμενες στον φορέα αξονικές διαμήκεις παραμορφώσεις στις ακραίες ίνες.

5.1.4 Αποτελέσματα

Η θεμελιώδης ιδιοπερίδος τής κατασκευής (με σχεδόν γεμάτη δεξαμενή) εκτιμήθηκε ίση με $T \approx 0.75 \div 0.90 \text{ sec}$. Οι αβεβαιότητες στην εκτίμηση αναφέρονται κυρίως στην συμπεριφορά τών υλικών. Η συνολική μάζα τού υδατοπύργου (πάντοτε με σχεδόν γεμάτη δεξαμενή) υπολογίστηκε περί τα 360 Mg, ενώ η ενεργός μάζα του (με βάση την πρώτη ιδιομορφή) περί τα 270 Mg. Η δεύτερη

ιδιοπερίοδος (κατά την διεύθυνση τής σεισμικής διέγερσης) εκτιμήθηκε ίση με $T \approx 0.22 \text{ sec}$.

Στο Σχήμα 5.3 παρουσιάζεται ο κάρναβος των πεπερασμένων στοιχείων, και η πρώτη ιδιομορφή του δομήματος (με σχεδόν γεμάτη δεξαμενή), αντιστοίχως, κατά την διεύθυνση της σεισμικής διέγερσης.

Τα Σχήματα 5.4 – 5.5 απεικονίζουν την υπολογισθείσα δυναμική απόκριση τού δομήματος υπό την μορφή τής χρονικής μεταβολής τής επιτάχυνσης στο κέντρο τής ενεργού μάζας τού υδατοπύργου, και τής αξονικής διαμήκου παραμόρφωσης στην περιοχή όπου αυτή λαμβάνει την μέγιστη τιμή της, για επιλεγμένες διεγέρσεις, (βλ. επόμενο κεφάλαιο) με τις καταγραφές Σεπολίων και ΚΕΔΕ, αντιστοίχως.

[Λεπτομερής παρουσίαση των αποτελεσμάτων των δυναμικών αναλύσεων του υδατοπύργου γίνεται σε επόμενο ξεχωριστό κεφάλαιο.]

Παρατηρούμε ότι η διέγερση αυτή προκαλεί επιτάχυνση στο κέντρο τής δεξαμενής ίση με 0.21 g και αξονική παραμόρφωση 0.035% περίπου. Η παρατηρηθείσα βλάβη αντιστοιχεί σε μιάμιση έως δύο φορές περίπου μεγαλύτερη παραμόρφωση. Η αντίστοιχη αυξημένη (με επικλιμάκια αναγωγή) διέγερση στην βάση, δίνει την φασματική επιτάχυνση \bar{S}_A για την ιδιοπερίοδο τής κατασκευής T .

Όλες οι διεγέρσεις στην βάση έχουν τροποποιηθεί (με επικλιμάκια αναγωγή) ώστε η υπολογιστικά αναπτυσσόμενη μέγιστη αξονική παραμόρφωση τού υδατοπύργου (στην περιοχή τών παρατηρηθεισών βλαβών) να είναι ίση με 0.05% περίπου. Η παραμόρφωση αυτή έχει εκτιμηθεί ότι αντιστοιχεί στις παρατηρηθείσες βλάβες.

Ετσι, λαμβάνοντας υπόψη και τις πιθανές αβεβαιότητες στους υπολογισμούς, καταλήγουμε στο εξής εύρος τιμών “ενεργού”

φασματικής επιτάχυνσης και ιδιοπεριόδου :

$$\bar{S}_A \approx 0.20 \div 0.25 g, \quad T \approx 0.75 \div 0.90 \text{ sec}$$

Οι τιμές αυτές ισχύουν για την περιοχή του Υδατοπύργου, 4 km περίπου ανατολικά του κέντρου των Αχαρνών και 6 km από την προβολή του ρήγματος στην επιφάνεια της γής.

5.2 Πύλες της Οδού Διαγορα (Αχαρνών) : Σεισμικές Βλάβες, Πείραμα σε Φυσική Κλίμακα, Αντίστροφη Ανάλυση

5.2.1 Εισαγωγή - Το Πείραμα

Στόχος της έρευνας που παρουσιάζεται εν-συντομία μόνον στο παρόν κεφάλαιο (λεπτομερώς δε στο Κεφάλαιο Β του Μέρους Β) είναι η εκτίμηση των σεισμικών επιταχύνσεων που θα είχαν διεγείρει τις κατασκευές στην περιοχή των Αχαρνών κατά τον σεισμό της 7-9-99. Πρός τον σκοπόν αυτό αποφασίσθηκε η διερεύνηση της συμπεριφοράς δύο "απλών" κατασκευών. Δύο δίστυλων πλαισίων από ωπλισμένο σκυρόδεμα στην περιοχή Αχαρνών. Πρόκειται για τις δύο πύλες μίας τριόροφης μονοκατοικίας, η μία από τις οποίες (ανοίγματος 3 m) υπέστη σημαντική καμπτική ρηγμάτωση ενώ η άλλη (ανοίγματος 1.55 m, αλλά κατά τα άλλα πανομοιότυπη με την πρώτη) παρέμεινε σχεδόν άθικτη.

Για τον προσδιορισμό της συμπεριφοράς των δύο πυλών στον σεισμό και κατ' επέκτασιν την εκτίμηση υπολογιστικώς των σεισμικών επιταχύνσεων στην περιοχή, εκτελέσθηκαν δύο επιτόπου δοκιμές Push-Over (δηλαδή μονοτονικής και επαναλαμβανόμενης εγκάρσιας φόρτισης) σε φυσική κλίμακα, κατά διεύθυνση κάθετη στο επίπεδο των πυλών. Οι δοκιμές αυτές αποτέλεσαν το θεμέλιον λίθο της επιχειρούμενης έμμεσης εκτίμησης των σεισμικών επιταχύνσεων. Εκτελέστηκαν όμως επιπλέον και δοκιμές δυναμικής (κρουστικής) εξαίτησης

Στο Σχήμα 9.1, όπου παρουσιάζεται σε αδρή προσέγγιση η κατανομή των βλαβών της περιοχής των Αχαρνών, απεικονίζεται και η τοποθεσία των δύο πυλών επί της οδού Διαγόρα.

[Λεπτομερής παρουσίαση της όλης πειραματικής και αναλυτικής έρευνας γίνεται σε επόμενο ξεχωριστό κεφάλαιο (Μέρος Β, Κεφάλαιο Β). Μόνον τα κυριότερα σημεία και συμπεράσματα της μελέτης αυτής δίδονται στο παρόν κεφάλαιο.]

Πρόκειται στην ουσία για δύο δίστυλα πλαίσια από ωπλισμένο σκυρόδεμα. Το μεγαλύτερο έχει άνοιγμα 3 m και ύψος 1.55 m ("μεγάλη" πύλη) ενώ το άνοιγμα και το ύψος του δευτέρου πλαισίου είναι 1.55 m και 1.50 m, αντιστοίχως ("μικρή" πύλη). Το επίπεδο των πυλών έχει διεύθυνση 15° δεξιόστροφα από τον βορρά, δηλαδή περίπου κάθετη προς την διεύθυνση του ρήγματος --- άρα η διεύθυνση φορτίσεως στο πείραμα συμπίπτει με την κυρίαρχη (κατά τεκμήριο) διεύθυνση του σεισμικού κραδασμού. Η όπλιση αμφοτέρων των πυλών παρουσιάζει έντονη ασυμμετρία χωρίς επαρκές μήκος αγκυρώσεως στους κόμβους και χωρίς οπλισμό περίσφυξης. Οι δύο πύλες δείχνονται στα Σχήματα 5.6 και 5.7, μαζί με ένα στιγμιότυπο από την εκτέλεση του πειράματος.

5.2.2 Συμπεριφορά των Πυλών στον Σεισμό της 7-9-99

Μικρή Πύλη

Κατά την διάρκεια του σεισμικού επεισοδίου αναπτύχθηκαν ελαφρότατες τριχοειδείς ρωγμές στον αστράγαλο των δύο υποστυλωμάτων. Οδηγούμαστε στο συμπέρασμα ότι η σεισμική απόκριση της μικρής πύλης ήταν οιονεί ελαστική.

Δημιουργήθηκαν ελαφρές ρωγμές στους πόδες και των δύο υποστυλωμάτων (περισσότερες σε αυτόν προς Βορράν). Στην κεφαλή των δύο στύλων, κάτω από το “ζύγωμα”–σκέπαστρο, αναπτύχθηκαν χαρακτηριστικές διαμπερείς ελαφρές ρηγματώσεις, σε προφανή (άν και αθέλητον) αρμό διακοπής της σκυροδέτησης. Οι ρωγμές της μεγάλης πύλης είχαν σαφώς μεγαλύτερο εύρος από τις ρωγμές της μικρής, εξού και το συμπέρασμα ότι η μεγάλη πύλη καταπονήθηκε εντόνως μή-γραμμικά κατά την διάρκεια του σεισμού. Πόσο μή γραμμικά προκύπτει από το Πείραμα και την ανάλυση.

5.2.3 Μεθοδολογία Αναλύσεων — Αξιολόγηση των Αποτελεσμάτων της Δοκιμής Push-Over

Το Προσομοίωμα και οι Σεισμικοί Κραδασμοί Υπολογισμού

Για την προσομοίωση της τριδιάστατης (3-Δ) φύσης του προβλήματος (διδιάστατη μεν η γεωμετρία των πυλών, η φόρτιση όμως έγινε σε διεύθυνση κάθετη προς το επίπεδό τους) γίνεται χρήση λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων Abaqus / Patran.

Στο προσομοίωμα οι πύλες έχουν αντικατασταθεί από 3-Δ στοιχεία δοκού . Η αλληλεπίδραση της θεμελίωσης των πυλών με το έδαφος παριστάνεται με δύο κατηγορίες ελατηρίων προσαρτημένων στα σημεία “έδρασης” των υποστυλωμάτων. Συγκεκριμένα για κάθε έναν τύπο εδαφικής αντίδρασης έχουμε :

- οριζόντιο μετακινησιακό ελατήριο σχετιζόμενο με την οριζόντια διάτμηση στην βάση της θεμελίωσης
- στροφικό ελατήριο σχετιζόμενο με την ροπή αντιδράσεως λόγω περιστροφής στην βάση του θεμελίου.

Για τον προσδιορισμό των σχέσεων φορτίου--μετατόπισης--παραμόρφωσης των δύο πλαισίων αξιοποιήθηκαν τα αποτελέσματα

των δοκιμών Push-Over . Τα διαγράμματα δύναμης---μετακίνησης που καταγράφηκαν στο πείραμα δίδονται στο Σχήμα 5.8 για την μικρή και την μεγάλη πύλη αντιστοίχως.

Ο προσδιορισμός των σχέσεων ροπής--καμπυλότητας των διατομών των υποστυλωμάτων πραγματοποιήθηκε με δύο διαφορετικές μεθόδους. Η πρώτη μέθοδος είναι ένας συνδυασμός αναλυτικών-αριθμητικών και εμπειρικών σχέσεων από την διεθνή βιβλιογραφία (βλ. επισυναπτόμενη τεχνική έκθεση Μ. Χρονόπουλου et al, 2000).

Η δεύτερη μέθοδος βασίζεται στα αποτελέσματα των δοκιμών Push-Over. Συγκεκριμένα εκτελέσθηκαν παραμετρικές αντίστροφες στατικές αναλύσεις με στόχο τον υπολογισμό της σχέσεως ροπής--καμπυλότητας για την οποία τα υπολογιζόμενα διαγράμματα δύναμης--μετακίνησης (με βάση το αριθμητικό μας προσομοίωμα για την μικρή πύλη) θα συνέπιπταν με τα αντίστοιχα διαγράμματα που καταγράφηκαν στο Πείραμα . Στο Σχήμα 5.9 απεικονίζονται τα διαγράμματα ροπής--καμπυλότητας σύμφωνα με τις δύο προαναφερθείσες μεθόδους. Στο Σχήμα 5.10 παρουσιάζονται τα υπολογισθέντα διαγράμματα δύναμης--μετακίνησης (για την μικρή πύλη) με βάση τις δύο μεθόδους και συγκρίνονται με το αντίστοιχο διάγραμμα που καταγράφηκε στο Πείραμα. Είναι σαφής η υπεροχή της δεύτερης μεθόδου (και επομένως η χρησιμότητα του πειράματος !).

