Training Course on Seismic Risk Assessment in Specific Areas of Importance

Εκτίμηση της σεισμικής απόκρισης Αρχαίων Μνημείων

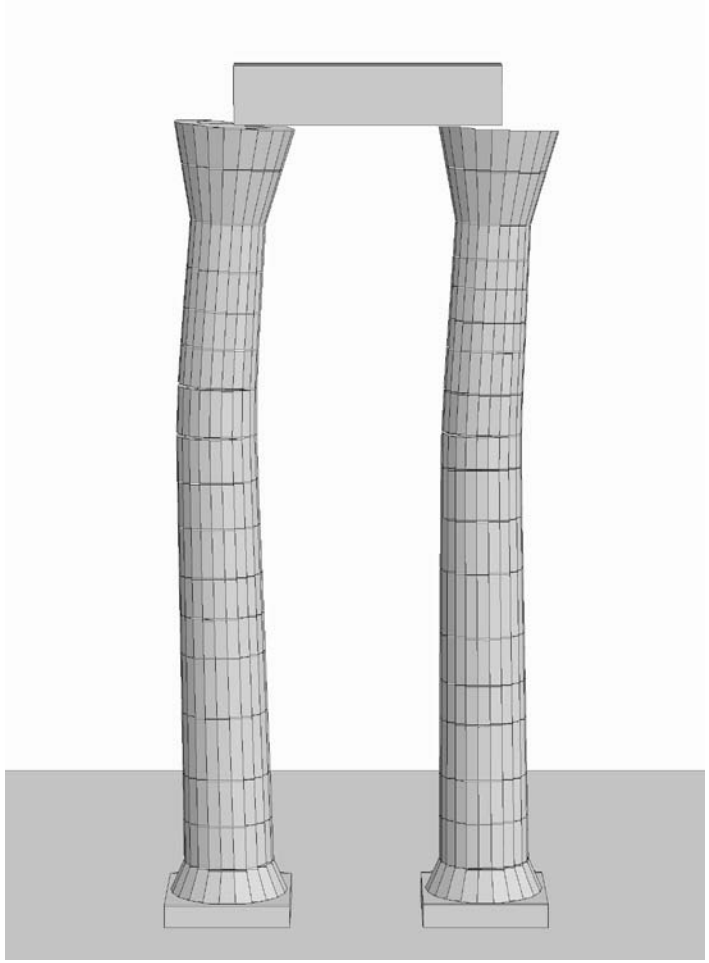
Γιάννης Ν. Ψυχάρης
Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Τρόπος δόμησης

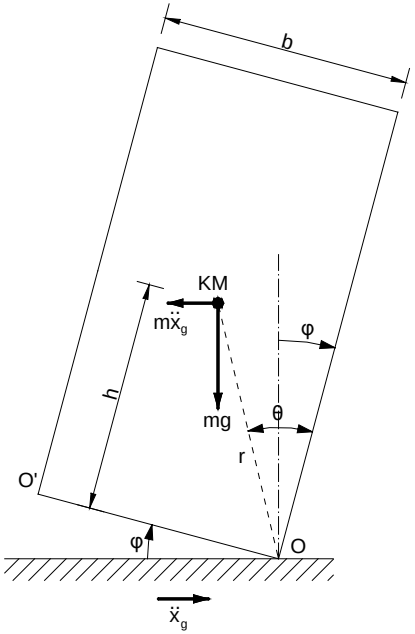
- Λίθινα δομικά στοιχεία χωρίς συνδετικό υλικό
- Τα ξύλινα εμπόλια μεταξύ των σπονδύλων αποσκοπούσαν στη σωστή τοποθέτηση των σπονδύλων και όχι στην αύξηση της διατμητικής αντοχής
- Σε λίγες μόνο περιπτώσεις έχουν χρησιμοποιηθεί μεταλλικοί σύνδεσμοι

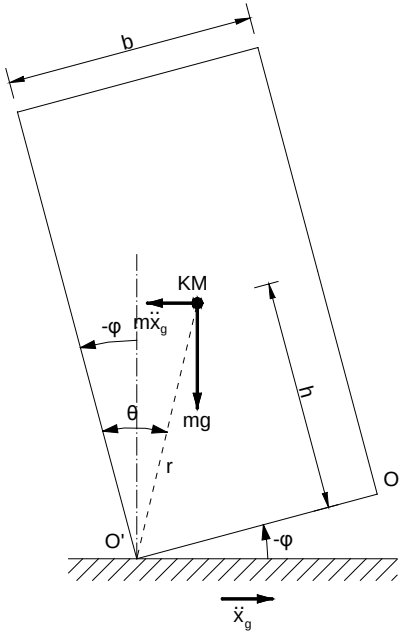
Δυναμική συμπεριφορά

- Λόγω της ασύνδετης δομής τους, κατά τη διάρκεια ενός σεισμού τα δομικά στοιχεία μπορούν να ολισθήσουν μεταξύ τους και να λικνιστούν, ανεξάρτητα ή σε ομάδες.
- Η δυναμική τους συμπεριφορά είναι διαφορετική από αυτή των συνεχών σωμάτων και χαρακτηρίζεται από:
  - Έντονη μη-γραμμικότητα
  - Πολύ μεγάλη ευαισθησία ακόμη και σε μικρές αλλαγές των παραμέτρων



Λικνισμός στερεού σώματος





$$I_0\ddot{\varphi} - mgh\varphi = \mp m\frac{b}{2}g - mh\ddot{x}_g$$ (Housner 1963)

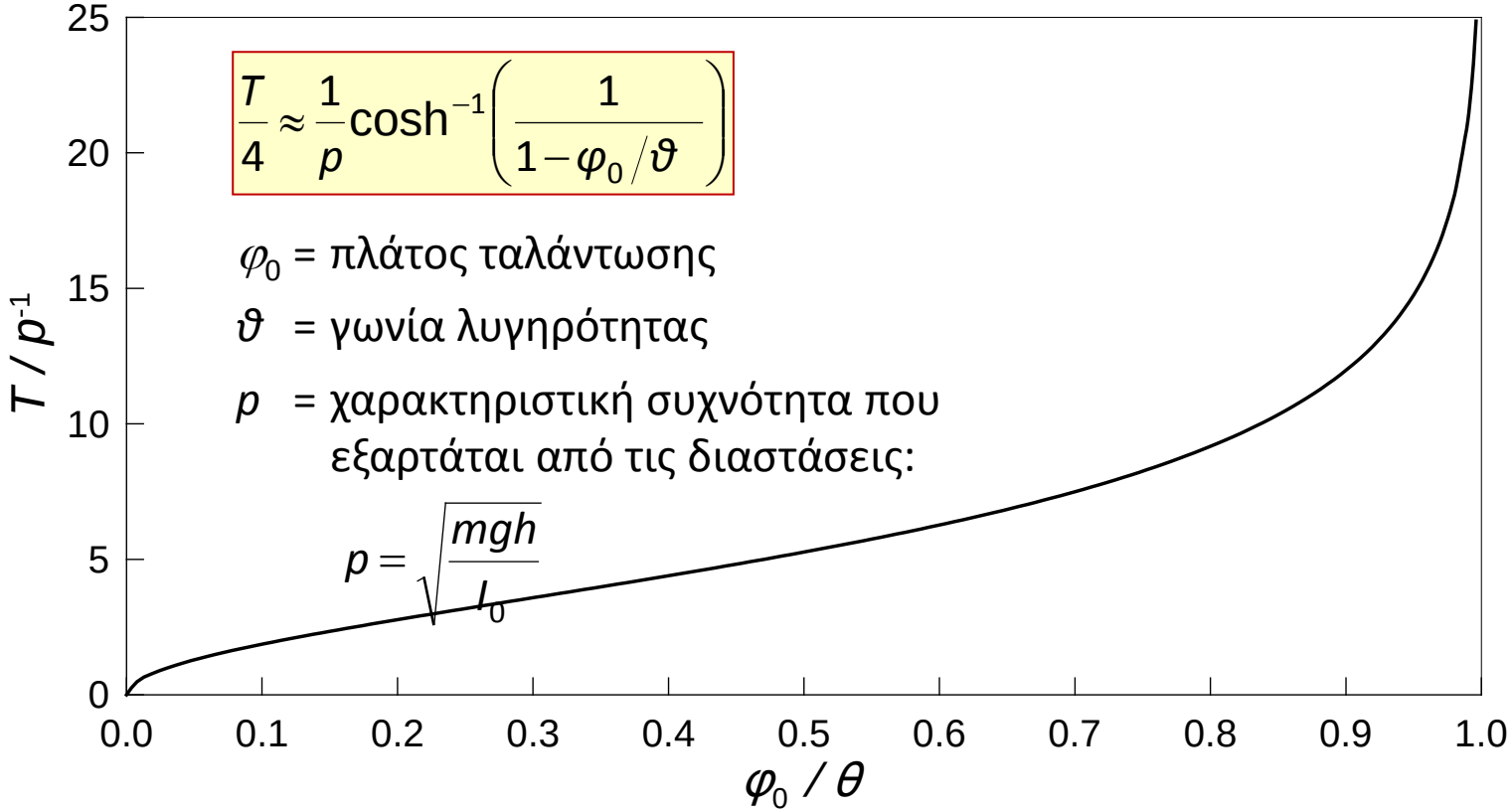
Αρνητική δυσκαμψία

- Αρνητική δυσκαμψία
  - ⇒ Η δύναμη επαναφοράς μειώνεται με την αύξηση της γωνίας στροφής
- Διαφορετική εξίσωση κίνησης για θετική και αρνητική γωνία στροφής
  - ⇒ Προκαλεί μη-γραμμική συμπεριφορά
- Ελάχιστη επιτάχυνση για έναρξη λικνισμού:

$$(\ddot{x}_g)_{cr} = \frac{b}{2h}g$$

Ιδιαιτερότητες δυναμικής απόκρισης

- Η περίοδος των ελεύθερων ταλαντώσεων εξαρτάται από το πλάτος ταλάντωσης



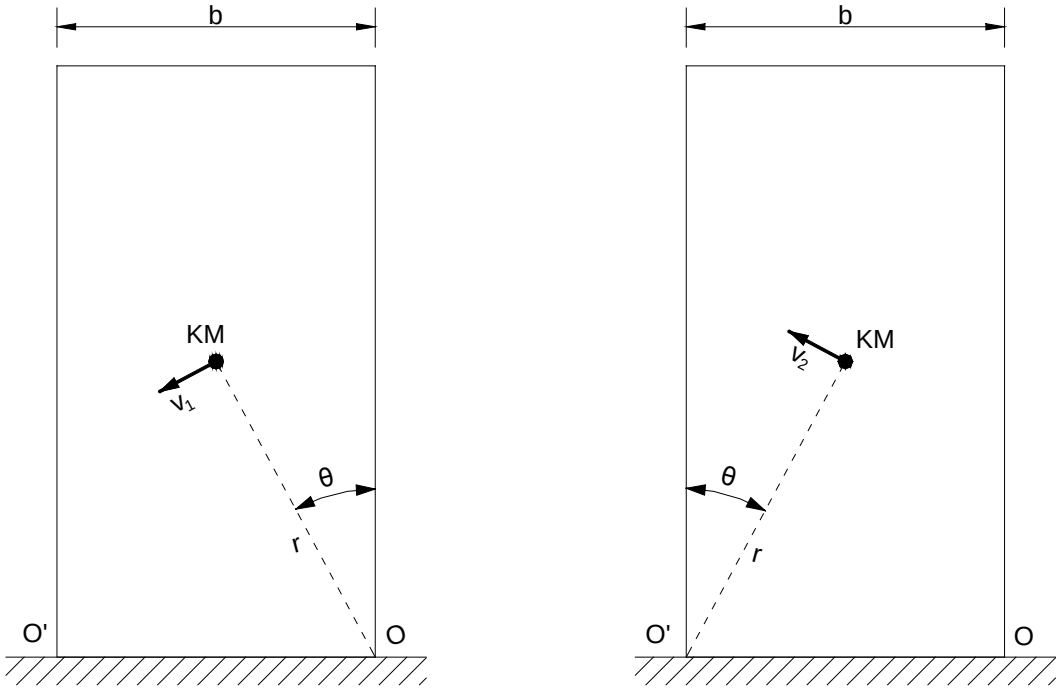
Τα λικνιζόμενα σώματα δεν έχουν ιδιοπεριόδους με την κλασική έννοια

Ιδιαιτερότητες δυναμικής απόκρισης (συνέχεια)

- Κρούση κάθε φορά που αλλάζει ο πόλος περιστροφής από το σημείο Ο στο Ο’ ή ανάποδα

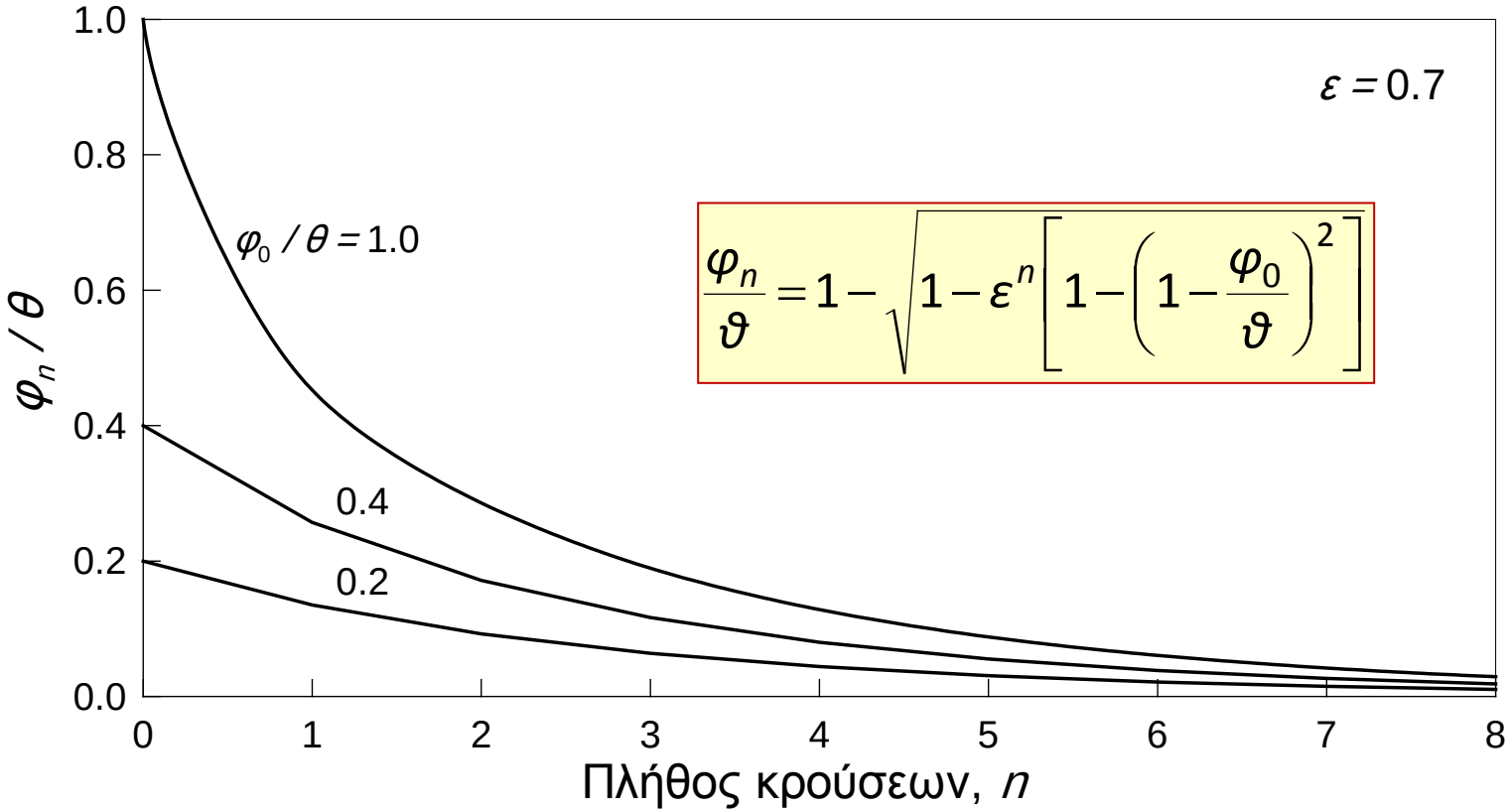
$\Rightarrow$ απώλεια ενέργειας λόγω αλλαγής ταχύτητας του Κ.Μ.

$$\dot{\varphi}_2 = \varepsilon \cdot \dot{\varphi}_1 \quad \text{όπου:} \quad \varepsilon = 1 - \frac{mb^2}{2I_0}$$



Ιδιαιτερότητες δυναμικής απόκρισης (συνέχεια)

