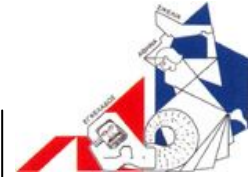
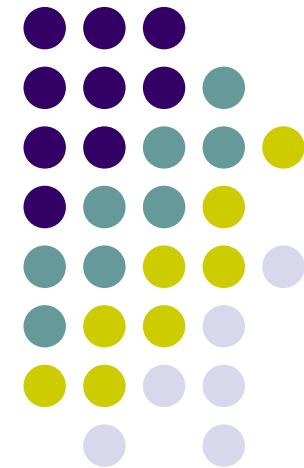


**Εργαστήριο Αντισεισμικής
Τεχνολογίας
Σχολή Πολιτικών Μηχανικών
Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο**



**Δυναμική Αλληλεπίδραση
Εδάφους – Κατασκευής:
Ιστορική Εξέλιξη και
Σύγχρονη Πρακτική**

**Κ. Σπυράκος, Καθηγητής ΕΜΠ
Δ/ντής Εργαστηρίου Αντισεισμικής Τεχνολογίας**

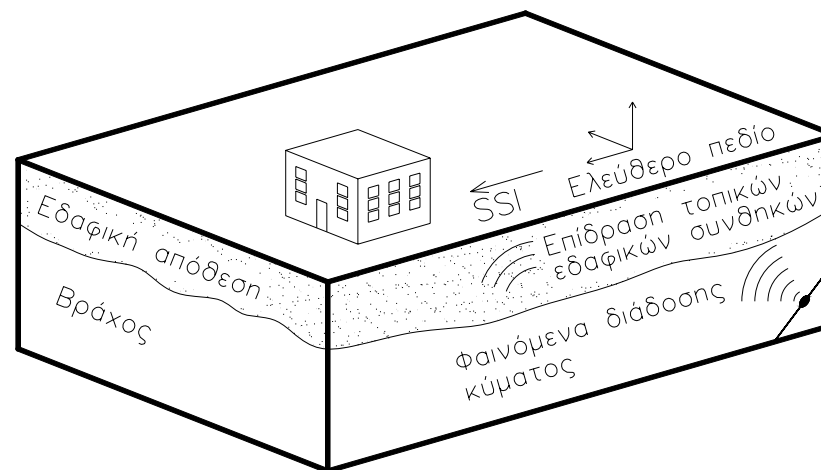




Αποτίμηση Σεισμικών Φορτίων

Η σεισμική κίνηση στο ελεύθερο πεδίο εξαρτάται:

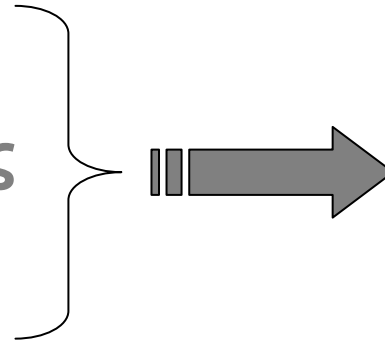
- από φαινόμενα σχετιζόμενα με την **πηγή** (όπως μέγεθος, μηχανισμός διάρρηξης)
- από φαινόμενα **διάδοσης κύματος** (τι παρεμβάλεται)
- από φαινόμενα σχετιζόμενα με τις **τοπικές εδαφικές συνθήκες** (επιφανειακές στρώσεις, ανάγλυφο)



Αποτίμηση Σεισμικών Φορτίων



επιδράσεις πηγής
φαινόμενα διάδοσης κύματος
τοπικές εδαφικές συνθήκες



κίνηση στο
ελεύθερο πεδίο
(κίνηση απουσία
δομήματος)

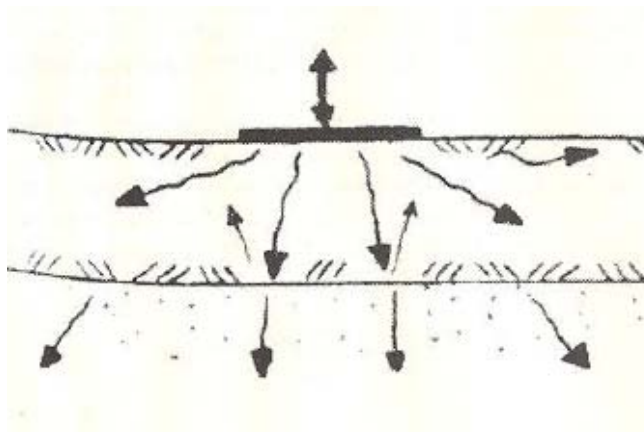
Η θεώρηση Αλληλεπίδρασης Κατασκευής - Εδάφους
(ΑΚΕ) λαμβάνει υπόψη:

παρουσία κατασκευής - θεμελίωσης

Σπουδαιότερα Αποτελέσματα ΑΚΕ



1. Τροποποίηση απόκρισης σε σχέση με θεώρηση πακτωμένης κατασκευής.
2. Θεώρηση της απόσβεσης στο έδαφος (Απόσβεση Ακτινοβολίας – Απόσβεση Εδαφικού Υλικού).



3. Ιδιαίτερα σημαντική για «δύσκαμπτες» κατασκευές θεμελιωμένες σε «μαλακά» εδάφη.

