

Δ.

ΑΝΑΤΡΟΠΗ
ΜΑΡΜΑΡΙΝΟΥ ΤΥΜΒΟΥ
(Νεκροταφείο Φυλής)

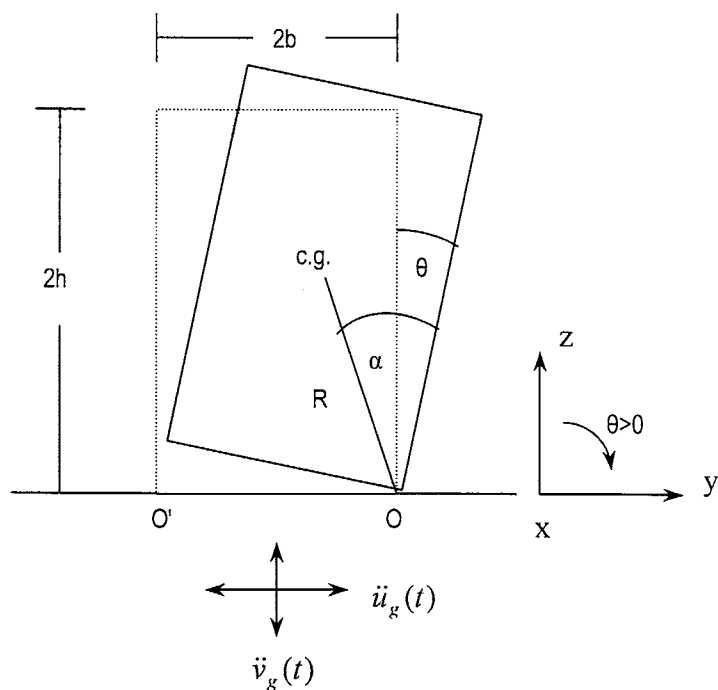
Γ.Γκαζέτας, Μ. Αποστόλου

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η περίπτωση του τύμβου του νεκροταφείου της Φυλής αποτελεί ένα από τα πιο χαρακτηριστικά ευρήματα των κοιμητηρίων που επλήγησαν βαριά στον σεισμό της Πάρνηθας, στην προσπάθεια έμμεσης εκτίμησης της σεισμικής έντασης στην πλειόσειστη περιοχή. Όπως φαίνεται στην φωτογραφία, ο μαρμάρινος όγκος αστόχησε από ανατροπή ενώ οι πλάκες που τον περιέβαλλαν δεν επέτρεψαν την ολίσθησή του: προσομοιώνεται με ένα ελεύθερα εδραζόμενο στερεό του οποίου ο συντελεστής τριβής στην στήριξη είναι τέτοιος ώστε $\mu > a_{g(h)}$. Ο έμμεσος υπολογισμός των ελαχίστων επιταχύνσεων (συναρτήσει της περιόδου διέγερσης) που μπορούν να προκαλέσουν την συγκεκριμένη αστοχία αποτελεί τον σκοπό της παρούσας μελέτης.



Σχήμα 1.1 Ο μαρμάρινος τύμβος 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 1.2. Το διδιάστατο προσομοίωμα του προβλήματος

Οι διαφορικές εξισώσεις που διέπουν τον λικνισμό απαραμόρφωτου στερεού με ελεύθερη στήριξη (απλή επαφή) στη βάση λόγω οριζόντιας και κατακόρυφης διέγερσης προκύπτουν από την ισορροπία ροπών του σώματος για τυχαία γωνιακή μετατόπιση θ , δηλαδή :

$$\begin{cases} I_o \ddot{\theta}(t) + mg \left(1 + \frac{\ddot{v}_g(t)}{g}\right) R \sin(\alpha - \theta) = -m \ddot{u}_g(t) R \cos(\alpha - \theta), & \theta > 0 \\ I_o \ddot{\theta}(t) + mg \left(1 + \frac{\ddot{v}_g(t)}{g}\right) R \sin(-\alpha - \theta) = -m \ddot{u}_g(t) R \cos(-\alpha - \theta), & \theta < 0 \end{cases}$$

Για μικρή γωνία $\alpha = \arcsin(b/b) (< 15^\circ)$, το σύστημα μεταπίπτει κατά προσέγγιση σε γραμμικό. Ειδικότερα για ορθογωνική διατομή και διέγερση ενός ημιτονικού κύκλου (παλμού), οι διαφορικές εξισώσεις απλοποιούνται σε:

$$\begin{cases} \ddot{\theta}(t) - p^2 \theta(t) = -a_p p^2 \sin(\omega t + \psi) - p^2 \alpha, & \theta > 0 \\ \ddot{\theta}(t) - p^2 \theta(t) = -a_p p^2 \sin(\omega t + \psi) + p^2 \alpha, & \theta < 0 \end{cases}$$

όπου $p = \sqrt{3g/4R}$, η *δυναμική παράμετρος* του σώματος για ορθογωνική διατομή.

Η ημιτονική φόρτιση περιγράφεται ως εξής :

$$\ddot{u}_g(t) = \begin{cases} a_p \sin(\omega_p t + \psi), & t \leq 2\pi / \omega_p \\ 0, & t > 2\pi / \omega_p \end{cases}$$

Από τη γεωμετρία του σώματος έχουμε :

$$\alpha = 9^\circ \text{ και } p = 3.38 \text{ rad/sec}$$

Σύμφωνα με την αναλυτική λύση των Makris & Zhang (1999) υπάρχουν δύο δυνατές περιπτώσεις ανατροπής σε διέγερση ημιτονικού παλμού: μετά από μία κρούση, και χωρίς προηγουμένως κρούση. Με βάση την επίλυση αυτή και ανάλογα με τη συχνότητα της διέγερσης διακρίνονται δύο περιοχές :

(1) $\omega_p > 6.6 \times 3.38 = 22.3 \text{ rad/s}$ ή $T_p < 0.28 \text{ s}$ όπου εάν υπάρξει ανατροπή αυτή υποχρεωτικά θα γίνει χωρίς κρούση προηγουμένως

(2) $\omega_p < 6.6 \times 3.38 = 22.3 \text{ rad/s}$ ή $T_p > 0.28 \text{ s}$ στην οποία η ανατροπή γίνεται με ή χωρίς προηγούμενη κρούση.

Η περίπτωση αυτή θα εξετασθεί ως η μόνη ρεαλιστική (για την (1) πρέπει να δεχθούμε $T_p < 0.3 \text{ s}$ και $a_{po} > 1.5 \text{ g!}$). Στον παρακάτω πίνακα συνοψίζονται τα παραμετρικά αποτελέσματα για την εδαφική επιτάχυνση που απαιτείται για την ανατροπή συναρτήσει της συχνότητας ω_p .

Πίνακας 1.1.

Οι κρίσιμες επιταχύνσεις για ανατροπή με ή χωρίς κρούση
από την αναλυτική λύση του ημιτονικού παλμού (Makris and Zhang, 1999)

T_p (sec)	ω_p / p	a_{po} (g)	
		Με κρούση	Χωρίς κρούση
0.3	6.2	0.89	1.62
0.4	4.6	0.39	1.13
0.5	3.7	0.27	0.77
0.6	3.1	0.19	0.58
0.8	2.3	0.16	0.47
1.0	1.8	0.16	0.35
1.2	1.5	0.16	0.30
1.4	1.3	0.16	0.27
1.6	1.2	0.16	0.25
1.8	1.0	0.16	0.24
2.0	0.9	0.16	0.23

2. ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

2.1. Απόκριση σε Ημιτονικό Παλμό

Για την επαλήθευση των ανωτέρω αποτελεσμάτων αλλά και την επέκταση της ανάλυσης σε διέγερση με πραγματικά επιταχυνσιογραφήματα σε μία ή περισσότερες διευθύνσεις, το πρόβλημα της ανατροπής του μαρμάρινου τύμβου επιλύεται αριθμητικά με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Τόσο ο τύμβος όσο και η βάση προσομοιώνονται με τριδιάστατα ορθογώνια στοιχεία, ενώ η διεπιφάνεια μεταξύ των δύο σωμάτων χαρακτηρίζεται με συντελεστή τριβής αρκετά μεγάλο ώστε να αποτραπεί η ολίσθηση (η επίδραση της ολίσθησης στην ανατροπή του τύμβου μελετάται ξεχωριστά).