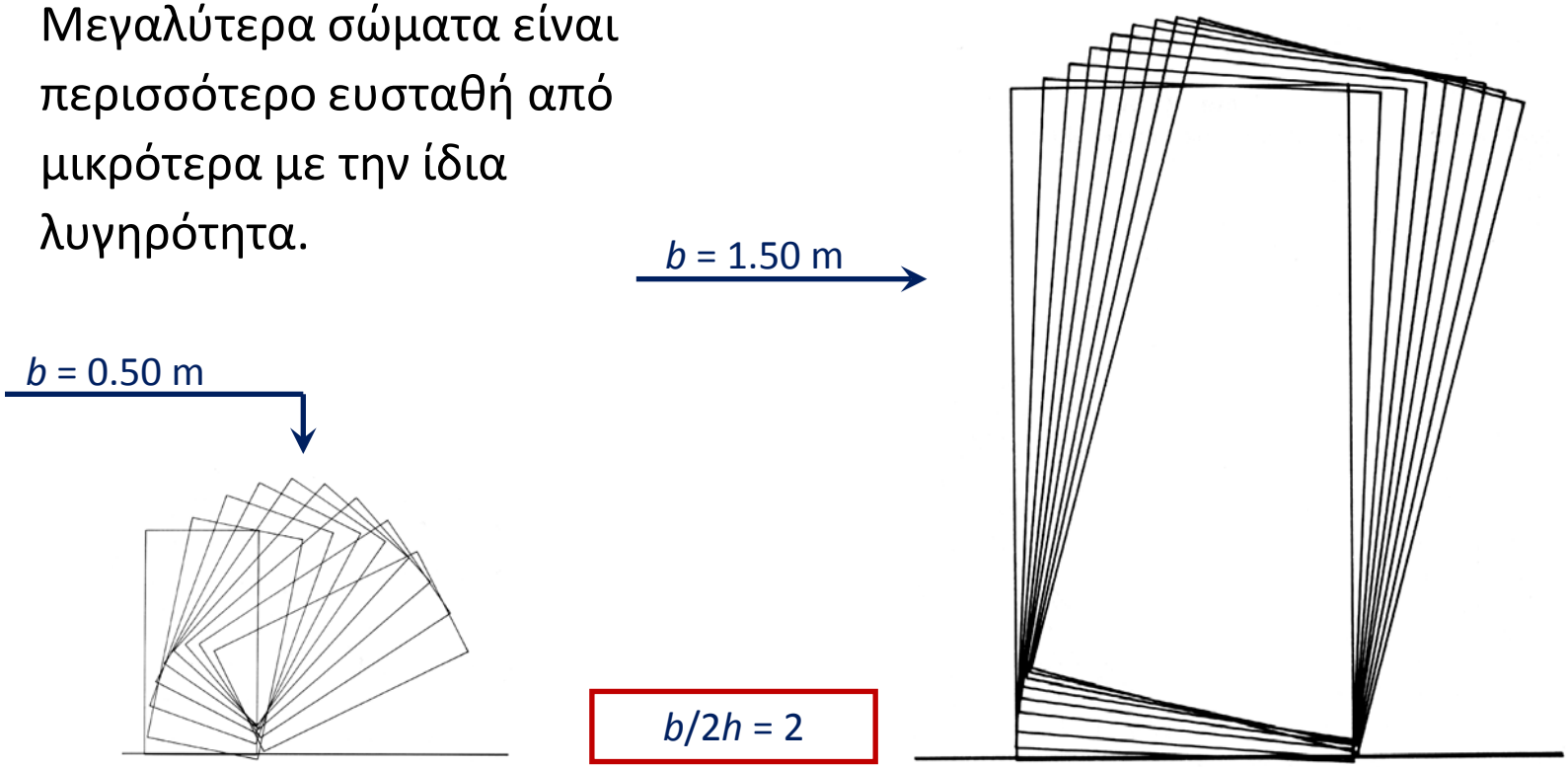
Μείωση του πλάτους των ελεύθερων ταλαντώσεων με τον αριθμό των κρούσεων



$$\frac{\varphi_n}{\vartheta} = 1 - \sqrt{1 - \varepsilon^n \left[1 - \left(1 - \frac{\varphi_0}{\vartheta} \right)^2 \right]}$$

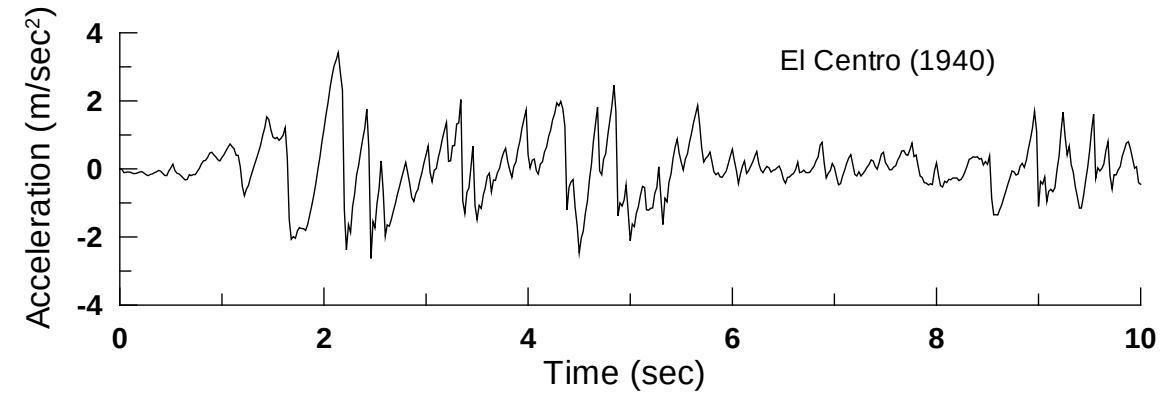
Ιδιαιτερότητες δυναμικής απόκρισης (συνέχεια)

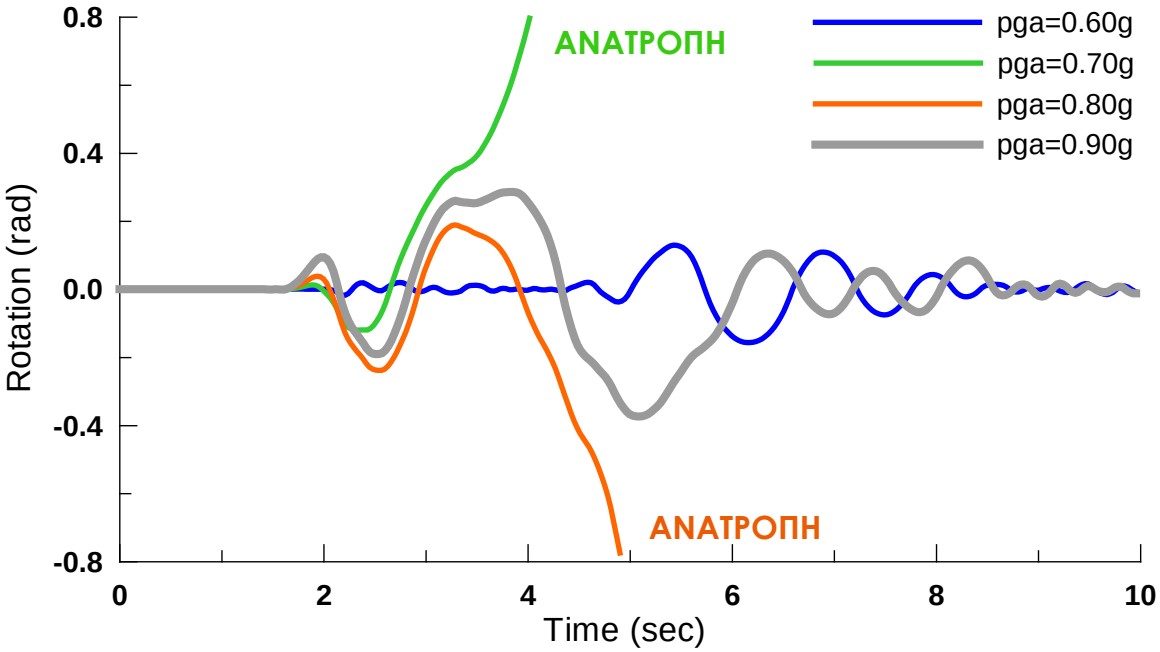
- Το απόλυτο μέγεθος παίζει σημαντικό ρόλο. Μεγαλύτερα σώματα είναι περισσότερο ευσταθή από μικρότερα με την ίδια λυγηρότητα.

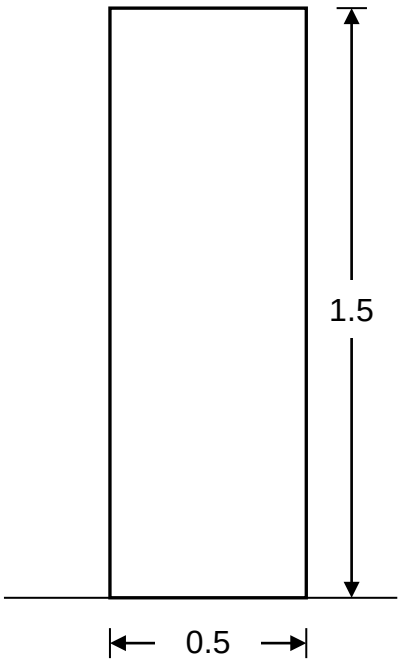


Ίδια αρχική οριζόντια ταχύτητα Κ.Β.

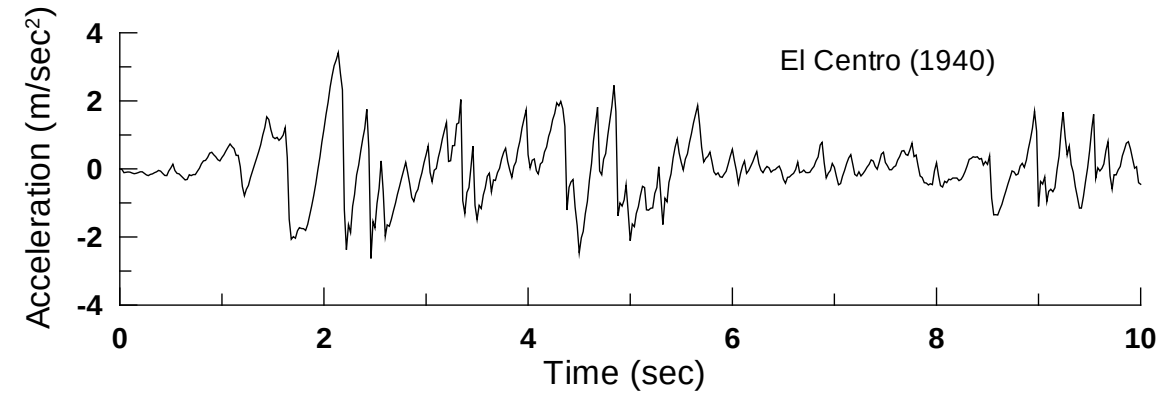
Μη-γραμμικότητα συμπεριφοράς

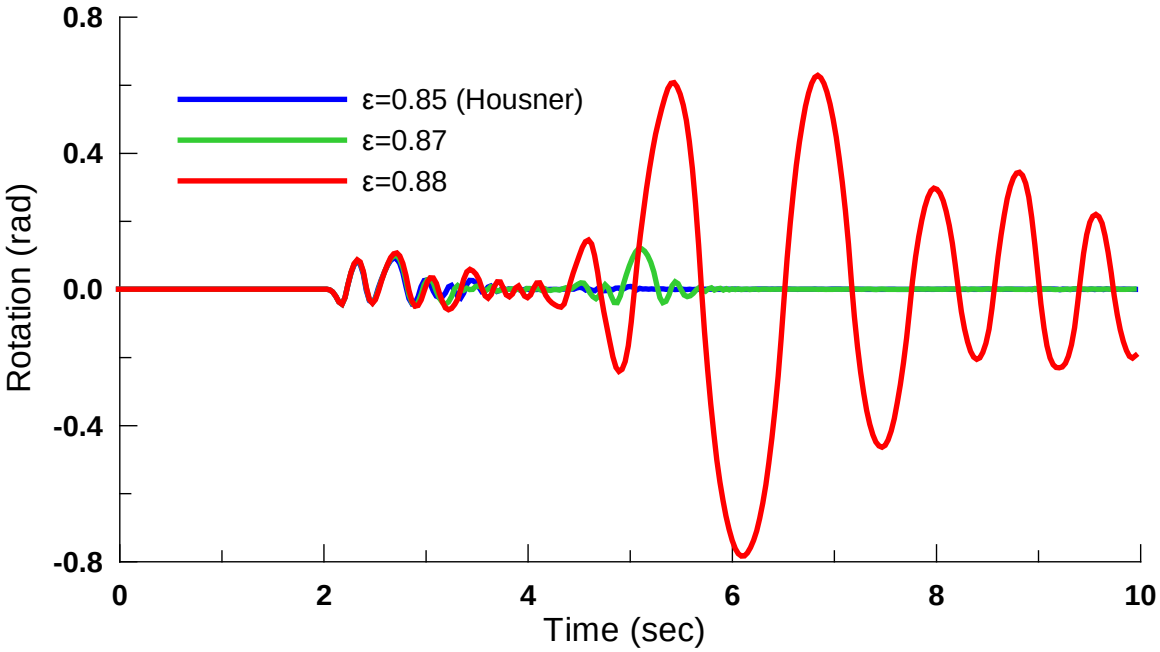


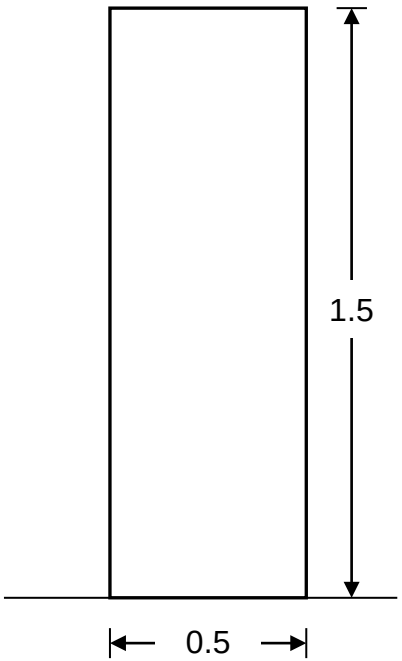




Ευαισθησία της απόκρισης

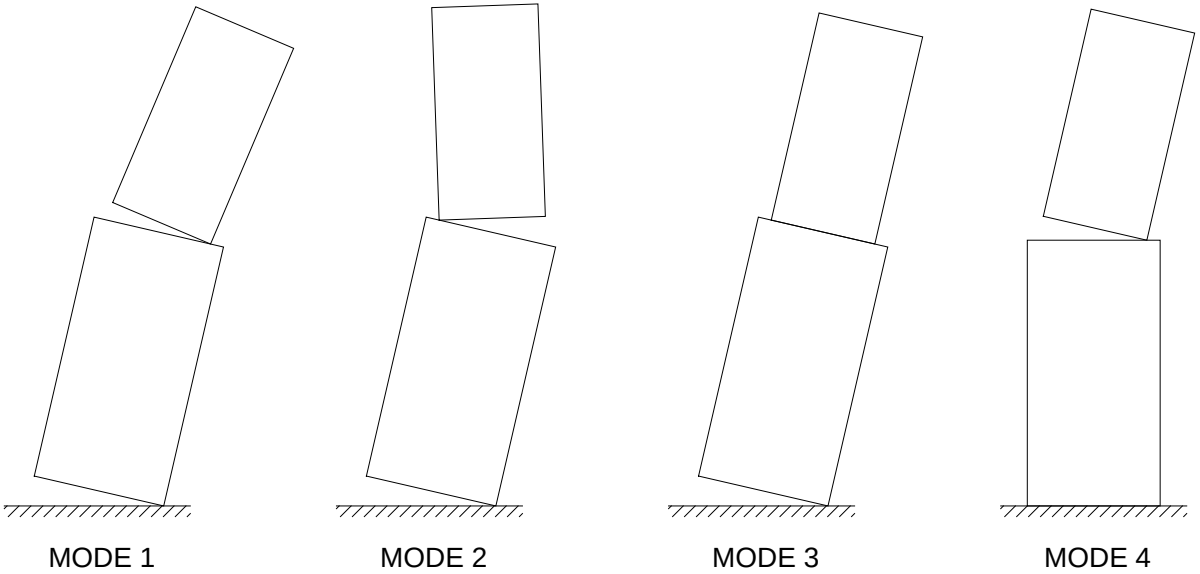






Συστήματα πολλών στερεών σωμάτων

- Πολλές διαφορετικές μορφές ταλάντωσης με διαφορετικές εξισώσεις κίνησης για κάθε μορφή



- Σε σύστημα 2 σωμάτων: 4 μορφές ταλάντωσης
- Σε κίονα με 11 σπονδύλους: 88573 μορφές ταλάντωσης (Ζάμπας 1994)

- Για συστήματα πολλών σωμάτων, η ανάλυση της συμπεριφοράς είναι ένα εξαιρετικά δύσκολο πρόβλημα $\Rightarrow$ απαιτείται η χρήση εξειδικευμένων προγραμμάτων.

Σεισμική συμπεριφορά κιόνων & κιονοστοιχιών

Κρίσιμες παράμετροι που επηρεάζουν την ανάλυση

Επιλογή εδαφικής κίνησης

- Επιλογή μεγέθους εδαφικής κίνησης: Κρίσιμη παράμετρος ???
- Δεσπόζουσα περίοδος
- Διάρκεια ισχυρής δόνησης (πλήθος σημαντικών κύκλων)

Παράμετροι προσομοίωσης

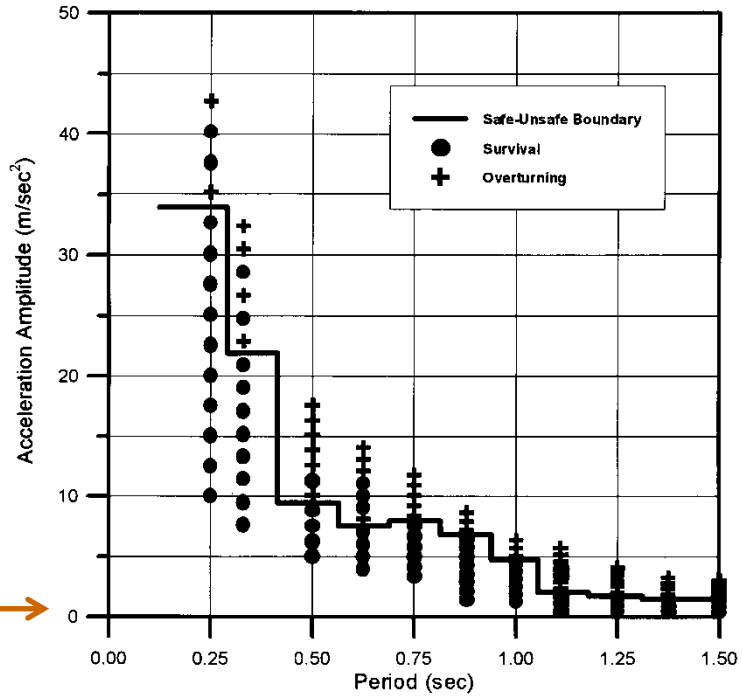
- Ιδιότητες στις διεπιφάνειες (ελαστικές σταθερές, συντελεστής τριβής)
- Συντελεστής απόσβεσης
- Λεπτομέρεια προσομοιώματος
  - Ακρίβεια γεωμετρίας
  - Σύνδεσμοι
  - Βλάβες

Χαρακτηριστικά εδαφικής κίνησης

Επιρροή δεσπόζουσας περιόδου

- Σπονδυλωτές κατασκευές δεν διαθέτουν ιδιομορφές με την κλασική έννοια και ως εκ τούτου δεν υφίσταται θέμα συντονισμού.