Στο ίδιο σχήμα παρουσιάζεται και το υπολογιστικό διάγραμμα (με βάση την σχέση ροπής--καμπυλότητας που προσδιορίστηκε με την δεύτερη μέθοδο) με θεώρηση της αλληλεπίδρασης θεμελίου--εδάφους. Με το προσομοίωμα αυτό εκτελούνται οι εξής αναλύσεις :

- Στατική ανάλυση με μονοτονικώς αυξανόμενη οριζόντια δύναμη, εφαρμοζόμενη στην κορυφή του ζυγώματος των πυλών σε διεύθυνση κάθετη προς το επίπεδό τους (αναπαράσταση του πειράματος).

- Δυναμική ανάλυση εν-χρόνω της σεισμικής απόκρισης. Ως διεγέρσεις χρησιμοποιούνται (εναλλακτικώς) τέσσερα πραγματικά επιταχυνσιογραφήματα. Συγκεκριμένα, οι καταγραφές που επιλέχθηκαν ως χρονοϊστορίες διεγέρσεως είναι οι εξής:

- α) οι δύο οριζόντιες συνιστώσες της καταγραφής *SPLB* (διαμήκης και εγκάρσια) στον σεισμό της 7-9-99
- β) μία συνιστώσα από την καταγραφή *ΚΕΔΕ* στον σεισμό της 7-9-99
- γ) μία συνιστώσα από την καταγραφή *Temblor* στον σεισμό *Parkfield* (1979).

Αιτιολόγηση της επιλογής των τριών αυτών επιταχυνσιογραφημάτων έχει δοθεί σε άλλη θέση της παρούσης Εκθέσεως.

Η επιρροή της κορυφαίας τιμής της επιτάχυνσης των ενλόγω επιταχυνσιογραφημάτων στην δυναμική απόκριση των πυλών διερευνάται παραμετρικά. Στην επιλογή των κορυφαίων εδαφικών επιταχύνσεων συνεκτιμάται η ενδοσιμότητα της θεμελίωσης, και η 3-Δ διεύθυνση του σεισμικού κραδασμού (3 συνιστώσες διέγερσης).

Από τις μετασεισμικές παρατηρήσεις των πυλών σε συνδυασμό με τα αποτελέσματα των δοκιμών *Push-Over* καταλήγουμε στα εξής συμπεράσματα για την πιθανή συμπεριφορά των πυλών κατά την διάρκεια του σεισμού :

- Στην μικρή πύλη μόλις είχαν αρχίσει να αναπτύσσονται ρωγμές κατά τον σεισμό (οιονεί ελαστική συμπεριφορά). Η μέγιστη σεισμική ροπή που αναπτύχθηκε στην πύλη δεν θα υπερέβη την $M_{\max} = 4 \text{ kNm}$.

- Η μεγάλη πύλη συμπεριφέρθηκε εντόνως ελαστο-πλαστικά κατά τον σεισμό. Η άποψη αυτή ενισχύεται αφενός μεν από το μεγάλο εύρος των παρατηρηθεισών μετασεισμικών ρωγμών στις "κρίσιμες" περιοχές των υποστυλωμάτων, αφετέρου δε από τα αποτελέσματα της δοκιμής Push-Over. Υπολογίσαμε ότι η μέγιστη σεισμική ροπή που αναπτύχθηκε στην μεγάλη πύλη κατά την διάρκεια του σεισμού ήταν ίση με την ροή αντοχής της, $M_R = 10.3 \text{ kNm}$. (Δηλαδή, $M_{\max} > 10 \text{ kNm}$.) Από τις μέγιστες επιταχύνσεις των πιθανών χρονοϊστοριών της εδαφικής επιτάχυνσης στην περιοχή των Αχαρνών (που χρησιμοποιήθηκαν ως διεγέρσεις στο αριθμητικό μας προσομοίωμα) επιλέχθηκαν αυτές για τις οποίες η δυναμική απόκριση των πυλών ικανοποίησε και τις δύο ανωτέρω συνθήκες.

5.2.5 Αποτελέσματα

Οι υπολογισθείσες πιθανές μέγιστες τιμές της σεισμικής επιτάχυνσης δίδονται στον Πίνακα 5.1 συναρτήσει των καταγραφών που επιλέχθηκαν ως διεγέρσεις.

Πίνακας 5.1

Καταγραφές	SEPOLIA-L	SEPOLIA-T	KEDE-T	TEMBLOR
$A_{\max} \text{ (g)}$	0.50-0.60	0.60-0.75	0.55-0.65	0.60-0.75

5.3 Αντίστροφες Αναλύσεις Ολισθήσεων και Ανατροπών Μνημείων: Νεκροταφεία Ανω Λιοσίων και Φυλής

5.3.1 Νεκροταφείο Ανω Λιοσίων: Λικνισμός και Ολίσθηση Μαρμάρινου Τύμβου # 1

Στο νεκροταφείο Ανω Λιοσίων εντοπίσαμε μεταξύ πολλών άλλων έναν σεισμικώς μετακινηθέντα μαρμάρينو τύμβο, ιδανικό εύρημα για τον έμμεσο προσδιορισμό της *"αιτίου επιταχύνσεως"*. Ο σημαντικών διαστάσεων τύμβος βρέθηκε στην κατάσταση που απεικονίζεται στο Σχήμα 5.11, έχοντας ολισθήσει από την αρχική του θέση. Το βάρος του τύμβου (≈ 250 kg) αποτελεί σημαντικότερο πλεονέκτημα, καθώς αποκλείει την περίπτωση της μετά – τον σεισμό – αθέλητης ή ηθελημένης παρέμβασης, καθώς είναι ανθρωπίνως αδύνατη η σκόπιμη ή μή μετακίνησή (μόνον ο σεισμός μπορεί να είχε προκαλέσει την συγκεκριμένη ολίσθηση !)

Διαπιστώθηκε ότι υπήρχαν εμφανή σημάδια στην επιφάνεια εδράσεως τα οποία υποδείκνυαν την αρχική θέση του εν λόγω τύμβου : διακρίνονται στις φωτογραφίες του Σχήματος 5.12. Το γεγονός αυτό αποτελεί ένα δεύτερο πλεονέκτημα του ευρήματος, καθιστώντας δυνατή την μέτρηση των τελικών (παραμενουσών) ολισθητικών μετακινήσεων και της περιστροφής του τύμβου.

Στην κορυφή του τύμβου υπήρχαν μικρο-ρωγμές και μία εσοχή με σημάδια σπασμένου μαρμάρου. Τούτο οδήγησε στο συμπέρασμα ότι ένας σταυρός θα ήταν κολλημένος στην κορυφή του τύμβου κατά το ελληνικό έθιμο. Ο σταυρός ανακαλύφθηκε στην πλαϊνή ταφόπλακα.

Για την αναλυτική μελέτη και προσομοίωση του εν λόγω ευρήματος καταγράφηκαν οι παραμένουσες ολισθήσεις, οι τιμές των οποίων απεικονίζονται στο σχήμα 5.13.

Προκειμένου να προσεγγισθεί η σεισμική απόκριση του εξεταζομένου τύμβου δημιουργήθηκε τριδιάστατο προσομοίωμα πεπερασμένων στοιχείων και χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Abaqus. Στόχος της ανάλυσης ήταν η προσέγγιση των μετρηθεισών παραμενουσών ολισθήσεων του τύμβου με διαδοχικές δοκιμές. Για τον σκοπό αυτόν. Ο υπό εξέτασιν τύμβος διαχωρίστηκε από την βάση μέσω διεπιφάνειας ολισθήσεως, ώστε να είναι ελεύθερος προς ολίσθηση και ανασήκωμα.

Ως μορφή χρονοϊστορίας της σεισμικής διεγέρσεως χρησιμοποιήθηκαν τα εξής τρία επιταχυνσιογραφήματα: (i) ΚΕΔΕ, (ii) Σεπόλια, και (iii) Temblor. Το τελευταίο (κατεγγραφέν σε σεισμό παρομοίου μεγέθους, δίπλα στο σεισμογόνο ρήγμα), επιλέχθηκε ως κατάτι πλουσιότερο σε υψηλές περιόδους απ' ότι των Σεπολίων. Και στις τρεις περιπτώσεις εφαρμόστηκε *ταυτόχρονη σεισμική διέγερση στις δύο οριζόντιες και στην κατακόρυφη διεύθυνση*. Στο Σχήμα 5.14 παρουσιάζονται χαρακτηριστικά στιγμιότυπα μιάς εκ των δυναμικών αναλύσεων. Παρατηρείστε το φαινόμενο του λικνισμού--βηματισμού (rocking--stepping) το οποίο όμως δεν οδηγεί σε ανατροπή, ενώ παράλληλα ο τύμβος ολισθαίνει και τελικά ηρεμεί με παραμένουσα ολίσθηση (γραμμική καί περιστροφική) παρόμοια με την παρατηρηθείσα.

Η ταυτόχρονη δράση των τριών συνιστωσών της επιταχύνσεως, σε συνδυασμό με τον αναπόφευκτο λικνισμό--βηματισμό, δίνει έναν ιδιαίτερος *χαστικό* χαρακτήρα στην δυναμική απόκριση του συστήματος κάνοντας την επιλογή ενός μόνον συνδυασμού επιταχύνσεων δυσχερέστατη. Για τον λόγο αυτόν για κάθε επιταχυνσιογράφημα και με βάση τους επικρατέστερους συνδυασμούς δίνονται πιθανά εύρη επιταχύνσεων, κάτι που κρίνεται ως ρεαλιστικότερο. Τα πιθανά αυτά εύρη επιταχύνσεων συνοψίζονται στον Πίνακα 5.2. Όπως παρατηρείται στον Πίνακα αυτόν, καί τα τρία εξετασθέντα επιταχυνσιογραφήματα συμφωνούν

στην υπεροχή της εγκάρσιας σεισμικής συνιστώσας a_y η οποία κυμαίνεται από **0.60 έως 0.70 g**. Η διαμήκης συνιστώσα a_x προκύπτει **0.40 g έως 0.50 g**. Επιπροσθέτως, παρατηρείται ότι σε κάθε περίπτωση απαιτείται σημαντική κατακόρυφη επιτάχυνση: $a_z \approx$ **0.45 έως 0.55 g**. Στο Σχήμα 5.15 απεικονίζονται οι χρονοϊστορίες των ολισθήσεων κατά τις δύο διευθύνσεις με έναν από τους επικρατέστερους συνδυασμούς και συγκρίνονται με τις μετρηθείσες. Η σύγκλιση αποτελεσμάτων – μετρήσεων είναι προφανής.

/ Λεπτομερής παρουσίαση των αποτελεσμάτων των δυναμικών αναλύσεων γίνεται σε επόμενο ξεχωριστό κεφάλαιο. /

Πίνακας 5.2

Πιθανά εύρη επιταχύνσεων (εντός παρενθέσεως αναγράφεται ο μέσος όρος του πιθανού εύρους)

	$a_x(g)$	$a_y(g)$	$a_z(g)$
ΚΕΔΕ	0.37 – 0.50 (0.44)	0.63 – 0.71 (0.67)	0.33 – 0.58 (0.45)
SPLB	0.45 – 0.54 (0.51)	0.54 – 0.64 (0.59)	0.37 – 0.64 (0.50)
Temblor	0.36 – 0.44 (0.40)	0.50 – 0.75 (0.62)	0.39 – 0.72 (0.55)

5.3.2 Νεκροταφείο Ανω Λιοσίων : Ανατροπή Μαρμάρινου Τύμβου #2

Η ανατροπή ενός μαρμάρινου τύμβου είναι η δεύτερη κατά σειράν αστοχία του νεκροταφείου των Ανω Λιοσίων που αναλύεται, με σκοπό τον έμμεσο υπολογισμό της εδαφικής επιτάχυνσης στην

περιοχή. Ο τύμβος αυτός εδραζόταν απευθείας σε μαρμάρινη πλάκα εντός του εδάφους, ενώ στην κορυφή του έφερε έναν μαρμάρινο σταυρό, ο οποίος βρέθηκε αποκολλημένος (έσπασε στη βάση κατά τον λικνισμό ή κατά την πτώση).

Η ανάλυση έγινε με το προσομοίωμα του Σχήματος 5.16, επικεντρώθηκε δε στον υπολογισμό των απαιτούμενων εδαφικών επιταχύνσεων που προκαλούν οριακά έστω την ανατροπή του τύμβου. Η ενδοσιμότητα του εδάφους δεν υπολογιστικά υπ' όψιν, δεδομένης της υψηλής δυστημσίας του (οι τιμές της ταχύτητας V_s υπερβαίνουν τα 400 m/sec κοντά στην επιφάνεια). Η επίδραση της πολύ μικρής περιστροφικής ευκαμψίας εκτιμήθηκε ότι είναι της τάξεως του 10% , και δυσμενής.

