

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6:

ΕΔΑΦΙΚΗ "ΕΝΙΣΧΥΣΗ" της σεισμικής δόνησης

1. Γενικά

- ✚ Παραδείγματα από πραγματικούς σεισμούς
- ✚ Αντισεισμικοί Κανονισμοί

2. Αναλυτικές Μέθοδοι

- ✚ Ελαστικό έδαφος επί άκαμπτου υποβάθρου
- ✚ Ιξωδο-Ελαστικό έδαφος επί άκαμπτου υποβάθρου
- ✚ Ιξωδο-Ελαστικό έδαφος επί εύκαμπτου υποβάθρου

3. Αριθμητικές Μέθοδοι

- ✚ Ισοδύναμη Γραμμική
- ✚ Μη-Γραμμική

4. Ασκήσεις

Πρόσθετη βιβλιογραφία:

- ✚ Steven Kramer: Κεφάλαιο 7 (7.1 και 7.2)
- ✚ Γιώργος Γκαζέτας: Κεφάλαιο 4 (4.2)
- ✚ SHAKE 92: Users' Manual

Παραδείγματα από πραγματικούς σεισμούς.....

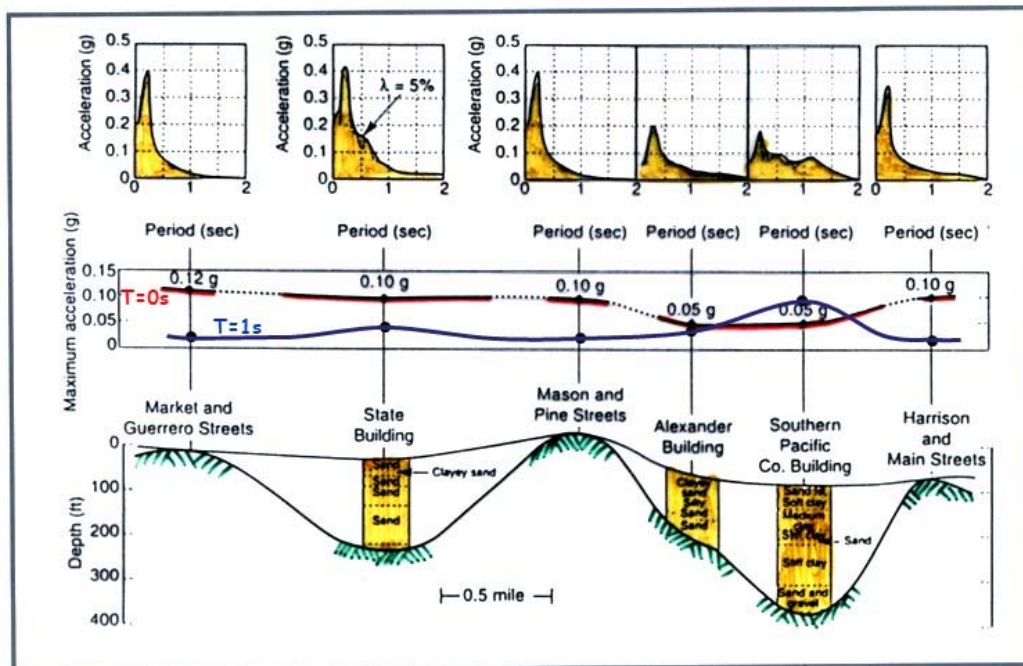
Τα παραδείγματα που ακολουθούν προέρχονται από πραγματικές περιπτώσεις ισχυρών σεισμών και δίνουν μια πρώτη ποιοτική αλλά και ποσοτική αίσθηση για την επίδραση που μπορεί να έχει το έδαφος στην ένταση και τα χαρακτηριστικά της σεισμικής δόνησης.

Κρατήστε σημειώσεις σχετικά με τα ακόλουθα:

- A. Εύρος διακύμανσης του συντελεστή «εδαφικής ενίσχυσης»
- B. Παράγοντες που το επηρεάζουν
- Γ. Επίδραση ιδιο-συχνότητας της κατασκευής στην «εδαφική ενίσχυση»

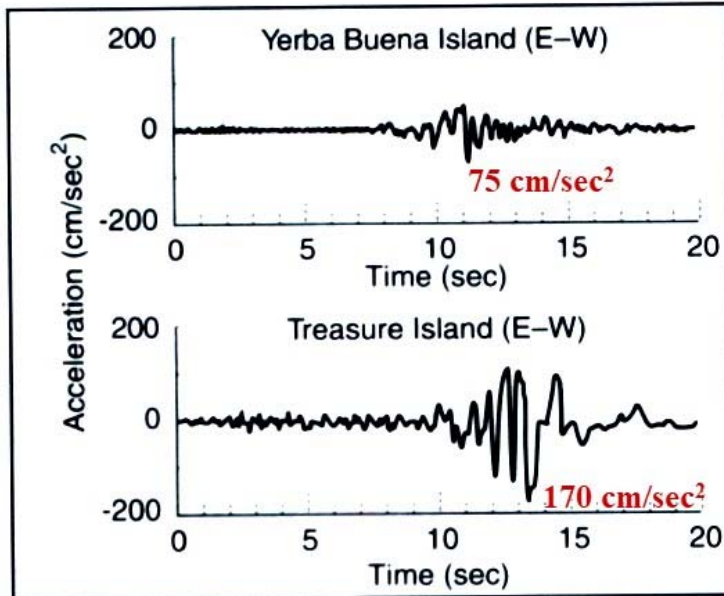


San Francisco 1957.....



Διακύμανση της μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης (PGA) και των ελαστικών φασμάτων απόκρισης σε σχέση με τις εδαφικές συνθήκες στις θέσεις των καταγραφών . . .