- Όμως, η δεσπόζουσα περίοδος του σεισμικού κραδασμού παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στην απόκριση:
  - Για την ίδια εδαφική επιτάχυνση, το πλάτος ταλάντωσης και ο κίνδυνος κατάρρευσης αυξάνουν εκθετικά με την περίοδο της δόνησης.



Κίονας Επικούριου Απόλλωνα

Απαιτούμενη επιτάχυνση για κατάρρευση υπό ημιτονική διέγερση

Χαρακτηριστικά εδαφικής κίνησης (συνέχεια)

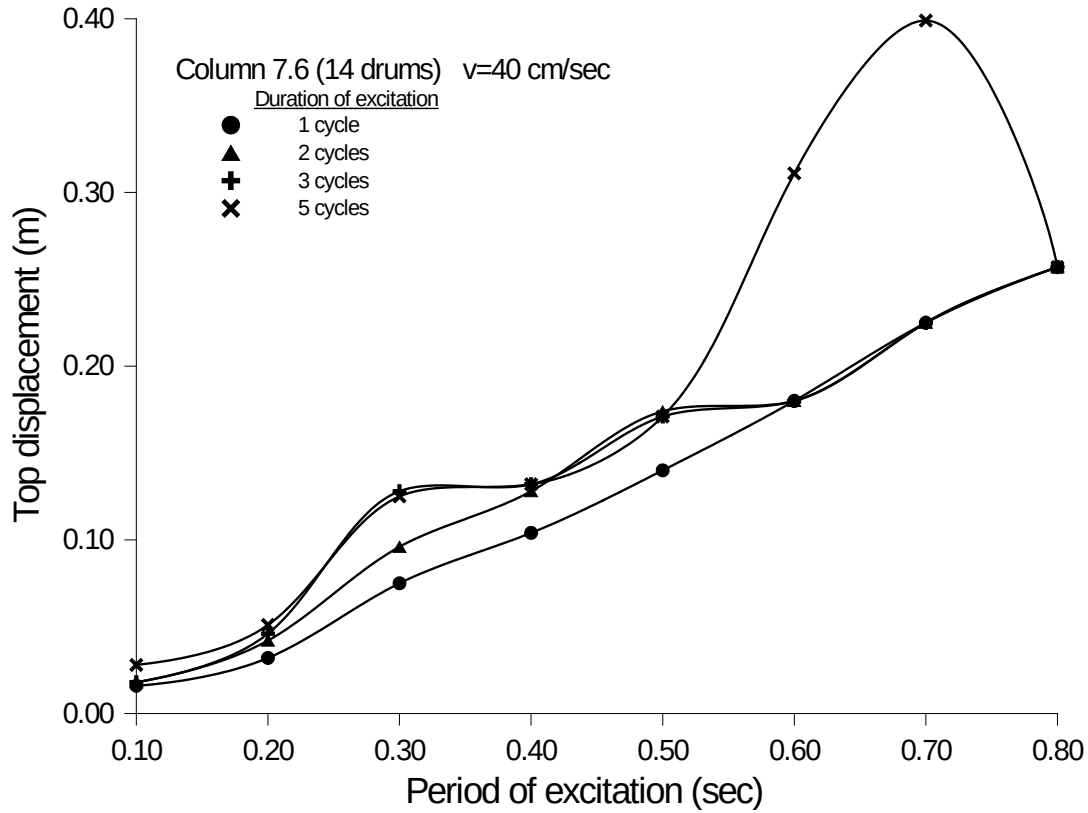
Επιρροή δεσπόζουσας περιόδου (συνέχεια)

- Υπό σταθερή εδαφική ταχύτητα, το πλάτος ταλάντωσης αυξάνει σχεδόν γραμμικά με την περίοδο της δόνησης.

Κίονας Ολυμπιείου

Μέγιστη μετακίνηση κιονοκράνου για ημιτονική διέγερση.

(PGV=40 cm/sec)

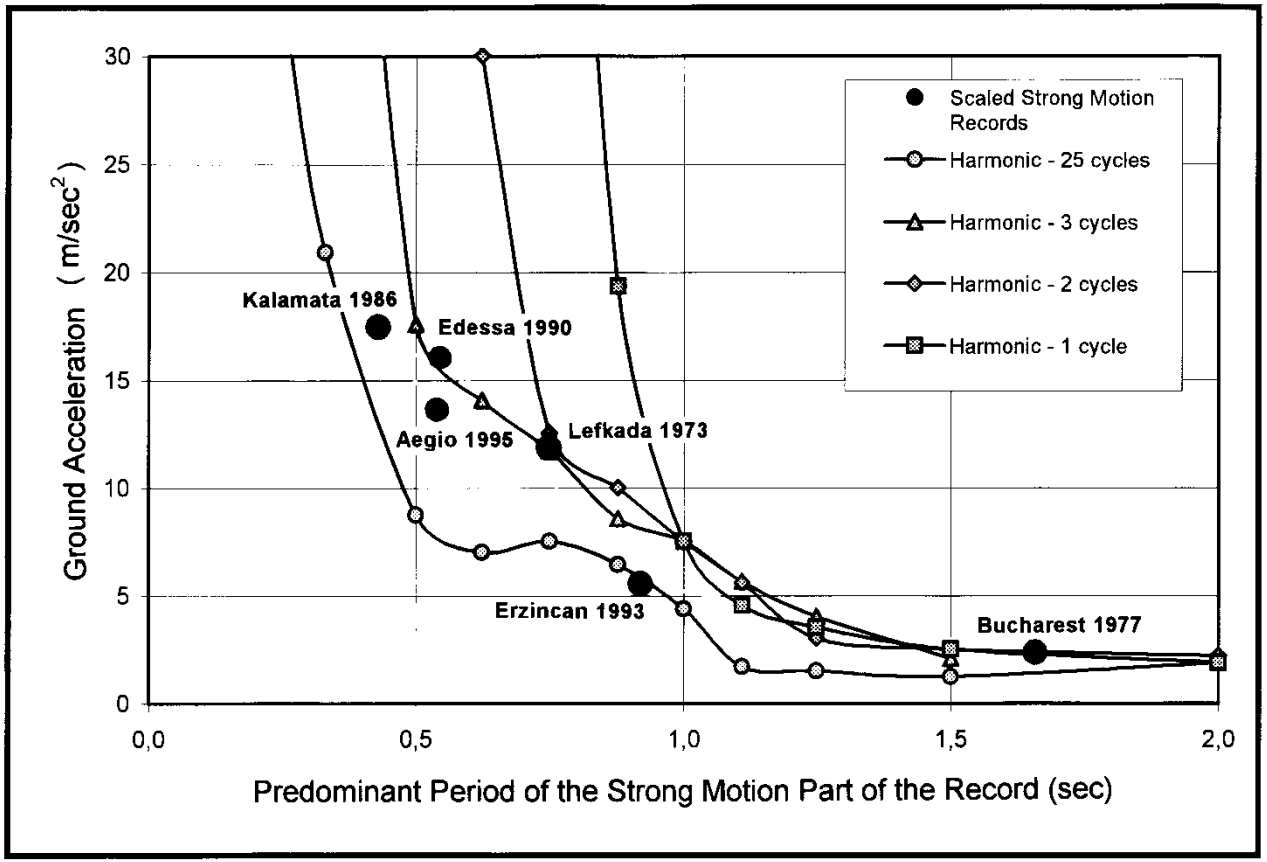


Χαρακτηριστικά εδαφικής κίνησης (συνέχεια)

Επιρροή δεσπόζουσας περιόδου (συνέχεια)

Κίονας Επικούριου Απόλλωνα

Απαιτούμενη εδαφική επιτάχυνση για ανατροπή σε ημιτονικές και σεισμικές διεγέρσεις

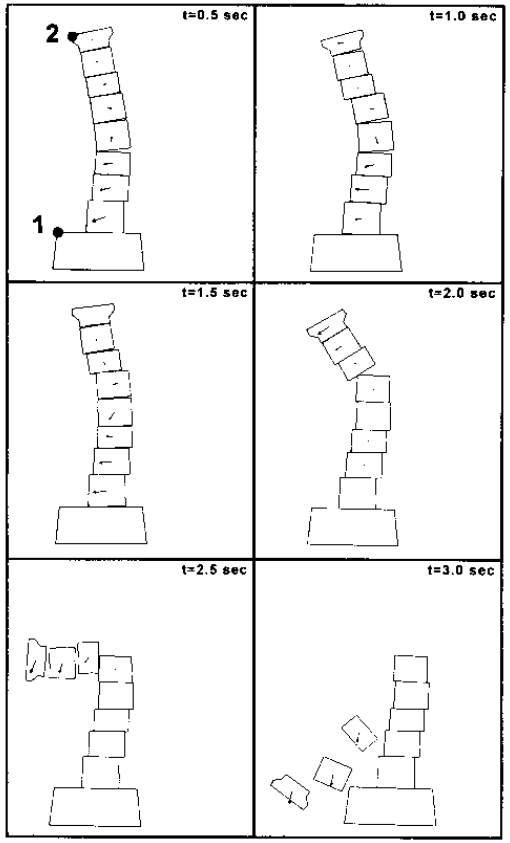


Χαρακτηριστικά εδαφικής κίνησης (συνέχεια)

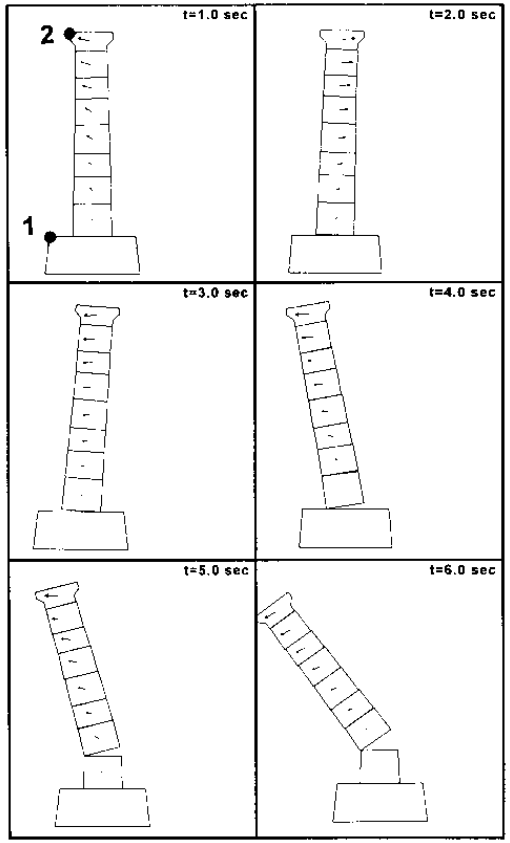
Επιρροή δεσπόζουσας περιόδου (συνέχεια)

- Η περίοδος της σεισμικής δόνησης επηρεάζει και τον τρόπο απόκρισης:
  - Διεγέρσεις μικρής περιόδου προκαλούν λικνισμό πολλών σπονδύλων.
  - Μακροπερίοδοι διεγέρσεις προκαλούν ταλάντωση των κιόνων ως μονολιθικών.

T=0.5 sec



T=2.0 sec



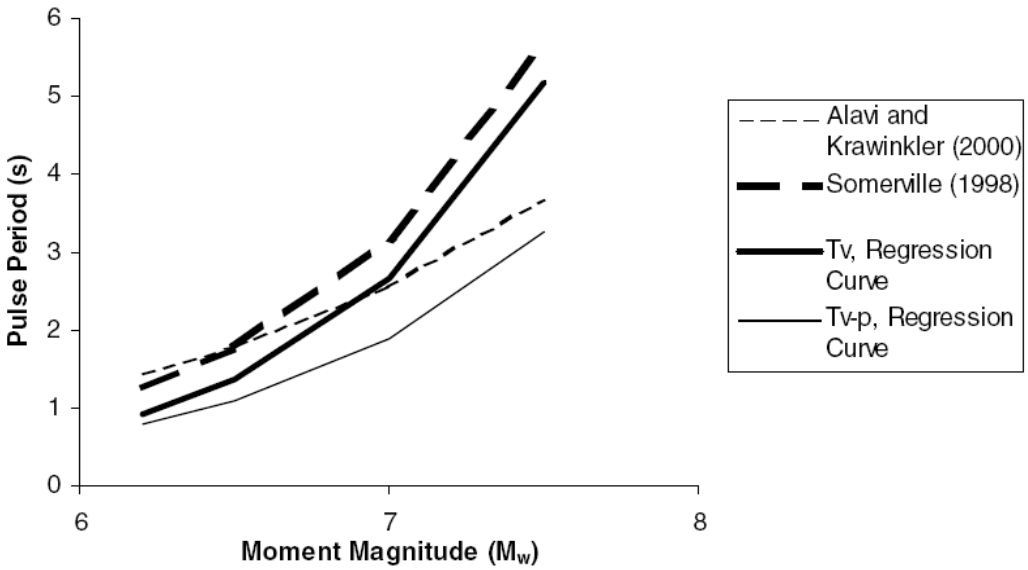
Κίονας Επικούριου Απόλλωνα

Ημιτονική διέγερση

Χαρακτηριστικά εδαφικής κίνησης (συνέχεια)

Επιρροή δεσπόζουσας περιόδου (συνέχεια)

- Σε σεισμούς κοντινού πεδίου (D<60 km) η εδαφική κίνηση μπορεί να περιέχει έναν παλμό μεγάλης περιόδου. Τέτοιοι σεισμοί είναι πολύ δυσμενείς για τα αρχαία μνημεία.

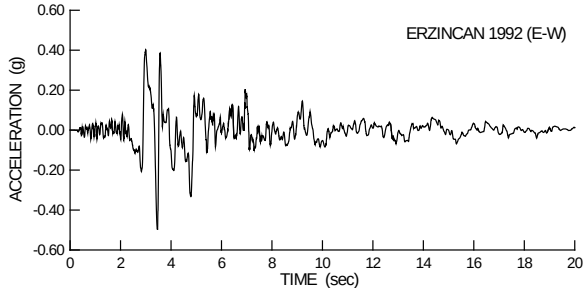


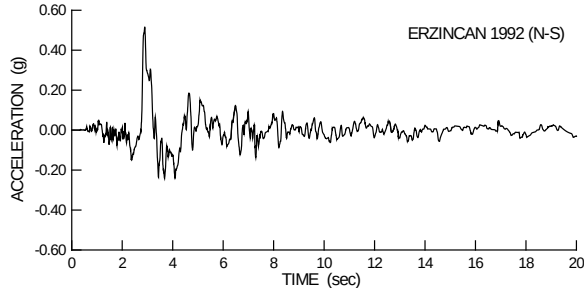
Η περίοδος του παλμού αυξάνει εκθετικά με το μέγεθος του σεισμού

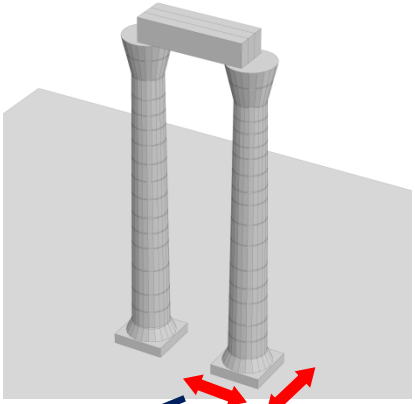
- Η σημερινή κατάσταση του μνημείου θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί σε μία ανάστροφη ανάλυση για την επιβεβαίωση ή τον αποκλεισμός ενός τέτοιου δυσμενούς σεναρίου σεισμικής δόνησης.