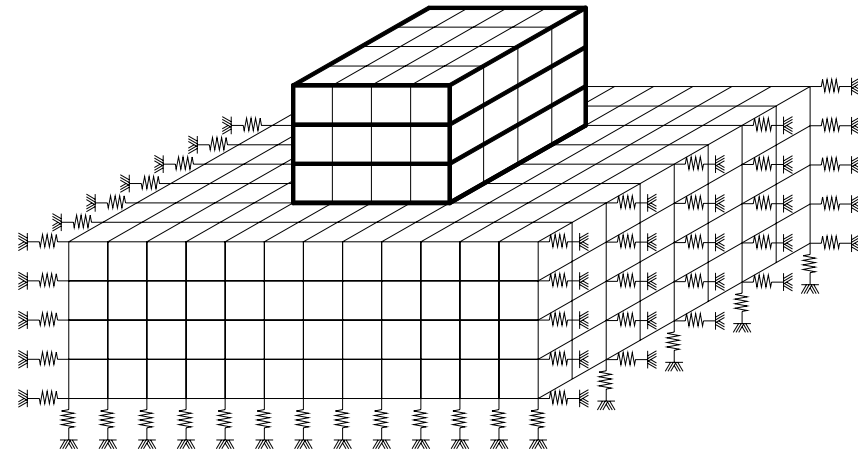


Μέθοδοι Αντιμετώπισης

A. Άμεσες μέθοδοι (direct methods)

Προσομοιώνουν την κατασκευή, το θεμέλιο και το έδαφος ταυτόχρονα. Κατάλληλες για θεώρηση μη-γραμμικής συμπεριφοράς. Συνήθεις μέθοδοι:

- Πεπερασμένα Στοιχεία
- Συνοριακά Στοιχεία



B. Έμμεσες μέθοδοι (substructure methods)

Κατάλληλες για γραμμικές αναλύσεις. Υιοθετούνται από τους κανονισμούς.

Κινηματική Αλληλεπίδραση
Αδρανειακή Αλληλεπίδραση



Είδη Αλληλεπίδρασης

Α. Κινηματική Αλληλεπίδραση

Η κινηματική αλληλεπίδραση αναφέρεται στην ύπαρξη του θεμελίου η οποία διαφοροποιεί την κίνηση του ελεύθερου πεδίου.

Παράμετροι:

- Μέγεθος θεμελίου
- Βάθος θεμελίωσης

Συνυπολογισμός της κινηματικής αλληλεπίδρασης σημαίνει τροποποίηση της εδαφικής κίνησης στο ελεύθερο πεδίο σε κίνηση που εισάγεται στη βάση των θεμελίων (ΚΒΘ) (Foundation Input Motion - FIM).