Κατ'αρχήν εξετάζεται η απόκριση του συστήματος σε διέγερση ημιτονικού παλμού όπου παρατηρείται σύγκλιση των απαιτούμενων μεγίστων επιταχύνσεων για ανατροπή με τις αντίστοιχες από την αναλυτική λύση (βλ. πίν.1.1.), ιδιαίτερα σε σχετικώς μεγάλες περιόδους. Επίσης από τις οριακές καταστάσεις ευστάθειας του συστήματος επαληθεύεται η ύπαρξη ενός “βρόχου” στο διάγραμμα επιτάχυνσης ανατροπής - συχνότητας διεγέρσεως, απόρροια της έντονης μη-γραμμικότητας του προβλήματος. Συγκεκριμένα, για ένα εύρος συχνοτήτων, ο τύμβος ενώ αστοχεί με κρούση μέχρι η μέγιστη επιτάχυνση να φθάσει μια οριακή τιμή, εν τούτοις δεν ανατρέπεται αν ξεπερασθεί η τιμή αυτή μέχρι κάποιο όριο. Το διάστημα αυτό των συχνοτήτων εξαρτάται αποκλειστικά από τη δυναμική παράμετρο ρ του σώματος. Αν η μέγιστη επιτάχυνση αυξηθεί παιρεταίρω, ο τύμβος ανατρέπεται χωρίς κρούση. Επιπλέον, όπως αποδυνκνείται αναλυτικά, υπάρχει μία μέγιστη συχνότητα διέγερσης

όπου πέραν αυτής ο τύμβος ανατρέπεται μόνον χωρίς κρούση. Τέλος, για αρκετά μικρές συχνότητες ο βρόχος εκφυλίζεται σε μία οριζόντια γραμμή που συμπίπτει με τη γραμμή της κρίσιμης επιτάχυνσης ανατροπής (χωρίς κρούση). Η επιτάχυνση αυτή για $\omega \rightarrow 0$ αντιστοιχεί στην “στατική” επιτάχυνση ανατροπής :

$$\frac{A}{g} = \frac{b}{h} \approx 0.16$$

Οι κρίσιμες επιταχύνσεις που απαιτούνται για να προκαλέσουν ανατροπή με ή χωρίς κρούση παριστάνονται στον πίνακα 2.1.

Πίνακας 2.1

Οι κρίσιμες επιταχύνσεις για ανατροπή με ή χωρίς κρούση από την αριθμητική επίλυση με διεγέρσεις ημιτονικών παλμών.

T_p (sec)	ω_p / p	a_{po} (g)	
		Με κρούση	Χωρίς κρούση
0.3	6.2	0.67	1.61 ⁽¹⁾
0.4	4.6	0.34	1.04 ⁽²⁾
0.5	3.7	0.26	0.77 ⁽³⁾
0.6	3.1	0.23	0.61 ⁽⁴⁾
0.8	2.3	0.20	0.44
1.2	1.5	0.19	0.31
1.6	1.2	0.185	0.25
2.0	0.9	0.18	0.22

(1) $a=1.52g$ ανατροπή με κρούση

1.61g ανατροπή χωρίς κρούση

1.60g όρθιο

1.55g όρθιο

(2) $a=1.01g$ ανατροπή με κρούση

1.04g ανατροπή χωρίς κρούση

1.02g όρθιο

1.03g όρθιο

(3) $a=0.75g$ ανατροπή με κρούση

0.77g ανατροπή χωρίς κρούση

0.76g όρθιο

(4) $a=0.60g$ ανατροπή με κρούση

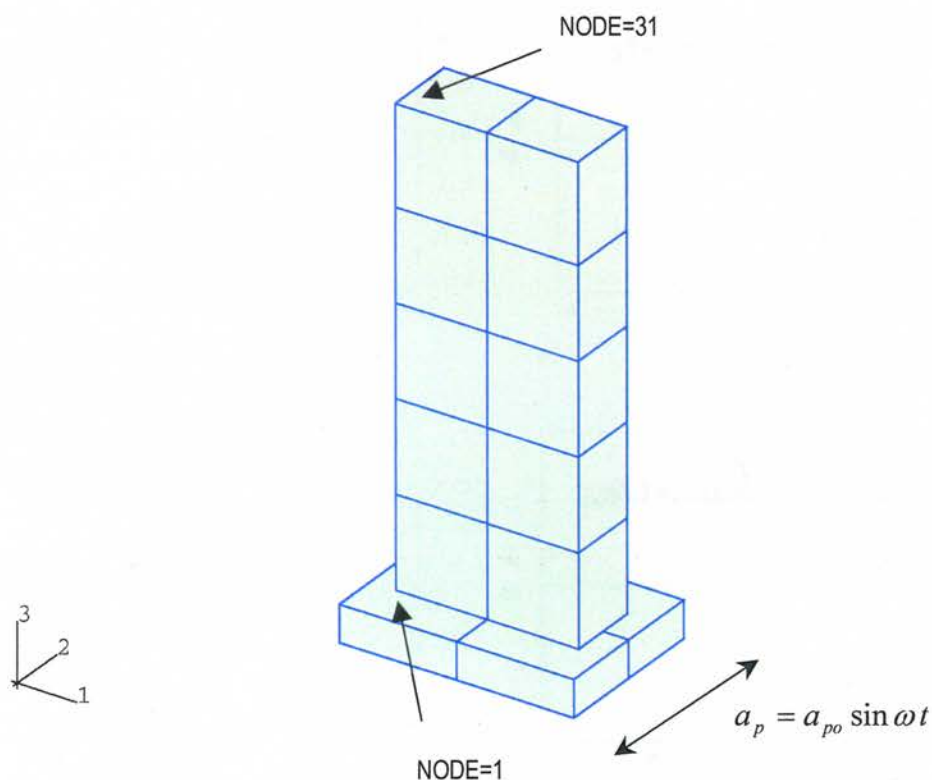
0.61g ανατροπή χωρίς κρούση

0.605g όρθιο

Στα επόμενα διαγράμματα παρουσιάζεται η απόκριση του τύμβου σε ημιτονικό παλμό για διαφορετικές περιόδους διέγερσης και μέγιστη επιτάχυνση παραπλήσια με την κρίσιμη επιτάχυνση ανατροπής όπου,

δ = η σχετική οριζόντια μετατόπιση της κορυφής ως προς τη βάση.

$$\delta = u_2(\text{node1}) - u_2(\text{node 31})$$

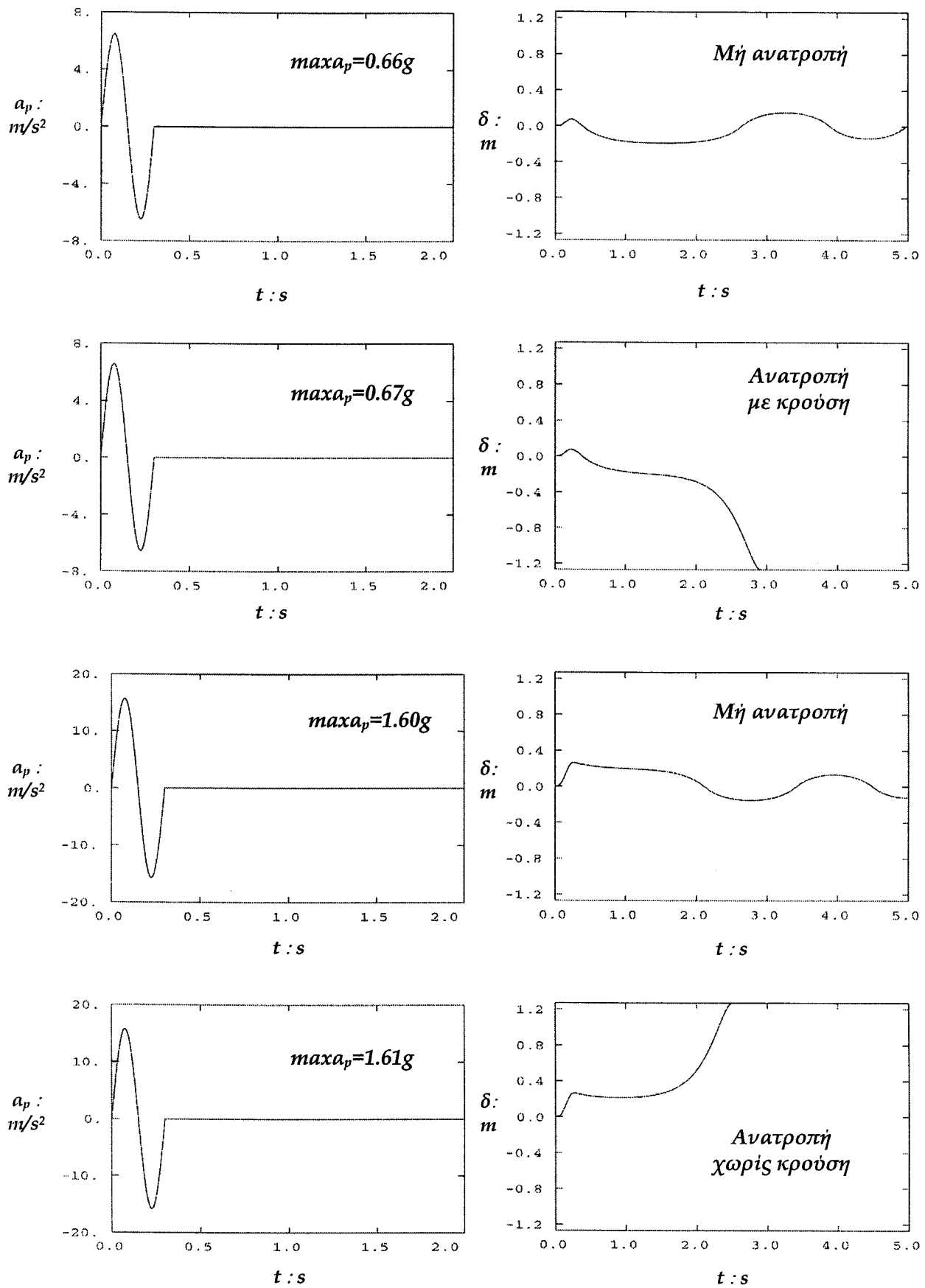


$$\delta = 0 \begin{cases} \dot{\delta} = 0 \rightarrow \text{ηρεμία, ολίσθηση} \\ \dot{\delta} \neq 0 \rightarrow \text{κρούση} \end{cases}$$