Χαρακτηριστικά εδαφικής κίνησης (συνέχεια)

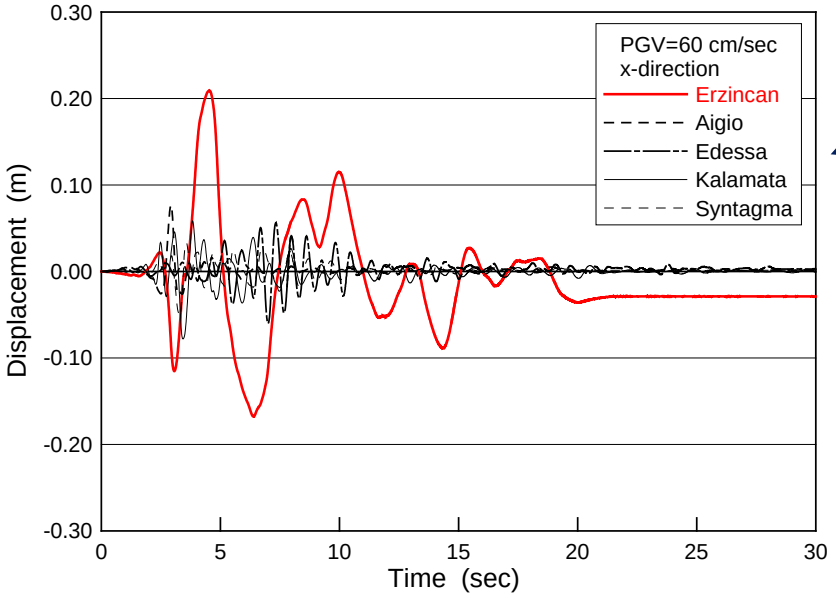
Erzincan, 1992: M=6.9, PGA=0.5g, **T>1.5 s**

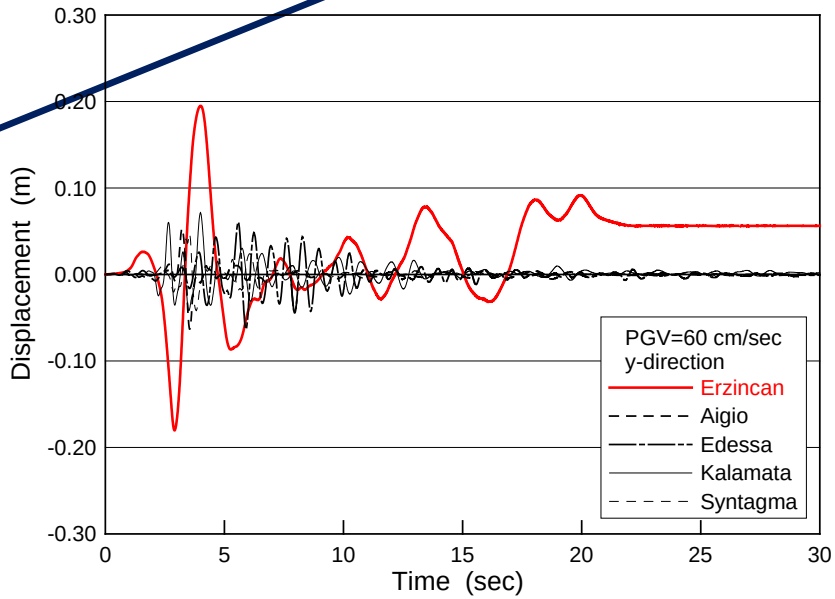






Ολυμπιείο: Σεισμός Erzincan για PGV=60 cm/sec



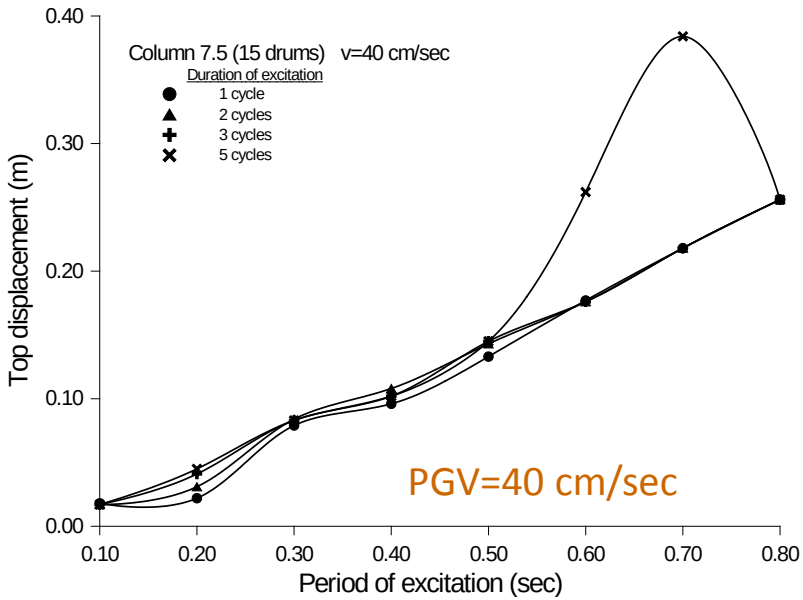


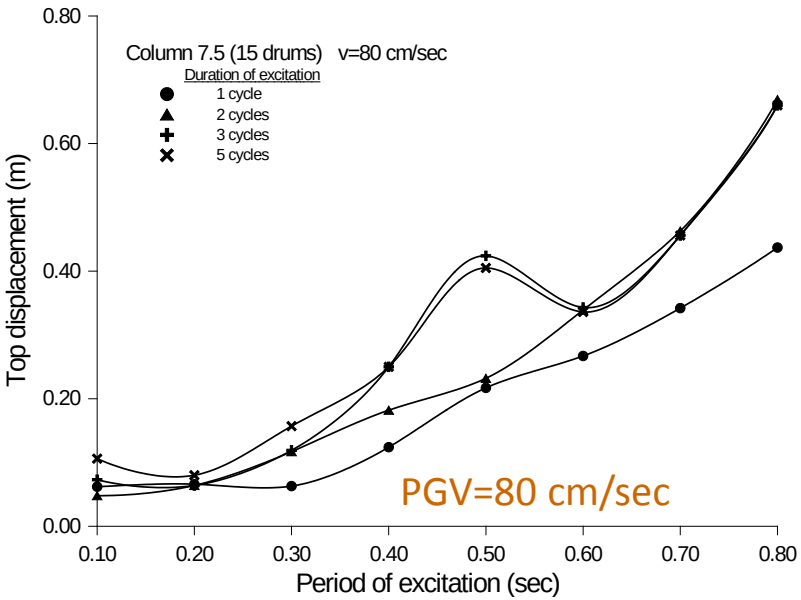
Χαρακτηριστικά εδαφικής κίνησης (συνέχεια)

Επιρροή της διάρκειας της ισχυρής δόνησης

- Γενικώς, όχι έντονη επιρροή για εδαφικές κινήσεις μέτριας ισχύος.
- Περισσότερο έντονη επιρροή για ισχυρές δονήσεις.

Κίονας Ολυμπιείου: Μέγιστη μετακίνηση κιονοκράνου για ημιτονική διέγερση





Χαρακτηριστικά εδαφικής κίνησης (συνέχεια)

Κρίσιμο μέγεθος της εδαφικής κίνησης

Δεν είναι σαφές ποιό είναι το κρίσιμο μέγεθος:

- Η εδαφική επιτάχυνση δεν είναι αντιπροσωπευτική, επειδή τα αποτελέσματα αλλάζουν δραστικά με την αλλαγή της περιόδου της κίνησης.
- Περισσότερο αντιπροσωπευτική φαίνεται να είναι η εδαφική ταχύτητα, επειδή συνδυάζει την ένταση της δόνησης και την περίοδο ($v=a\cdot T$), αλλά τα αποτελέσματα δίνουν σημαντική διασπορά.
- Αρκετά αντιπροσωπευτικό είναι και το χαρακτηριστικό μήκος: $L=v\cdot T/2$ (Makris & Black, 2004).
- Άλλα μεγέθη (π.χ. σεισμική ενέργεια, Arias intensity κλπ) δεν δίνουν καλά αποτελέσματα.

Χαρακτηριστικά εδαφικής κίνησης (συνέχεια)

Επιλογή εδαφικών κινήσεων για τις αναλύσεις

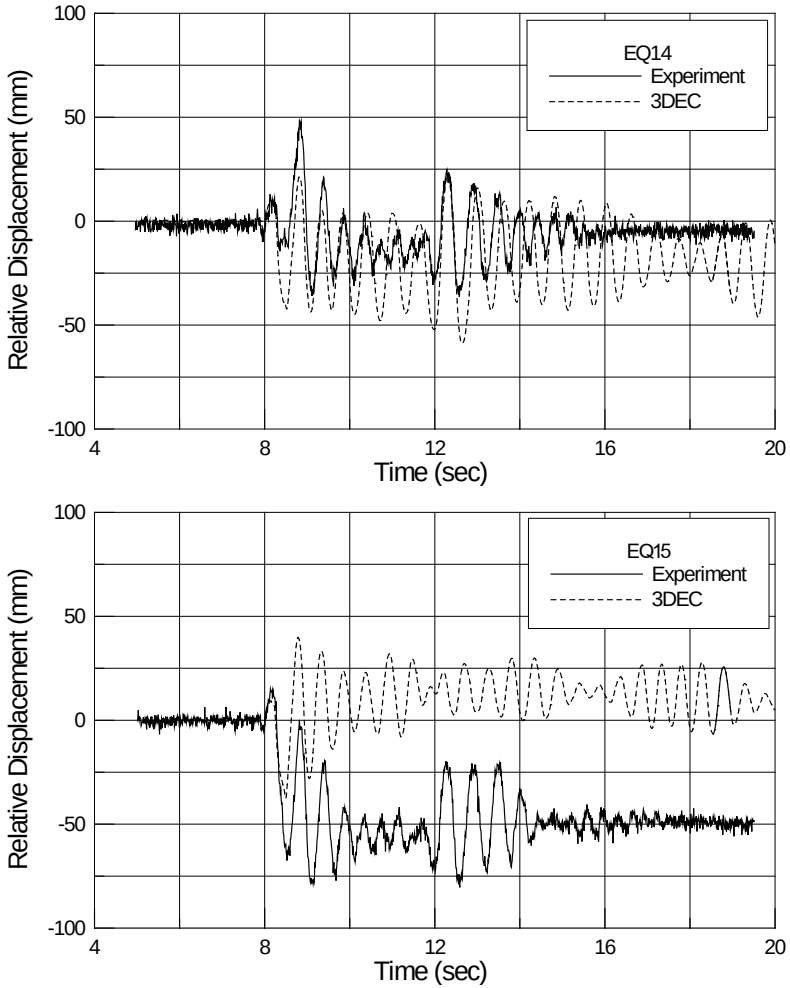
- Λόγω της ευαισθησίας της δυναμικής συμπεριφοράς στα χαρακτηριστικά της εδαφικής κίνησης, απαιτείται προσεκτική επιλογή των δονήσεων που θα χρησιμοποιηθούν στις αναλύσεις.
- Αυθαίρετη επιλογή εδαφικών κινήσεων μπορεί να οδηγήσει σε λανθασμένα συμπεράσματα.
- Τεχνητοί σεισμοί προσαρμοσμένοι στα φάσματα των κανονισμών συνήθως δεν επαρκούν, αφού δεν καλύπτουν σεισμούς που περιέχουν παλμούς μεγάλης περιόδου, οι οποίοι μπορούν να προκαλέσουν σημαντικές ζημιές ή καταρρεύσεις.
- Οι εδαφικές κινήσεις που θα χρησιμοποιηθούν πρέπει να συνδυάζουν σωστά την ένταση της αναμενόμενης εδαφικής κίνησης και τη δεσπόζουσα περίοδό της και πρέπει να προκύπτουν μετά από μελέτη σεισμικής επικινδυνότητας, λαμβάνοντας υπόψη, εάν είναι δυνατόν, και τα τεκτονικά δεδομένα της ευρύτερης περιοχής.

Παράμετροι προσομοίωσης

Ευαισθησία δυναμικής συμπεριφοράς

- Επανάληψη του ίδιου πειράματος ⇒ διαφορετικά αποτελέσματα:
  - Ανεπαίσθητες διαφορές στην αρχική γεωμετρία.
  - Ανεπαίσθητες διαφορές στη διέγερση.
- Η ευαισθησία της απόκρισης είναι εμφανής και στις αριθμητικές επιλύσεις.

εγγενής αβεβαιότητα αποτελεσμάτων



Πειράματα σεισμικής τράπεζας σε κίονα του Παρθενώνα υπό κλίμακα 1:3

Παράμετροι προσομοίωσης (συνέχεια)

Λόγω της ευαισθησίας της δυναμικής συμπεριφοράς:

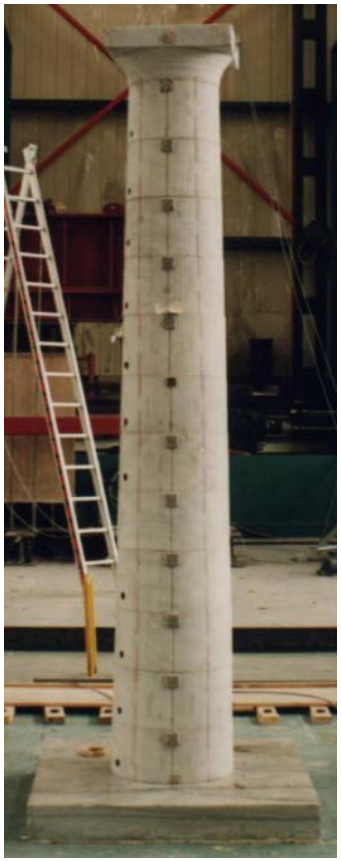
- Οι αριθμητικές αναλύσεις πρέπει να βασίζονται σε:
  - Σωστή προσομοίωση της πραγματικής κατασκευής
  - Ρεαλιστικές τιμές των παραμέτρων και των ιδιοτήτων
- Σύγκριση πειραματικών και αριθμητικών αποτελεσμάτων μοπεί να δώσει σημαντικές πληροφορίες, όπως:
  - Επαλήθευση του κώδικα υπολογισμού που θα χρησιμοποιηθεί
  - Βαθμονόμηση των παραμέτρων που θα χρησιμοποιηθούν.
- Τα αποτελέσματα πρέπει να επεξεργάζονται με προσοχή.
- Τα συμπεράσματα πρέπει να είναι περισσότερο ποιοτικά και λιγότερο ποσοτικά.

Πειραματική τεκμηρίωση

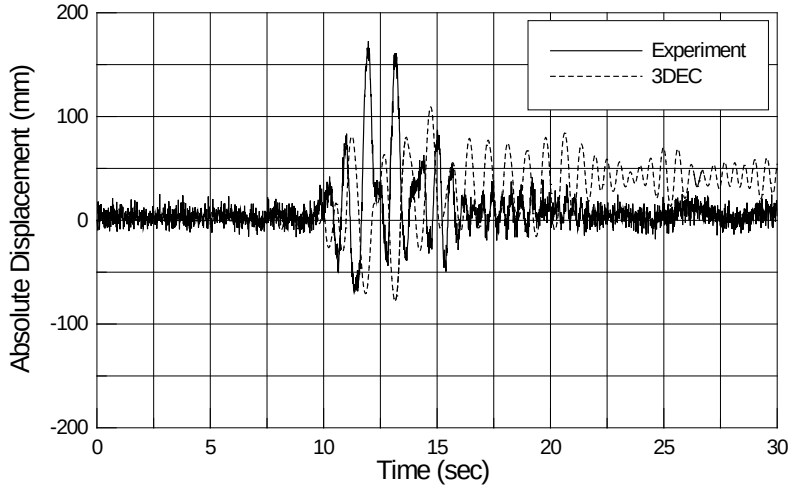
Επαλήθευση του αριθμητικού κώδικα 3DEC (Itasca)

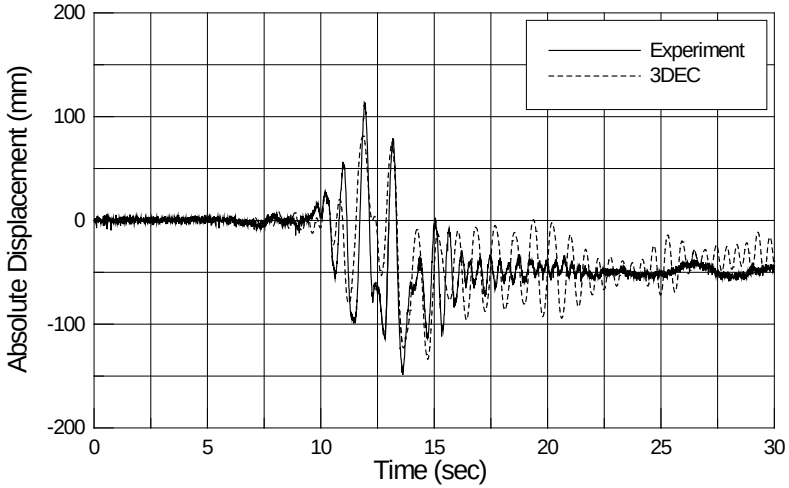
Καλή πρόβλεψη της μορφής της ταλάντωσης και της μόνιμης παραμόρφωσης.

- Πειράματα στη σεισμική τράπεζα για μοντέλο κίονα του Παρθενώνα σε κλίμακα 1:3
- Σεισμική διέγερση σε δύο οριζόντιες διευθύνσεις



Μετακίνηση κορυφής

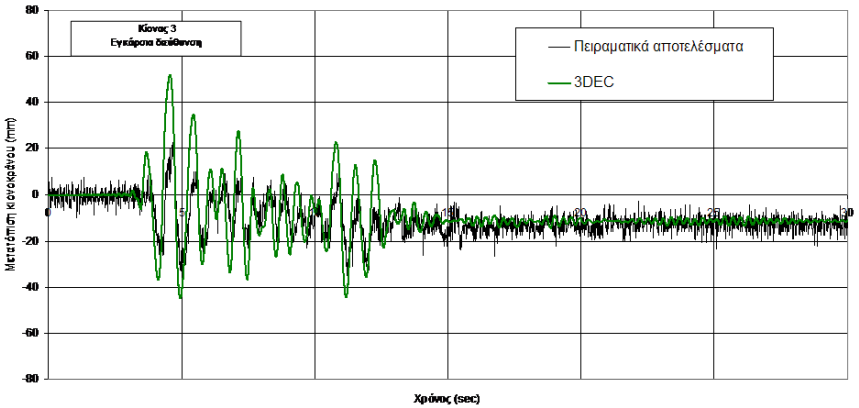


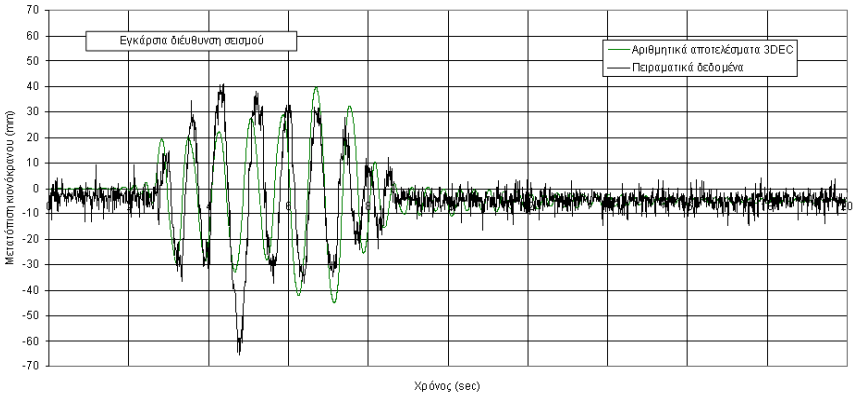


Πειραματική τεκμηρίωση

Πειραματική διερεύνηση της επιρροής συνδέσμων στις δοκούς των επιστυλίων

Χωρίς συνδέσμους





Με συνδέσμους

Ιδιότητες στις διεπιφάνειες των αρμών

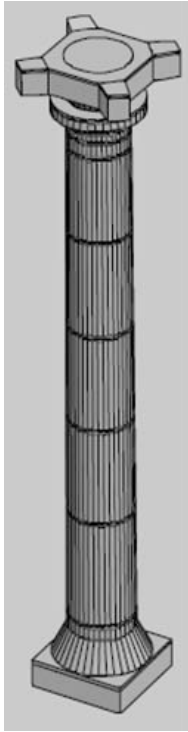
- Για την αποφυγή αριθμητικών ασταθειών, στις διεπιφάνειες θεωρούνται ελαστοπλαστικές επαφές με ιδιότητες:
  - k_n = ελαστική σταθερά στην κάθετη στον αρμό διεύθυνση
  - k_s = ελαστική σταθερά στην εφαπτομενική διεύθυνση (διατμητική αντίσταση)

  } μέχρι την έναρξη της ολίσθησης

  - μ = συντελεστής τριβής → μετά την έναρξη της ολίσθησης
- Διαφοροποιήσεις στην τιμή των k_n, k_s επηρεάζουν αρκετά τα αποτελέσματα, κυρίως όμως όσον αφορά στο τμήμα της απόκρισης μετά το τέλος του σεισμού.