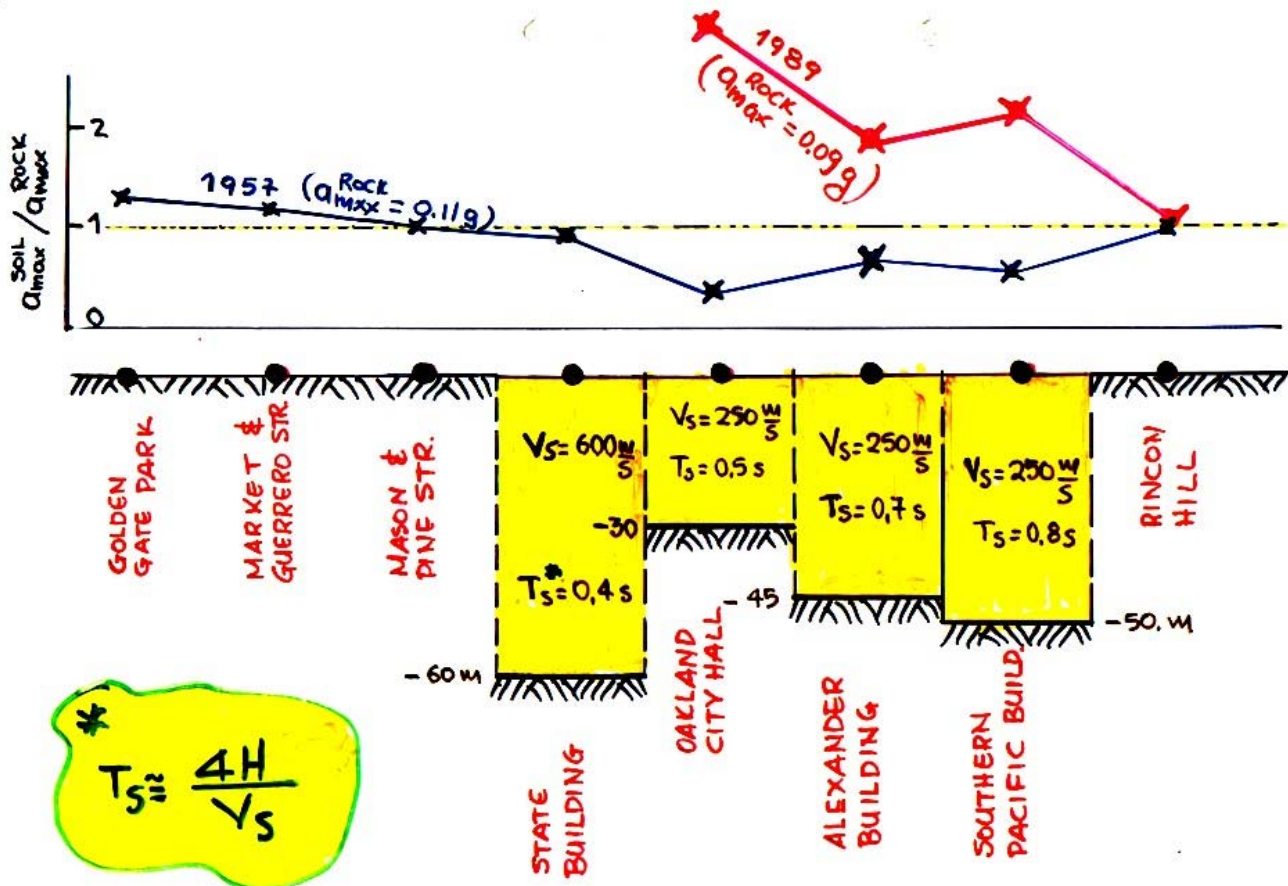
San Francisco 1989



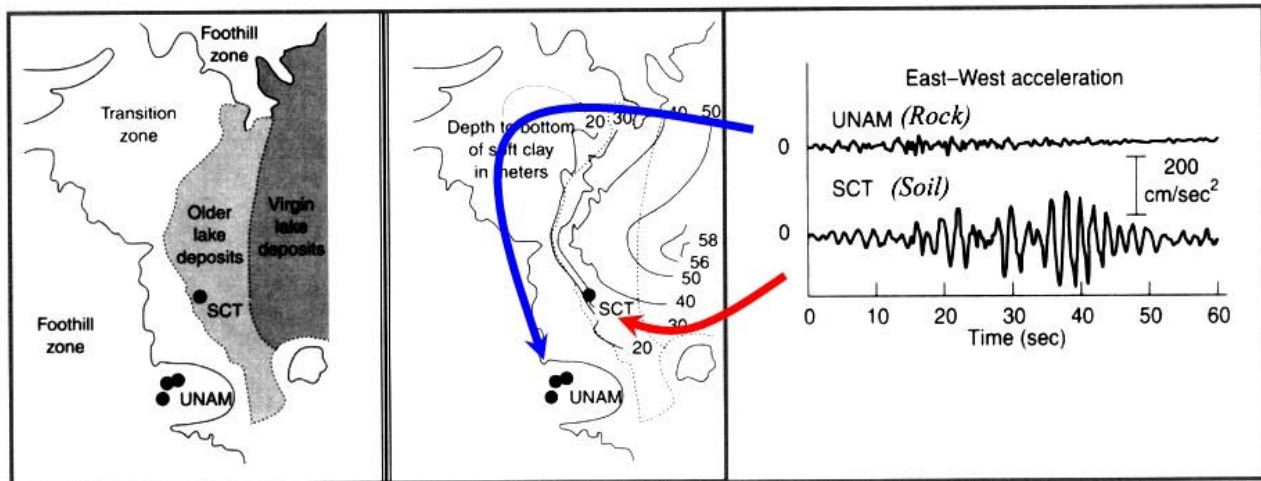
Καταγραφή σε
αναδύομενο ΒΡΑΧΟ

Καταγραφή στην
επιφάνεια εδαφικών
επιχώσεων επί αργιλικού
πυθμένα

Εδαφική "ενίσχυση" ή/και "απομείωση" ?