Καταρχάς ως σεισμική διέγερση χρησιμοποιείται το επιταχυνσιογράφημα του SPLB, (δεσπόζουσας περιόδου 0.26s) --- ένα από τα αντιπροσωπευτικότερα επιταχυνσιογραφήματα του σεισμικού κραδασμού της 7-9-1999. Για να διερευνηθεί παραμετρικά η επίδραση της δεσπόζουσας περιόδου της διέγερσης στην απόκριση, αυξήσαμε σε διαδοχικές αναλύσεις το χρονικό της βήμα της καταγραφής κατά 10% και 20% , αντιστοίχως (Σχήμα 5.17). Ετσι προέκυψαν δύο νέα επιταχυνσιογραφήματα, η δεσπόζουσα περίοδος των οποίων αυξάνεται κατά το ίδιο ποσοστό (ελέω γραμμικότητας), δηλαδή σε 0.29 s και 0.31 s. Στο σχήμα 5.18 δείχνονται τα ελαστικά και ελαστοπλαστικά φάσματα απόκρισης των τριών επιταχυνσιογραφημάτων, για βαθμούς πλαστιμότητας $\mu_d = 1, 2$ και 3. Τα αποτελέσματα των αναλύσεων απεικονίζονται στο σχήμα 5.19 υπό την μορφή χρονοϊστοριών της γωνίας περιστροφής θ . Η σεισμική διέγερση εισαγάγεται κατά την εγκάρσια διεύθυνση.

Χρησιμοποιώντας το επιταχυνσιογράφημα SPLB υπολογίζουμε ότι απαιτείται επικλιμάκια αναγωγή του έως ότου η μέγιστη

επιτάχυνση γίνει **0.79 g** ώστε ο τύμβος να ανατραπεί οριακά (στο σχήμα 5.19 παρατηρούμε ότι για μέγιστη επιτάχυνση **0.78 g** ο τύμβος δεν ανατρέπεται). Η τιμή της επιτάχυνσης αυτής φαίνεται πολύ υψηλή από τα μέχρι σήμερα δεδομένα για τον σεισμό της Πάρνηθας, ακόμα και για τις πλειόσειστες περιοχές. Εντούτοις η ακριβής είναι ιδιαιτέρως ευαίσθητη σε μικρές μεταβολές του φασματικού περιεχομένου της διέγερσης, λόγω του υψίσυχνου χαρακτήρα του. Έτσι, αυξάνοντας το χρονικό βήμα της χρονοϊστορίας κατά 10% και 20% η οριακή επιτάχυνση για ανατροπή μειώνεται εντυπωσιακά σε **0.58 g** και **0.54 g**, αντιστοίχως. Οι τιμές αυτές επιταχύνσεων πιστεύεται ότι βρίσκονται πιο κοντά στην πραγματικότητα, εάν αξιολογήσουμε και τα αποτελέσματα της ολίσθησης του τύμβου # 1. Αυξάνοντας περαιτέρω το χρονικό βήμα, η επιτάχυνση μειώνεται με επιβραδυνόμενο ρυθμό, συγκλίνοντας τελικώς στην "στατική" ανατροπή (Σχήμα 5.20):

$$\frac{A}{g} = \frac{b_2/2}{z_{c.m}} \approx 0.15$$

όπου $z_{c.m}$ το ύψος του κέντρου μάζας από την βάση και b_2 το πλάτος της διατομής της βάσης. Στις ανωτέρω αναλύσεις έχει αγνοηθεί χάριν ευκολίας η οριζόντια διεύθυνση στη διαμήκη διεύθυνση και η κατακόρυφη, καθώς έχει αποδειχθεί στις αναλύσεις μας ότι δεν μεταβάλλουν αισθητά τα αποτελέσματα (βλ. κατωτέρω και ανατροπή μαρμάρινου τύμβου # 3 – νεκροταφείο Φυλής).

5.3.3 Νεκροταφείο Φυλής: Ανατροπή Μαρμάρινου Τύμβου # 3

Η περίπτωση του τύμβου του νεκροταφείου της Φυλής αποτελεί ένα από τα πιο χαρακτηριστικά ευρήματα των δύο κοιμητηρίων, Ανω Λιοσίων και Φυλής, που επλήγησαν βαριά στον σεισμό της Πάρνηθας, στην προσπάθεια έμμεσης εκτίμησης της

σεισμικής έντασης στην πλειόσειστη περιοχή. Όπως φαίνεται στην φωτογραφία του Σχήματος 5.21, ο μαρμάρινος όγκος αστόχησε από ανατροπή ενώ οι πλάκες που τον περιέβαλλαν δεν επέτρεψαν την ολίσθησή του. Η τυχόν εφελκυστική αντοχή της διεπιφάνειας θεωρείται ότι εξαντλείται πολύ γρήγορα για να επηρεάσει τον λικνισμό, και κατά συνέπεια δεν λαμβάνεται υπόψιν. Η ανάλυση γίνεται με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων όπου ο τύμβος και η βάση εδράσεως προσομοιώνονται με τριδιάστατα στοιχεία συνεχούς μέσου, ενώ η διεπιφάνεια απλής έδρασης χαρακτηρίζεται από συντελεστή τριβής μ_s . Καταρχάς θεωρείται ότι η ταλάντωση γίνεται σε μία διεύθυνση και χωρίς ολίσθηση (βλ. Σχήμα 5.22). Ως διέγερση χρησιμοποιούνται αρχικώς τα τρία επιταχυνσιογραφήματα από την ανάλυση του τύμβου των Άνω Λιοσίων: η πραγματική καταγραφή των Σεπολίων SPLB και οι τροποποιημένες χρονοϊστορίες $SPLB \times 1.1$ και $SPLB \times 1.2$ (προκύπτουν με επικλιμάκια αναγωγή του χρόνου t κατά 10 % και 20 %, αντιστοίχως). Οι επιταχύνσεις που απαιτούνται για την ανατροπή σε κάθε περίπτωση είναι παραπλήσιες με αυτές του τύμβου # 2 (Πίνακας 5.3), καθώς τα δύο σώματα έχουν σχεδόν τον ίδιο και παραπλήσιον δείκτη λυγηρότητας (*aspect ratio*) : μέγεθος $h/b=6.6$ και 6.3 αντιστοίχως.

Πίνακας 5.3

Οι απαιτούμενες επιταχύνσεις (g) για ανατροπή των δύο τύμβων με τρεις διεγέρσεις τύπου Σεπολίων

ΕΠΙΤΑΧΥ/ΜΑ	ΤΥΜΒΟΣ # 2 (ΑΝΩ ΛΙΟΣΙΑ)	ΤΥΜΒΟΣ # 3 (ΦΥΛΗ)
SPLB	0.79	0.85
SPLB $\times 1.1$	0.58	0.61
SPLB $\times 1.2$	0.54	0.58

Χρησιμοποιώντας ημιτονοειδείς παλμούς αλλά και πραγματικές διεγέρσεις με διαφορετικό φασματικό περιεχόμενο, επαληθεύσαμε τον προαναφερθέντα κυρίαρχο (δυσμενή) ρόλος της δεσπόζουσας περιόδου στην κρίσιμη επιτάχυνση ανατροπής, ιδιαιτέρως στις υψίσυχνες διεγέρσεις (βλ. Σχήμα 5.23). Επιπλέον, από το σύνολο των αναλύσεων προκύπτει ότι για επιταχυνσιογραφήματα με δεσπόζουσα περίοδο περίπου 0.3 s, η απαιτούμενη επιτάχυνση για ανατροπή είναι της τάξεως του 0.60 g --- τιμή που συγκλίνει στις επιταχύνσεις των τροποποιημένων επιταχυνσιογραφημάτων SPLB.

Επεκτείνοντας την ανάλυση, εισαγάγουμε την σεισμική διέγερση και στις υπόλοιπες δύο διευθύνσεις ενώ τέλος μελετάται και η επίδραση της πιθανής ολίσθησης. Από τα αποτελέσματα (βλ. Πίνακες 5.4, 5.5, και 5.6) διαφαίνεται η ανεξαρτησία της επιτάχυνσης ανατροπής στην διαμήκη οριζόντια διεύθυνση και την ολίσθηση. Τέλος η *κατακόρυφη* συνιστώσα της επιτάχυνσης, προκύπτει από τις αναλύσεις μας ότι σε ακραίες περιπτώσεις θα μπορούσε να μεταβάλλει την επιτάχυνση ανατροπής μέχρι 10 % το πολύ. Σημειώνεται εδώ το παρόμοιο συμπέρασμα απ' την διδακτορική εργασία Αντωνόπουλου (2001), το οποίο βασίσθηκε σε ανάλυση με λογισμικό UDEC και Πειράματα στην Δονητική Τράπεζα του ΕΜΠ.

Πίνακας 5.4

Οι κρίσιμες επιταχύνσεις για ανατροπή με ή χωρίς κατακόρυφη συνιστώσα. Σε όλες τις αναλύσεις το πλάτος της κατακόρυφης επιτάχυνσης αυξήθηκε σε 1.0 g. Οπου υπάρχει αρνητικό πρόσημο, η καταγραφή χρησιμοποιήθηκε με ανεστραμμένα πρόσημα.

ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ		ΚΡΙΣΙΜΗ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΗ ΜΕ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗ ΣΥΝΙΣΤΩΣΑ (g)		ΚΡΙΣΙΜΗ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΗ ΧΩΡΙΣ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗ ΣΥΝΙΣΤΩΣΑ (g)
ΟΡΙΖΟΝΤΙΑ	ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗ			
<i>SPLB-long</i>	<i>SPLB-vert</i>	0.93(+)	0.71(-)	0.85
<i>SPLB-trans</i>	<i>SPLB-vert</i>	0.72(+)	0.92(-)	0.85
<i>ΚΕΔΕ long</i>	<i>ΚΕΔΕ vert</i>	0.61(+)	0.67(-)	0.63
<i>ΚΕΔΕ trans</i>	<i>ΚΕΔΕ vert</i>	0.89(+)	0.89 (-)	0.87
<i>Sylmar long</i>	<i>Sylmar vert</i>	0.20(+)	0.26 (-)	0.23

Πίνακας 5.5

Οι κρίσιμες επιταχύνσεις για ανατροπή με μία ή δύο οριζόντιες συνιστώσες

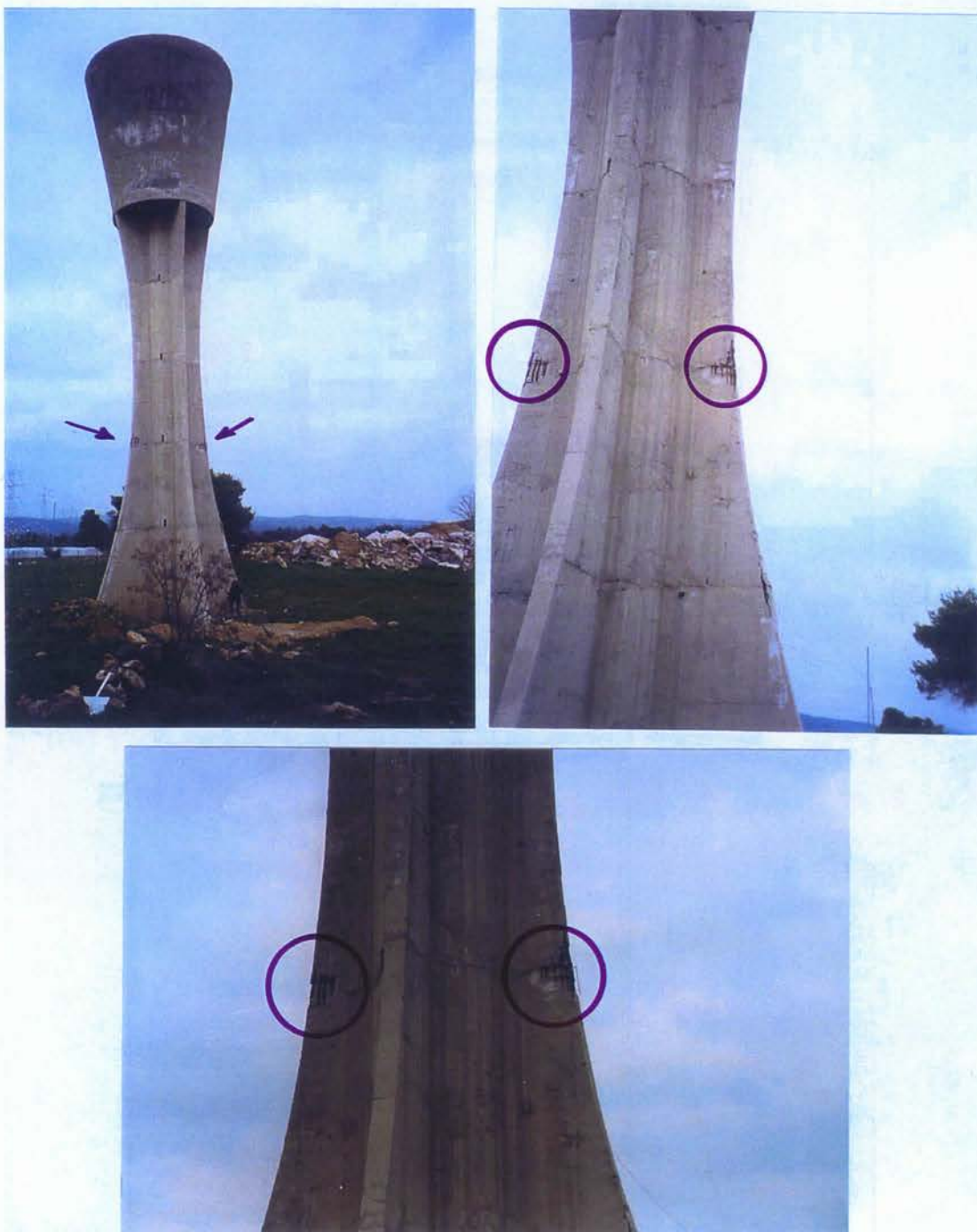
ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ		ΔΙΑΡΚΕΙΑ (sec)	ΚΡΙΣΙΜΗ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΗ ΜΕ ΔΙΑΜΗΚΗ ΣΥΝΙΣΤΩΣΑ (g)	ΚΡΙΣΙΜΗ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΗ ΧΩΡΙΣ ΔΙΑΜΗΚΗ ΣΥΝΙΣΤΩΣΑ (g)
ΕΓΚΑΡΣΙΑ	ΔΙΑΜΗΚΗΣ			
<i>SPLB-trans</i>	<i>SPLB-long</i>	10	0.85	0.85
<i>SPLB-long</i>	<i>SPLB-trans</i>	10	0.86	0.85
<i>ΚΕΔΕ trans</i>	<i>ΚΕΔΕ long</i>	10	0.88	0.87
<i>Duzce ns</i>	<i>Duzce ew</i>	10	0.23	0.23