Ιδιότητες στις διεπιφάνειες των αρμών (συνέχεια)

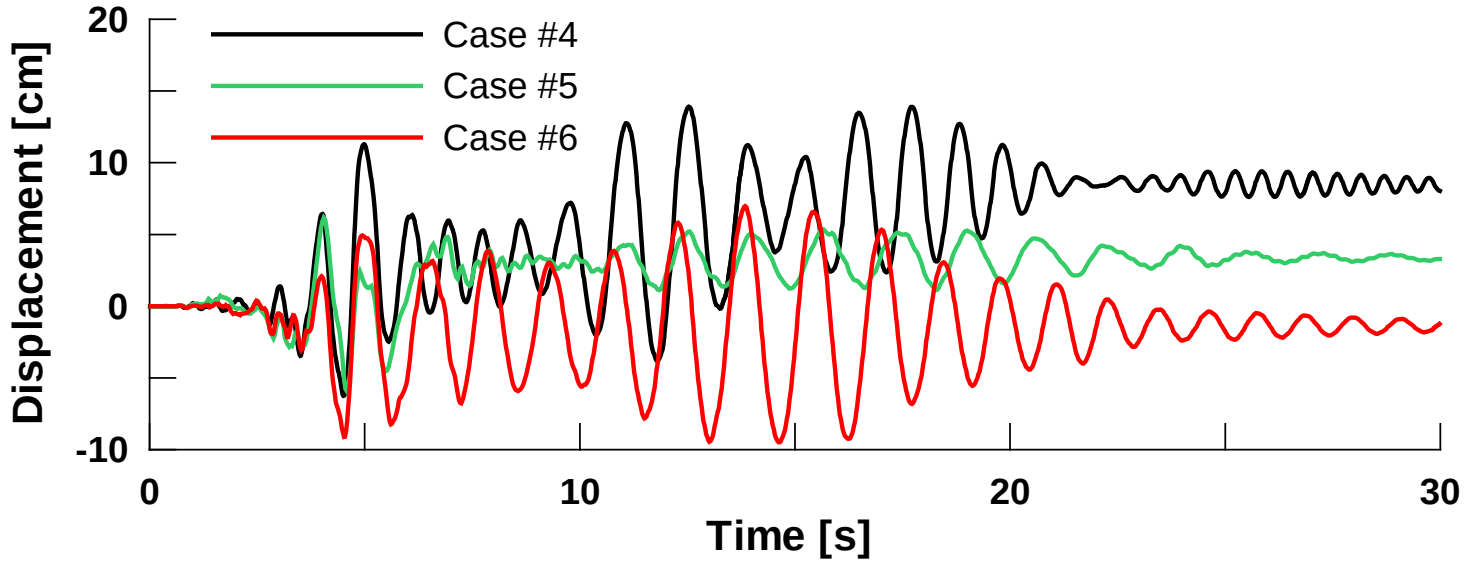
Επιρροή ελαστικών σταθερών στις διεπιφάνειες



Ναός Αφροδίτης (Αμαθούντα Κύπρου)

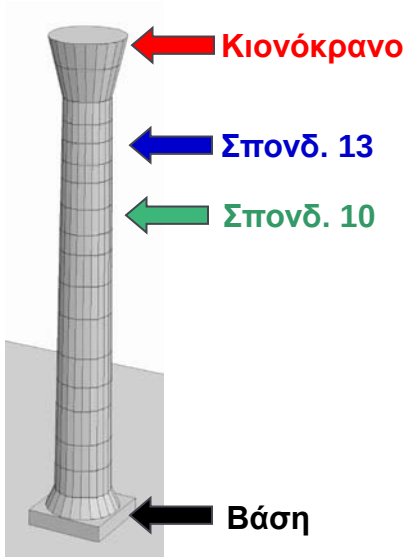
Μετακίνηση κορυφής κιονοκράνου

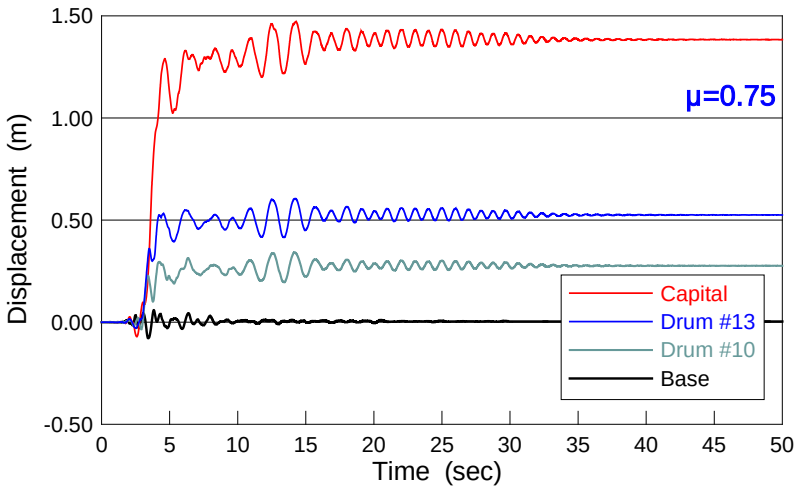
Case	k_n [Pa/m]	k_s [Pa/m]	*fr* [deg]
#4	5×10^9	1×10^9	36.87
#5	0.5×10^9	0.1×10^9	36.87
#6	1×10^9	0.2×10^9	36.87

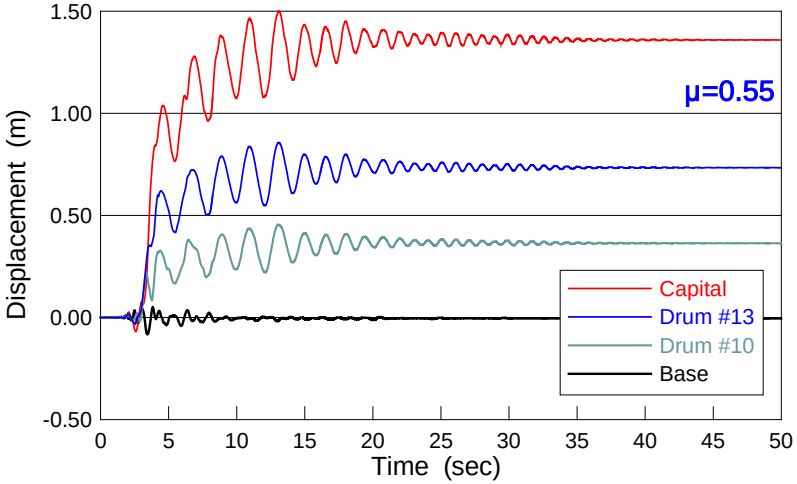


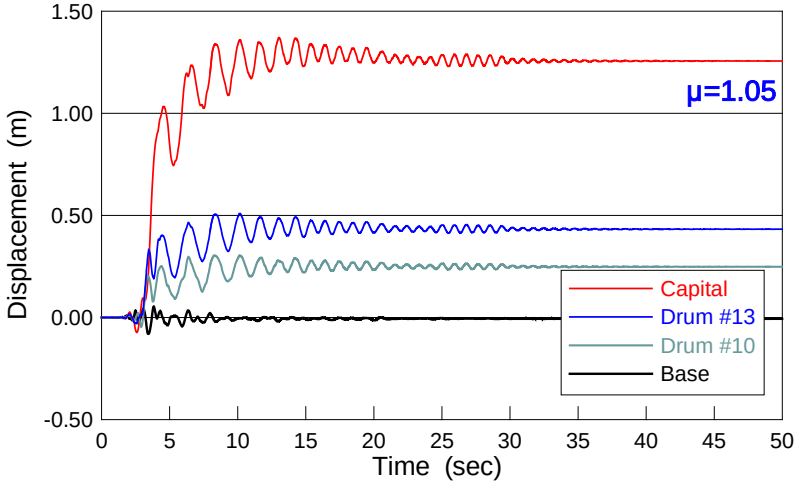
Ιδιότητες στις διεπιφάνειες των αρμών (συνέχεια)

Επιρροή συντελεστή τριβής





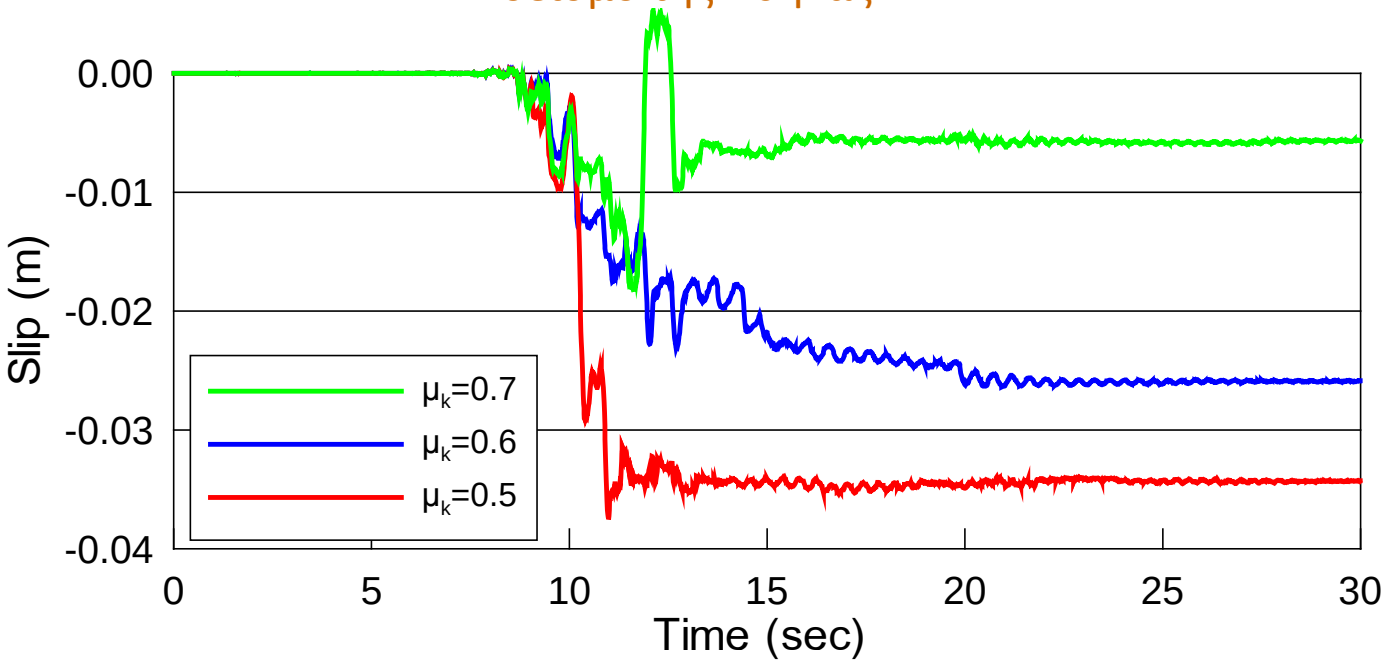


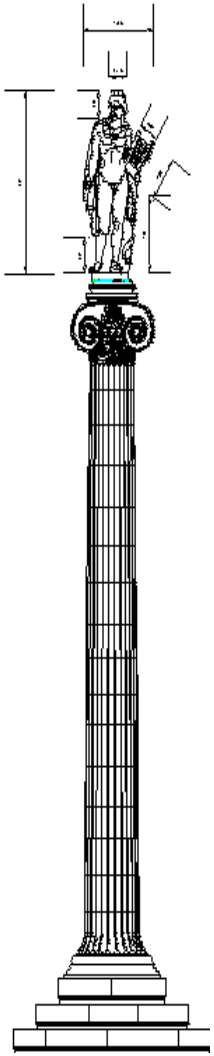


Ιδιότητες στις διεπιφάνειες των αρμών(συνέχεια)

Επιρροή συντελεστή τριβής (συνέχεια)

Ολίσθηση αγάλματος Απόλλωνα της Ακαδημίας Αθηνών στο σεισμό της Αθήνας





Απόσβεση

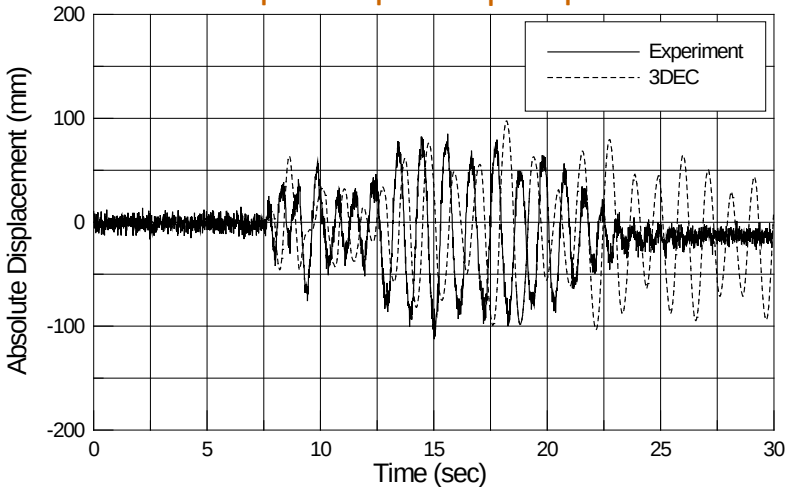
- Η απόσβεση οφείλεται σε:
  - Ολισθήσεις των λιθοσωμάτων
  - Κρούσεις μεταξύ των λιθοσωμάτων κατά το λικνισμό.
- Η απόσβεση από ολισθήσεις λαμβάνεται αυτόματα υπόψη μέσω της τριβής.
- Η απόσβεση λόγω κρούσεων, όμως, δεν μπορεί να ληφθεί υπόψη, λόγω της ελαστικότητας των διεπιφανειών μεταξύ των σωμάτων. Γι' αυτό χρειάζεται να προστεθεί μέσω ισοδύναμου συντελεστή απόσβεσης.

Απόσβεση (συνέχεια)

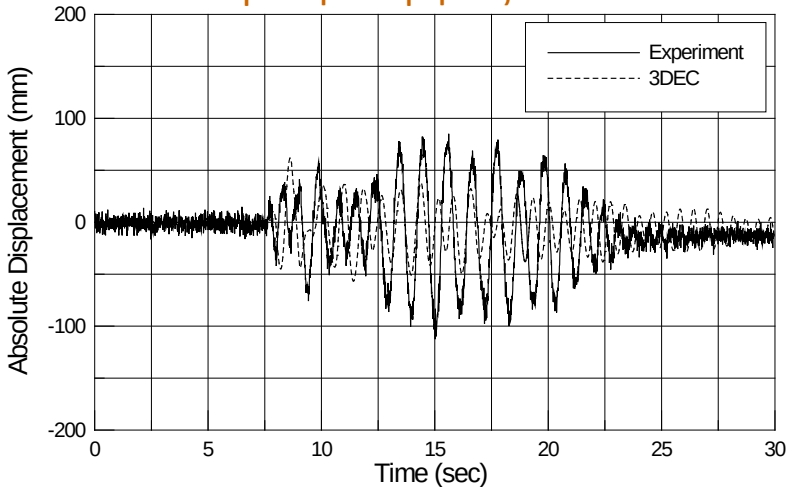
- Κατά τη διάρκεια της ισχυρής δόνησης, η απόσβεση λόγω κρούσεων δεν είναι σημαντική και μπορεί να χρησιμοποιηθεί μηδενικός συντελεστής απόσβεσης.
- Μετά το τέλος της ισχυρής δόνησης, πρέπει να χρησιμοποιηθεί κάποιος συντελεστής απόσβεσης, ώστε η κίνηση να απομειωθεί και να προκύψουν οι παραμένουσες μετατοπίσεις.

Σύγκριση πειραματικών και αριθμητικών αποτελεσμάτων

Μηδενική απόσβεση



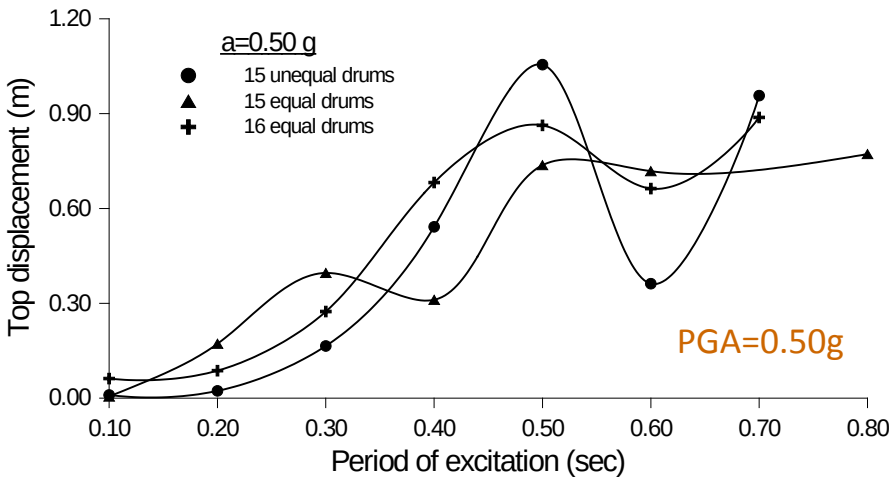
Απόσβεση ακαμψίας = 0.005



Ακρίβεια προσομοίωσης κατασκευής

Λεπτομερής αποτύπωση γεωμετρίας

Λόγω της ευαισθησίας της απόκρισης, το μοντέλο υπολογισμού πρέπει να ανταποκρίνεται, κατά το δυνατόν, στην πραγματική κατασκευή.