Mexico City 1985

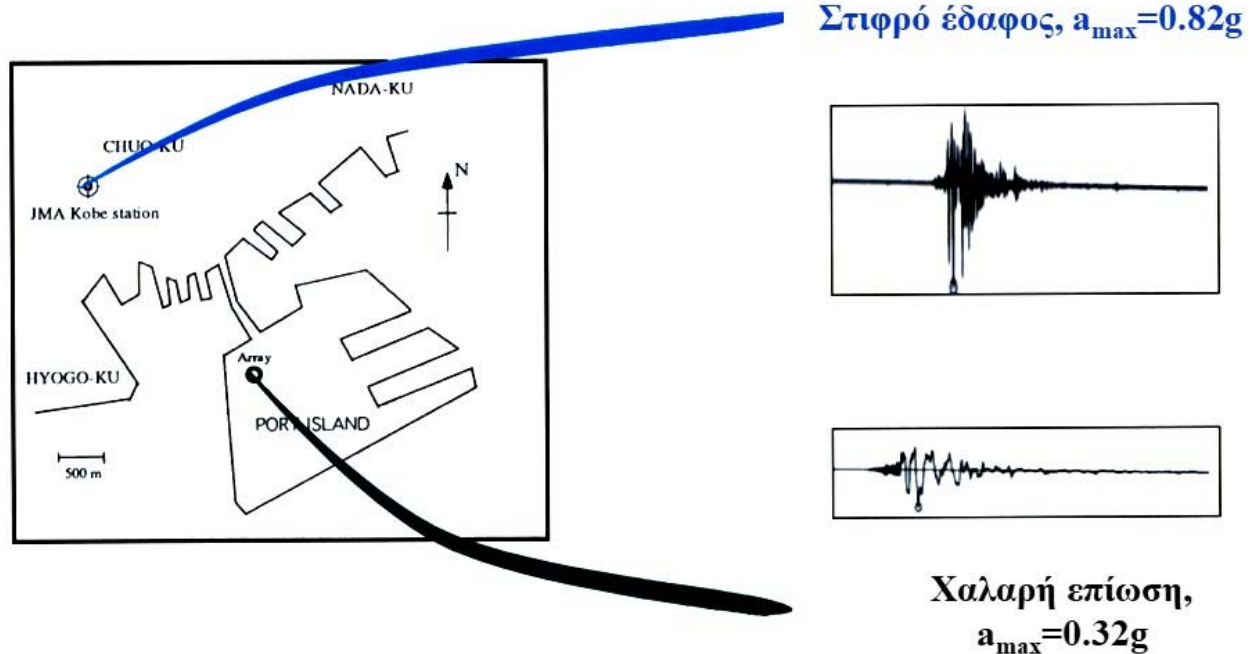


Γεωλογία
περιοχής

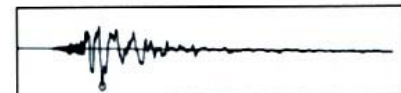
Πάχος
πρόσφατων
αποθέσεων

Καταγραφές της επιτάχυνσης
στην επιφάνεια ΕΔΑΦΟΥΣ &
ΒΡΑΧΟΥ

Kobe, Japan 1995

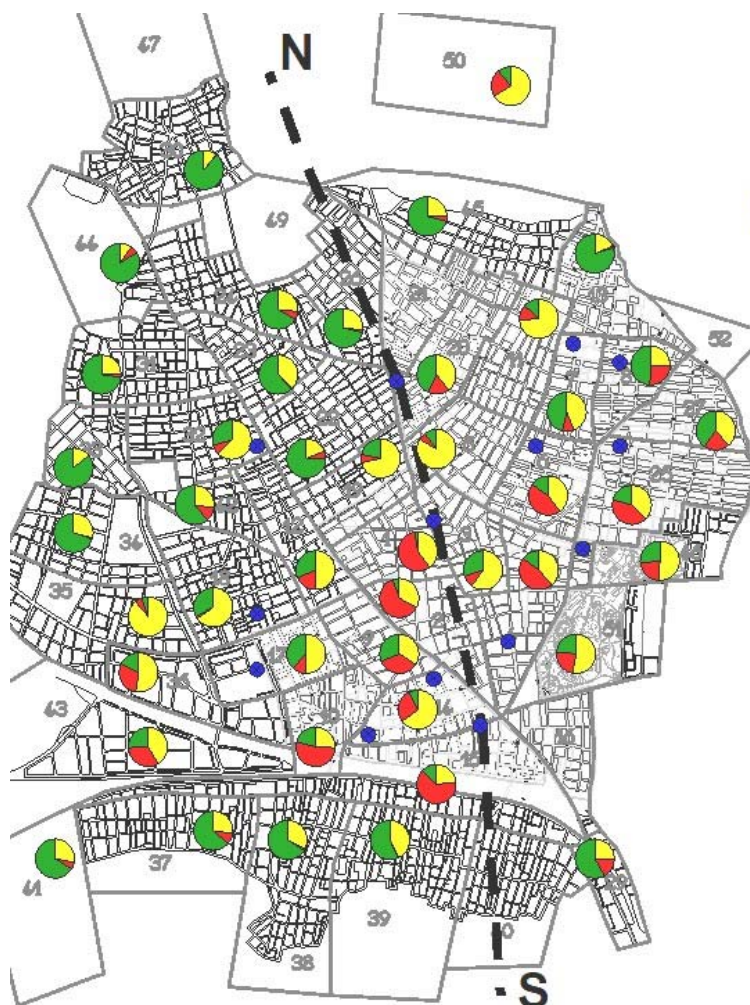
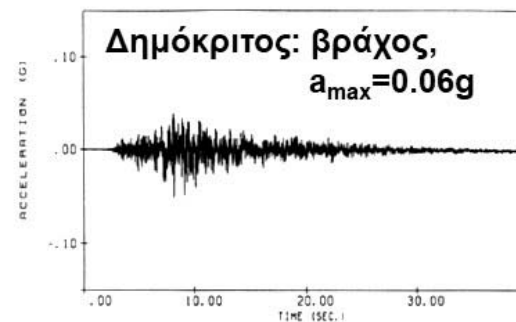
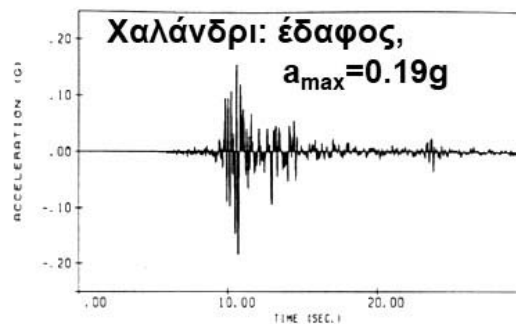


Στιφρό έδαφος, $a_{\max}=0.82g$

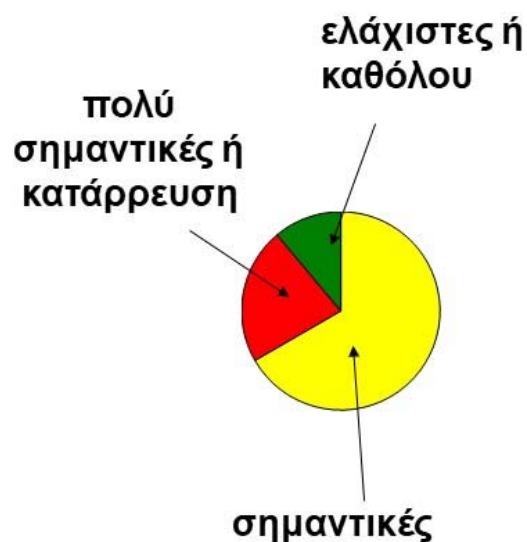


Χαλαρή επίωση,
 $a_{\max}=0.32g$

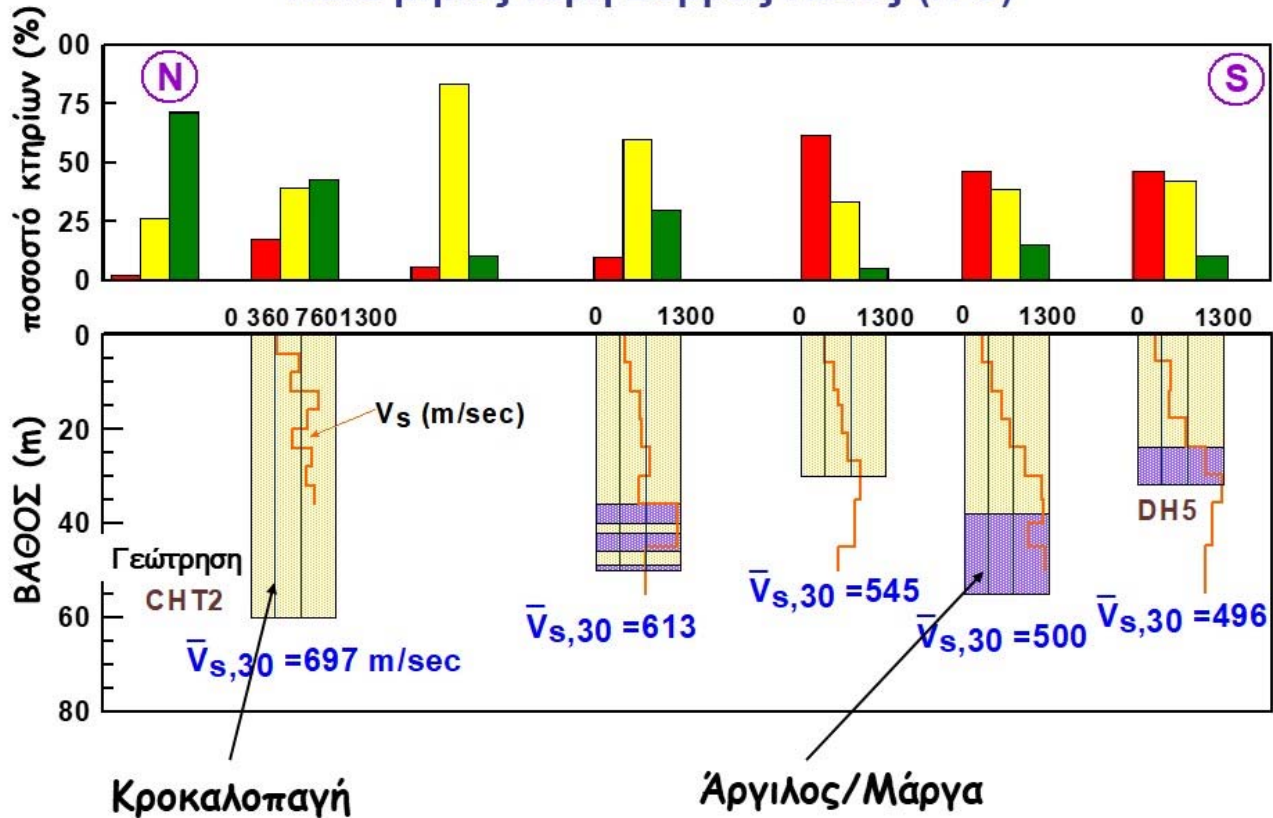
Αθήνα, Σεπτέμβριος 1999



Κατανομή βλαβών στα Άνω Λιόσια (πολύ κοντά στο επίκεντρο)