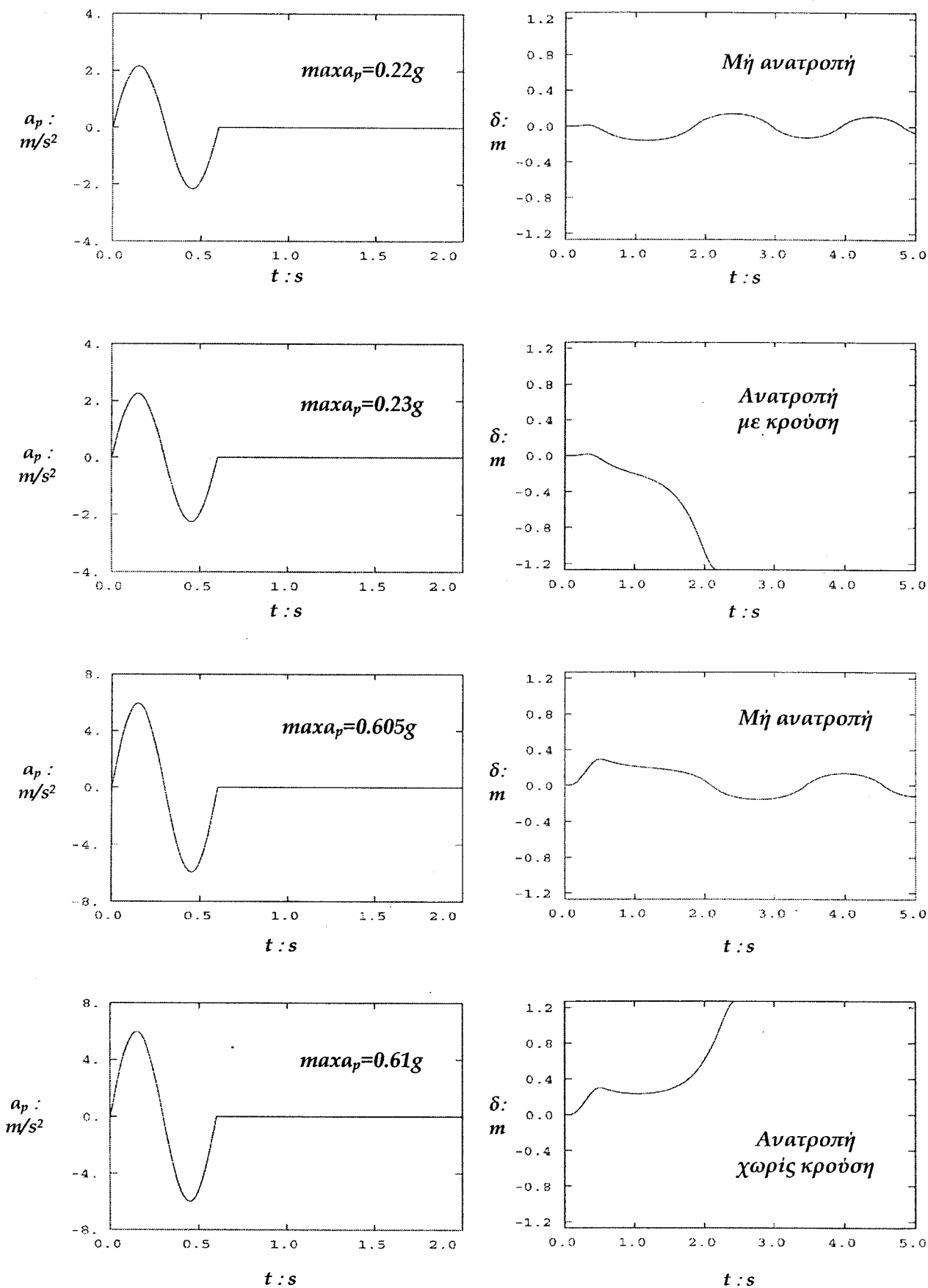
$$\delta = h = 1.27m \rightarrow \text{ανατροπή}$$

$$0 < |\delta| < h \rightarrow \text{λικνισμός}$$

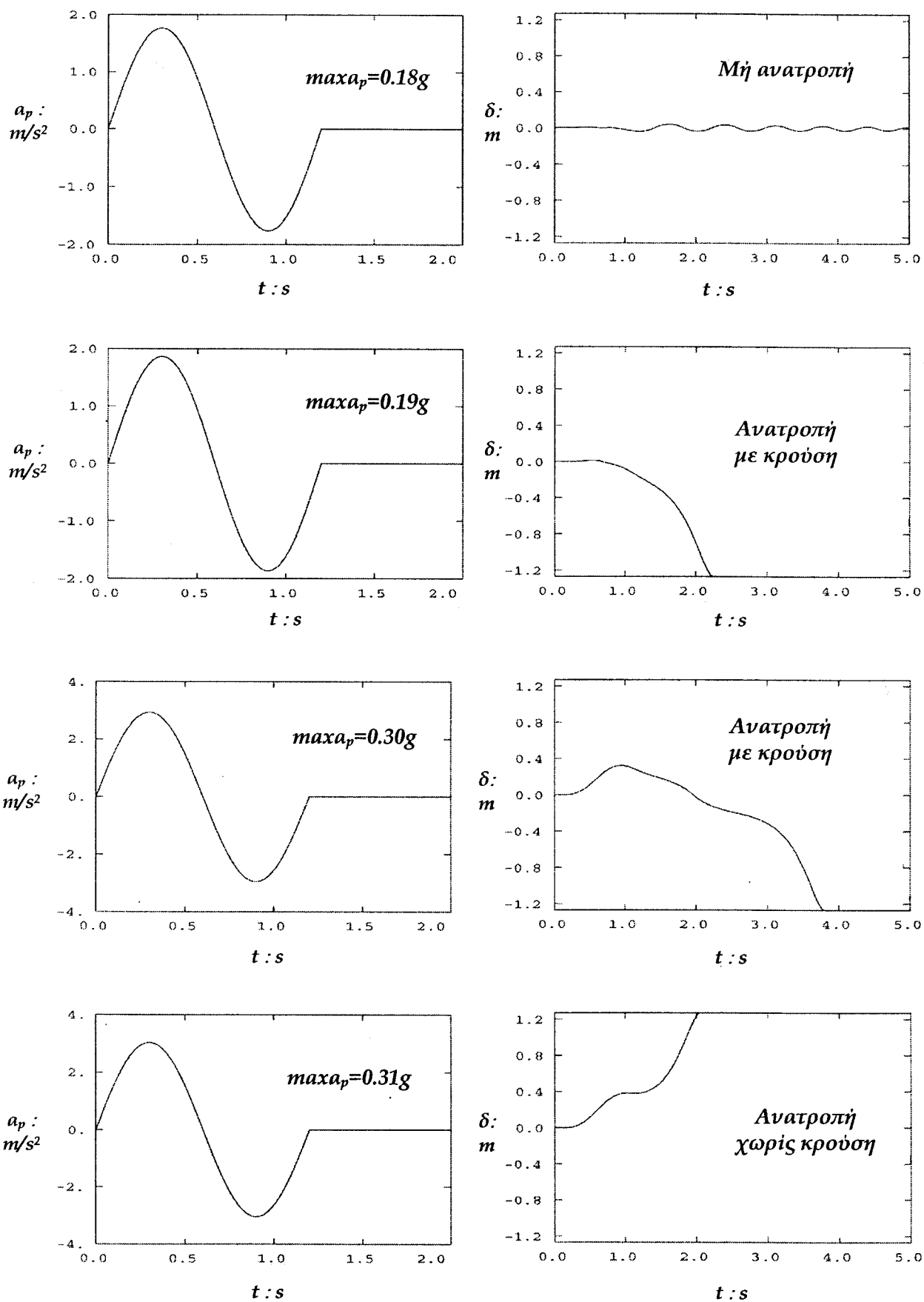
Σχήμα 2.1. Το αριθμητικό προσομοίωμα του συστήματος. Η μορφή της κίνησης προκύπτει από την σχετική οριζόντια μετατόπιση των κόμβων (1) και (31)