Πίνακας 5.6

Οι κρίσιμες επιταχύνσεις για ανατροπή με ή χωρίς ολίσθηση

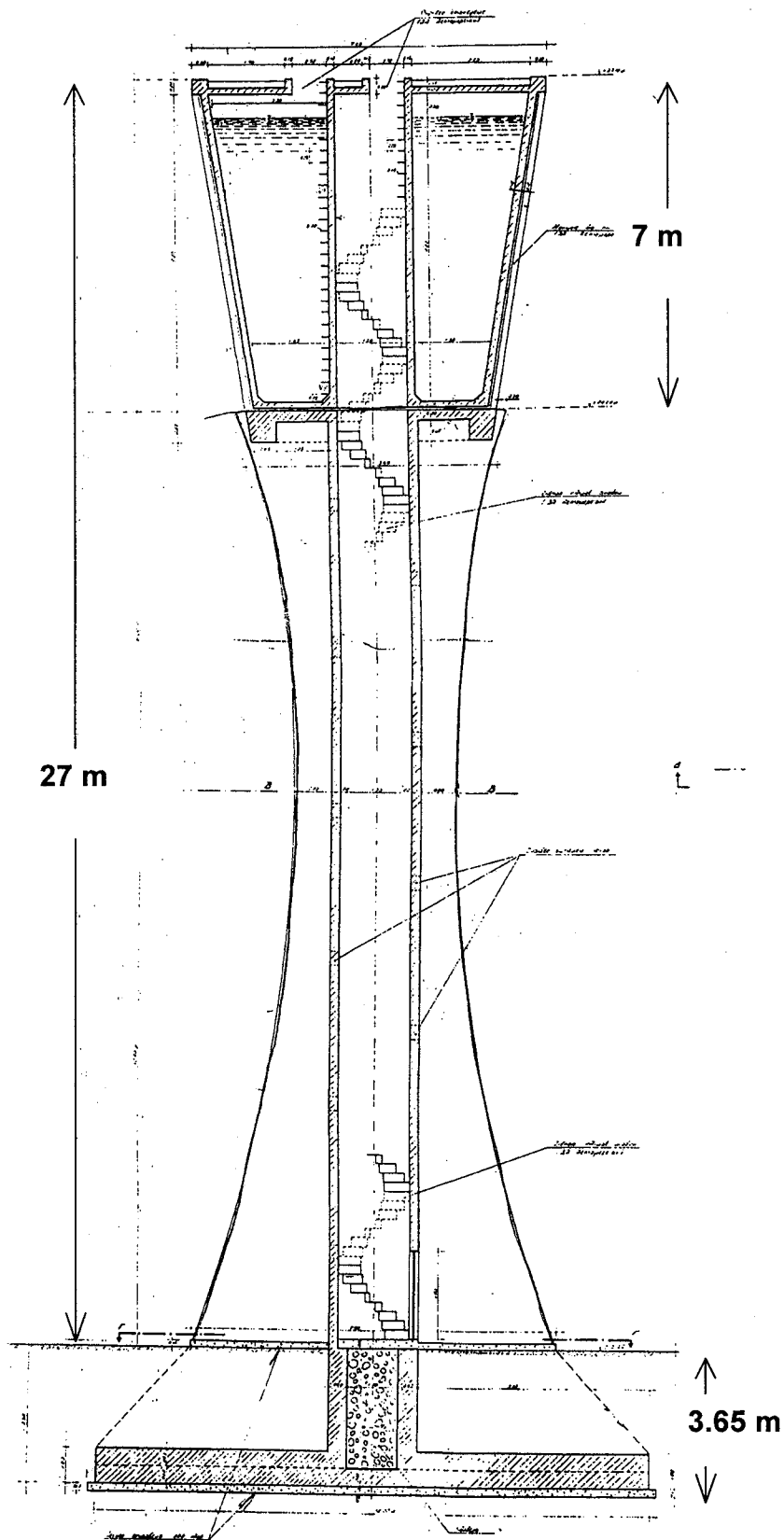
ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ			ΚΡΙΣΙΜΗ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΗ (g) ΜΕ ΠΙΘΑΝΗ ΟΛΙΣΘΗΣΗ ($\mu=0.4$)	ΚΡΙΣΙΜΗ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΗ (g) ΧΩΡΙΣ ΟΛΙΣΘΗΣΗ
ΕΓΚΑΡΣΙΑ	ΔΙΑΜΗΚΗΣ	ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗ		
<i>ΚΕΔΕ trans</i>	<i>ΚΕΔΕ long</i>	-	0.94	0.88
<i>SPLB-long</i>	-	-	0.86	0.85
<i>SPLB-long</i>	<i>SPLB-trans</i>	-	0.85	0.86
<i>SPLB-long</i>	<i>SPLB-trans</i>	<i>SPLB-vert(+)</i>	0.90	0.93
<i>SPLB-long</i>	<i>SPLB-trans</i>	<i>SPLB-vert(-)</i>	0.71	0.71

ΣΧΗΜΑΤΑ
ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ 5



Σχήμα 5.1
Ο υδατόπυργος και οι βλάβες του

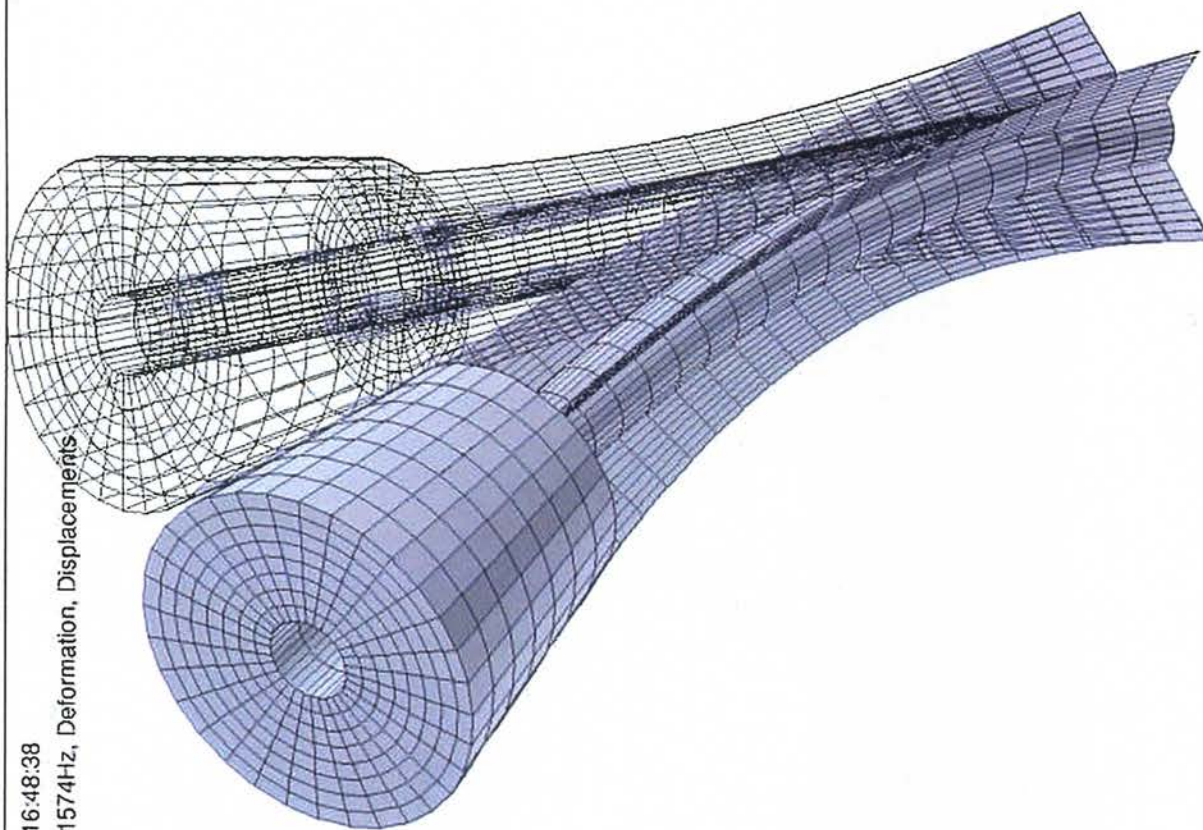
Κατακόρυφος τομή Δ-Δ
ΚΑΙΜΑ 1:30



Σχήμα 5.2
Κατακόρυφη τομή του υδατοπύργου

MSC/PATRAN Version 8.0 20-Apr-00 16:48:38

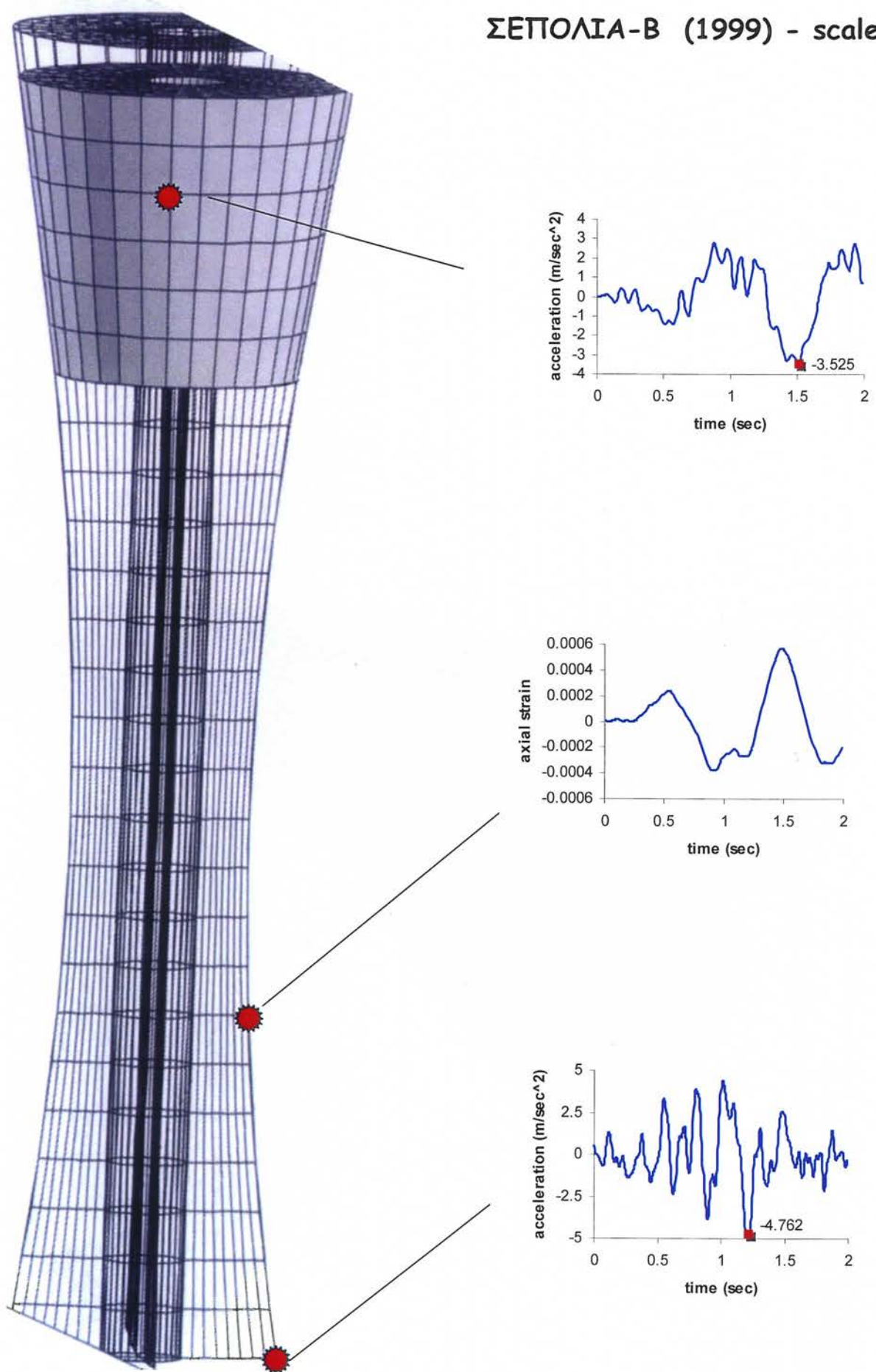
Deform: Default, Step1, Mode1, Freq=1.1574Hz, Deformation, Displacements