Κατά μήκος τομή Βορράς-Νότος (N-S)



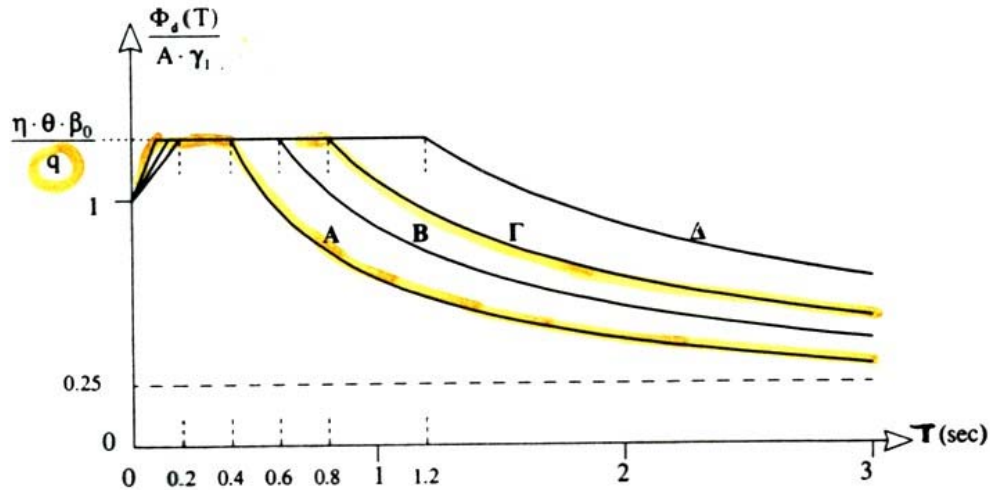
Σύνοψη ...

- A. Εύρος διακύμανσης του συντελεστή «εδαφικής ενίσχυσης»**
(0.40-3.20) 0.6-2.0
- B. Παράγοντες που το επηρεάζουν**
ιδιότητες εδάφους & σεισμικής διέγερσης
- Γ. Επίδραση ιδιο-συχνότητας της κατασκευής στην «εδαφική ενίσχυση»**
διαφορετική για $a_{\max}(T=0)$ & $S_a(T>0)$

συχνά,

η διάδοση των σεισμικών κυμάτων μέσω **λίγων δεκάδων μέτρων μαλακού εδάφους** έχει μεγαλύτερη και πιο σημαντική επίδραση από την διάδοση μέσω **πολλών χιλιομέτρων βραχώδους υποβάθρου**

Ελληνικός Αντισεισμικός Κανονισμός (ΕΑΚ)



π.χ. Κατηγορία Εδάφους Β: Έντονα αποσαθρωμένος βράχος ή σχηματισμοί με μηχανική συμπεριφορά κοκκώδους εδάφους. Στρώσεις μέσης πυκνότητας κοκκώδους εδάφους με πάχος άνω των 5m ή πυκνού κοκκώδους εδάφους με πάχος άνω των 70m.

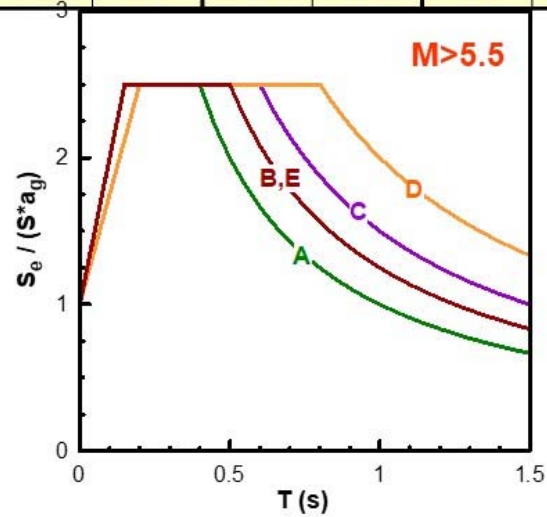
Ερώτηση 6.1

Πόσο πλήρης είναι ο **ΕΑΚ** σε σχέση με αυτά που είδαμε από τις πραγματικές καταγραφές; Είναι σαφής η εφαρμογή του;

- .
- .
- .
- .
- .
- .

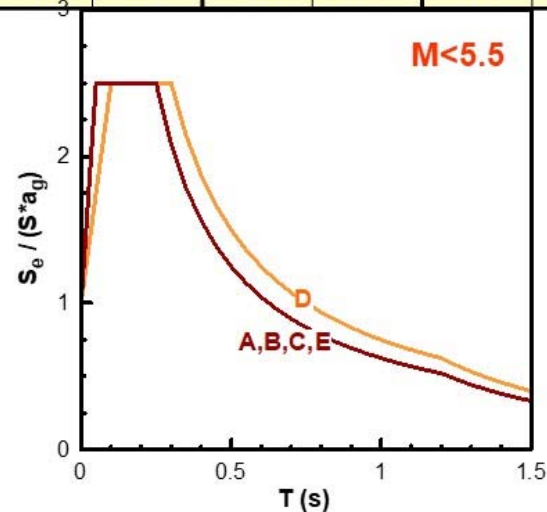
	Περιγραφή	Εδαφικές Παράμετροι
A		
B		
C	Βαθείς αποθέσεις πυκνής ή μέσης πυκνότητας άμμου και χαλίκων, ή στιφρής αργίλου, με πάχος...."from several tens to many hundreds of m"	$V_{s,30}=180-360\text{m/s}$ $N_{SPT}=15-50$ $C_u=70-250\text{KPa}$
D		
E		

	S		T_B		T_C	
	M>5,5	M<5,5	M>5,5	M<5,5	M>5,5	M<5,5
A	1.0	1.0	0.15	0.05	0.4	0.25
B	1.2	1.35	0.15	0.05	0.5	0.25
C	1.15	1.5	0.20	0.10	0.6	0.25
D	1.35	1.8	0.20	0.10	0.8	0.30
E	1.4	1.6	0.15	0.05	0.5	0.25

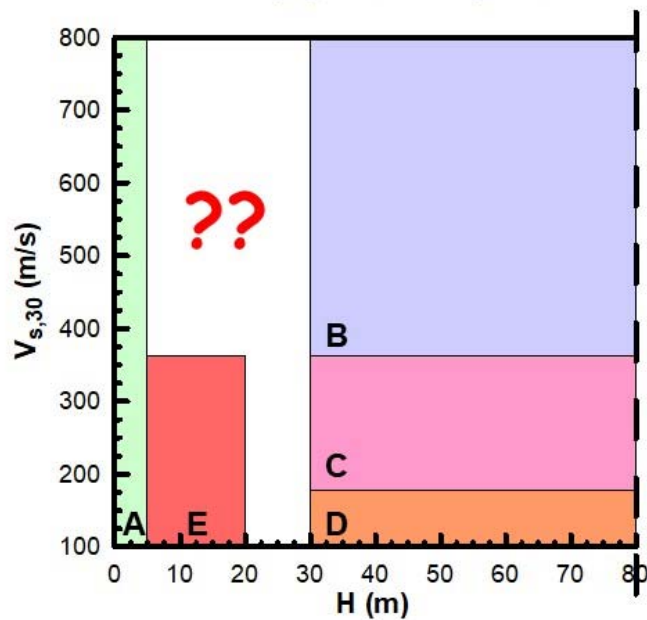


	Περιγραφή	Εδαφικές Παράμετροι
A		
B		
C	Βαθείς αποθέσεις πυκνής ή μέσης πυκνότητας άμμου και χαλίκων, ή στιφρής αργίλου, με πάχος...."from several tens to many hundreds of m"	$V_{s,30}=180-360\text{m/s}$ $N_{SPT}=15-50$ $C_u=70-250\text{KPa}$
D		
E		