Είδη Αλληλεπίδρασης

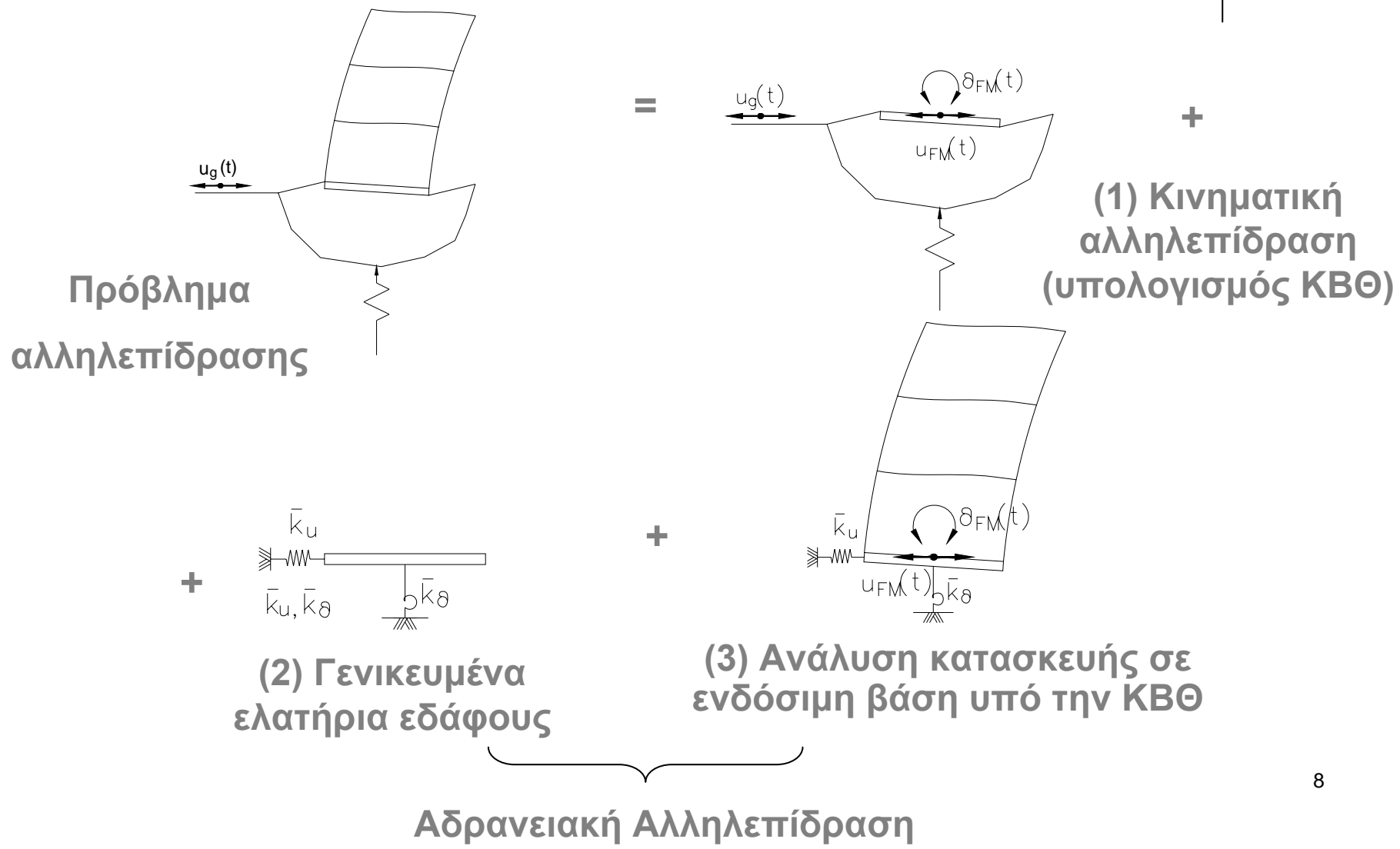


B. Αδρανειακή Αλληλεπίδραση

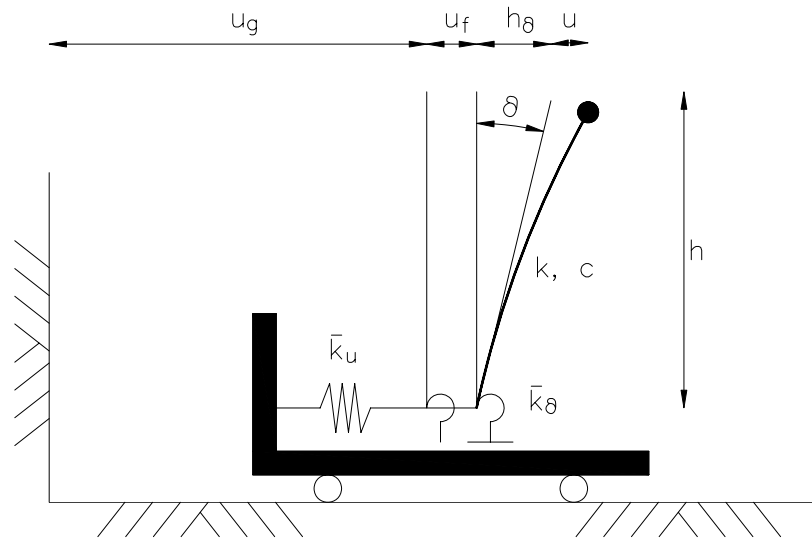
Η αδρανειακή αλληλεπίδραση αναφέρεται στην αδράνεια, δυσκαμψία και απόσβεση της κατασκευής και του εδάφους, όπως αυτά επηρεάζουν την απόκριση του συστήματος για τη σεισμική δράση που ορίζεται στη διεπιφάνεια θεμελίου - εδάφους.



Έμμεση μέθοδος επίλυσης της ΑΚΕ



Βασικές εξισώσεις – αδρανειακή ΑΚΕ



Προσομοίωμα για αδρανειακή
αλληλεπίδραση

(αρμονική φόρτιση στο θεμέλιο)

$$\begin{bmatrix} V \\ M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{k}_u & 0 \\ 0 & \bar{k}_\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_f \\ \theta \end{bmatrix}$$

Βασικές εξισώσεις – αδρανειακή ΑΚΕ



Τα γενικευμένα ελατήρια για τον βαθμό ελευθερίας i εκφράζονται με τη μορφή

$$\bar{k}_i = k_i(\alpha_o, \nu) + i \cdot \omega \cdot c_i(\alpha_o, \nu)$$

ω : η γωνιακή συχνότητα φόρτισης

ν : λόγος Poisson εδάφους

α_o : αδιάστατη συχνότητα της μορφής $a_o = \omega \cdot r / V_s$,
όπου r =ακτίνα θεμελίωσης, V_s = ταχύτητα διάδοσης
διατμητικών κυμάτων στο έδαφος

Βασικές εξισώσεις – αδρανειακή ΑΚΕ



Η δυσκαμψία και η απόσβεση εκφράζονται από τις σχέσεις:

$$k_u = \alpha_u K_u, k_\theta = \alpha_\theta K_\theta$$
$$c_u = \beta_u \frac{K_u r_1}{V_S}, c_\theta = \beta_\theta \frac{K_\theta r_2}{V_S}$$

όπου

K_u, K_θ , οι στατικές δυσκαμψίες, και
 $\alpha_u, \beta_u, \alpha_\theta, \beta_\theta$ αδιάστατες παράμετροι που ορίζουν την εξάρτηση
από τη συχνότητα.

Οι ακτίνες r υπολογίζονται χωριστά για την μεταφορική και τη
λικνιστική κίνηση:

$$r_1 = \sqrt{\frac{A_f}{\pi}}, r_2 = \sqrt[4]{\frac{4I_f}{\pi}}$$

A_f και I_f = εμβαδόν επιφάνειας θεμελίου και ροπή αδράνειας

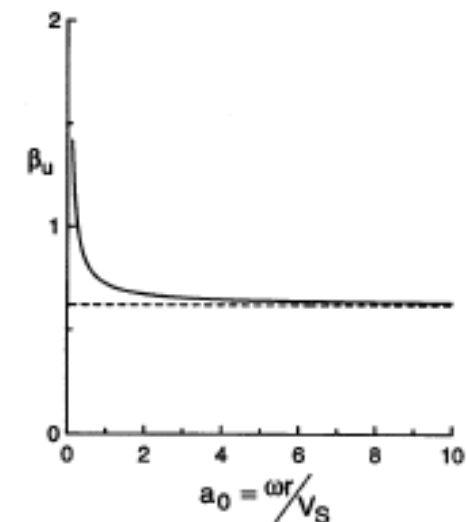
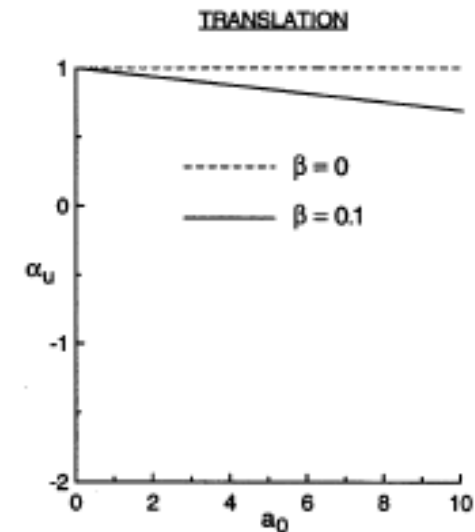
Προσομοίωση θεμελίωσης



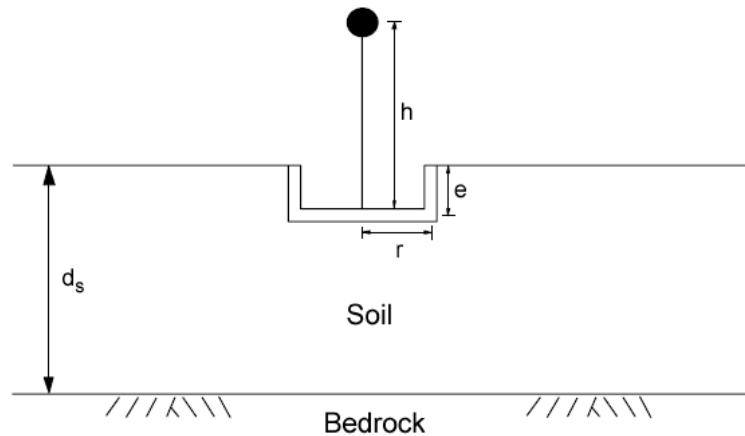
Σημαντικοί παράγοντες στην προσομοίωση της θεμελίωσης είναι οι ακόλουθοι:

Δυσκαμψία: Οι περισσότερες έμμεσες μέθοδοι υποθέτουν ότι η θεμελίωση συμπεριφέρεται ως άκαμπτη.