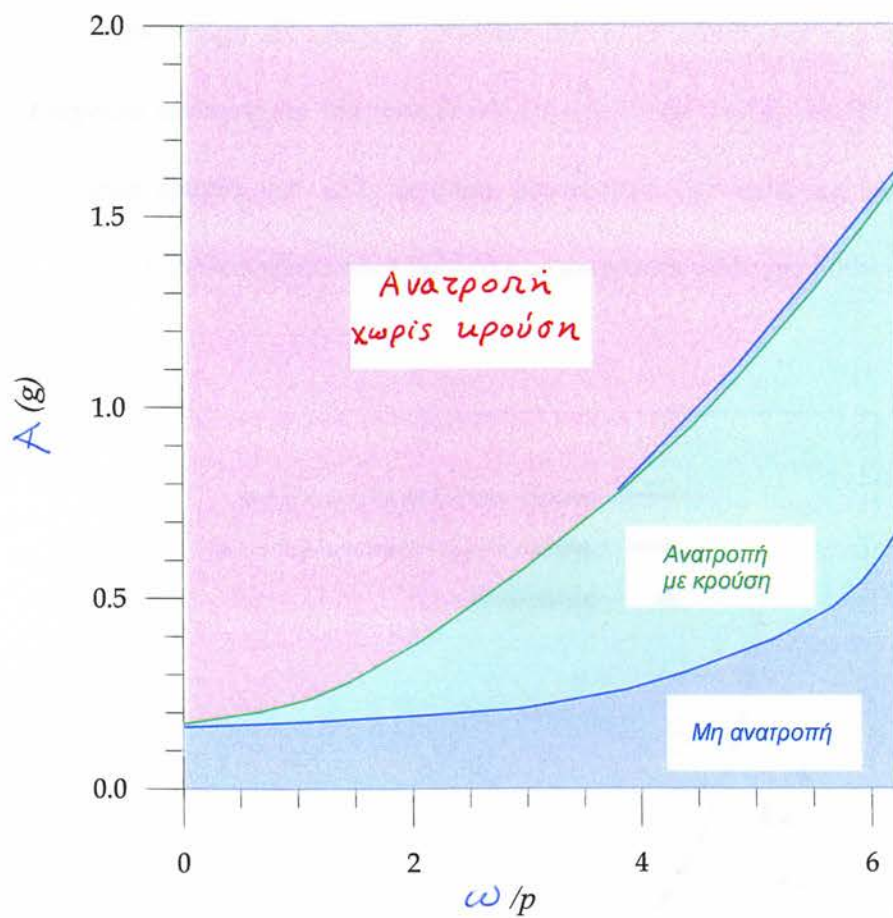
Σχήμα 2.2. Οι οριακές καταστάσεις της απόκρισης του τύμβου σε διέγερση ημιτονικού παλμού, $T=0.3s$



Σχήμα 2.3. Οι οριακές καταστάσεις της απόκρισης του τμήνου σε διέγερση ημιτονικού παλμού, $T=0.6s$



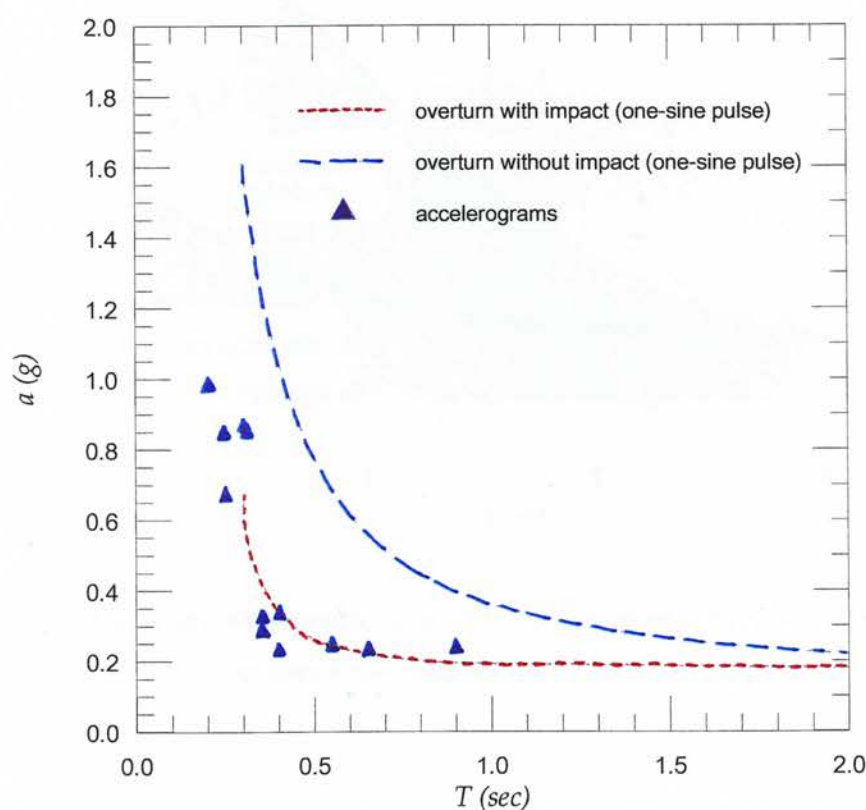
Σχήμα 2.4. Οι οριακές καταστάσεις της απόκρισης του τόμβου σε διέγερση ημιτονικού παλμού, $T=1.2s$



Σχήμα 2.5 Γραφική απεικόνιση των τριών δυνατών καταστάσεων της απόκρισης του τύμβου σε διέγερση ενός ημιτονικού κύκλου

2.2. Απόκριση σε Σεισμική Διέγερση

Η ανάλυση επεκτείνεται θέτοντας ως διέγερση επιταχυνσιογραφήματα από σεισμικά επεισόδια του ελλαδικού αλλά και διεθνούς χώρου. Σε πρώτο στάδιο, η κίνηση της βάσης τίθεται μόνον κατά την μία διεύθυνση και επιχειρείται σύγκριση των αποτελεσμάτων με αυτά του ημιτονικού παλμού. Για τον σκοπό αυτό, το χαρακτηριστικό μέγεθος της κάθε καταγραφής αποτελεί η δεσπόζουσα περίοδος.



Σχήμα 2.6 Οι κρίσιμες επιταχύνσεις για ανατροπή από ημιτονική και σεισμική διέγερση.

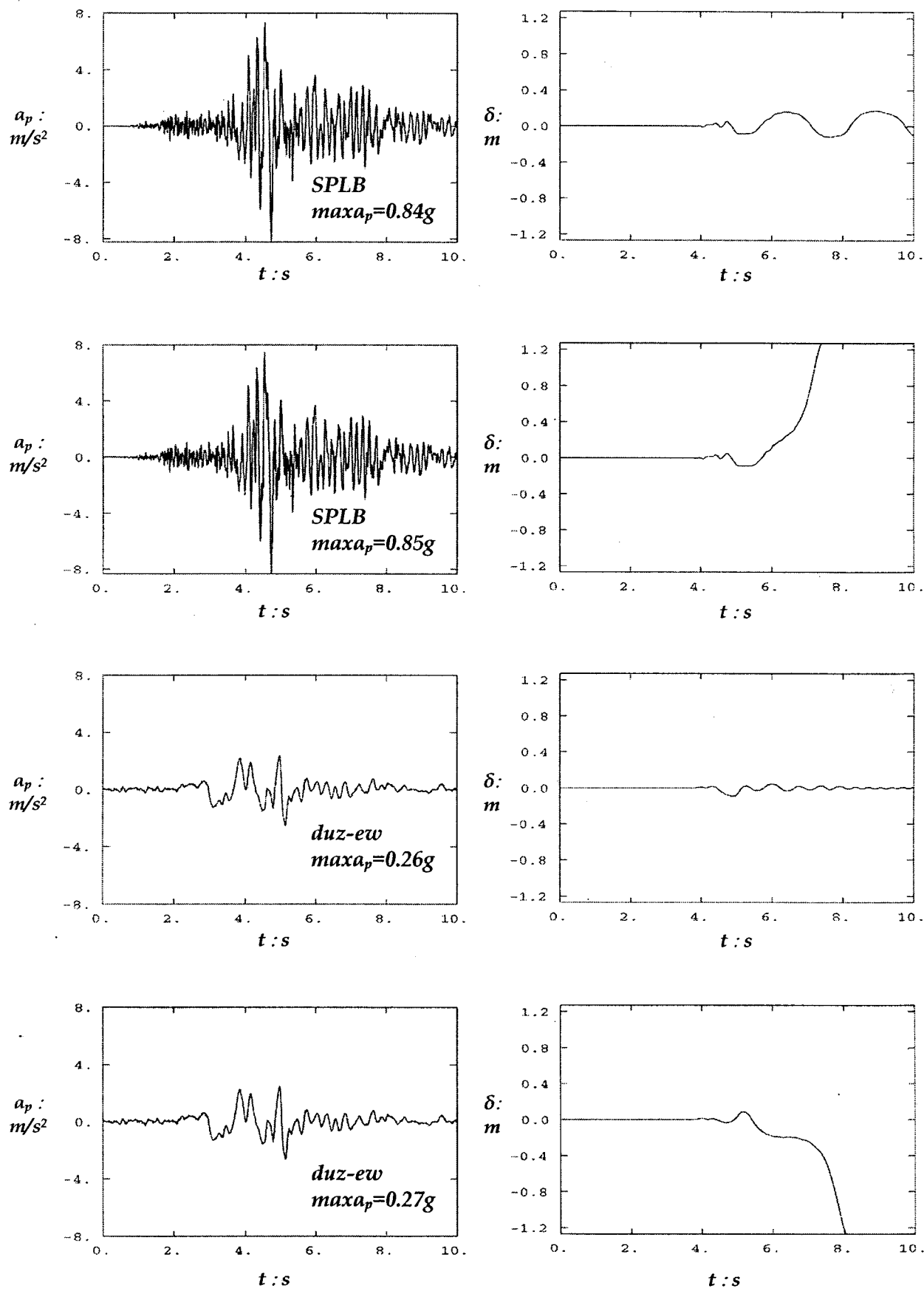
Στο σχήμα 2.6 παριστάνονται ως σημεία τα αποτελέσματα από την ανάλυση όπου φαίνεται να συγκλίνουν προς την καμπύλη μέγιστης επιτάχυνσης - περιόδου για ανατροπή με κρούση από τη διέγερση του ημιτονικού παλμού. Διακρίνονται τρεις περιοχές σχετικά με την περίοδο T . Στην πρώτη ($T \approx 0.2-0.3s$) η καμπύλη ($a_{over} - T$)