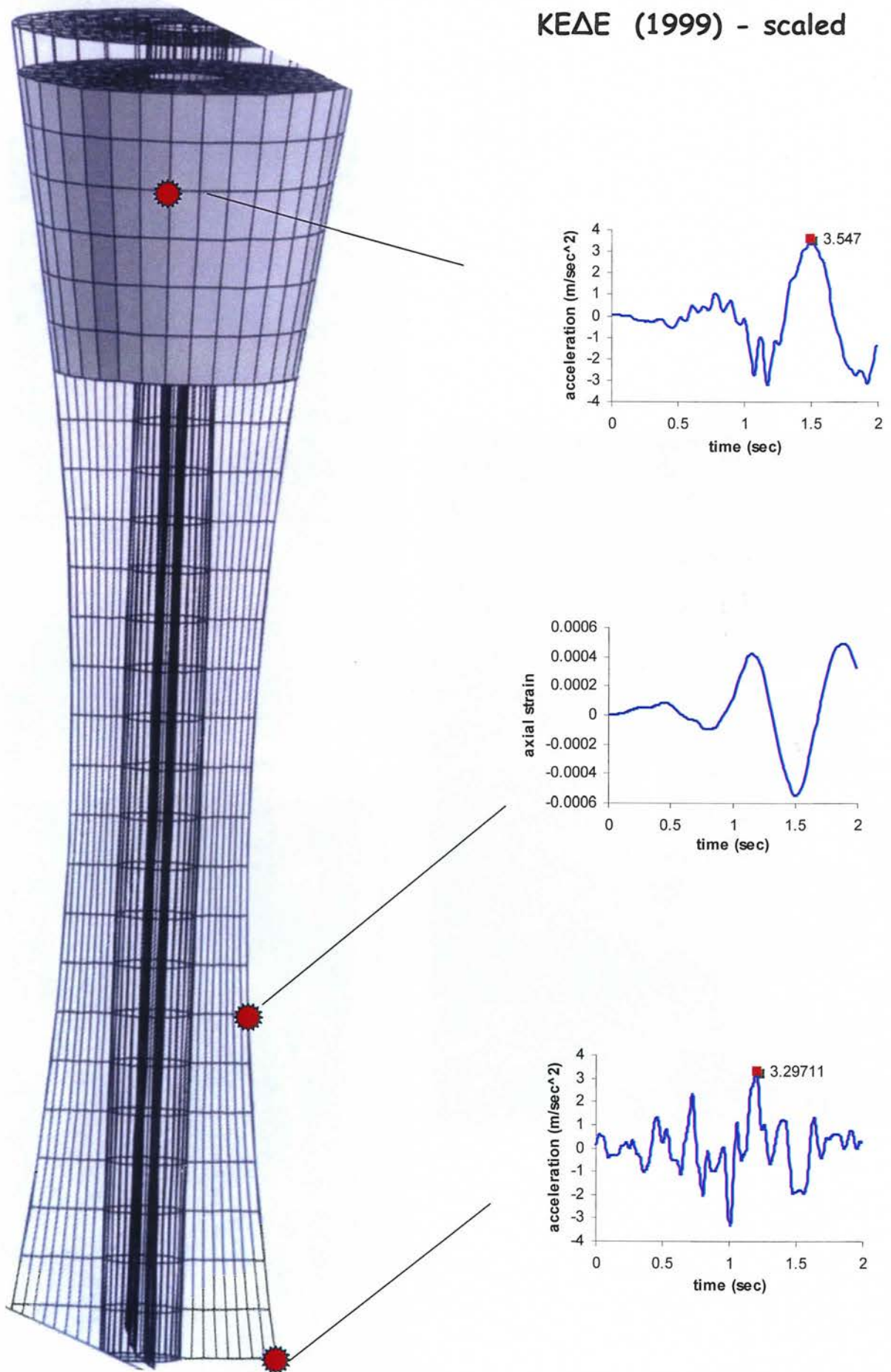
default_Deformation :
Max 1.00+00 @Nd 1

Σχήμα 5.3

Ο κάνναβος των Π.Σ. και η πρώτη ιδιομορφή του υδατόπυργου



Σχήμα 5.4
Δυναμική απόκριση υδατοπύργου



Σχήμα 5.5
Δυναμική απόκριση υδατοπύργου

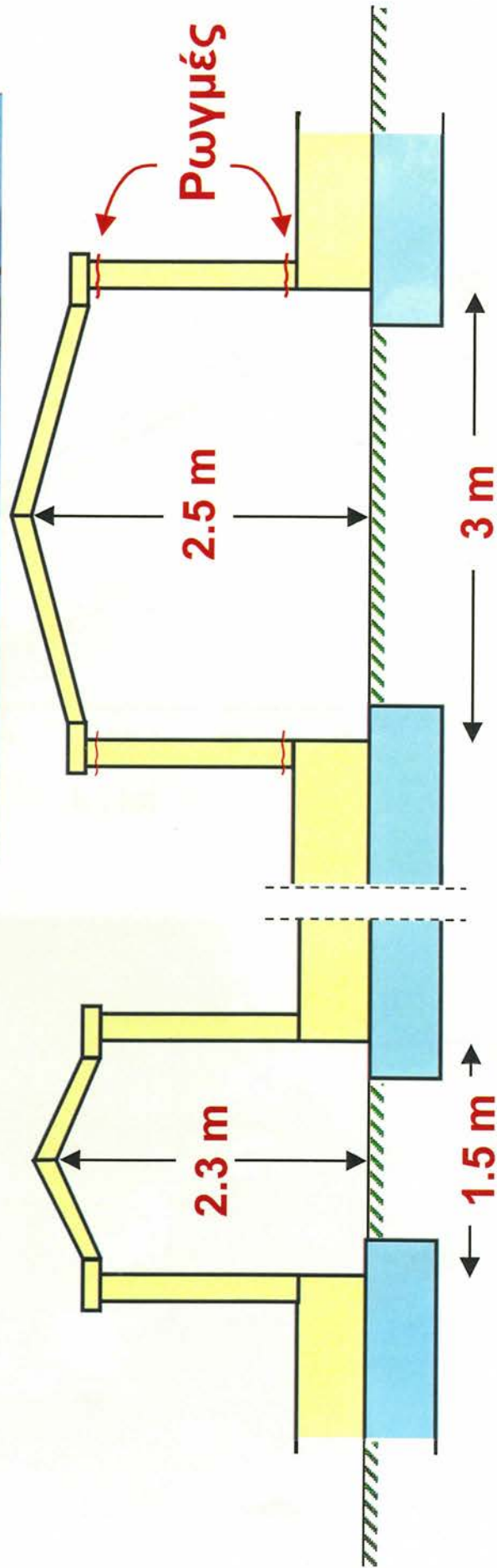


Σχήμα 5.6
Οι πύλες της οδού Διαγόρα στις Αχαρνές

Διπλό Πείραμα
σε
Φυσική Κλίμακα :

7 - 9 - 99

21 - 5 - 00



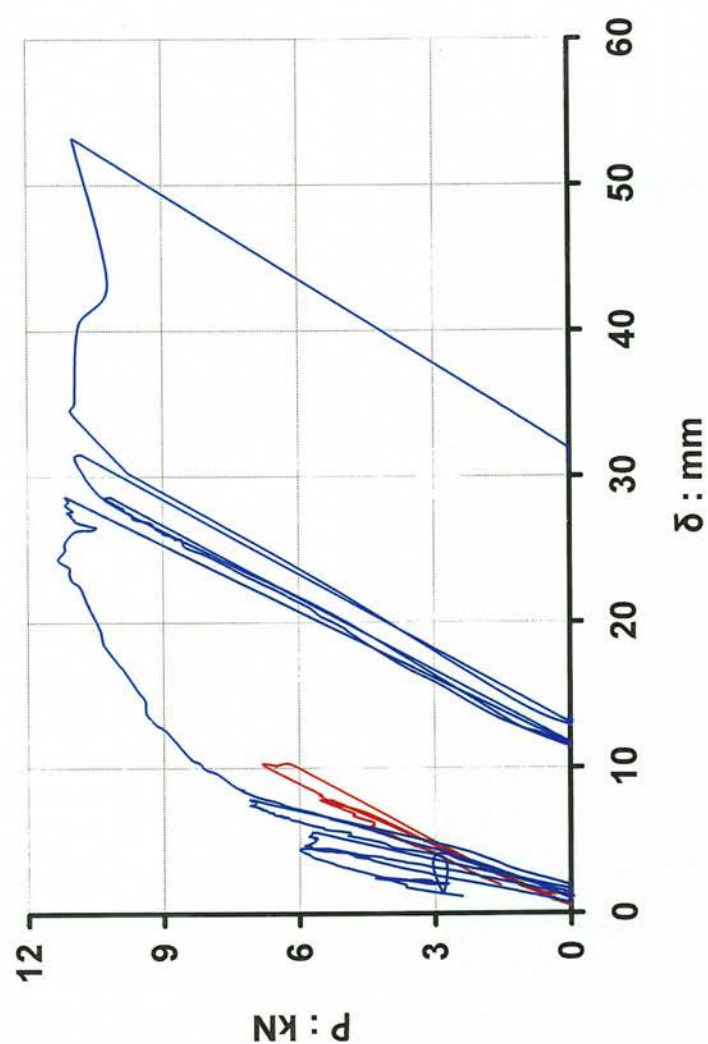
Σχήμα 5.7
Οι Πύλες της Οδού Διαγόρα (περιοχή Αχαρνών)



Εγκάρσια

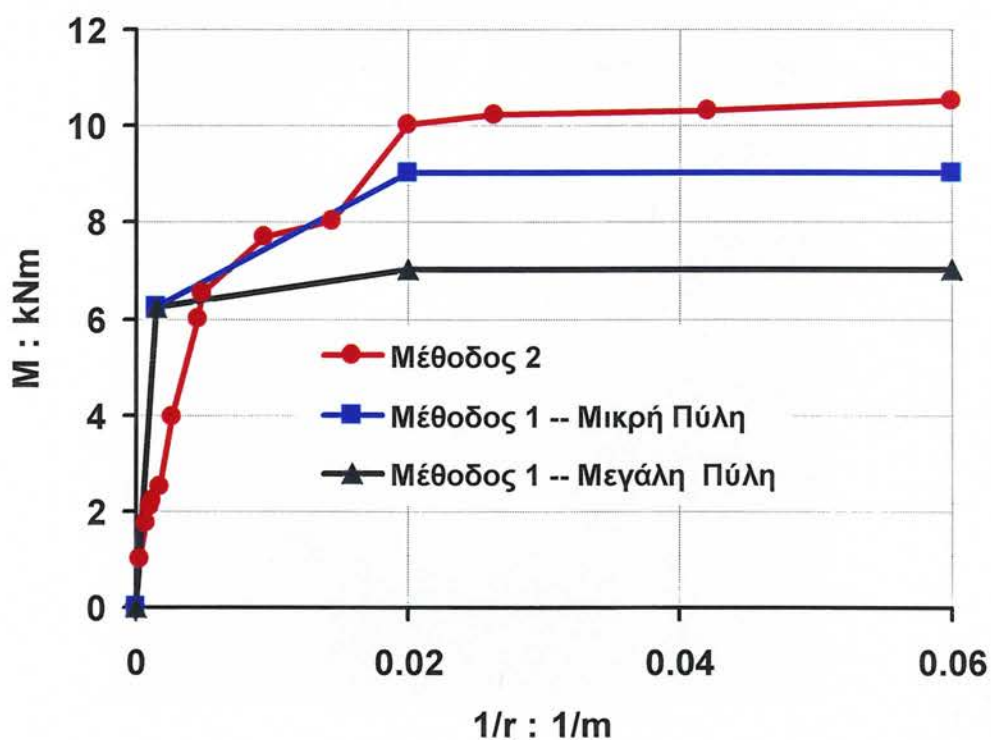
Φόρτιση-Αποφόρτιση :