Αποκλίσεις στην περίπτωση εύκαμπτης θεμελίωσης με δύσκαμπτο εσωτερικό πυρήνα στην ανωδομή.



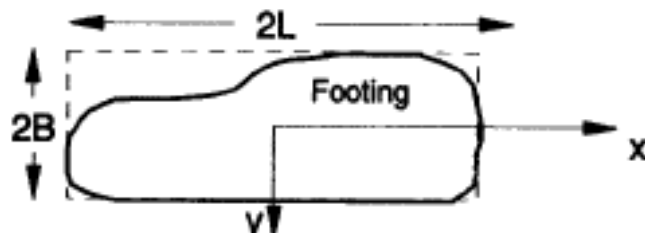
Προσομοίωση θεμελίωσης



➤ Θεμελιώσεις σε όρυγμα

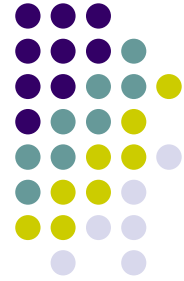
$$(K_u)_{FL/E} = K_u \left(1 + \frac{2e}{3r}\right) \left(1 + \frac{5e}{4d_s}\right) \left(1 + \frac{1r}{2d_s}\right)$$

$$(K_\theta)_{FL/E} = K_\theta \left(1 + 2\frac{e}{r}\right) \left(1 + 0.7\frac{e}{d_s}\right) \left(1 + \frac{1r}{6d_s}\right)$$



➤ Γεωμετρία

Αλληλεπίδραση Κατασκευής - Εδάφους και Κανονισμοί / Συστάσεις



- Ευρωκώδικας – Αμερικανικοί – Ιαπωνικοί
- Κανονισμός Επεμβάσεων (ΚΑΝ.ΕΠΕ.)
- FEMA 440 – Ανελαστική Στατική Ανάλυση

Πότε λαμβάνεται υπόψη?



FEMA 440

Κινηματική Αλληλεπίδραση

- Σημαντική για μικρές ιδιοπεριόδους ($< \sim 0.5$ sec), μεγάλες διαστάσεις θεμελίωσης, και ορύγματα άνω των 3.0 m.
- Παραβλέπεται για θεμελίωση σε όρυγμα εντός δύσκαμπτου εδάφους.

Πότε λαμβάνεται υπόψη?



ΚΑΝ.ΕΠΕ.

Η επιρροή της αλληλεπίδρασης λαμβάνεται όταν η αύξηση της ιδιοπεριόδου οδηγεί σε αύξηση των φασματικών επιταχύνσεων.

Επιτρέπεται μείωση έως 25% των σεισμικών απαιτήσεων στα επιμέρους δομικά μέλη

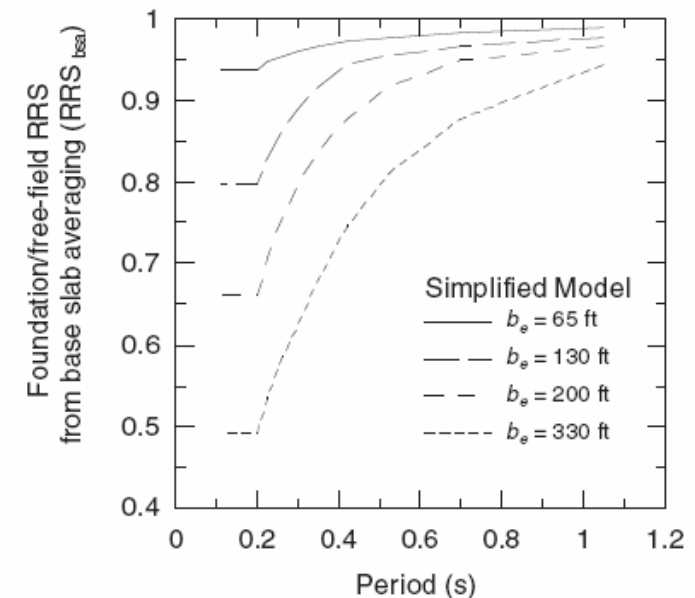
Μεθοδολογία FEMA 440



A. Κινηματική Αλληλεπίδραση

1. Υπολογισμός ενεργούς διάστασης θεμελίωσης από τις διαστάσεις της a και b :
2. Συντελεστής μείωσης φάσματος σχεδιασμού λόγω διαστάσεων θεμελίου (RRS_{bsa}).

$$b_e = \sqrt{a \cdot b}$$





Μεθοδολογία FEMA 440

A. Κινηματική Αλληλεπίδραση

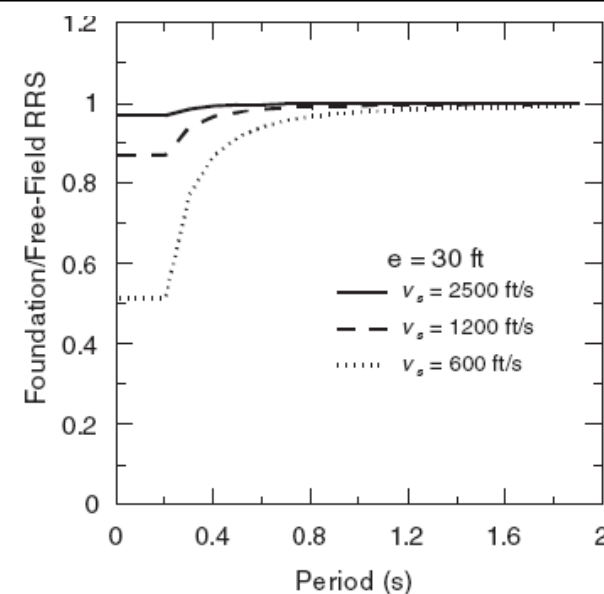
3. Συντελεστής μείωσης φάσματος σχεδιασμού λόγω ορύγματος και μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης (RRS_e).