είναι σχεδόν κατακόρυφη και δύσκολα μπορεί να γίνει εκτίμηση της κρίσιμης επιτάχυνσης για ανατροπή για επιταχυνσιογραφήματα αυτής της ζώνης. Στην δεύτερη περιοχή ($0.3 \text{ s} < T < 0.6 \text{ s}$) η μείωση της επιτάχυνσης αυτής είναι εκθετική και το κρίσιμο μέγεθος στην ανατροπή αποτελεί η ταχύτητα (βλ. πίνακα 2.2). Για μεγάλες περιόδους ($T > 0.6 \text{ s}$) βρισκόμαστε στην στατική περιοχή όπου η επιτάχυνση είναι πρακτικώς σταθερή και ανεξάρτητη της δεσπόζουσας περιόδου. Αναλυτικά οι οριακές τιμές των επιταχύνσεων και των αντιστοίχων ταχυτήτων για κάθε διεγερση παρουσιάζονται στον πίνακα 2.2.

Πίνακας 2.2

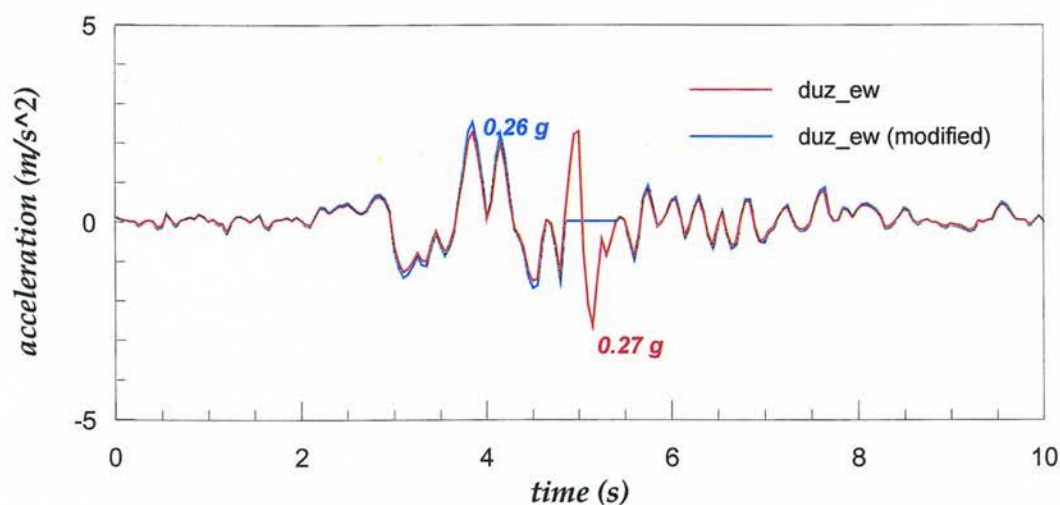
Οι κρίσιμες επιταχύνσεις για ανατροπή από την αριθμητική λύση με σεισμικές διεγέρσεις

ΔΙΕΓΕΡΣΗ	ΔΕΣΠΟΖΟΥΣΑ ΠΕΡΙΟΔΟΣ (s)	ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΗ ΓΙΑ ΑΝΑΤΡΟΠΗ (g)	ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΓΙΑ ΑΝΑΤΡΟΠΗ (m/sec)
<i>SPLB long</i>	0.3	0.85	0.53
<i>SPLB trans</i>	0.3	0.85	0.90
<i>ΚΕΔΕ long</i>	0.25	0.63	0.39
<i>ΚΕΔΕ trans</i>	0.25	0.87	0.43
<i>Shinkobe</i>	0.4	0.33	0.48
<i>FUKIAI</i>	0.9	0.23	0.35
<i>Duzce ew</i>	0.35	0.27	0.46
<i>Duzce ns</i>	0.4	0.23	0.43
<i>Northridge (Sylmar)</i>	0.55	0.24	0.31
<i>San Fern. (Pacoima)</i>	0.65	0.23	0.27
<i>MNSA (2sec)</i>	0.2	0.98	0.32
<i>Πύργος (2sec)</i>	0.3	0.86	0.38
<i>Parkfield (2sec)</i>	0.25	0.84	0.40



Σχήμα 2.7. Οι οριακές καταστάσεις της αποκρίσεως του τμήνου σε σεισμική διέγερση

Από τα προηγούμενα αποτελέσματα είναι προφανής ο δυσμενής ρόλος της δεσπόζουσας περιόδου στην ανατροπή του τύμβου για την συντριπτική πλειονότητα των σεισμικών επεισοδίων. Η έντονη εξάρτηση της απόκρισης από τη δεσπόζουσα περίοδο της διέγερσης γίνεται εύκολα αντιληπτή συγκρίνοντας τα αποτελέσματα της ανάλυσης δύο διαφορετικών μεταξύ τους χρονοϊστοριών : *Σεπόλια*, *Duzce*. Έτσι όπως παρατηρούμε στο σχήμα 2.7, χρησιμοποιώντας την καταγραφή των *Σεπολίων* με περίοδο περίπου 0.3 s απαιτείται επικλιμάκια αναγωγή της χρονοϊστορίας ώστε να έχει μέγιστη επιτάχυνση 0.85 g για να υπάρξει οριακά ανατροπή του τύμβου. Αντιθέτως στην περίπτωση του *Düzce* με δεσπόζουσες περιόδους έως 1.0 s αρκεί μέγιστη επιτάχυνση μόλις 0.27 g για να ανατρέψει τον τύμβο!



Σχήμα 2.8 Οι δύο χρονοϊστορίες του *duzce* (η κόκκινη απεικονίζει την πραγματική καταγραφή και η γαλάζια την τροποποιημένη) που προκαλούν οριακά την ανατροπή του τύμβου. Η ομοιότητα των δύο είναι προφανής.

Παρατηρώντας το επιταχυνσιογράφημα αυτό βλέπουμε ότι εκτός από τον κρίσιμο για κύκλο περιόδου 0.4 s , μετά από 1.0 s υπάρχει και ένας σημαντικός, σχεδόν ημιτονικός κύκλος ίσου περίπου πλάτους αλλά με σαφώς μικρότερη περίοδο. Αφαιρώντας τον κύκλο αυτό από το επιταχυνσιογράφημα και επαναλαμβάνοντας την προηγούμενη ανάλυση, προκύπτει ότι η χρονοϊστορία της διέγερσης που προκαλεί οριακά την ανατροπή είναι η ίδια και στις δύο περιπτώσεις, δηλαδή η απόκριση του τύμβου δεν «αντιλαμβάνεται» καθόλου τον ισχυρό αυτό αλλά και υψίσυχνο ταυτοχρόνως παλμό (βλέπε σχήμα 2.8)!

•Επίδραση Κατακόρυφης Επιτάχυνσης

Για τον έλεγχο της επιρροής της κατακόρυφης συνιστώσας στην κρίσιμη (οριζόντια) επιτάχυνση ανατροπής του τύμβου, χρησιμοποιούνται για την οριζόντια και κατακόρυφη διέγερση μερικά από τα πραγματικά επιταχυνσιογραφήματα των μονοδιάστατων αναλύσεων. Επίσης κάθε ανάλυση επαναλαμβάνεται αντιστρέφοντας το πρόσημο της κατακόρυφης επιτάχυνσης με σκοπό να εξετασθεί τόσο η δυσμενής όσο και η ευνοϊκή της επίδραση στην ανατροπή. Σε όλες τις αναλύσεις, η κατακόρυφη συνιστώσα υφίσταται επικλιμάκια αναγωγή ώστε η μέγιστη τιμή της να είναι 1.0 g, ενώ η διάρκεια των διεγέρσεων είναι 10 s.

Πίνακας 2.3.

Οι κρίσιμες επιταχύνσεις για ανατροπή με ή χωρίς κατακόρυφη συνιστώσα. Όπου υπάρχει αρνητικό πρόσημο, η καταγραφή χρησιμοποιήθηκε με ανεστραμμένα πρόσημα.

ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ		ΚΡΙΣΙΜΗ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΗ ΜΕ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗ ΣΥΝΙΣΤΩΣΑ		ΚΡΙΣΙΜΗ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΗ ΧΩΡΙΣ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗ ΣΥΝΙΣΤΩΣΑ
ΟΡΙΖΟΝΤΙΑ	ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗ	(g)		(g)
<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>KEΔΕ long</i>	<i>KEΔΕ vert</i>	0.61(+)	0.67(-)	0.63
<i>KEΔΕ trans</i>	<i>KEΔΕ vert</i>	0.89(+)	0.89 (-)	0.87
<i>Sylmar long</i>	<i>Sylmar vert</i>	0.20(+)	0.26 (-)	0.23

Σε καμία περίπτωση η μεταβολή της κρίσιμης επιτάχυνσης δεν ξεπερνάει το $\pm 10\%$ γεγονός που φανερώνει την μάλλον μικρή επίδραση της κατακόρυφης συνιστώσας στην τιμή της οριζόντιας επιτάχυνσης ανατροπής. Η μικρή ευαισθησία της απόκρισης στην κατακόρυφη επιτάχυνση αρχικώς μπορεί να αποδοθεί κατά

πρώτον λόγο στον υψίσυχνο χαρακτήρα της (η κατασκευή «δεν προλαβαίνει» να αποκριθεί) και κατά δεύτερον στη χρονική υστέρηση μεταξύ των ισχυρών παλμών της οριζόντιας και της κατακόρυφης διέγερσης. Ας χρησιμοποιήσουμε όμως την ίδια ακριβώς χρονοϊστορία ως οριζόντια και κατακόρυφη επιτάχυνση ώστε να συμπίπτουν απολύτως τα μέγιστα στις δύο διευθύνσεις, μεγάλης μάλιστα δεσπόζουσας περιόδου (καταγραφή *Sylmar* από τον σεισμό του *Northridge*). Παρατηρούμε ότι η επιρροή της κατακόρυφης συνιστώσας στην τιμή της κρίσιμης οριζόντιας επιτάχυνσης αυτή είναι μικρή ($\pm 15\%$) και δυσπρόβλεπτη, άλλοτε θετική και άλλοτε αρνητική. (βλ. Πίνακα 2.4.).

Πίνακας 2.4.

Οι κρίσιμες επιταχύνσεις για ανατροπή με ή χωρίς κατακόρυφη συνιστώσα θέτοντας ως διέγερση την καταγραφή *Sylmar*. Στη δευτέρα γραμμή έχει χρησιμοποιηθεί ως οριζόντια και κατακόρυφη διέγερση η ίδια συνιστώσα.

ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ		ΚΡΙΣΙΜΗ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΗ ΜΕ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗ ΣΥΝΙΣΤΩΣΑ (g)		ΚΡΙΣΙΜΗ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΗ ΧΩΡΙΣ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗ ΣΥΝΙΣΤΩΣΑ (g)
ΟΡΙΖΟΝΤΙΑ	ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗ			
<i>Sylmar long</i>	<i>Sylmar vert</i>	0.20(+)	0.26 (-)	0.23
<i>Sylmar long</i>	<i>Sylmar long</i>	0.27(+)	0.26(-)	0.23

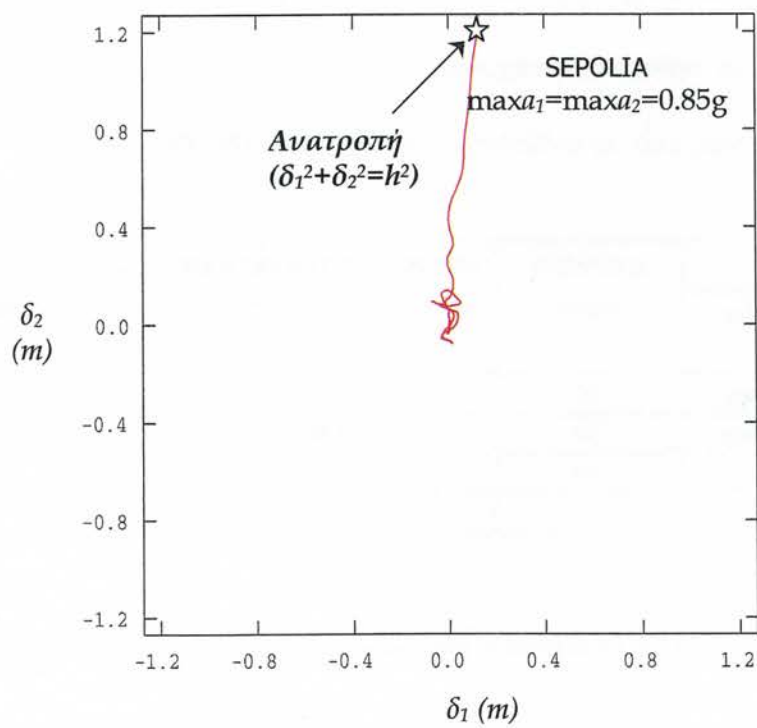
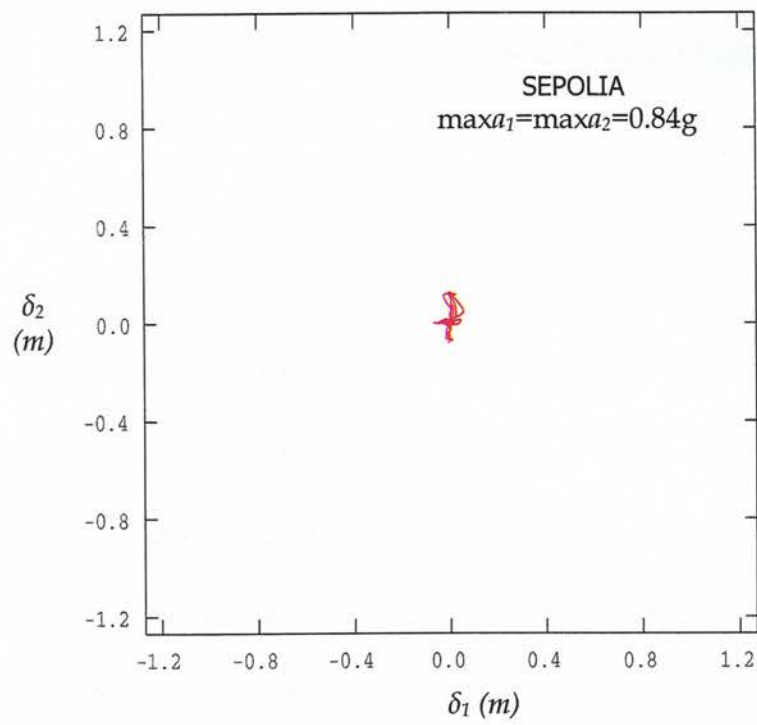
Αλληλεπίδραση Οριζοντίων Συνιστωσών με $\max A_1 = \max A_2$

Όπως διαπιστώνεται από τη γεωμετρία του, ο τύμβος είναι πολύ πιο «ευάλωτος» να ανατραπεί σε διέγερση μεγάλης περιόδου κατά την εγκάρσια διεύθυνση παρά κατά τη διαμήκη (οι «στατικές» επιταχύνσεις για ανατροπή κατά τις δύο διευθύνσεις είναι $a_{1(cr)} = b_1 / H = 0.40g \gg 0.16g = a_{2(cr)}$). Αν υποθεθεί ότι η αναλογία των κρίσιμων επιταχύνσεων διατηρείται περίπου σταθερή για μεγάλο εύρος περιόδων διέγερσης, τότε τα παραπάνω ισχύουν ανεξαρτήτως του φασματικού περιεχομένου του σεισμικού κραδασμού. Επεκτείνοντας την παραδοχή αυτή στην περίπτωση της διδιάστατης οριζόντιας σεισμικής διέγερσης όπου οι δύο συνιστώσες έχουν ίσα πλάτη, οι κρίσιμες επιταχύνσεις για ανατροπή αναμένεται να εξαρτώνται σχεδόν αποκλειστικώς από τις αντίστοιχες της εγκάρσιας διεύθυνσης.