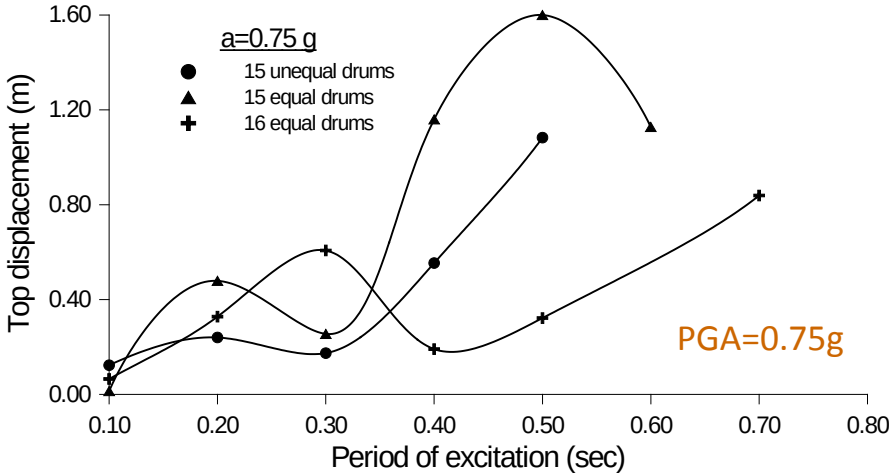


Κίονας Ολυμπιείου

Μέγιστη μετακίνηση κιονοκράνου για ημιτονική διέγερση.

Σύγκριση:

- 15 ανισοϋψείς σπόνδυλοι
- 15 ισοϋψείς σπόνδυλοι
- 16 ισοϋψείς σπόνδυλοι



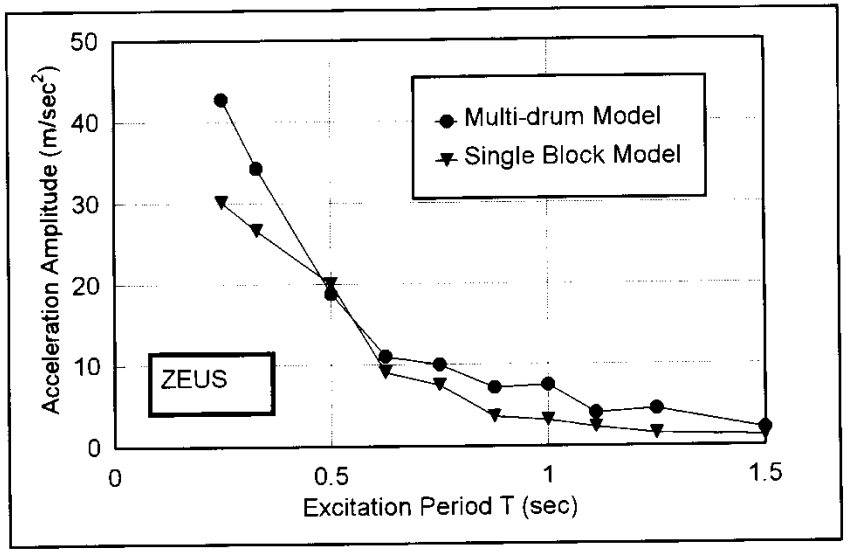
Ακρίβεια προσομοίωσης κατασκευής (συνέχεια)

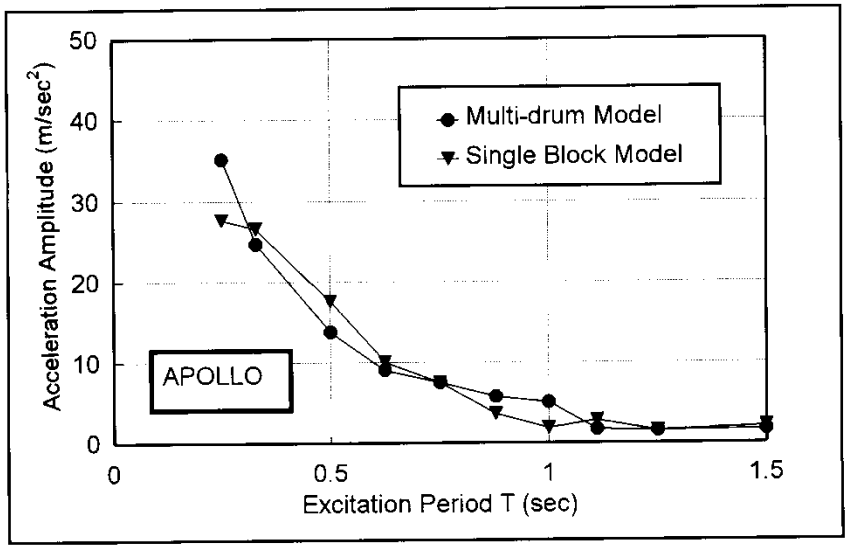
- Όμως: Ακόμη και πολύ απλοποιημένες γεωμετρίες μπορούν να δώσουν, σε ορισμένες περιπτώσεις, αρκετές πληροφορίες για τη σεισμική συμπεριφορά (μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως αρχική εκτίμηση).

Κίονες Δία Νεμέας και Επικούριου Απόλλωνα

Απαιτούμενη επιτάχυνση για ανατροπή για ημιτονική διέγερση

Σύγκριση πολύσπονδου κίονα και ισοδύναμου μονολιθικού



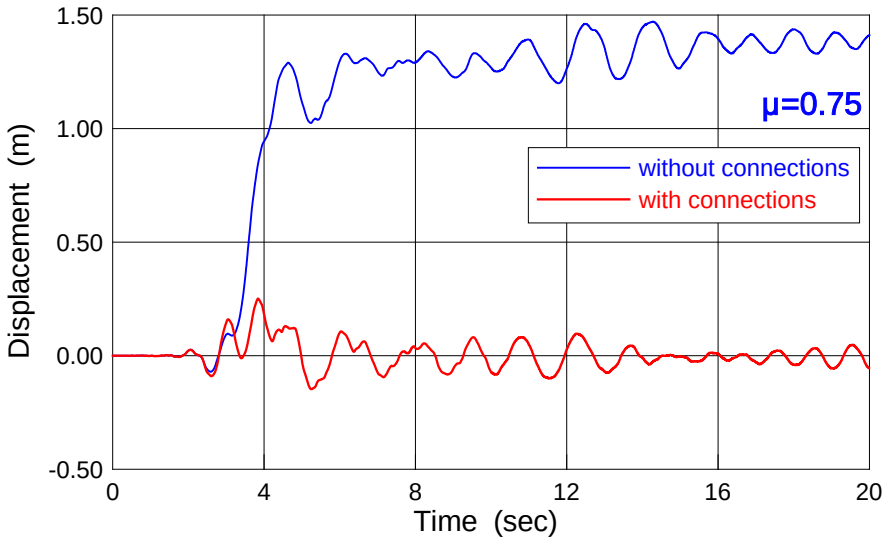


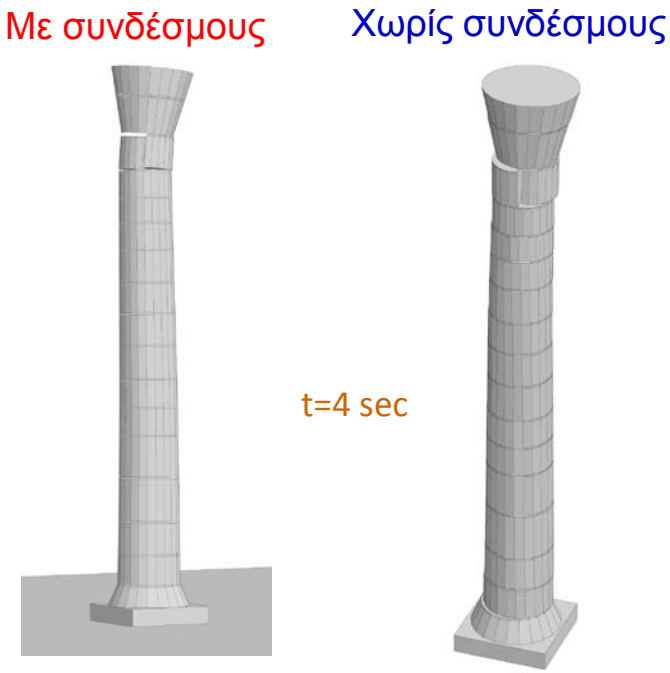
Ακρίβεια προσομοίωσης κατασκευής (συνέχεια)

Προσομοίωση συνδέσμων

Οι σύνδεσμοι μεταξύ των σπονδύλων:

- Περιορίζουν τις ολισθήσεις των σπονδύλων
- Αναγκάζουν την κατασκευή να κινηθεί περισσότερο σε λικνισμό
- Η επιρροή τους μπορεί να είναι ευνοϊκή ή δυσμενής





Κίονας Ολυμπιείου: Μετακίνηση κιονοκράνου

Σεισμός Καλαμάτας με PGV=60 cm/s

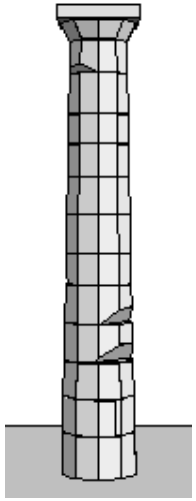
Ακρίβεια προσομοίωσης κατασκευής (συνέχεια)

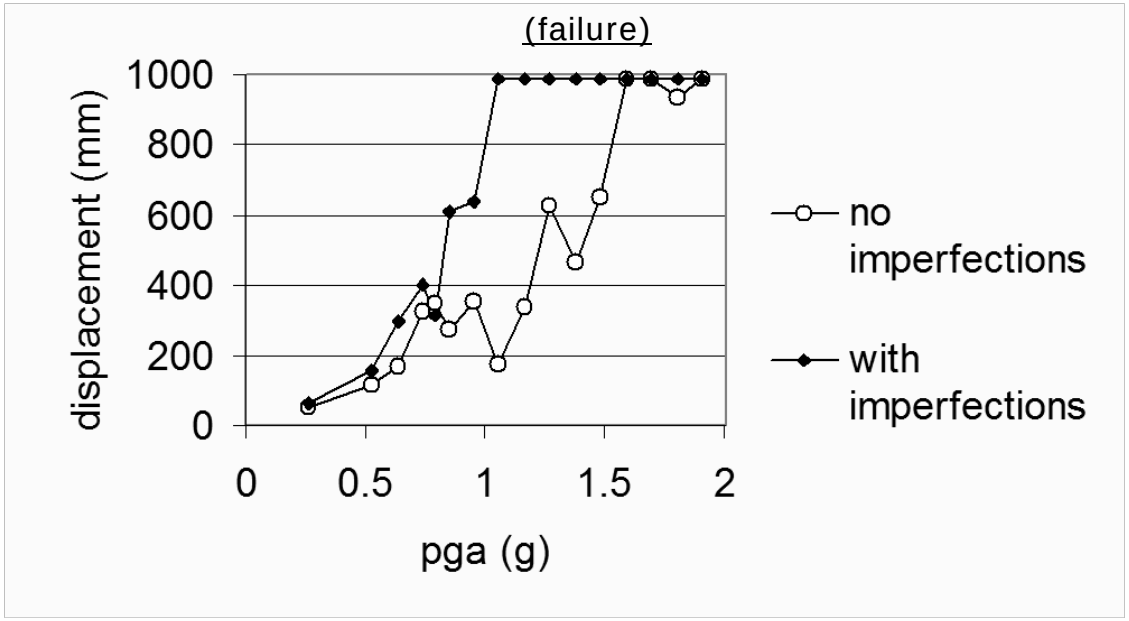
Προσομοίωση υφιστάμενων βλαβών

- Η ύπαρξη βλαβών μειώνει σημαντικά την ευστάθεια έναντι κατάρρευσης.
- Η συνύπαρξη διαφορετικού τύπου βλαβών (π.χ. αποτμήσεις σπονδύλων, κλίσεις κιόνων, ρωγμές, κλπ) επηρεάζει τον κίνδυνο αστοχίας αθροιστικά.

Κίονας Παρθενώνα:

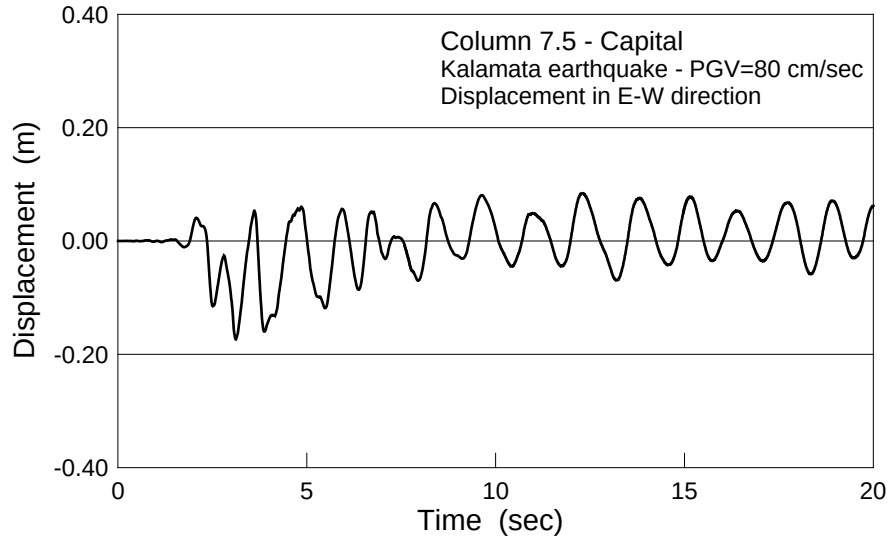
Μέγιστη μετακίνηση κιονοκράνου με και χωρίς βλάβες (Σεισμός Αιγίου).

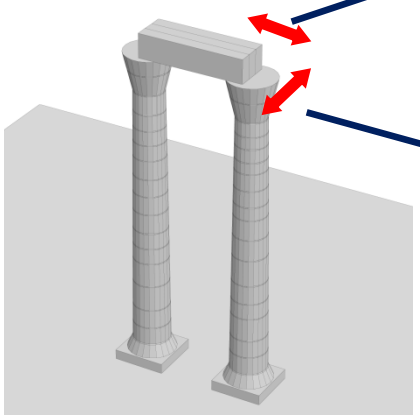


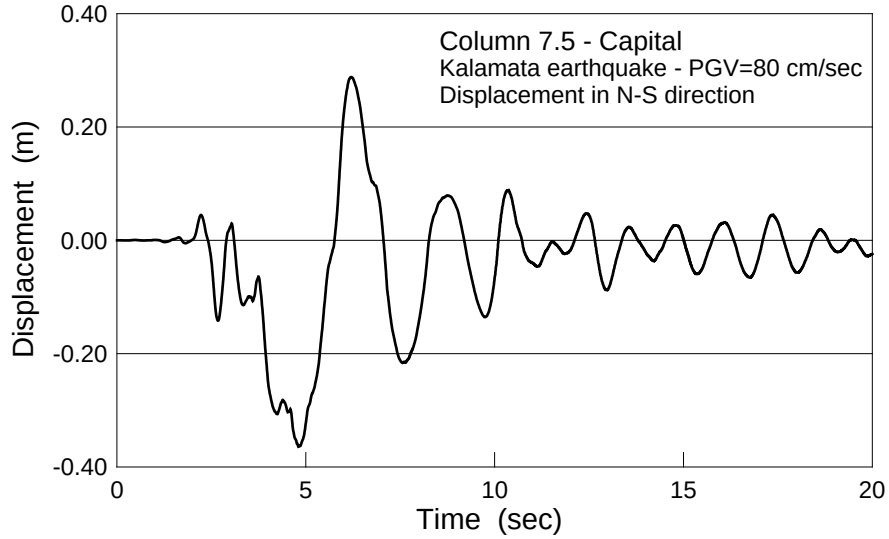


Τρισδιάστατη ανάλυση

- Μεμονωμένος κίονας: σημαντική εκτός επιπέδου κίνηση για επίπεδη διέγερση.
- Σύστημα δύο κιόνων: σημαντικά διαφορετική κίνηση στις δύο κύριες διευθύνσεις