$$RRS_e = \cos\left(\frac{2\pi e}{Tn v_s}\right) \geq \max\left\{0.453, RRS_{e(T=0.2s)}\right\}$$

- e:** βάθος ορύγματος
 v_s : μέση ταχύτητα διάδοσης κυμάτων S για βάθος b_e υπό την θεμελίωση
n: συντελεστής μείωσης v_s ανάλογα με την αναμενόμενη PGA

Table 8-1 Approximate Values of Shear Wave Velocity Reduction Factor, n

n	Peak Ground Acceleration (PGA)			
	0.10g	0.15g	0.20g	0.30g
	0.90	0.80	0.70	0.65





Μεθοδολογία FEMA 440

A. Κινηματική Αλληλεπίδραση

4. Υπολογισμός του γινομένου των λόγων μεταβολής RRS_{bsa} και RRS_e για τις διάφορες περιόδους.

$$RRS(T) = RRS_{bsa}(T) \cdot RRS_e(T)$$

5. Το τελικό φάσμα της κίνησης εισόδου (FIM) προκύπτει από τη σχέση:

$$RS_{FIM} = RRS(T) \cdot RS_{freefield}(T)$$



Μεθοδολογία ΚΑΝ.ΕΠΕ.

Ενεργός ιδιοπερίοδος σε οριζόντια μετακίνηση:

$$T' = T_o \sqrt{\left[1 + \frac{k_o}{k_x} \left(1 + \frac{k_x \cdot h_{ef}^2}{k_\phi} \right) \right]}$$

όπου

T_o , k_o : ιδιοπερίοδος και δυσκαμψία για πακτωμένη βάση

k_x , k_ϕ : μεταφορική και λικνιστική δυσκαμψία θεμελίωσης

h_{ef} : ενεργό ύψος

2/3 πραγματικού ύψους σε πολυώροφα

πραγματικό ύψος σε μονώροφα

Μεθοδολογία ΚΑΝ.ΕΠΕ.



Ενεργός απόσβεση, ζ' :

$$\zeta' = \zeta_0 + \frac{\zeta}{\left(T'/T_0\right)^3}$$

όπου

ζ : απόσβεση για πακτωμένη βάση (5% ενγένει)

$\zeta_0 = \beta_f$: απόσβεση θεμελίωσης

(h_{ef} , διαστάσεις θεμελίωσης, T'/T_0 , PGA)



Απόσβεση θεμελίωσης

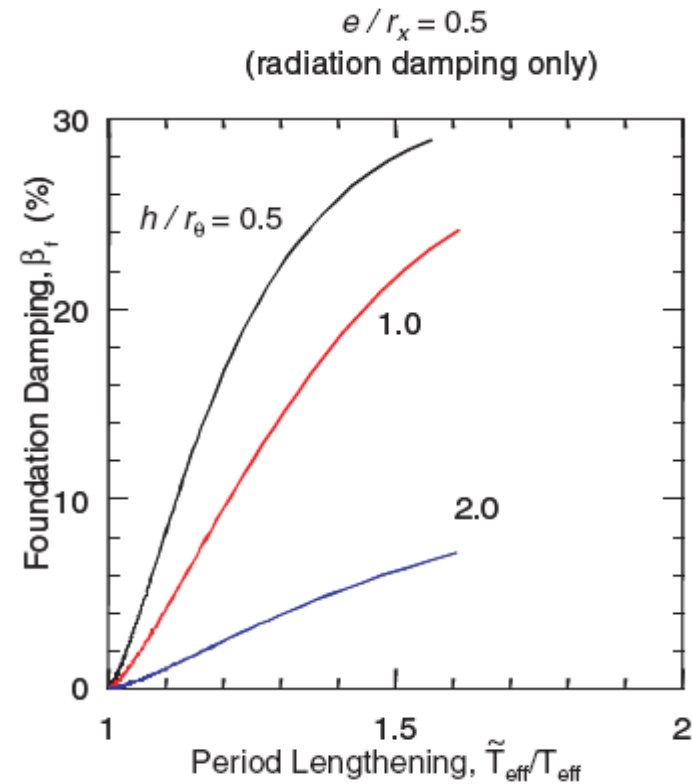
$$\beta_f = \alpha_1 \left(\frac{T'}{T_0} - 1 \right) + \alpha_2 \left(\frac{T'}{T_0} - 1 \right)^2$$

όπου:

$$\alpha_1 = c_e \cdot e^{4.7 - 1.6 \frac{h}{r_\theta}}$$

$$\alpha_2 = c_e \cdot \left[25 \cdot \ln \left(\frac{h}{r_\theta} \right) - 16 \right]$$

$$c_e = 1.5 \left(\frac{e}{r_x} \right) + 1$$



Ιστορική Ανασκόπηση



Ιστορικά στοιχεία μπορούν να αναζητηθούν σε *State of the Art* δημοσιεύσεις των WHITMAN et al (1967), McNEIL (1969) and GAZETAS (1983), RICHART et al (1970), DAS (1983), PECKER (1984), HAUPT (1986) and SIEFFERT et al. (1992), Spyrakos (2003), Mylonakis et al (2006).

Ιστορική Ανασκόπηση



Ενδεικτικά αναφέρουμε μερικά «ορόσημα» της έρευνας από τις αρχές του περασμένου αιώνα που σχετίζονται με τα επιφανειακά θεμέλια:

- **1904:** ο LAMB μελετά τις ταλαντώσεις ενός γραμμικά ελαστικού ημίχωρου σε αρμονικό σημειακό φορτίο.
- **1936:** ο REISSNER αναλύει την απόκριση μιας πλάκας τοποθετημένης στην επιφάνεια ομογενούς ελαστικού ημίχωρου υπό κατακόρυφο αρμονικό φορτίο. Είναι ουσιαστικά ο πρώτος ο οποίος επισήμανε την παρουσία της απόσβεσης ενέργειας λόγω ακτινοβολίας.