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

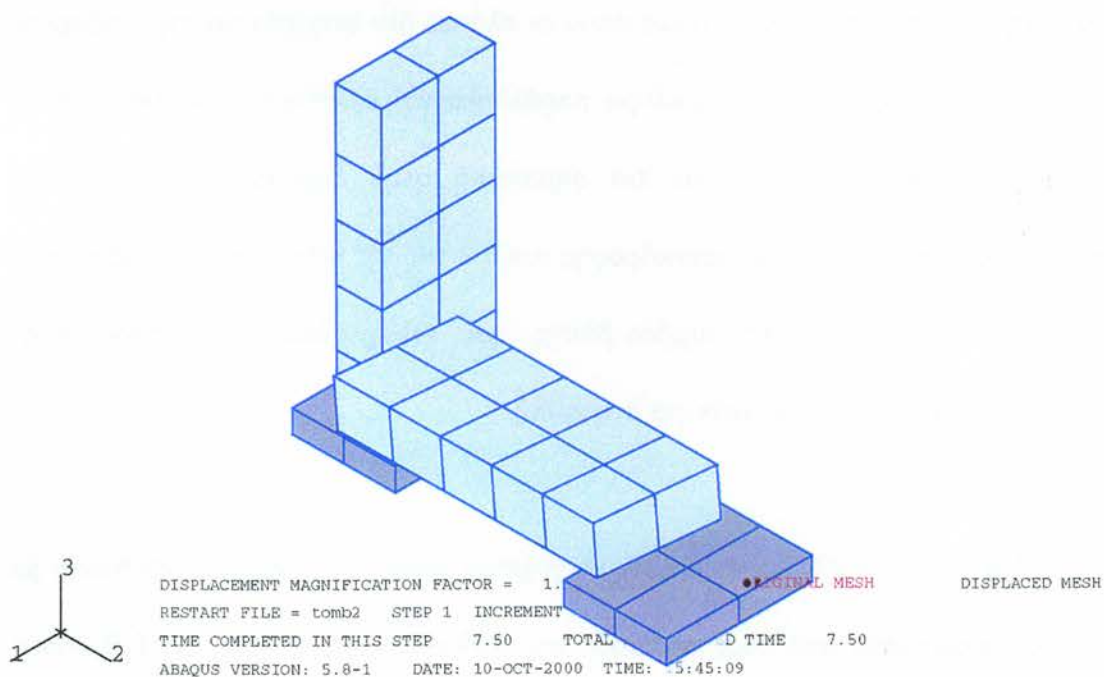
Πίνακας 2.5. Οι κρίσιμες επιταχύνσεις για ανατροπή με μία ή δύο οριζόντιες συνιστώσες

Πράγματι, όπως φαίνεται από τα αποτελέσματα της αριθμητικής ανάλυσης με οριζόντια φόρτιση και στις δύο διευθύνσεις και για διαφορετικές σε φασματικό περιεχόμενο σεισμικές καταγραφές, η διαμήκης συνιστώσα δεν μεταβάλλει καθόλου την κρίσιμη επιτάχυνση της μονοδιάστατης φόρτισης.



Σχήμα 2.9. Η τροχιά της κίνησης της κορυφής ως προς τη βάση για δύο οριακές ως προς την ανατροπή διεγέρσεις.

Επιπλέον, παρ'όλο το μεγάλο πλάτος της διαμήκουσ συνιστώσας, η διεύθυνση της λικνιστικής ταλάντωσης και της ανατροπής σχεδόν ταυτίζεται με την εγκάρσια (σχήμα 2.9) ενώ λόγω της «μονοδιάστατης» γεωμετρίας της βάσης του τύμβου η περιστροφή του ως προς τον κατακόρυφο άξονα (γενικώς προκαλείται από τη φόρτιση με δύο οριζόντιες συνιστώσες) είναι αμελητέα (σχήμα 2.10).

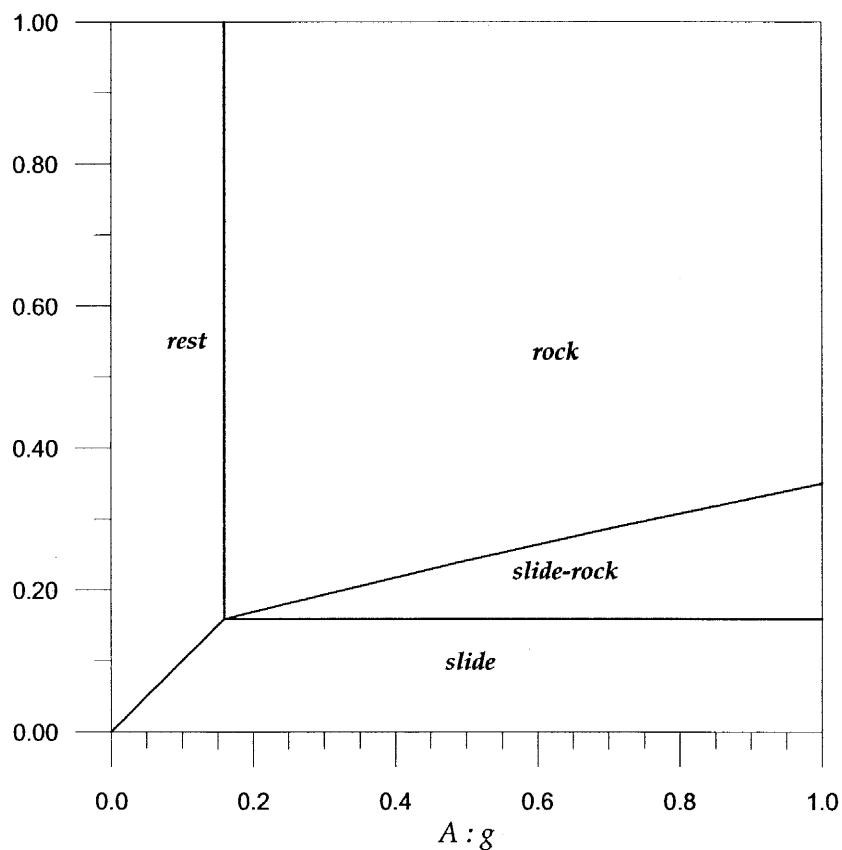


Σχήμα 2.10. Η ανατροπή του τύμβου με τη διέγερση των Σεπολίων. Από τη διεύθυνσή του άξονά του τη στιγμή όπου ανατρέπεται, φαίνεται η αμελητέα επιρροή της εγκάρσιας συνιστώσας στην απόκρισή του.

•Επιρροή Πιθανής Ολίσθησης

Στις μέχρι τώρα αναλύσεις για τον υπολογισμό της οριακής επιτάχυνσης ανατροπής θεωρήθηκε ότι ο συντελεστής τριβής στη βάση του τύμβου είναι αρκετά μεγάλος ώστε η μοναδική μορφή κίνησής του μέχρι την ανατροπή ήταν ο λικνισμός (*rocking mode*). Η παραδοχή αυτή θεωρείται λογική καθώς ο τύμβος στη βάση του στηριζόταν περιμετρικά από μαρμάρινες πλάκες οι οποίες εμπόδισαν την ολίσθησή του. Στην αντίθετη περίπτωση όμως όπου οι πλάκες δεν επηρέασαν την απόκριση του τύμβου πιθανότατα να σημειώθηκε παράλληλα και ολίσθησή του (*slide-rocking mode*). Η ολίσθηση αυτή είναι πιο σημαντική στην περίπτωση και δεύτερης (διαμήκους) οριζόντιας ή και κατακόρυφης συνιστώσας της διέγερσης όπου εξασθενεί η τριβή της διεπιφάνειας τύμβου-βάσης και ενδεχομένως να επιδρά στην απαιτούμενη μέγιστη επιτάχυνση για ανατροπή.

Κατ'αρχήν επιβάλλεται οριζόντια φόρτιση κατά την εγιάρσια διεύθυνση με επιχυνσιογραφήματα από τους σεισμούς της Αθήνας (*SPLB-long*, *SPLB-trans*) και της Τουρκίας (*Düzce-ew*, *Düzce-ns*) και στη συνέχεια εισαγάγονται και οι άλλες δύο διευθύνσεις. Οι χρονοϊστορίες υφίστανται τέτοια αναγωγή ώστε η μέγιστη οριζόντια επιτάχυνση να είναι η ίδια στις δύο οριζόντιες συνιστώσες και η μέγιστη κατακόρυφη να είναι 1.0 g. Ο συντελεστής τριβής εκτιμάται $\mu = 0.4$, ίδιος για κάθε διεύθυνση.