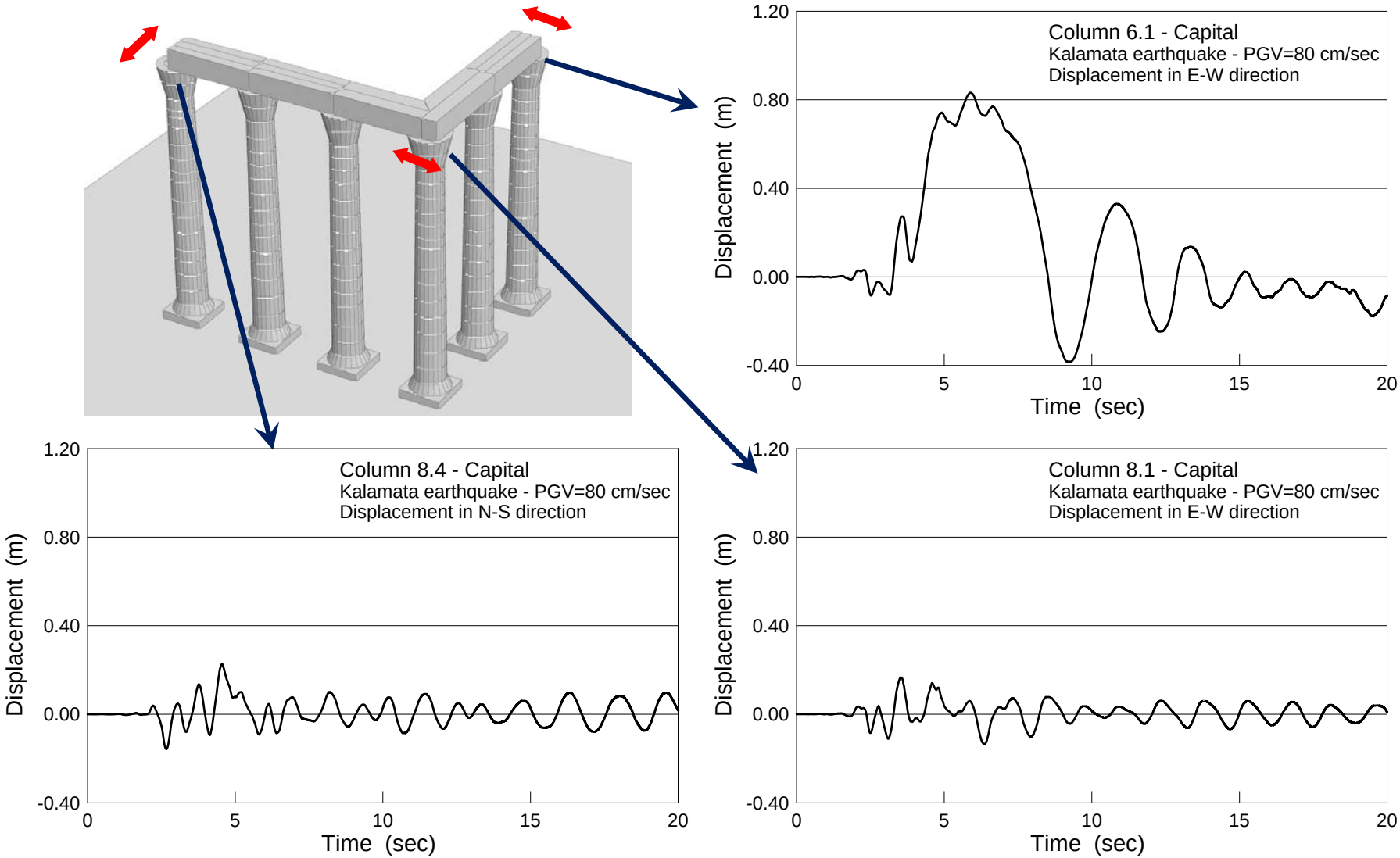






Ολυμπιείον: Σεισμός Καλαμάτας (PGV=80 cm/sec)

Τρισδιάστατη ανάλυση (συνέχεια)

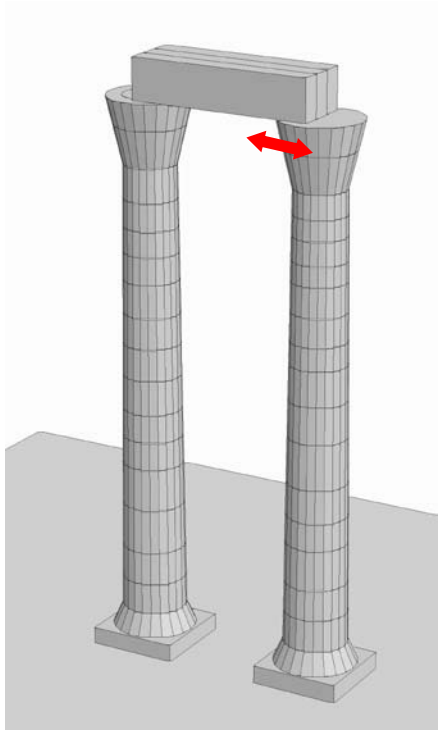


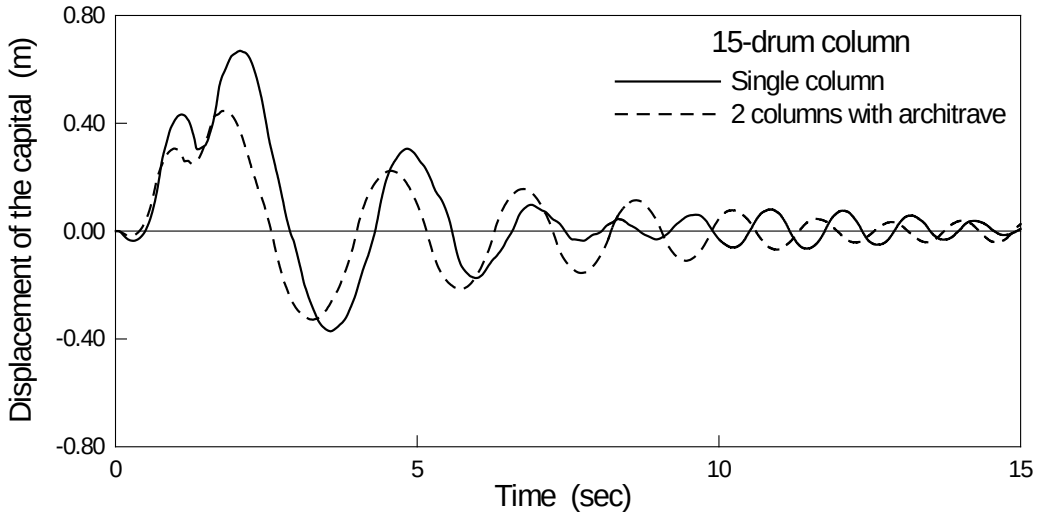
Εφαρμογές - Παραδείγματα

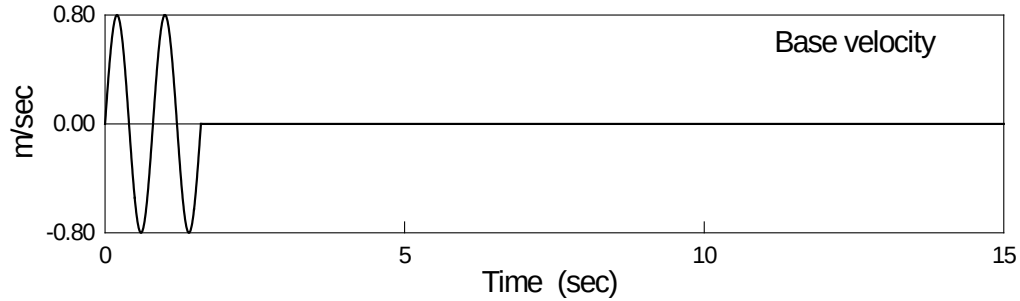
Ολυμπιείον

- Διερεύνηση της επιρροής της σύζευξης κιόνων με επιστύλιο

Σύγκριση απόκρισης μεμονωμένου κίονα και δύο συζευγμένων κιόνων





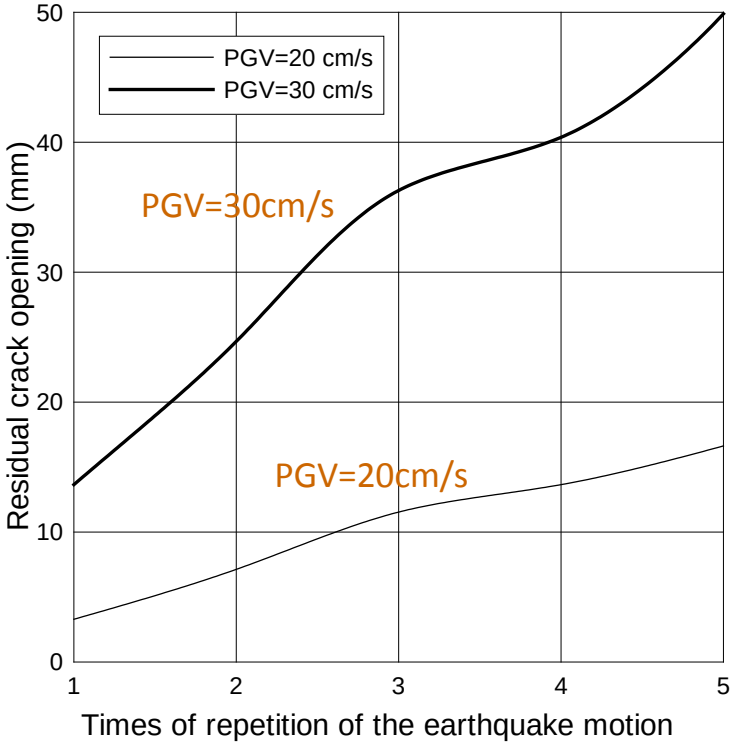


Εφαρμογές - Παραδείγματα

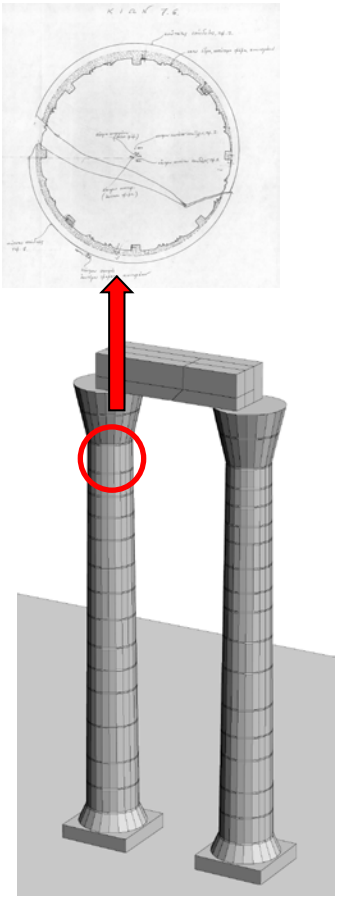
Ολυμπιείον

- Διερεύνηση της επιρροής επαναλαμβανόμενων σεισμικών διεγέρσεων
  - Στις περισσότερες περιπτώσεις το αποτέλεσμα είναι αθροιστικό
  - Σε ορισμένες περιπτώσεις, επόμενος σεισμός είναι δυνατόν να αναιρέσει μερικώς (τοπικά) το δυσμενές αποτέλεσμα προηγούμενου σεισμού

Άνοιγμα ρωγμής με πλήθος επαναλήψεων σεισμικής διέγερσης (σεισμός Καλαμάτας, 1989)



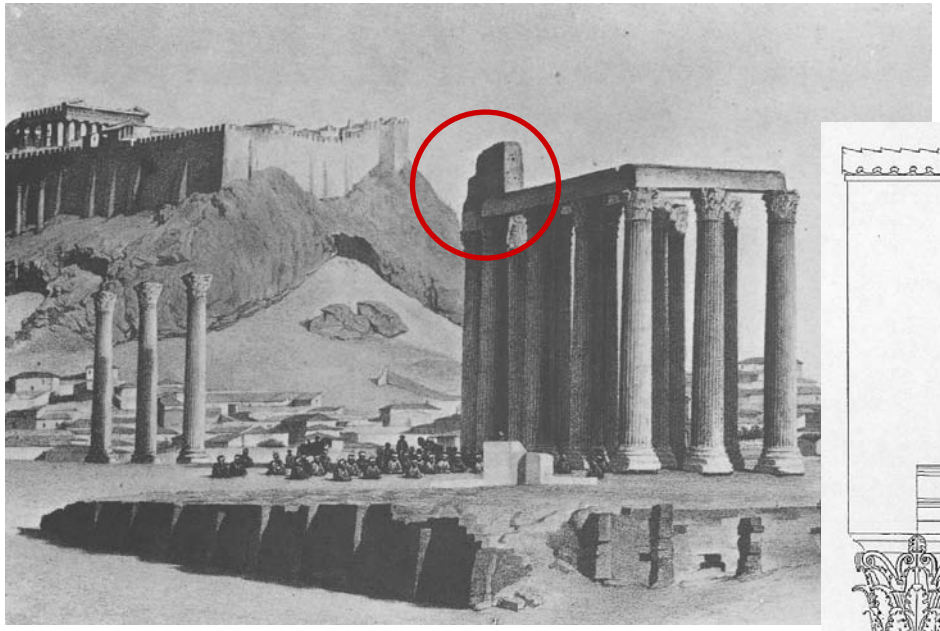
Διατομή σπονδύλου



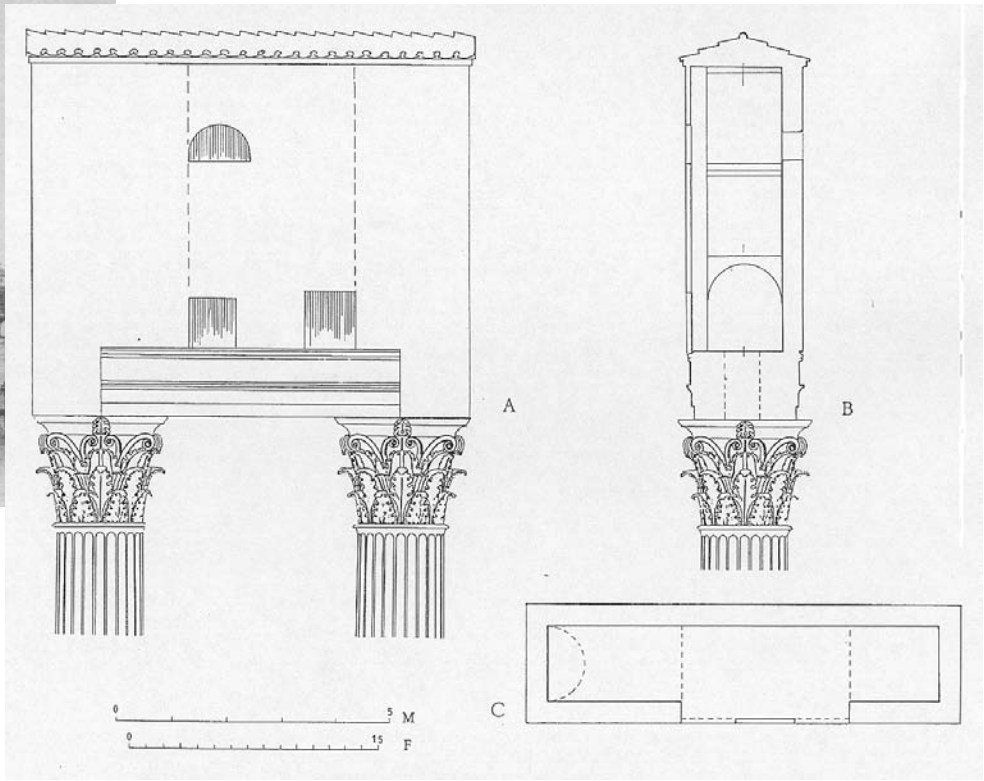
Εφαρμογές - Παραδείγματα

Ολυμπιείον

- Επιρροή μάζας ανωδομής-Κελί στυλίτη μοναχού (κατεδαφίστηκε το 1886)



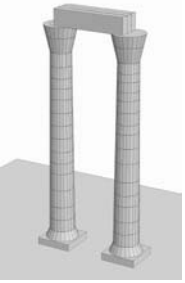
Αναπαράσταση (Bouras, 1996)