Ιστορική Ανασκόπηση

- **1953 έως 1956:** οι SUNG, QUILAN, ARNOLD et al και BYCROFT αποσαφηνίζουν και γενικεύουν την εργασία του REISSNER για τις κινήσεις των έξι βαθμών ελευθερίας του θεμελίου.
- **1962 έως 1967:** οι AWOJOB1 et al και ELORDUY et al. τελειοποιούν τις προηγούμενες μεθόδους. Ο HSIEH και ειδικά ο LYSMER εισάγουν για πρώτη φορά την αντίληψη ότι η συμπεριφορά του συστήματος εδάφους-θεμελίου σε κατακόρυφη μετακίνηση μπορεί να αντιπροσωπευθεί από σύστημα ενός βαθμού ελευθερίας με σταθερή δυσκαμψία και απόσβεση ανεξάρτητα από τη συχνότητα της διέγερσης - μοντέλο συγκεντρωμένων ιδιοτήτων (lumped parameters).



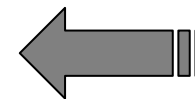
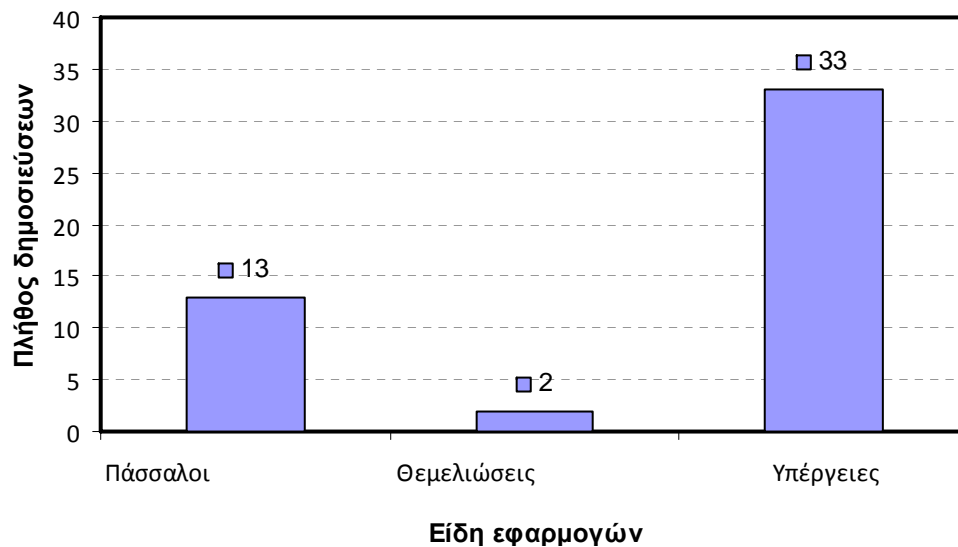
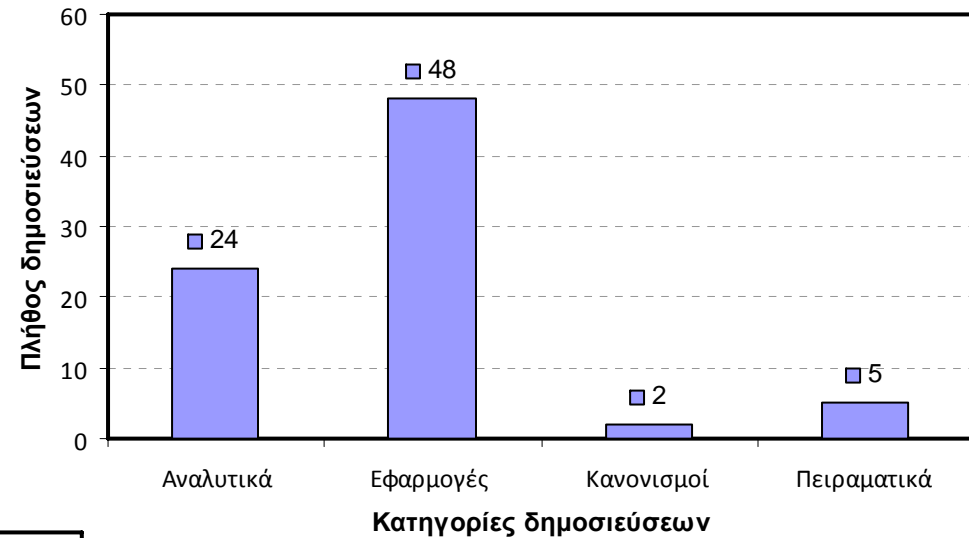
Ιστορική Ανασκόπηση

- **1962 έως 1967 (συνέχεια):** Η απλοποιητική θεώρηση γνωστή ως ανάλογο του Lysmer [“Lysmer's analogy”] επεκτάθηκε και για τις άλλες κινήσεις από τους RICHART και WHITMAN. Πλασματικές μάζες (fictitious masses) χρησιμοποιούνται για την ταύτιση της απόκρισης στις συχνότητες συντονισμού.
- **Τέλη δεκαετίας '60 αρχές δεκαετίας '70:** Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται συστηματικά στην μορφή δύο συναρτήσεων που εξαρτώνται από τη συχνότητα εκ των οποίων η μία είναι πραγματική και η δεύτερη αποτελεί το φανταστικό μέρος της μιγαδικής δυναμικής δυσκαμψίας (complex dynamic stiffness). Οι συναρτήσεις αυτές καλούνται γενικευμένα ελατήρια “impedance functions”.
- **Σημαντική συνεισφορά Ελλήνων ερευνητών.**

Αλληλεπίδραση κατά το πρόσφατο 14^ο Παγκόσμιο Συνέδριο Αντισεισμικής Μηχανικής (Κίνα, 12~17 Οκτωβρίου 2008)



79 δημοσιεύσεις με
μελέτη
αλληλεπίδρασης



Κατανομή δημοσιεύσεων
με εφαρμογές

Αλληλεπίδραση και μελέτη ιδιομορφικών χαρακτηριστικών με ενόργανη παρακολούθηση (μικροδονήσεις)