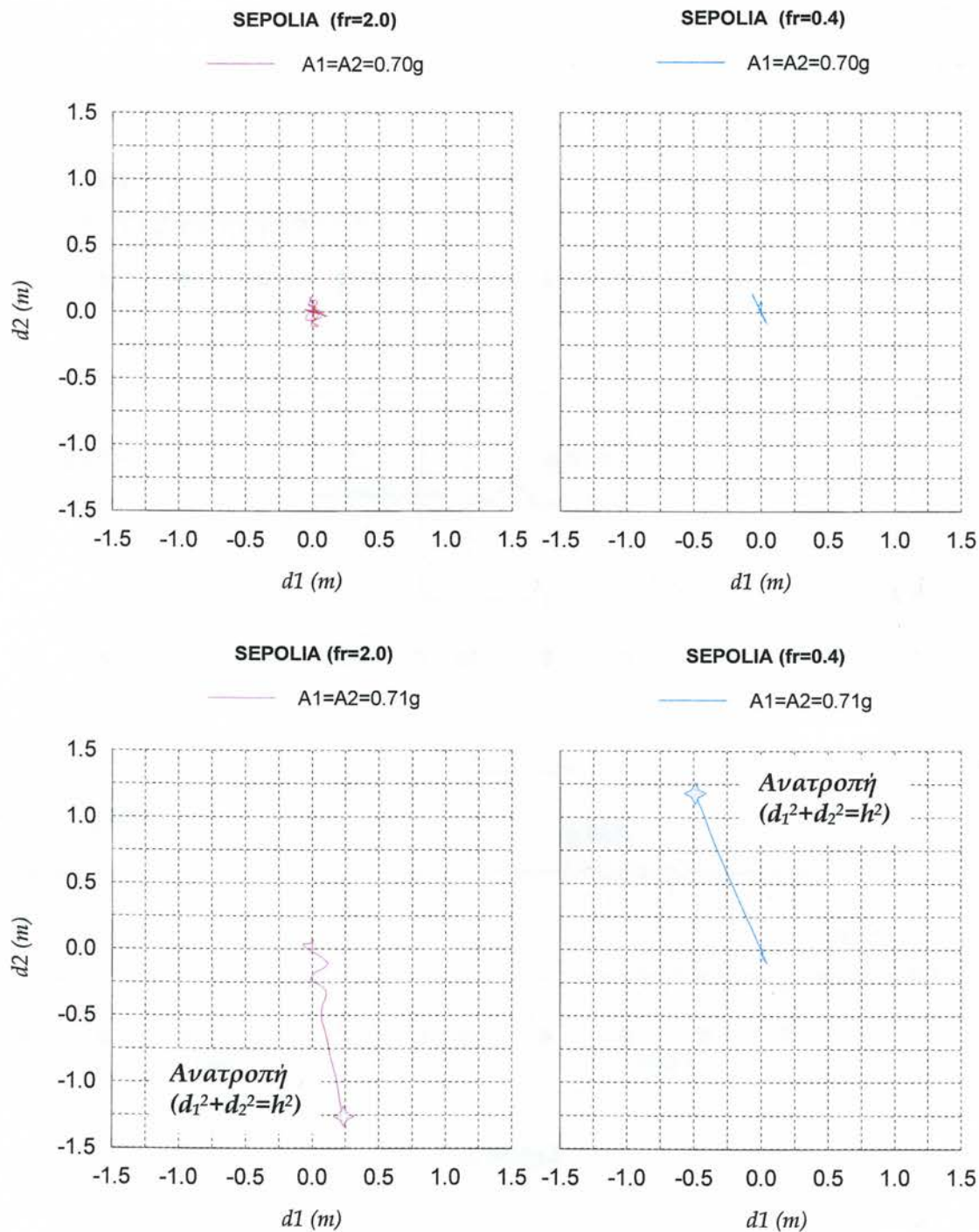


Σχήμα 2.11. Οι πιθανές μορφές κίνησης του τύμβου σε διέγερση ημιτονικού παλμού χωρίς κατακόρυφη επιτάχυνση, (Shenton, 1996).

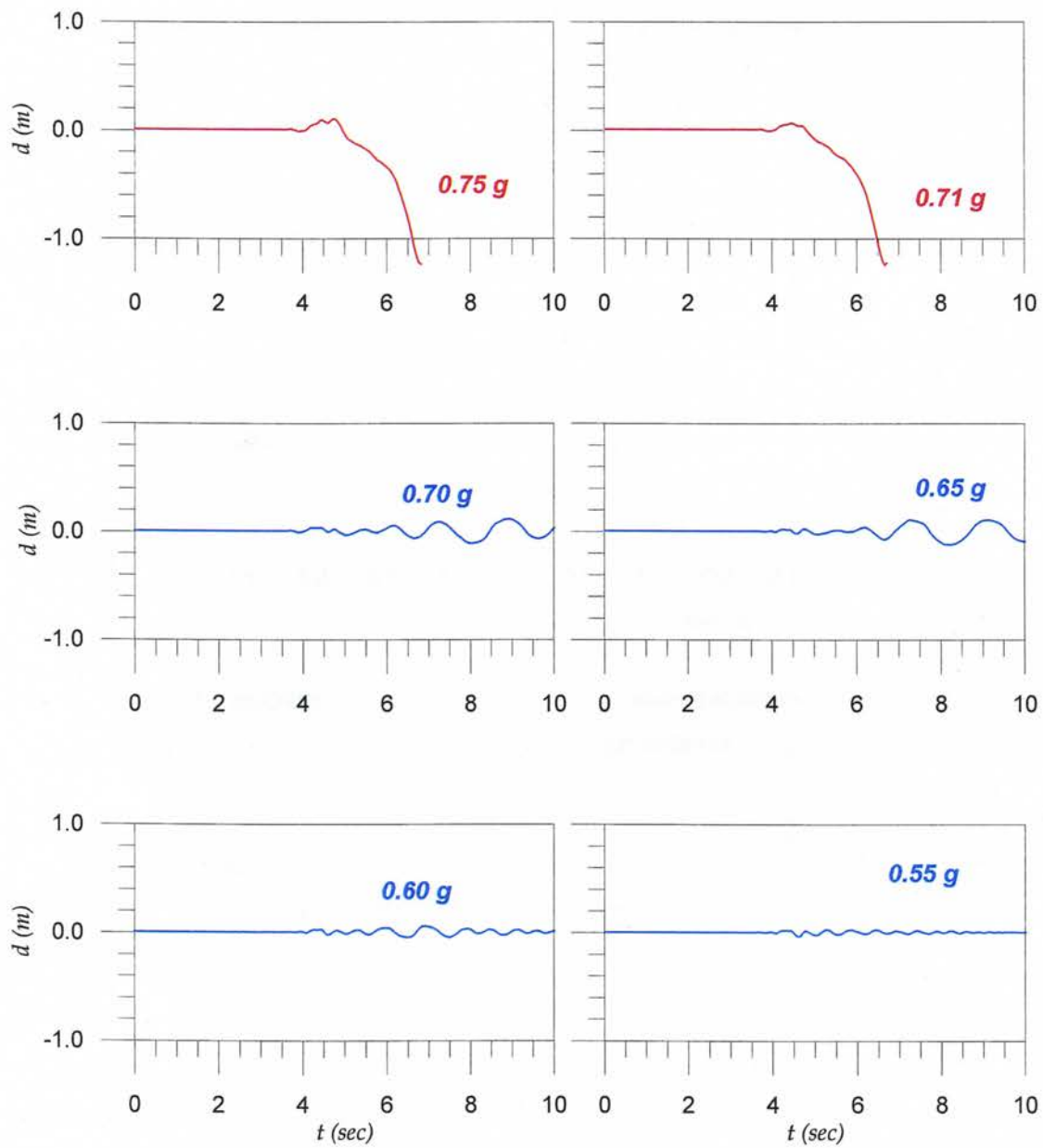
Οι επιταχύνσεις που προκύπτουν είναι οι ίδιες με αυτές που προκύπτουν παρεμποδίζοντας την ολίσθηση, γεγονός που ωφείλεται στον μεγάλο λόγο h/b (στα πολύ υψίκορμα σώματα δεν υπάρχει δυνατότητα παράλληλης ολίσθησης με λικνισμό). Το συμπέρασμα αυτό ενισχύεται μελετώντας τις δυνατές μορφές κίνησης του τύμβου σε ημιτονική διέγερση, κατά *Shenton*, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.11. Συνοπτικά τα αποτελέσματα των αναλύσεων παρουσιάζονται στον πίνακα 2.6.

Δ Ι Ε Υ Θ Υ Ν Σ Η			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

Πίνακας 2.6. Οι κρίσιμες επιταχύνσεις για ανατροπή με ή χωρίς ολίσθηση.



Σχήμα 2.12. Η τροχιά της οριζόντιας κίνησης της κορυφής ως προς τη βάση και η οριακή ανατροπή του τμήνου, με διέγερση στις τρεις διευθύνσεις την καταγραφή των Σεπολίων (Αθήνα 1999). Η κατακόρυφη συνιστώσα της επιτάχυνσης έχει χρησιμοποιηθεί με ανεστραμμένα πρόσημα και μέγιστη τιμή 1.0 g.



Σχήμα 2.13

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ :

Shao, Y., and Tung, C. (1999). "Seismic Response of Unanchored Bodies." *Earthquake Spectra*, August 1999, Volume 15, Number 3, 523-536.

Anooshehpour, A., Heaton, T., Shi B., Brune J. (1999). "Estimates of the Ground Accelerations at Point Reyes Station during the 1906 San Francisco Earthquake." *Bulletin of the Seismological Society of America*, August 1999, Volume 89, Number 4, 845-853.

Makris, N., and Zhang, J. (1999). "Rocking Response and Overturning of Anchored Equipment under Seismic Excitations." *Final Report to PG&E, Department of CEE, University of California, Berkeley*.

Shenton, H. (1996). "Criteria for initiation of Slide, Rock and Slide-Rock Rigid-Body Modes." *Journal of Engineering Mechanics*, July 1996, Volume 122, Number 7, 690-693.

Scalia, A., and Sumbatyan, M. (1996). "Slide Rotation of Rigid Bodies subjected to a Horizontal Ground Motion." *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Volume 25, 1139-1149.

Spanos, P., and Koh, A. (1984). "Rocking of Rigid Blocks due to Harmonic Shaking." *Journal of Engineering Mechanics*, November 1984, Volume 110, Number 11, 1627-1642.

Ishiyama, Y. (1982). "Motion of Rigid Bodies and Criteria for Overturning by Earthquake Excitations" *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Volume 10, 635-650.