21 - 5 - 00



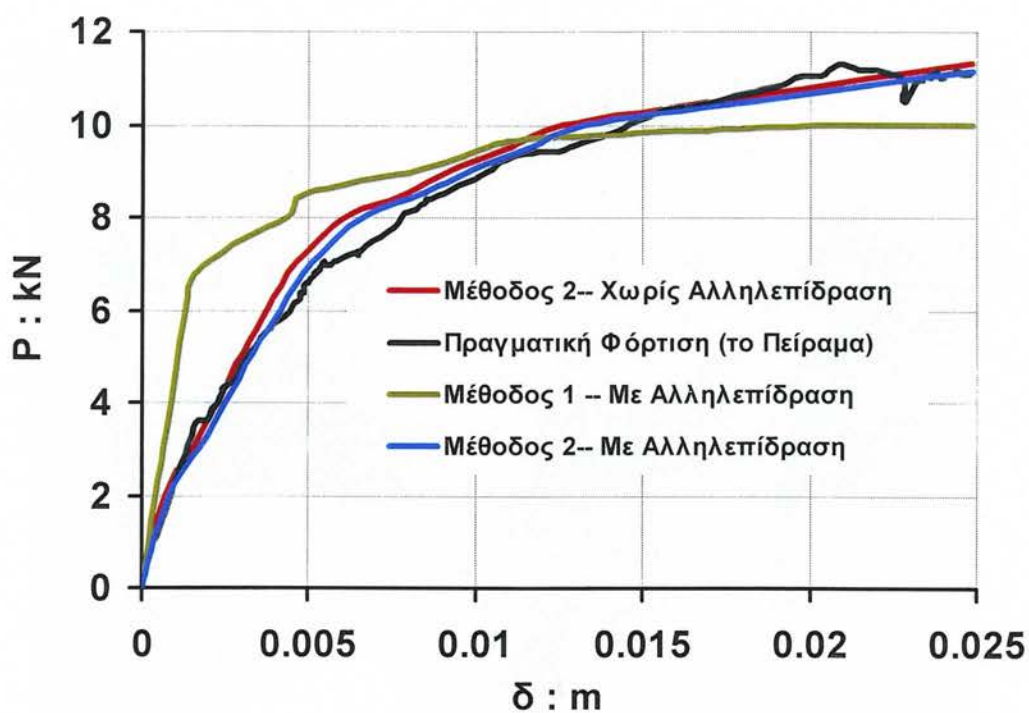
Σχήμα 5.8

Το Πείραμα και το καταγραφέν διάγραμμα $P-\delta$ οριζόντιας δύναμης-μετακίνησης, για την μικρή πύλη (μπλέ καμπύλη) και την μεγάλη πύλη (κόκκινη καμπύλη).



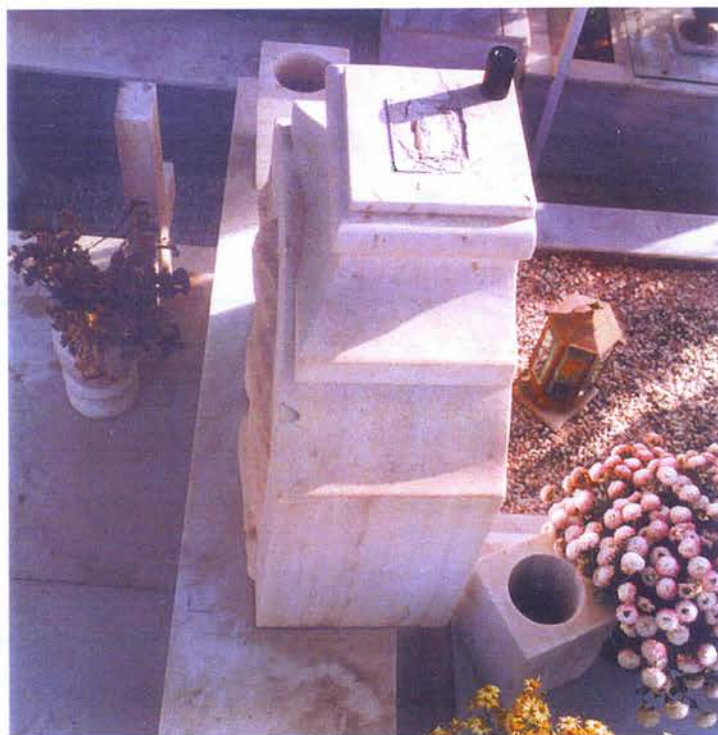
Σχήμα 5.9

Διαγράμματα ροπής--καμπυλότητας



Σχήμα 5.10

Διαγράμματα δύναμης--μετακίνησης



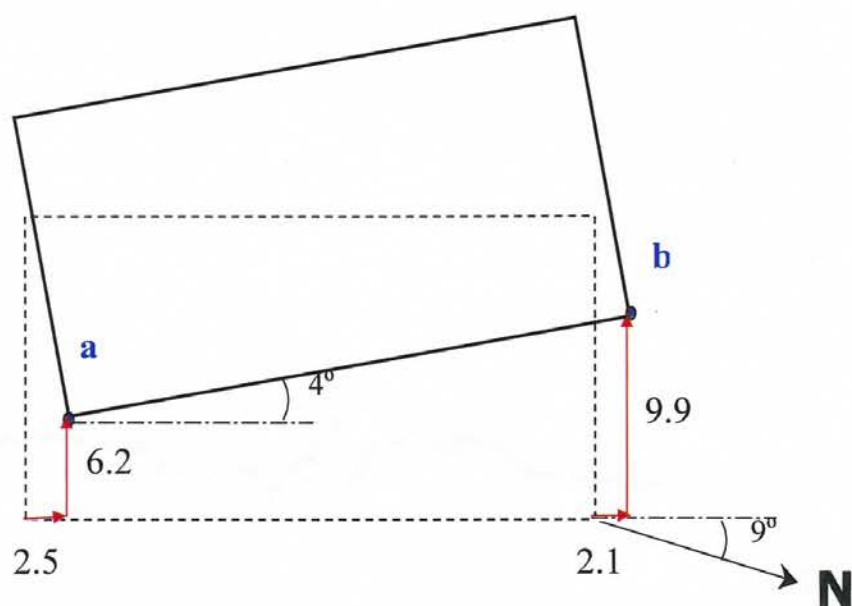
Σχήμα 5.11

Ο τύμβος # 1 όπως βρέθηκε μετά τον σεισμό και όπως εξακολουθεί να είναι σήμερα χάρη στο τεράστιο βάρος του.



Σχήμα 5.12

Πλάγια όψη όπου διακρίνεται η αρχική θέση του τύμβου



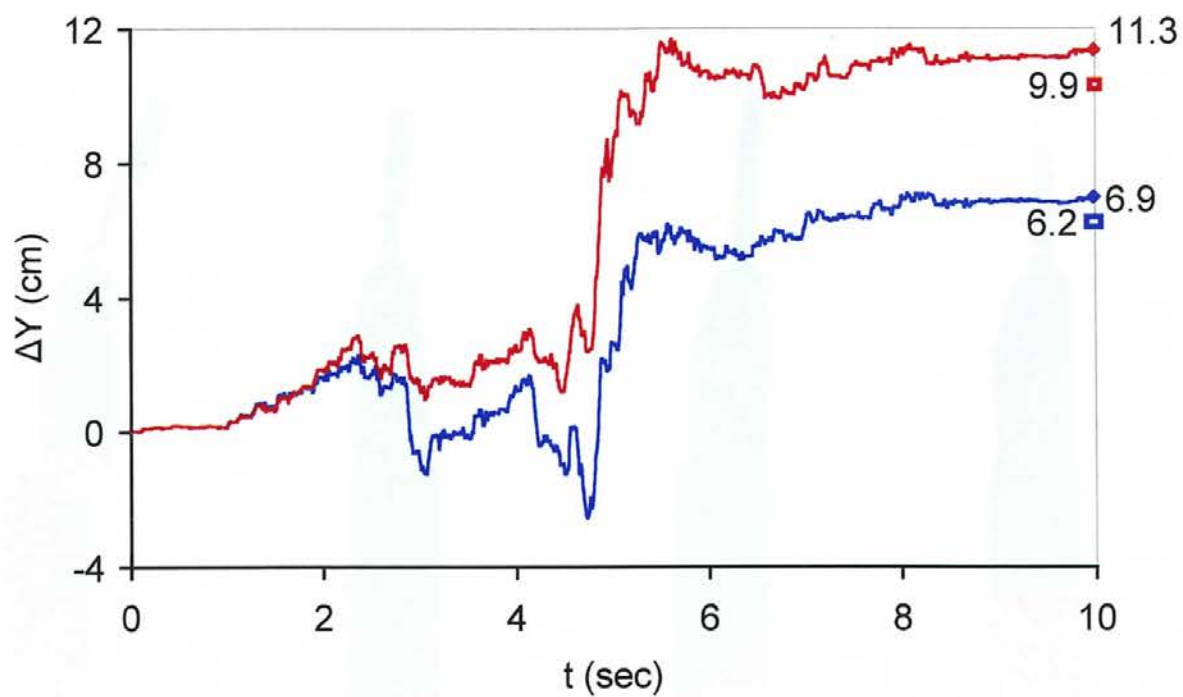
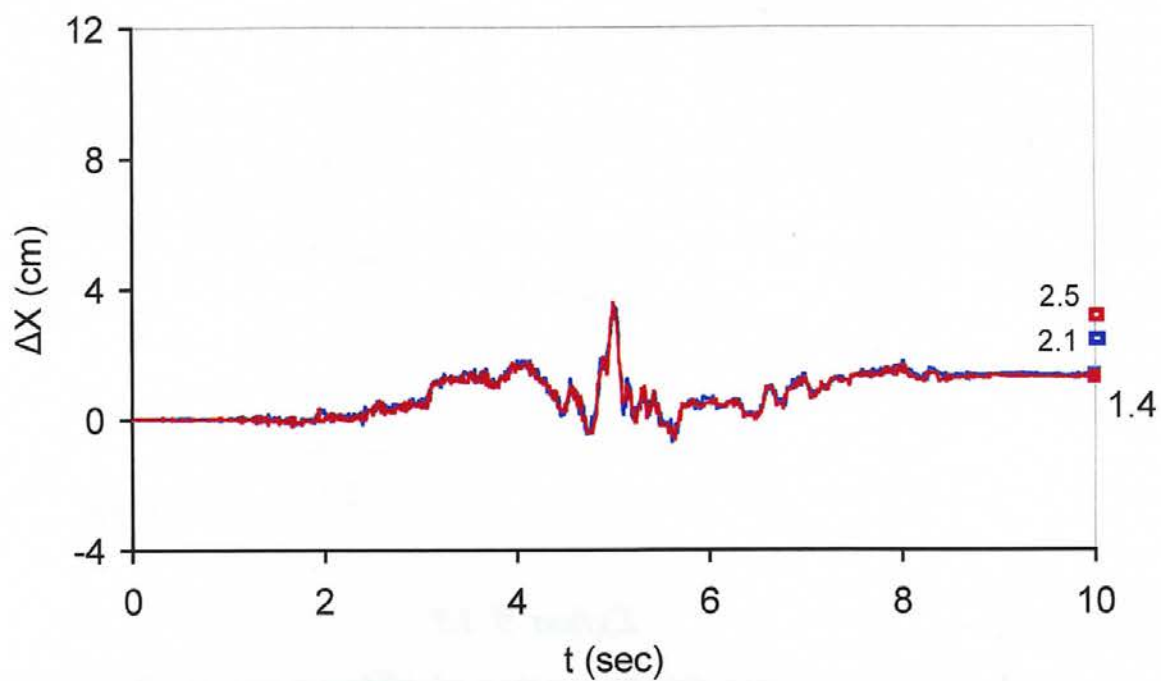
Σχήμα 5.13