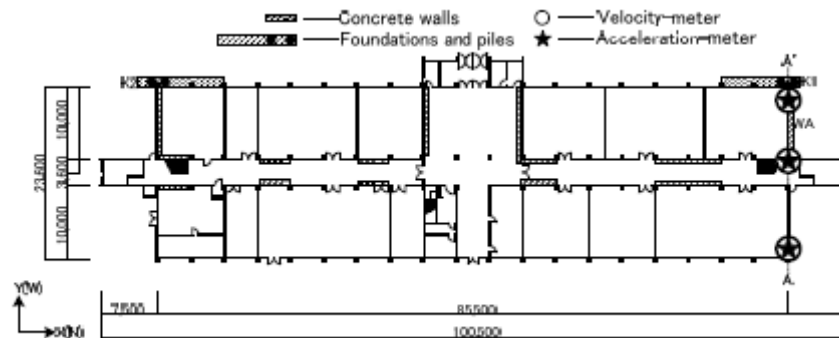


Fig. 1 Plan on the first floor of the retrofitted building

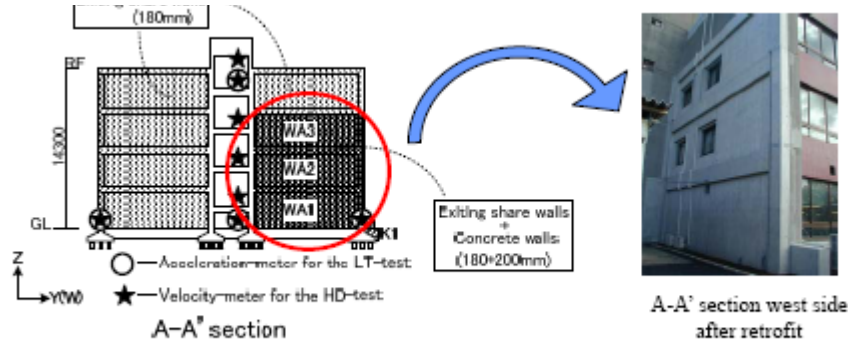
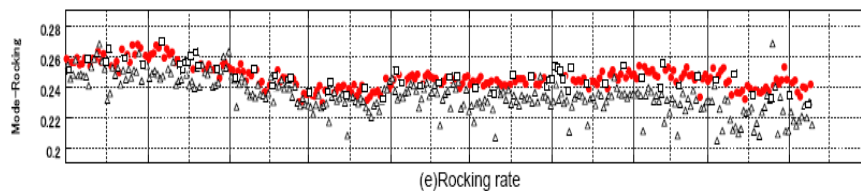


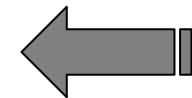
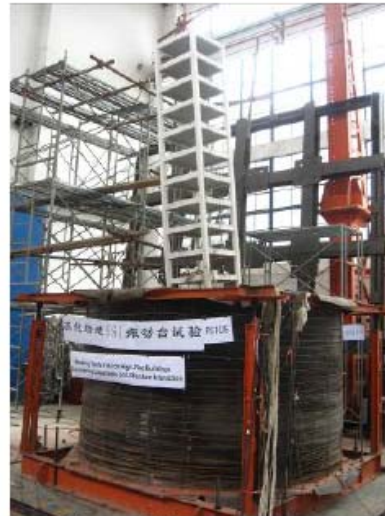
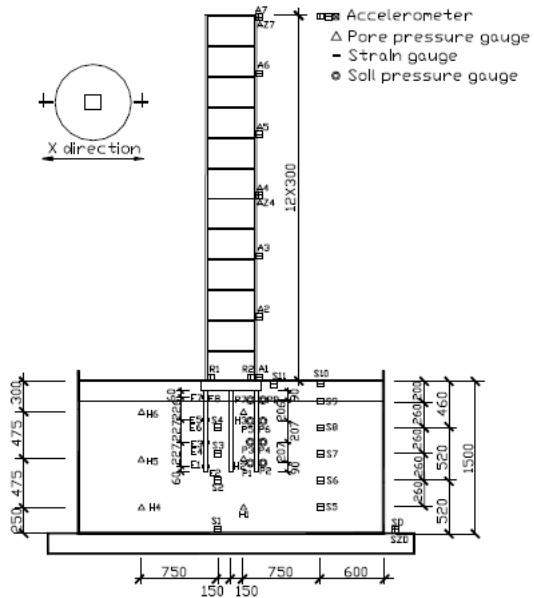
Fig. 2 A-A' section of the building after retrofit and measurement installations for ambient vibrations



Ενίσχυση Πολυώροφου Κτιρίου – Ιαπωνία

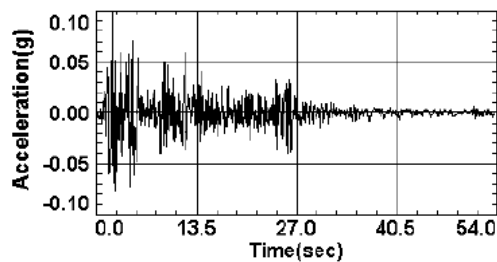
- Μελέτη επίδρασης εργασιών ενίσχυσης θεμελίων-ανωδομής