	S		T_B		T_C	
	M>5,5	M<5,5	M>5,5	M<5,5	M>5,5	M<5,5
A	1.0	1.0	0.15	0.05	0.4	0.25
B	1.2	1.35	0.15	0.05	0.5	0.25
C	1.15	1.5	0.20	0.10	0.6	0.25
D	1.35	1.8	0.20	0.10	0.8	0.30
E	1.4	1.6	0.15	0.05	0.5	0.25



Κατηγορίες εδάφους



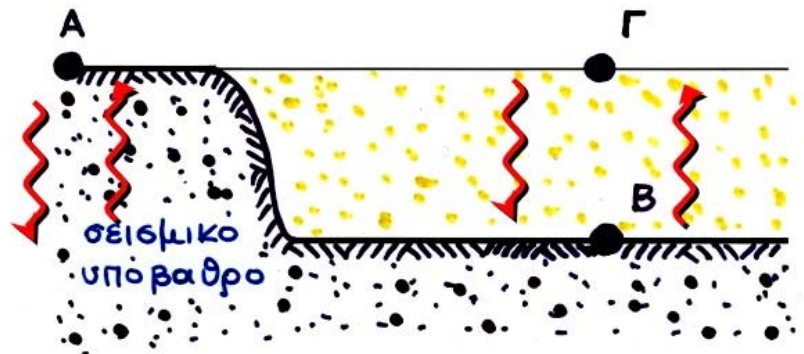
H = πάχος εδάφους

$V_{s,30}$ ή $C_{s,30}$ = ταχύτητα
σεισμικών κυμάτων S
(μέση τιμή για 30m βάθος)

Ερώτηση 6.2

Πόσο πλήρης είναι ο **EC-8** σε σχέση με αυτά που είδαμε από τις πραγματικές καταγραφές; Είναι σαφής η εφαρμογή του; Τι πλεονεκτήματα προσφέρει σε σχέση με τον ΕΑΚ;

- .
- .
- .
- .
- .
- .



Η "εδαφική επίδραση" ορίζεται συνήθως ως ο λόγος της τιμής των σεισμικών παραμέτρων (π.χ. μέγιστη ή φασματική επιτάχυνση) στην επιφάνεια του εδάφους προς την αντίστοιχη τιμή στην επιφάνεια του αναδυόμενου βραχώδους "σεισμικού υποβάθρου":

$$\frac{\text{κίνηση στο } \Gamma}{\text{κίνηση στο B}} \quad \text{ή συνηθέστερα (γιατί;)} \quad \frac{\text{κίνηση στο } \Gamma}{\text{κίνηση στο A}}$$

Τι σημαίνει (βραχώδεις) "σεισμικό υπόβαθρο" ?

Δεν υπάρχει κάποιος κοινά αποδεκτός ορισμός. Συμβατικά, κάθε συνεχής με το βάθος γεωλογικός σχηματισμός με $V_S \geq 750 \text{ m/s}$ μπορεί να θεωρηθεί ότι αποτελεί το «σεισμικό υπόβαθρο» μιας περιοχής. Ένας τέτοιος απόλυτος ορισμός όμως δεν είναι πάντοτε σωστός γιατί (όπως θα δούμε) δεν είναι η απόλυτη τιμή του V_S που παίζει ρόλο, αλλά η απότομη αύξηση (contrast) της τιμής του V_S με το βάθος, κατά την μετάβαση από το έδαφος στο υποκείμενο σεισμικό υπόβαθρο. Εναλλακτικά, ως "σεισμικό υπόβαθρο" μπορεί να θεωρηθεί ο αναδυόμενος γεωλογικός σχηματισμός στην ελεύθερη επιφάνεια του οποίου καταγράφηκε η σεισμική διέγερση.

Για τα ελληνικά δεδομένα, όπου οι εκτιμήσεις της σεισμικής διέγερσης βασίζονται σε καταγραφές πραγματικών δονήσεων στην επιφάνεια πολύ στιφρών-πυκνών εδαφών και βράχων (βλ. κατηγορία εδάφους A του ΕΑΚ 2002), το σεισμικό υπόβαθρο μπορεί να τοποθετηθεί εντός Νεογενών ή παλαιότερων γεωλογικών σχηματισμών, καθώς και σε επικείμενα καλά συγκολλημένα κροκαλοπαγή.

Αναλυτικές μέθοδοι υπολογισμού της “εδafικής επίδρασης” είναι διαθέσιμες για τις παρακάτω περιπτώσεις (με σειρά αυξανόμενης υπολογιστικής δυσκολίας αλλά και ακρίβειας):

- Ομοιόμορφο ελαστικό έδαφος επί άκαμπτου υποβάθρου
- Ομοιόμορφο **ιξωδο-ελαστικό** έδαφος επί άκαμπτου υποβάθρου
- Ομοιόμορφο ιξωδο-ελαστικό έδαφος επί **εύκαμπτου υποβάθρου**
- **Ανομοιόμορφο** ιξωδο-ελαστικό έδαφος επί εύκαμπτου υποβάθρου (όχι εντελώς αναλυτική...)

Σε όλες τις περιπτώσεις γίνεται η παραδοχή:

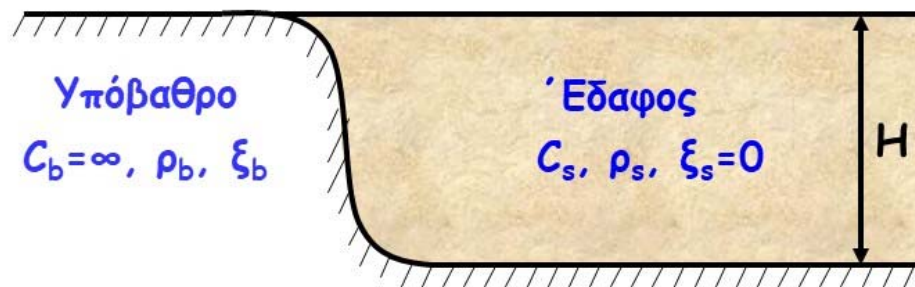
- **Αρμονικής** σεισμικής διέγερσης
- **Κατακόρυφα μεταδιδόμενων** σεισμικών κυμάτων (SH & P)

Ερώτηση 6.3

Τι σχέση έχουν οι παραδοχές για “αρμονική σεισμική διέγερση” και “κατακόρυφα μεταδιδόμενα σεισμικά κύματα” με το πραγματικό πρόβλημα;

.
. .
. .
. .
. .