Οι μετρηθείσες παραμένουσες ολισθήσεις του τύμβου



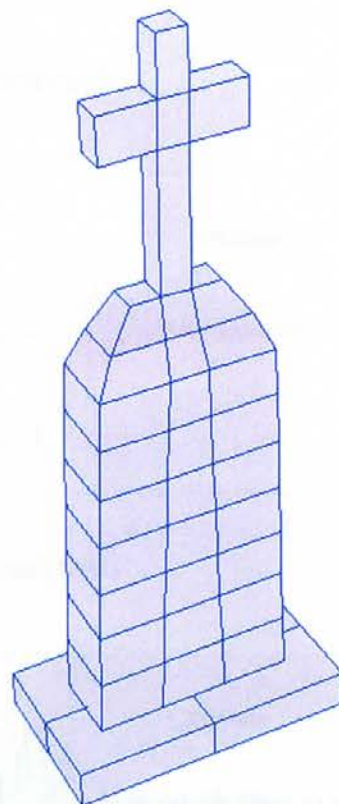
Σχήμα 5.14

Χαρακτηριστικά στιγμιότυπα μίας εκ των αναλύσεων



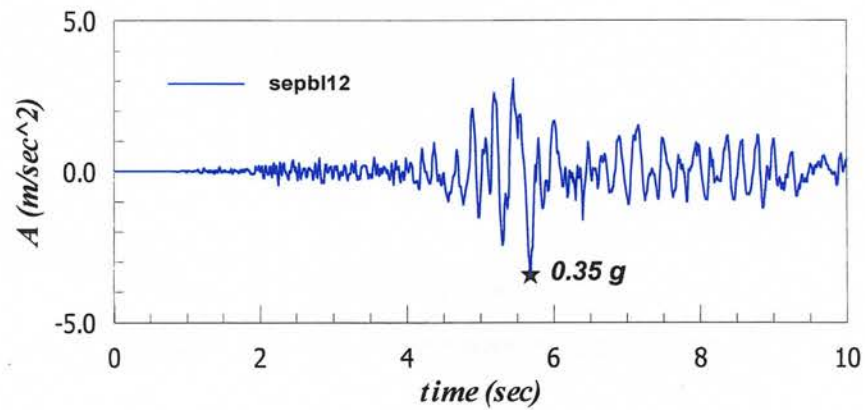
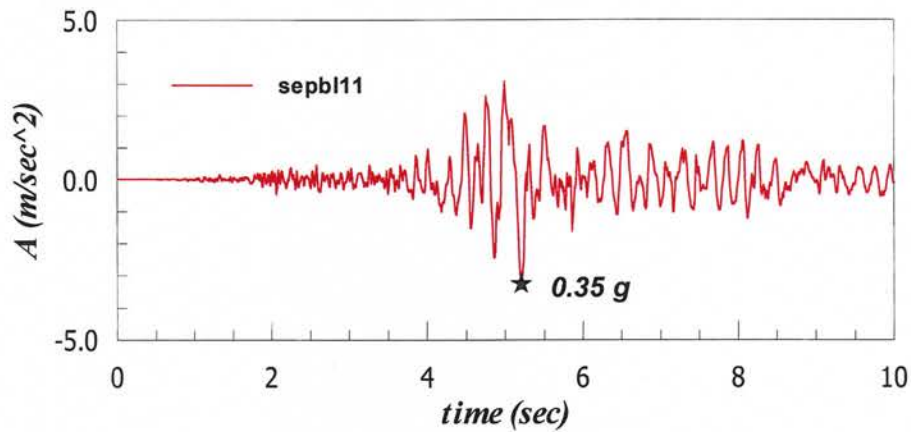
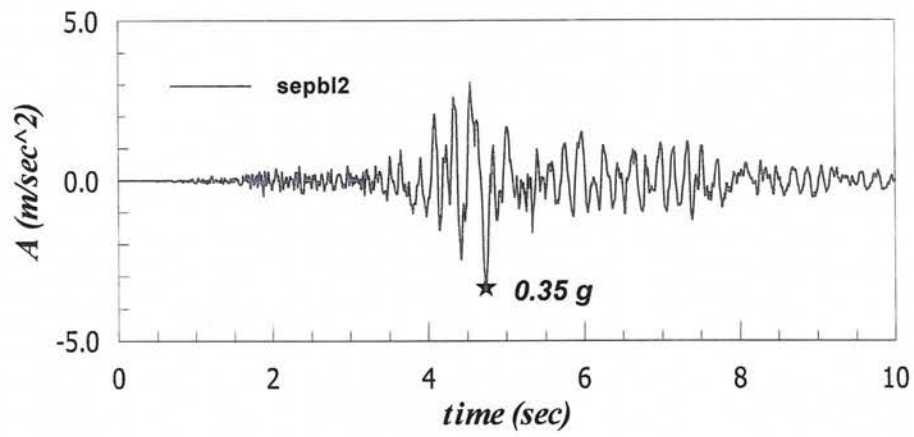
Σχήμα 5.15

Χρονοϊστορίες των ολισθήσεων κατά τις δύο διευθύνσεις και σύγκριση με τις μετρηθείσες



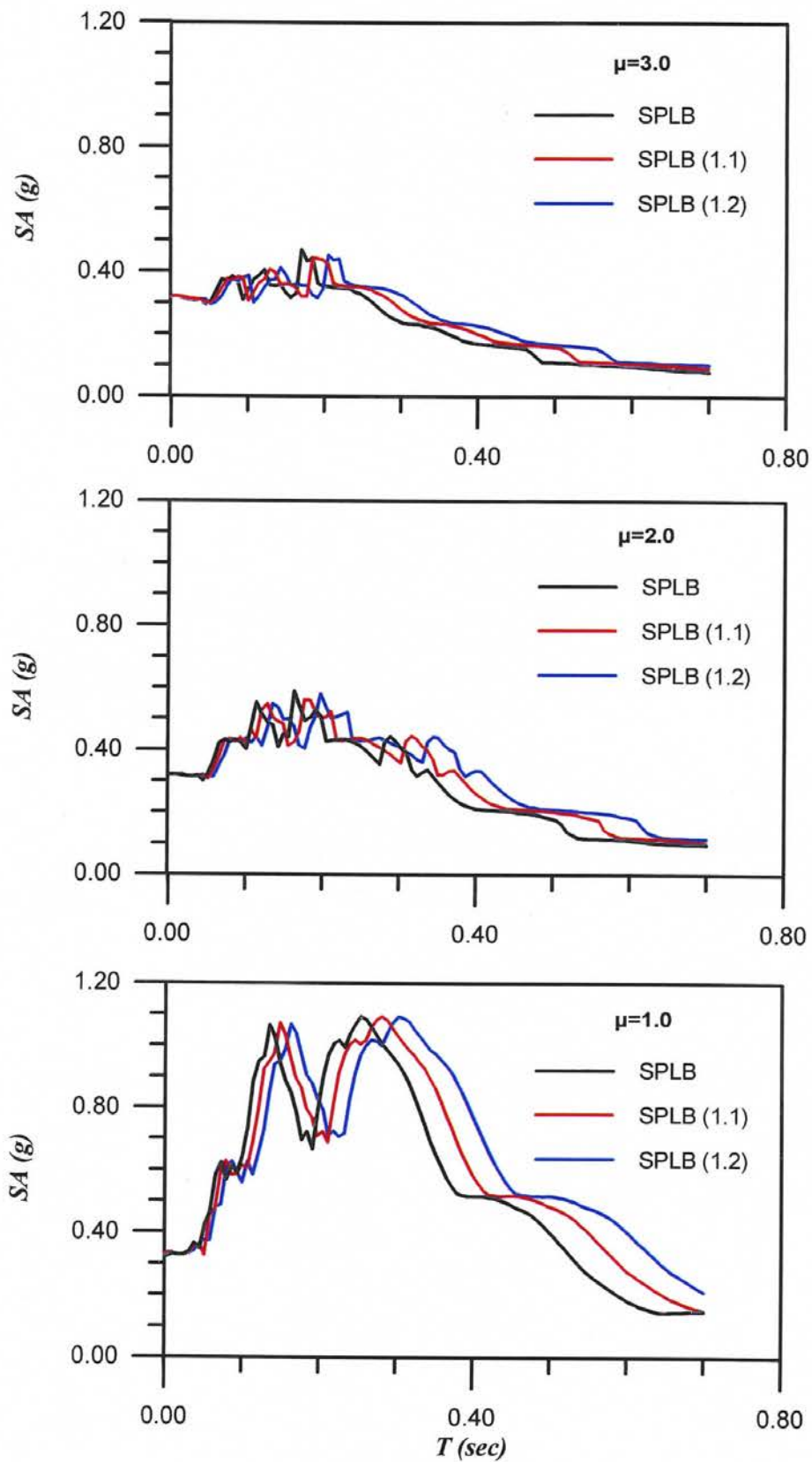
Σχήμα 5.16

Το τριδιάστατο προσομοίωμα του τύμβου # 2.



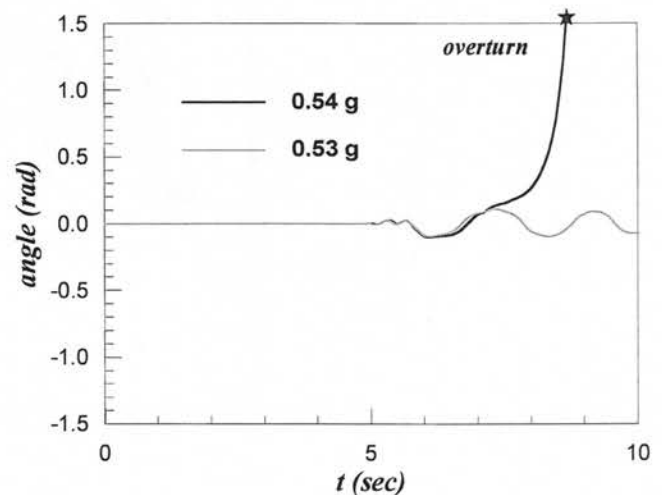
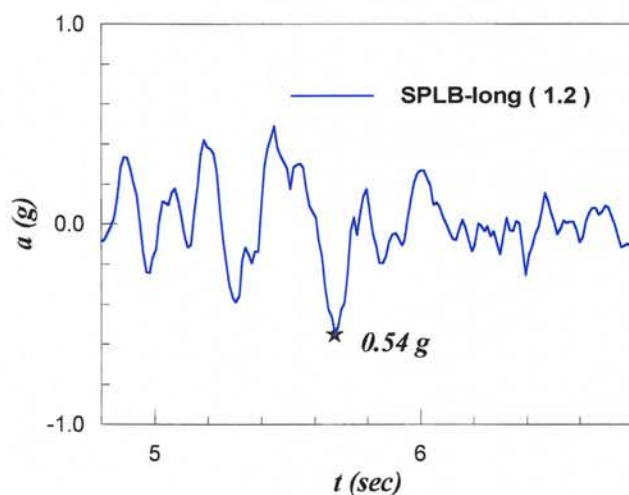
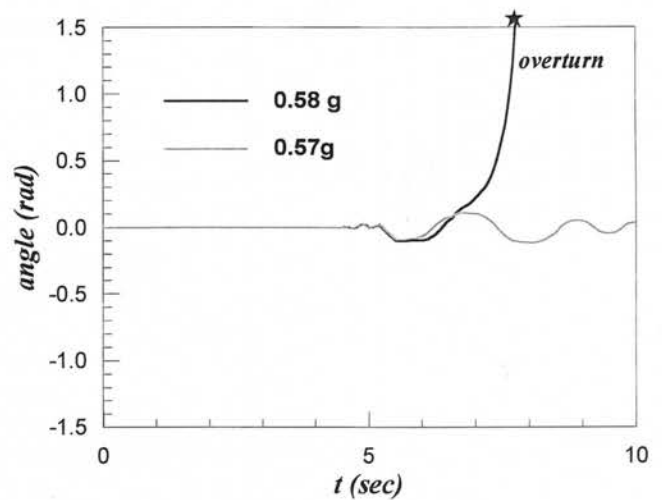
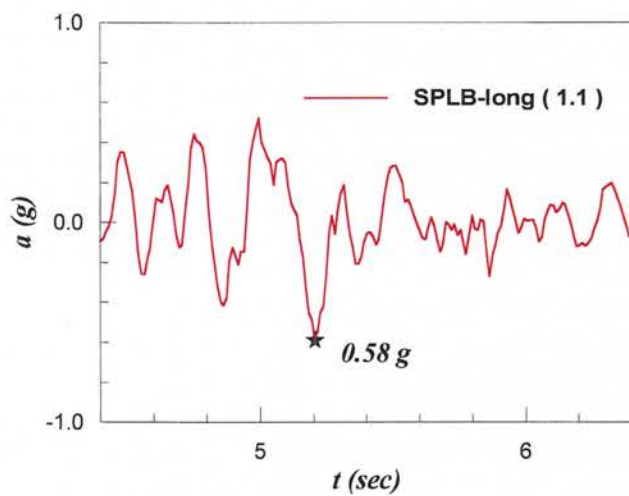
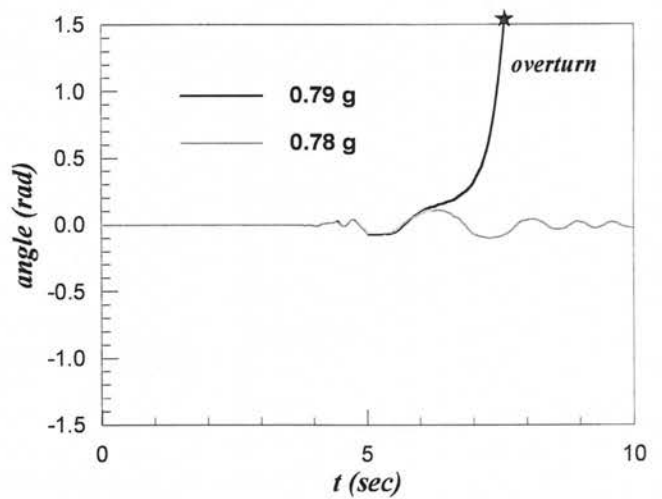
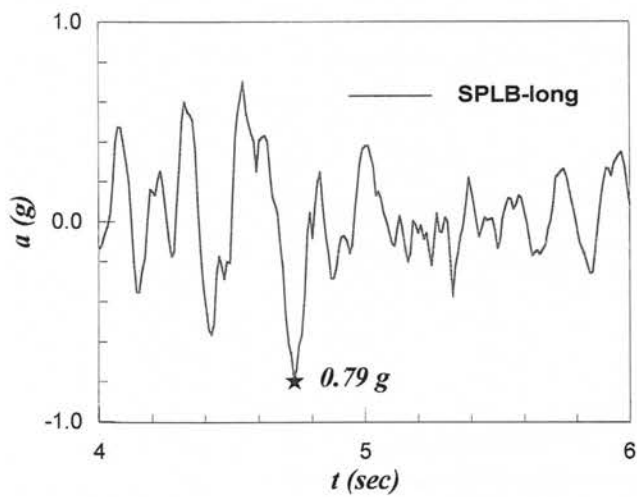
Σχήμα 5.17