Αλληλεπίδραση και πειράματα σε σεισμική τράπεζα

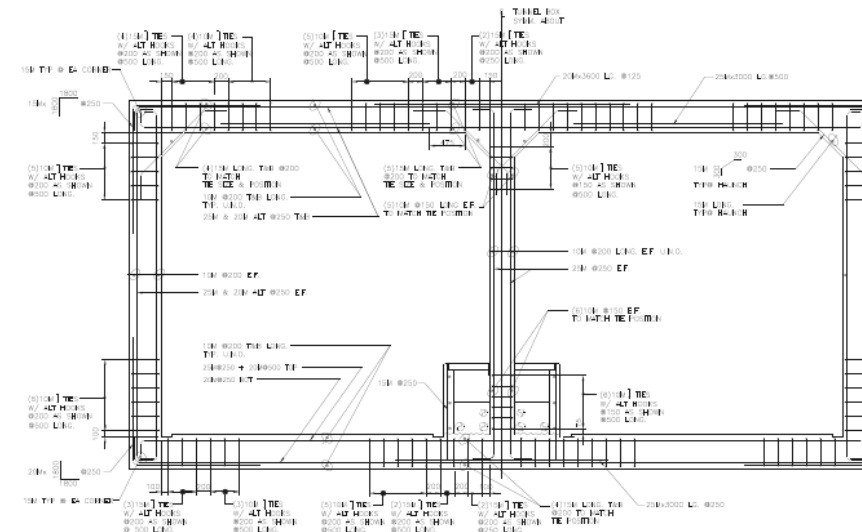


Πειράματα
αλληλεπίδρασης

Ρευστοποίηση
εδάφους



Αλληλεπίδραση και υπόγεια έργα



Κατασκευή «cut and cover» 6.6 km

Rapid Transit System, Vancouver
Καναδάς

Αλληλεπίδραση κατασκευής – εδάφους – ύδατος με «ανασήκωμα» θεμελίου

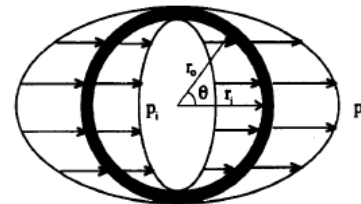
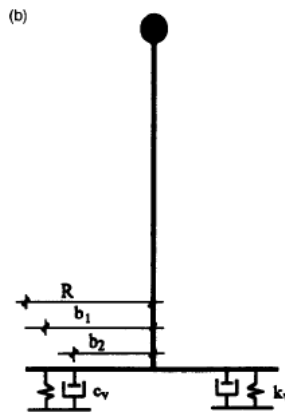
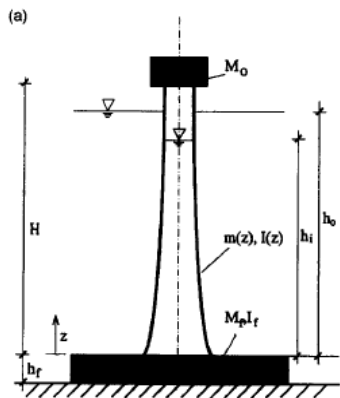
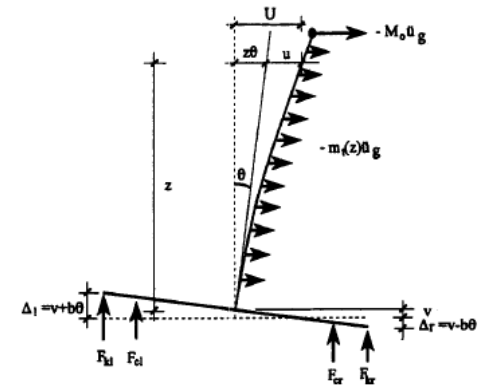
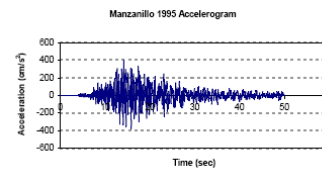
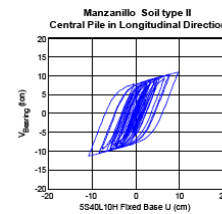
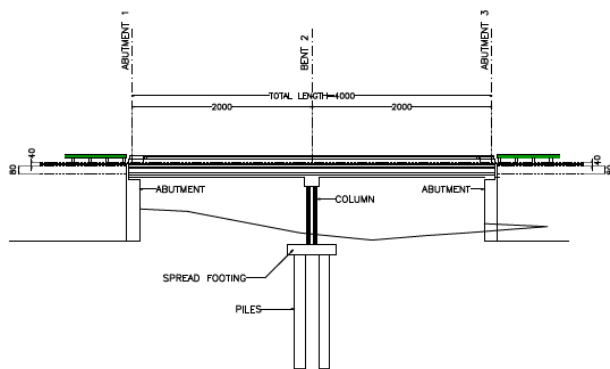
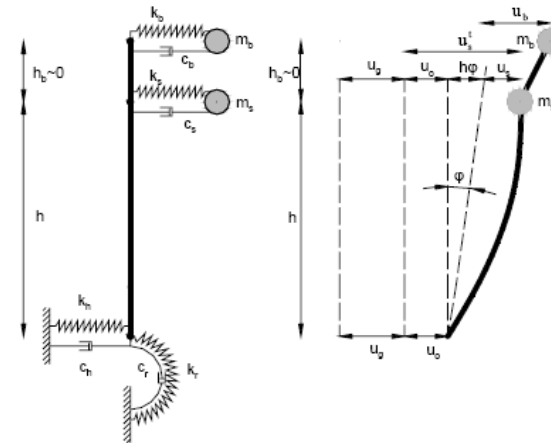
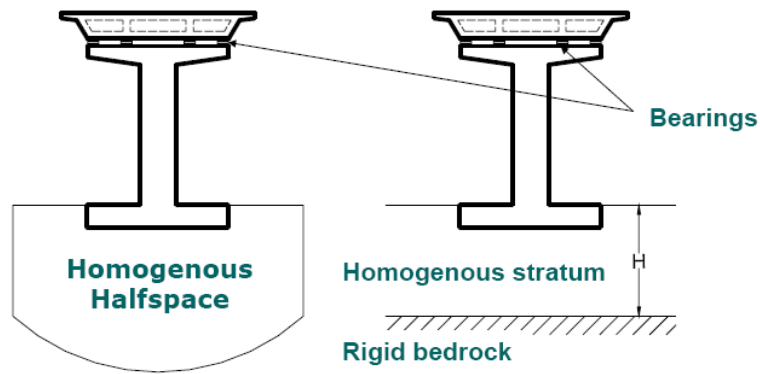


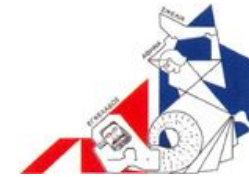
Fig. 3. Hydrodynamic pressure.



Αλληλεπίδραση και σεισμική μόνωση



Δυναμική
Αλληλεπίδραση
Εδάφους –
Κατασκευής: Ιστορική
Εξέλιξη και Σύγχρονη
Πρακτική



Εργαστήριο Αντισεισμικής
Τεχνολογίας

www.civil.ntua.gr/earthquake

Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, ΕΜΠ