6.2.2 Ομοιόμορφο Ελαστικό Έδαφος επί Άκαμπτου Υποβάθρου

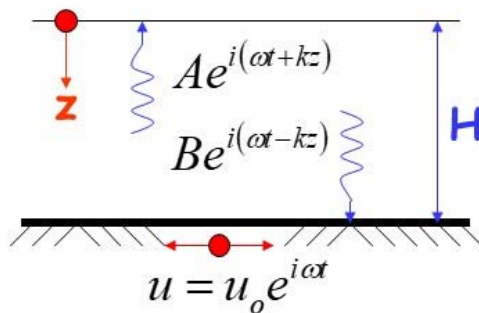


**βασικές
παράμετροι:**

$$C_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$$

$$k = \frac{\omega}{C_s} \quad (\text{κυματικός αριθμός})$$

$$\left[T_s = \frac{4H}{C_s}, \text{ ιδιο - περίοδος εδάφους} \right]$$



1^η συνοριακή συνθήκη : $\tau_{z=0} = 0$

$$G \frac{\partial u}{\partial z} \Big|_{z=0} = 0 \Rightarrow Gik \left[Ae^{i(\omega t + kz)} - Be^{i(\omega t - kz)} \right] = 0$$

$$\text{για } z = 0 : Gik(A - B)e^{i\omega t} = 0 \Rightarrow A = B$$

$$\text{έτσι : } u = 2Ae^{i\omega t} \frac{e^{ikz} + e^{-ikz}}{2} = 2Ae^{i\omega t} \cos kz$$

$$u = Ae^{i(\omega t + kz)} + Be^{i(\omega t - kz)}$$

2^η συνοριακή συνθήκη : $u_{z=H} = u_o e^{i\omega t}$

$$\text{έτσι : } u_o = 2A \cos kH \quad \text{ή} \quad A = \frac{u_o}{2 \cos kH}$$

$$u(z) = 2Ae^{i\omega t} \cos kz = u_o(H) \frac{\cos kz}{\cos kH} e^{i\omega t}$$

δηλ. «στάσιμο» κύμα με εύρος

$$u_o(z) = u_o(H) \frac{\cos kz}{\cos kH}$$

συντελεστής
εδαφικής ενίσχυσης:

$$F_1(\omega) = \frac{\text{κίνηση } \Gamma}{\text{κίνηση } B} = \frac{1}{\cos kH}$$

συντονισμός:

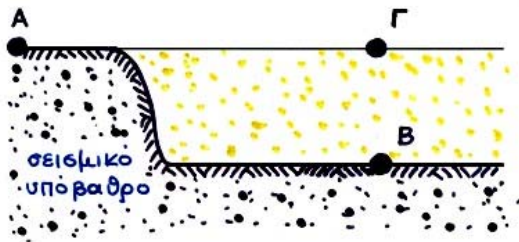
$$\cos kH = 0 \rightarrow kH = (2n-1) \frac{\pi}{2} \rightarrow$$

$$\dots\dots T_{s,n} = \frac{4H}{C_s} \frac{1}{2n-1}$$

ιδιο-μορφές:

$$\frac{u}{2A} = \cos \left[\frac{\pi}{2} (2n-1) \frac{z}{H} \right]$$

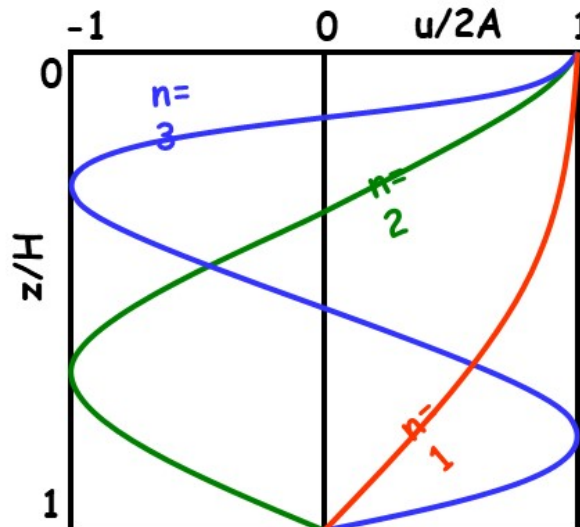
$$\dot{\eta} \quad \frac{u}{2A} = \begin{cases} \cos \frac{\pi}{2} \frac{z}{H}, & n=1 \\ \cos \frac{3\pi}{2} \frac{z}{H}, & n=2 \\ \cos \frac{5\pi}{2} \frac{z}{H}, & n=3 \end{cases}$$



Ιδιο-μορφές:

$$\frac{u}{2A} = \cos \left[\frac{\pi}{2} (2n-1) \frac{z}{H} \right]$$

$$\dot{\eta} \quad \frac{u}{2A} = \begin{cases} \cos \frac{\pi}{2} \frac{z}{H}, & n=1 \\ \cos \frac{3\pi}{2} \frac{z}{H}, & n=2 \\ \cos \frac{5\pi}{2} \frac{z}{H}, & n=3 \end{cases}$$



ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ

ΕΔΑΦΙΚΗΣ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ:

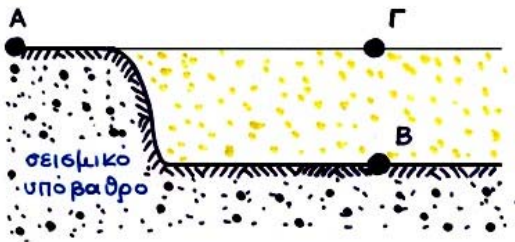
$$F_1(\omega) = \frac{\text{κίνηση } \Gamma}{\text{κίνηση } B} = \frac{1}{\cos kH} = \dots \frac{1}{\cos \left(\frac{\pi T_{soil}}{2 T_{exc}} \right)}$$

ΣΥΝΤΟΝΙΣΜΟΣ:

$$\frac{T_{soil}}{T_{exc}} = 2n - 1, \quad n = 1, 2, \dots$$

ΙΔΙΟ-ΜΟΡΦΕΣ:

$$\frac{u}{2A} = \cos \left[\frac{\pi}{2} (2n - 1) \frac{z}{H} \right]$$

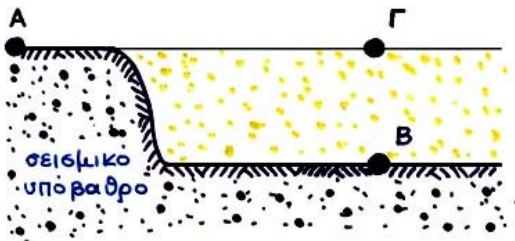
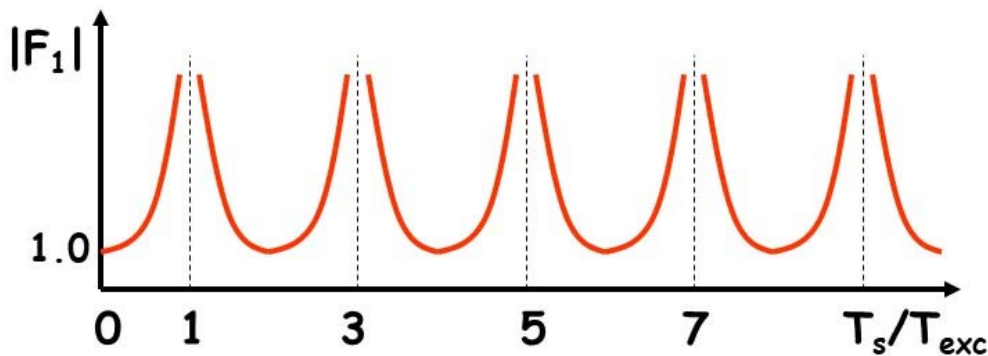


$$\text{ή } \frac{u}{2A} = \begin{cases} \cos \frac{\pi}{2} \frac{z}{H}, & n = 1 \\ \cos \frac{3\pi}{2} \frac{z}{H}, & n = 2 \\ \cos \frac{5\pi}{2} \frac{z}{H}, & n = 3 \end{cases}$$

ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ

ΕΔΑΦΙΚΗΣ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ:

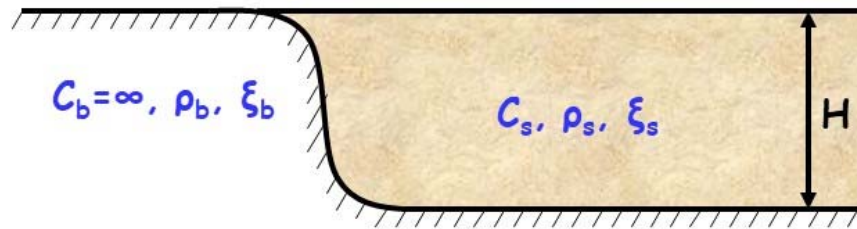
$$F_1(\omega) = \frac{\text{κίνηση } \Gamma}{\text{κίνηση } B} = \frac{1}{\cos kH} = \dots \frac{1}{\cos \left(\frac{\pi T_{soil}}{2 T_{exc}} \right)}$$



Λόγω της παραδοχής ΑΚΑΜΠΤΟΥ υποβάθρου (κίνηση A) = (κίνηση B) και επομένως...

$$F_1(\omega) = \frac{\text{κίνηση } \Gamma}{\text{κίνηση } B} = \frac{\text{κίνηση } \Gamma}{\text{κίνηση } A}$$

6.2.3 Ομοιόμορφο Ιξωδο-ελαστικό Έδαφος επί Άκαμπτου Υποβάθρου



Βασικές παράμετροι για
ελαστικό έδαφος ($\xi=0$)

$$C_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$$

$$T_s = \frac{4H}{C_s}$$

$$k = \frac{\omega}{C_s} \quad (\text{κυματικός αριθμός})$$

Βασικές παράμετροι για
ιξωδο-ελαστικό έδαφος ($\xi \neq 0$)

$$G^* = G(1 + 2i\xi)$$

$$C_s^* = \sqrt{\frac{G^*}{\rho}} \approx C_s(1 + i\xi) \quad \text{για } \xi \leq 0,30$$

$$T_s^* = \frac{4H}{C_s^*} \approx \frac{4H}{C_s}(1 - i\xi) = T_s(1 - i\xi)$$

$$k^* = \frac{\omega}{C_s^*} \approx \frac{\omega}{C_s}(1 - i\xi) = k(1 - i\xi)$$

Σύμφωνα με την «αρχή της αντιστοιχίας» (correspondence principle), οι λύσεις για ελαστικό έδαφος μπορούν να χρησιμο-ποιηθούν και για ιξωδο-ελαστικό, εάν οι πραγματικές μεταβλητές αντικατασταθούν με τις αντίστοιχες μιγαδικές. Έτσι:

συντελεστής
εδαφικής
ενίσχυσης

$$F_2(\omega) = \frac{1}{\cos k^* H} \cong \frac{1}{\cos[kH(1 - i\xi)]} = \frac{1}{\cos(kH - i\xi kH)}$$

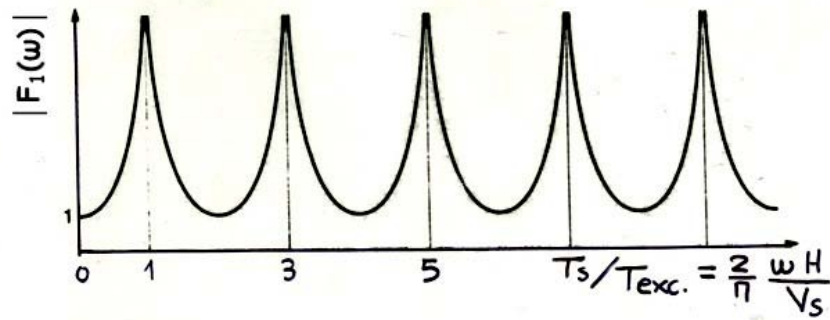
δεδομένου ότι: $|\cos(x \pm iy)| = \sqrt{\cos^2 x + \sinh^2 y} \approx \sqrt{\cos^2 x + y^2} \quad (y \rightarrow 0)$

$$|F_2(\omega)| \approx \frac{1}{\sqrt{\cos^2 kH + (kH\xi)^2}} \quad \text{όπου } k = \omega/V_s$$

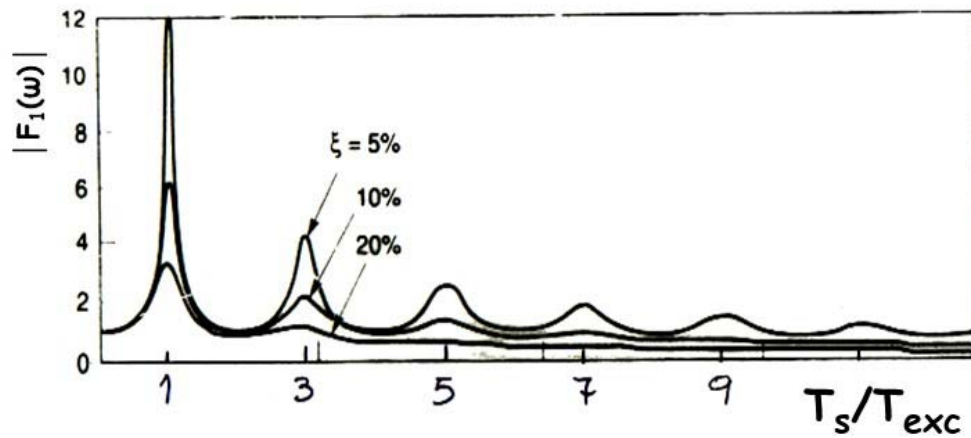
$$\max |F_2(\omega)| = \frac{2}{(2n-1)\pi} \frac{1}{\xi}$$

όταν

$$kH \approx (2n-1)\frac{\pi}{2} \quad \text{or} \quad \frac{T_{\text{soil}}}{T_{\text{exc}}} = 2n-1$$



Ελαστικό
έδαφος επί
ΑΚΑΜΠΤΟΥ
υποβάθρου



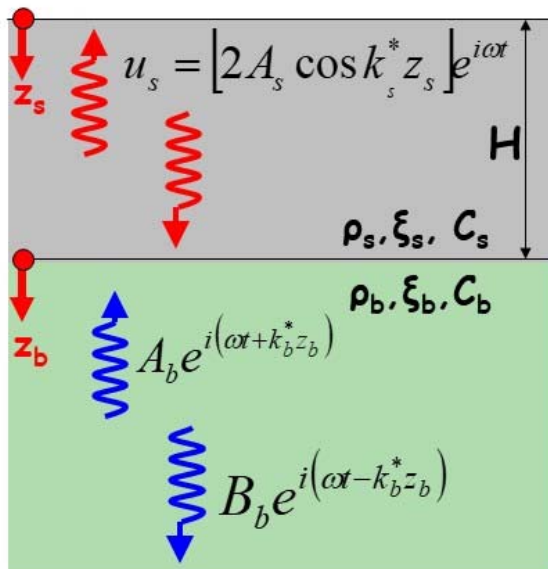
Ιξωδο-ελαστικό
έδαφος επί
ΑΚΑΜΠΤΟΥ
υποβάθρου