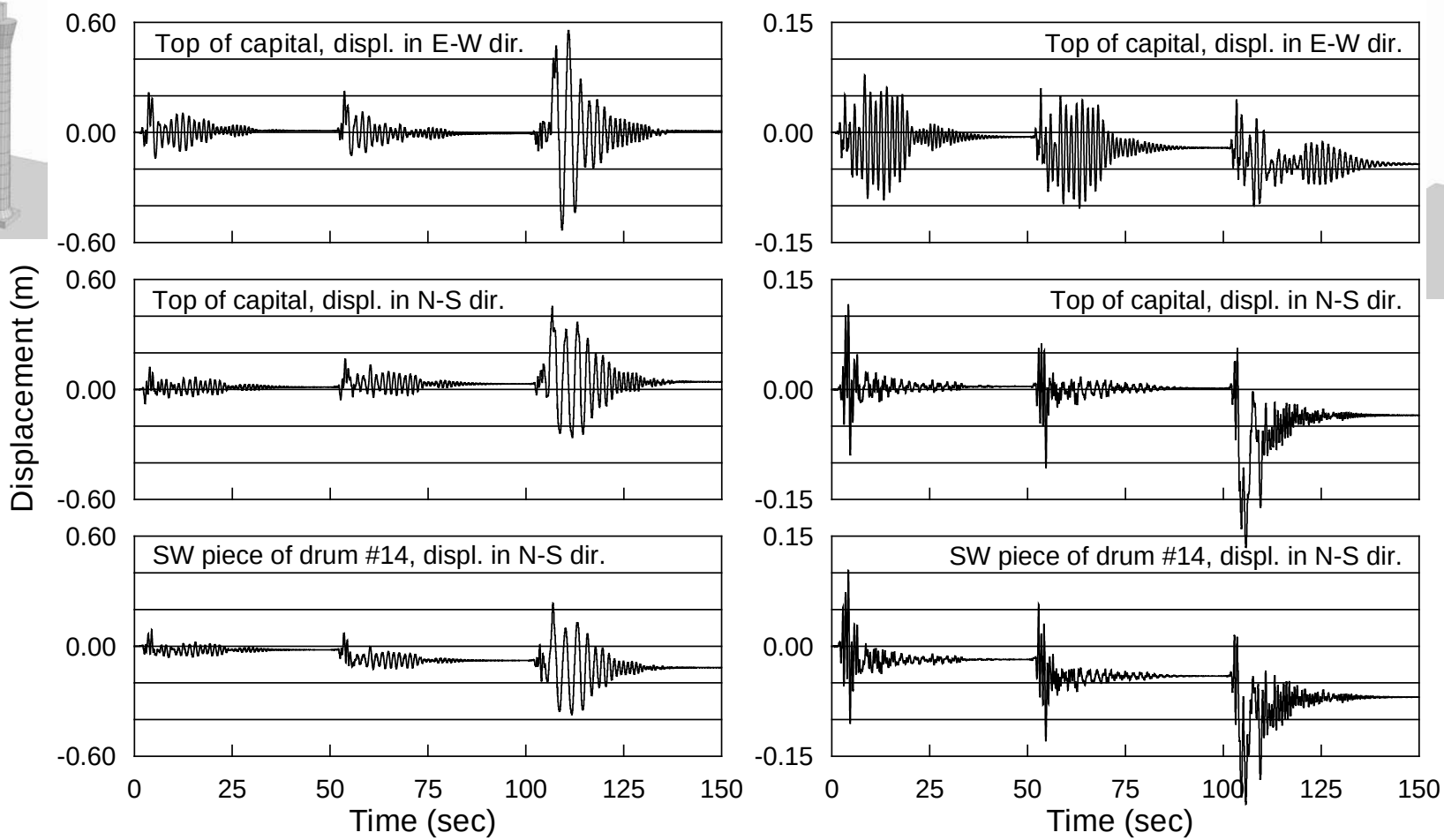


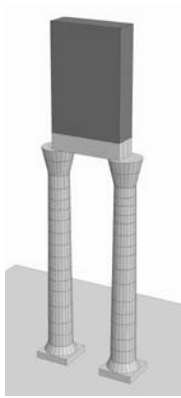
Εφαρμογές - Παραδείγματα

Ολυμπιείον

3 × Καλαμάτα, PGV=60 cm/s







Χωρίς κτίσμα

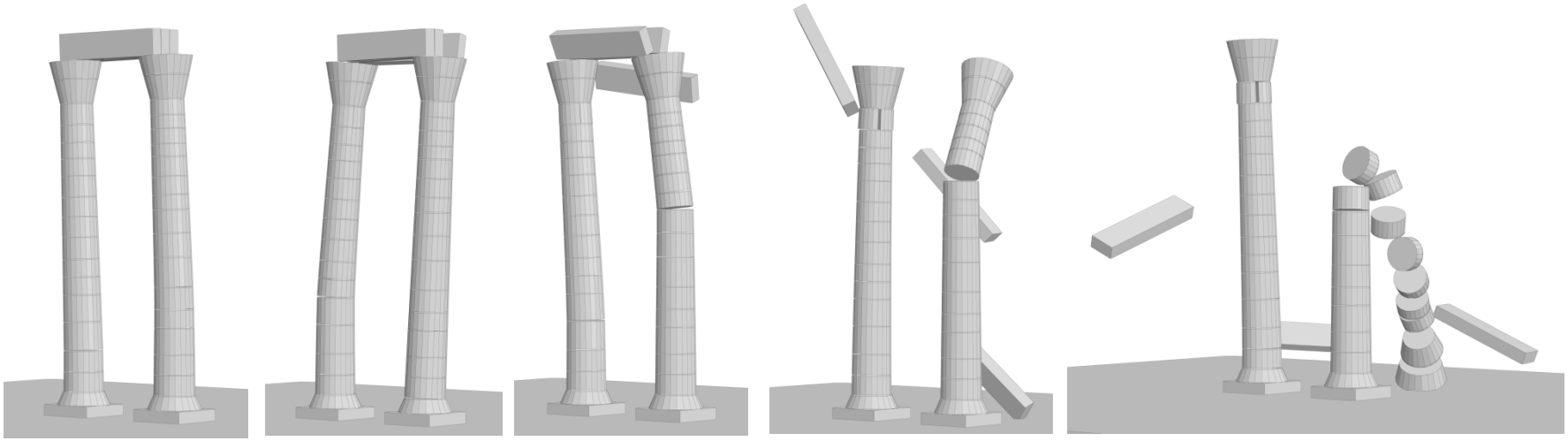
Με κτίσμα

Εφαρμογές - Παραδείγματα

Ολυμπιείον

- Τρόπος απόκρισης και κατάρρευσης

Σεισμός Erzincan, PGV=0.40 m/s

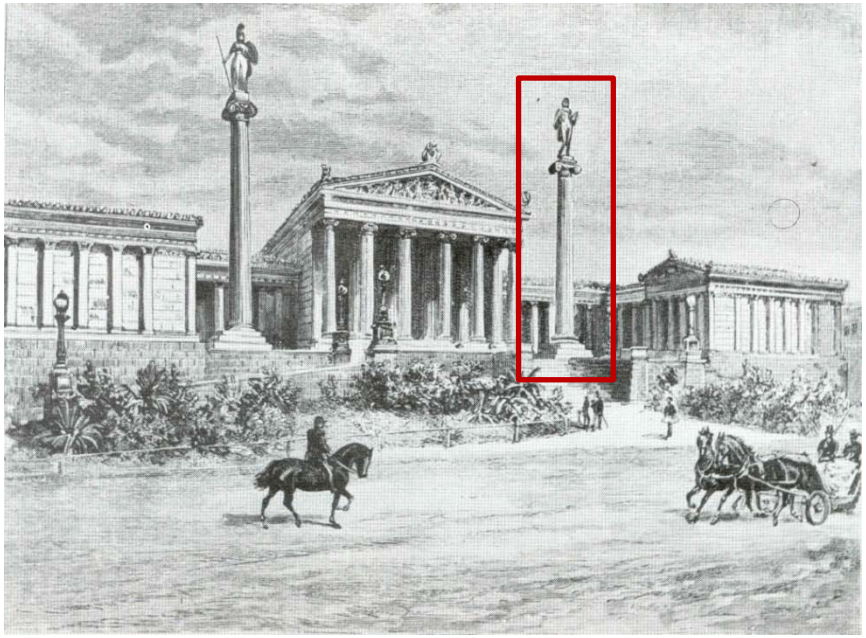


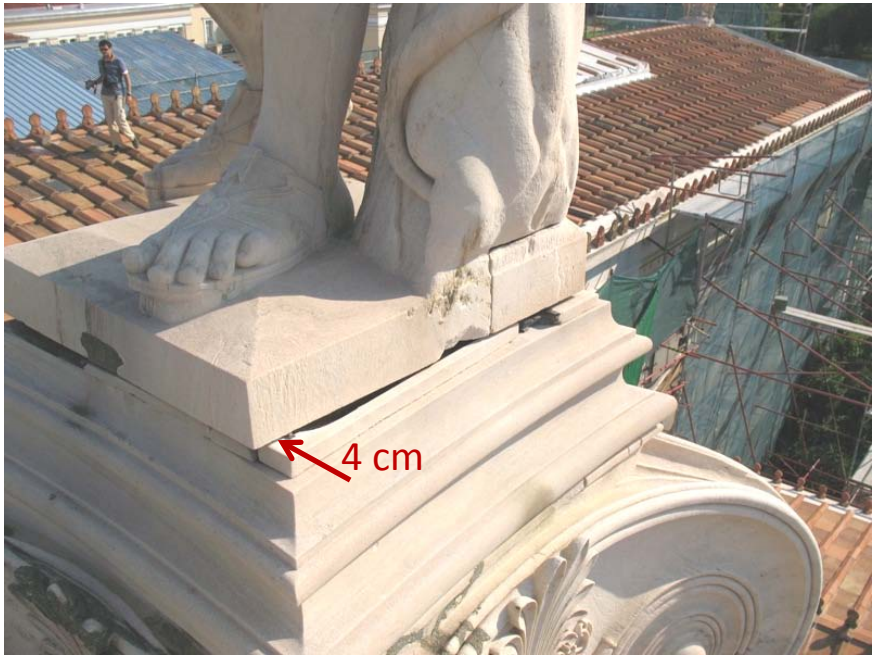
t=4 sec t=6 sec t=8 sec t=10 sec t=12 sec

Εφαρμογές - Παραδείγματα

Άγαλμα Απόλλωνα Ακαδημίας Αθηνών

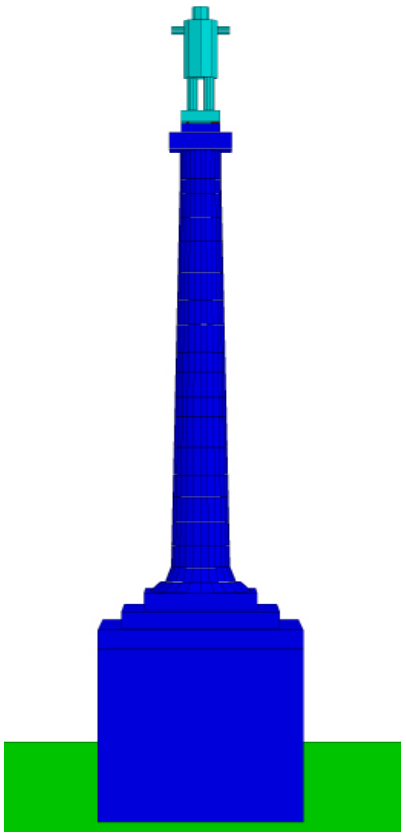
- Στροφή στο σεισμό της Αθήνας, 1999

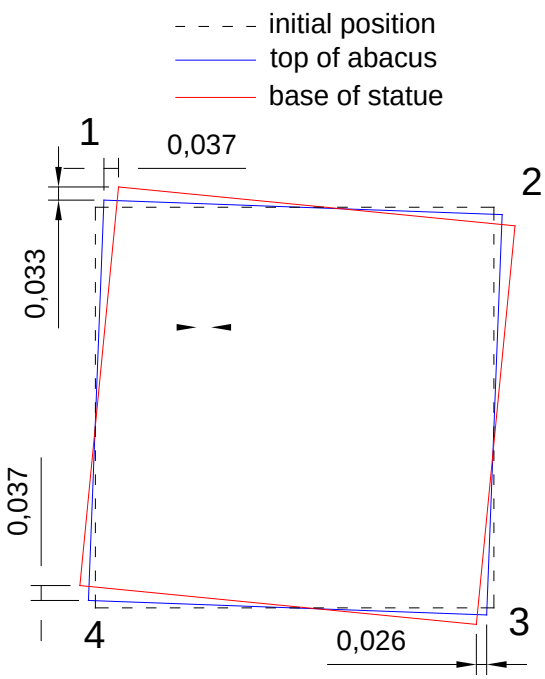




Άγαλμα Απόλλωνα Ακαδημίας Αθηνών

- Στροφή στο σεισμό της Αθήνας, 1999





Καταγραφή: ΜΕΤΡΟ Συντάγματος για PGA=0.14 g

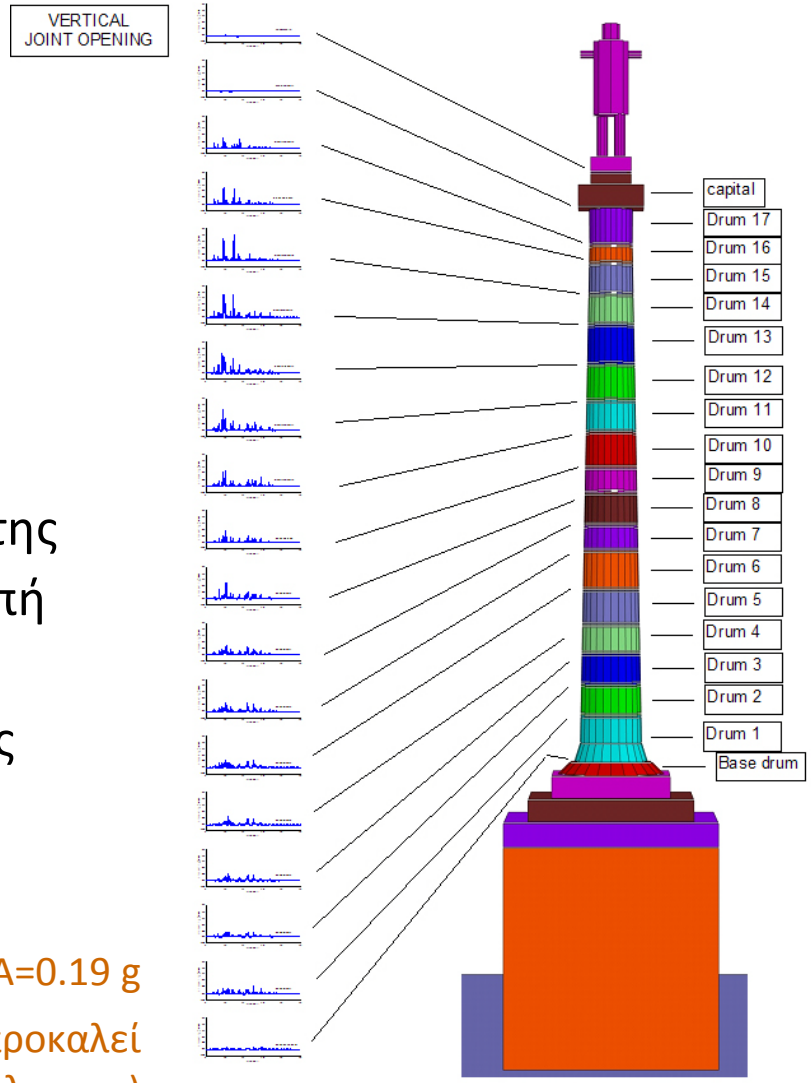
Εφαρμογές - Παραδείγματα

Άγαλμα Απόλλωνα Ακαδημίας Αθηνών

- Τρόπος απόκρισης
  - Λικνισμός κυρίως στους μεσαίους σπονδύλους – σχεδόν καθόλου λικνισμός στο άγαλμα
  - Για διαφορετικό πρασανατολισμό της ίδιας διέγερσης συμβαίνει ανατροπή του αγάλματος ⇒ κίνδυνος κατάρρευσης εάν αρχίσει λικνισμός του αγάλματος

Καταγραφή: ΜΕΤΡΟ Συντάγματος για PGA=0.19 g

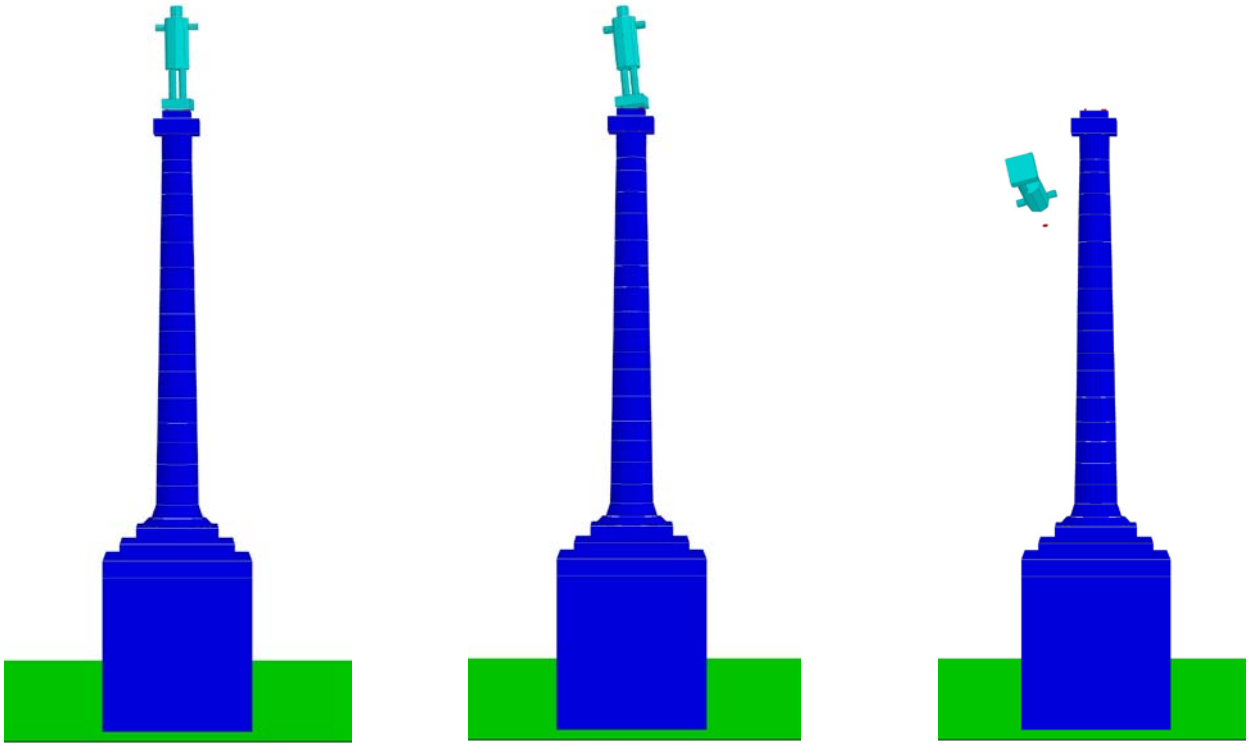
(προσανατολισμός διέγερσης που δεν προκαλεί ανατροπή του αγάλματος)



Κατακόρυφο άνοιγμα αρμών

Εφαρμογές - Παραδείγματα

Άγαλμα Απόλλωνα Ακαδημίας Αθηνών



t=10 sec t=12 sec t=14 sec

Καταγραφή: ΜΕΤΡΟ Συντάγματος για PGA=0.19 g

(προσανατολισμός διέγερσης που προκαλεί ανατροπή του αγάλματος)

Συμπεράσματα

- Σεισμική συμπεριφορά αρχαίων μνημείων:
  - Έντονα μη γραμμική
  - Εξαιρετικά ευαίσθητη
  - Πολύ δύσκολο και πολύπλοκο πρόβλημα
- Σεισμικές διεγέρσεις:
  - Προσεκτική επιλογή τους με βάση μελέτη σεισμικής επικινδυνότητας
  - Μη σωστή επιλογή μπορεί να οδηγήσει σε λανθασμένα συμπεράσματα
  - Απαιτούνται επιλύσεις με αρκετές σεισμικές διεγέρσεις με διαφορετικά χαρακτηριστικά (αλλά συμβατά με την τεκτονική της ευρύτερης περιοχής)
  - Ο προσανατολισμός των οριζόντιων συνιστωσών μπορεί να αλλάξει σημαντικά τα αποτελέσματα

Συμπεράσματα

- Αριθμητικό προσομοίωμα:
  - Απαιτείται όσο το δυνατόν ακριβέστερη απεικόνηση της πραγματικής γεωμετρίας. Απλοποιημένες γεωμετρίες μπορούν να δώσουν ενδεικτικά μόνον αποτελέσματα
  - Απαιτούνται τρισδιάστατες αναλύσεις
  - Απαιτείται σωστή επιλογή των τιμών των παραμέτρων. Σε περίπτωση αμφιβολιών πρέπει να γίνει παραμετρική διερεύνηση
- Εξαγωγή συμπερασμάτων:
  - Προσεκτική εξαγωγή συμπερασμάτων. Λόγω της μεγάλης ευαισθησίας της δυναμικής απόκρισης, υπάρχει εγγενής αβεβαιότητα των αποτελεσμάτων
  - Τα αποτελέσματα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη περισσότερο ποιοτικά και λιγότερο ποσοτικά