Τα τρία επιταχυνσιογραφήματα που χρησιμοποιήθηκαν ως δοκιμαστικές διεγέρσεις : Η πραγματική καταγραφή SPLB-long (μαύρη γραμμή) και τα δύο τροποποιημένα επιταχυνσιογραφήματα όπως προκύπτουν από το SPLB-long με αύξηση του χρονικού βήματος κατά 10% και 20% (κόκκινη και μπλε γραμμή αντιστοίχως)



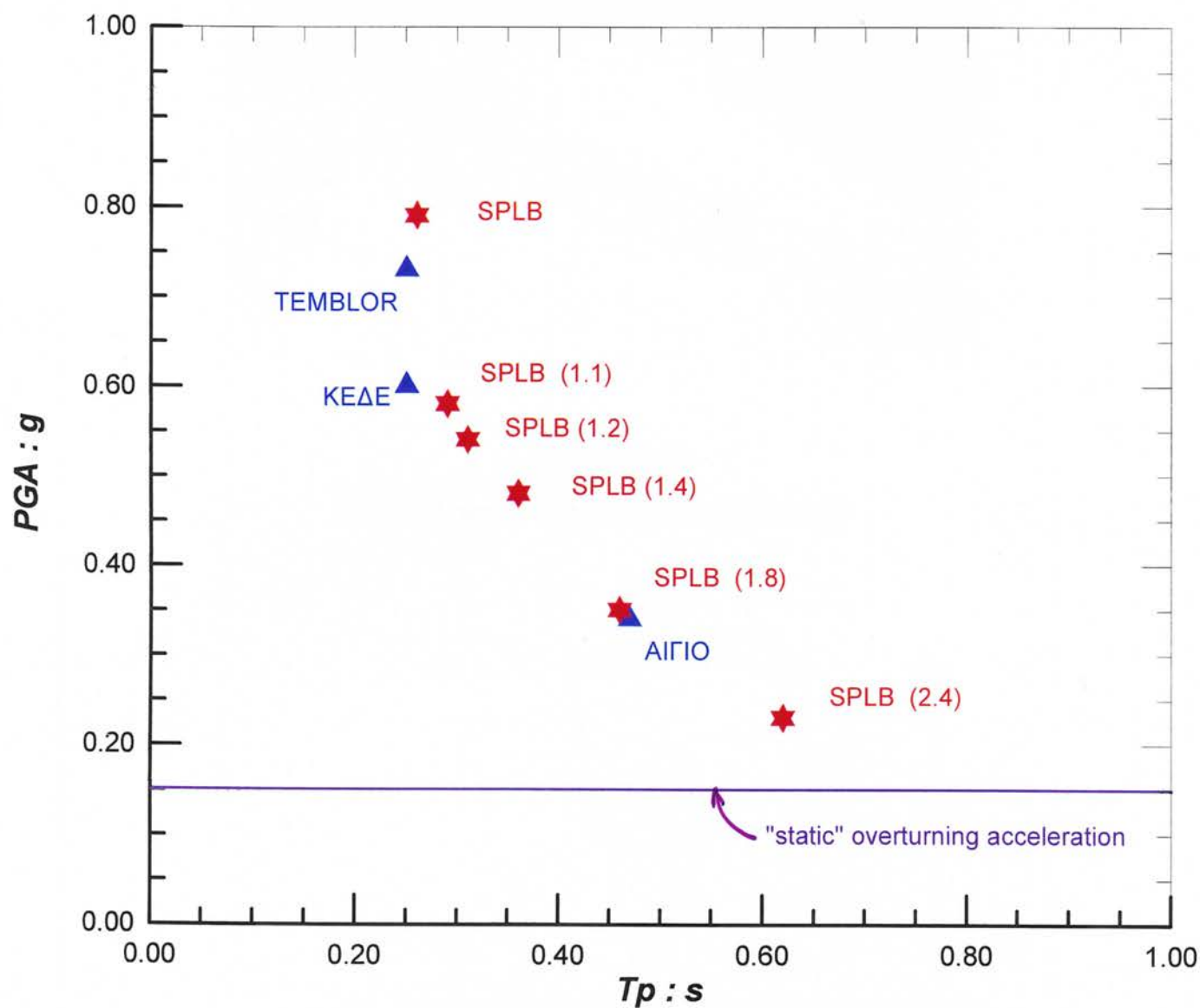
Σχήμα 5.18

Τα ελαστικά ($\mu_d=1$) και ανελαστικά ($\mu_d=2$ και 3) φάσματα απόκρισης



Σχήμα 5.19

Τα επιταχυνσιογραφήματα που ανατρέπουν οριακά τον τύμβο στις τρεις περιπτώσεις. Στην δεξιά στήλη απεικονίζεται η απόκρισή του υπό μορφήν της γωνίας $\theta = \theta(t)$



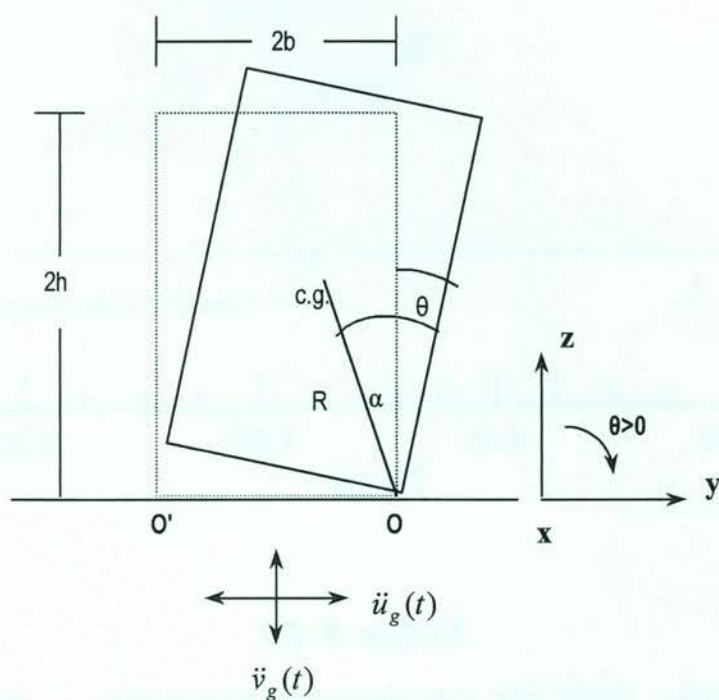
Σχήμα 5.20.

Οι κορυφαίες τιμές της επιτάχυνσης ανατροπής συναρτήσει της δεσπόζουσας περιόδου της διεγέρσεως



Σχήμα 5.21

Ο μαρμαρίνος τύμβος # 3 της Φυλής



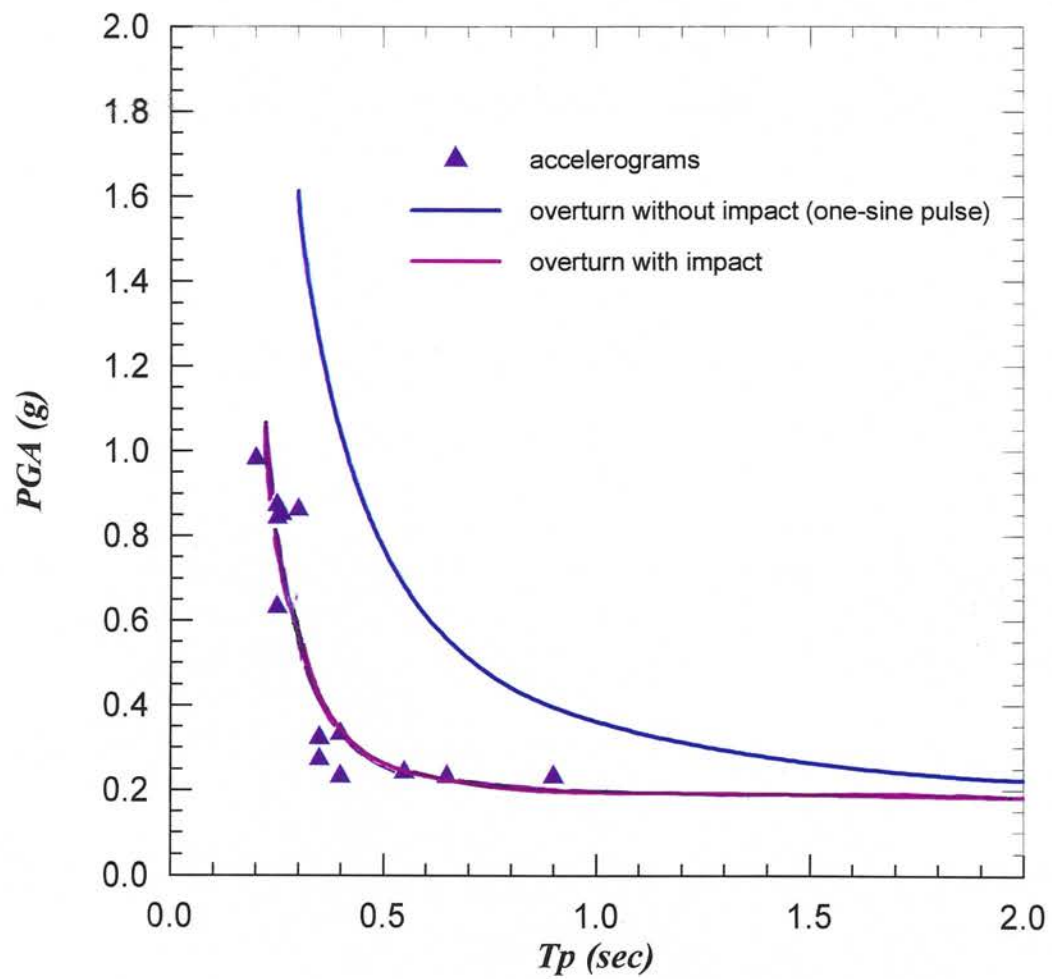
$$h = 63.5 \text{ cm}, \quad b_x = 25 \text{ cm}, \quad b_y = 10 \text{ cm}$$

$$\gamma_x = 2.5, \quad \gamma_y = 6.3$$

$$\mu = 0.50 - 0.75$$

Σχήμα 5.22

Το διδιάστατο αναλυτικό προσομοίωμα του προβλήματος



Σχήμα 5.23

Οι κρίσιμες επιταχύνσεις ανατροπής για ημιτονική και σεισμική διέγερση