6.2.4 Ομοιόμορφο Ιξωδο-ελαστικό Έδαφος επί Εύκαμπτου Υποβάθρου

Συνοριακές συνθήκες:

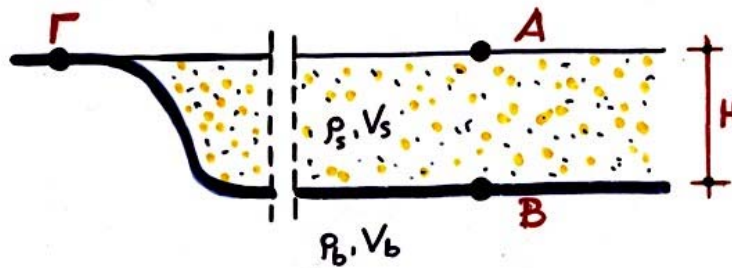
$$z_s = 0 :$$

$$\tau = G_s^* \frac{\partial u_s}{\partial z_s} = 0 \rightarrow \dots u_s = (2A_s \cos k_s^* z_s) e^{i\omega t}$$



$$\Rightarrow \begin{cases} A_b = A_s [\cos k_s^* H + i a_s^* \sin k_s^* H] \\ B_b = A_b [\cos k_s^* H - i a_s^* \sin k_s^* H] \end{cases}$$

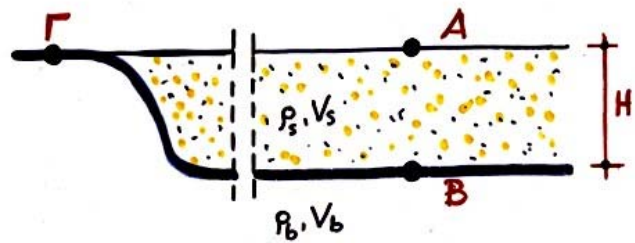
$$a^* = \frac{\rho_s C_s^*}{\rho_b C_b^*} = \frac{\rho_s C_s}{\rho_b C_b} \frac{1 + i \xi_s}{1 + i \xi_b} = a \frac{1 + i \xi_s}{1 + i \xi_b}$$



$$F_3(\omega) = \frac{u_A}{u_B} = \frac{u_s(0)}{u_b(0)} = \frac{2A_s}{A_b + B_b} \Rightarrow \dots$$

$$|F_3(\omega)| = \frac{1}{|\cos(k_s^* H)|} \approx \frac{1}{[\cos^2(k_s H) + (\xi_s k_s H)^2]^{1/2}} = |F_2(\omega)|$$

Από πρακτικής άποψης
 όμως, είναι πιο σημαντικό να
 γνωρίζουμε τον λόγο U_A/U_Γ :



$$F_4(\omega) = \frac{u_A}{u_\Gamma} = \dots \frac{2A_s}{2A_b} \Rightarrow \dots$$

$$|F_4(\omega)| = \frac{1}{|\cos(k_s^* H) + ia_s^* \sin(k_s^* H)|} \approx \frac{1}{[\cos^2(k_s H) + (\bar{\xi}_s k_s H)^2]^{1/2}}$$

όπου

$$\bar{\xi}_s = \xi_s + \frac{2}{\pi} a_s \frac{T_{exc.}}{T_s}$$

$$a_s = \frac{\rho_s C_s}{\rho_b C_b}$$

για άκαμπτο βράχο $C_b \rightarrow \infty$, $a_s \rightarrow 0$, $\bar{\xi}_s \rightarrow \xi_s$,
 και έτσι

$$|F_4(\omega)| \approx \frac{1}{[\cos^2(k_s H) + (\xi_s k_s H)^2]^{1/2}} \approx |F_3(\omega)|$$

**Σημαντικές παράμετροι του εδάφους και της διέγερσης που
 επιδρούν στην εδαφική ενίσχυση . . .**

$$|F_4(\omega)| = \frac{1}{|\cos(k_s^* H) + ia_s^* \sin(k_s^* H)|} \approx \frac{1}{[\cos^2(k_s H) + (\bar{\xi}_s k_s H)^2]^{1/2}}$$

όπου: $\bar{\xi}_s = \xi_s + \frac{2}{\pi} a_s \frac{T_{exc.}}{T_s}, \quad a_s = \frac{\rho_s C_s}{\rho_b C_b}$

Άρα, οι σημαντικές παράμετροι είναι:

$$k_s H = \frac{\omega H}{C_s} = \frac{\pi}{2} \left(\frac{T_s}{T_{exc}} \right)$$

$$\bar{\xi}_s = \xi_s + \frac{2}{\pi} a_s \left(\frac{T_s}{T_{exc}} \right)^{-1}$$



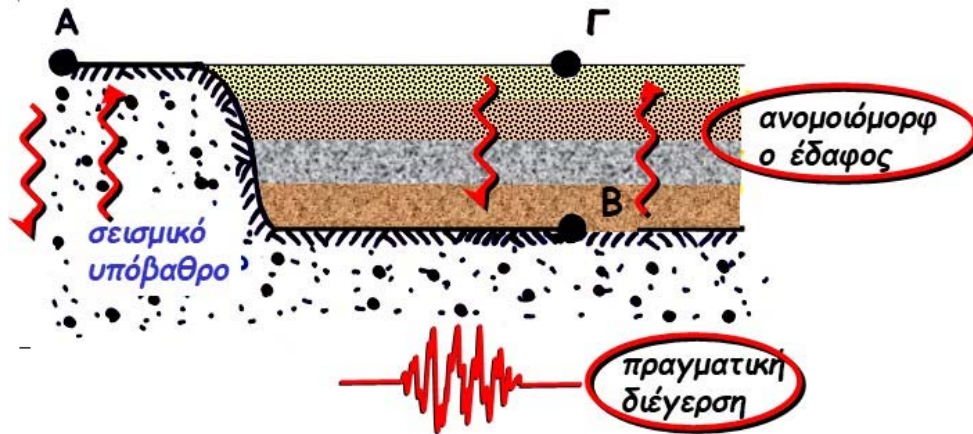
$$T_s / T_{exc}$$

$$\xi_s$$

$$a_s = \frac{\rho_s C_s}{\rho_b C_b} \approx \frac{T_b}{T_s} \left(\eta \frac{T_b}{T_{exc}} \right)$$

6.3 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ

Οι αναλυτικές λύσεις που εξετάστηκαν προηγουμένως είναι ιδιαίτερα χρήσιμες για την κατανόηση των μηχανισμών και για προκαταρκτικές εκτιμήσεις



Στην πραγματικότητα όμως το έδαφος είναι **ανομοιόμορφο**, με **μη-γραμμική** ιξωδο-ελαστική (ή και ελαστο-πλαστική) συμπεριφορά και η σεισμική διέγερση **δεν είναι αρμονική**. Έτσι, όταν απαιτείται μεγαλύτερη ακρίβεια, πραγματοποιούνται **αριθμητικές αναλύσεις** της σεισμικής απόκρισης του εδάφους.

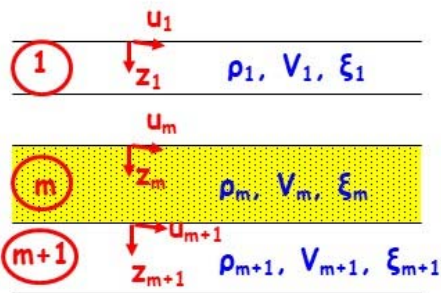
Υπάρχουν δύο βασικές επιλογές:

- ✚ **Ισοδύναμες γραμμικές αναλύσεις**, με συχνотική ολοκλήρωση ("equivalent linear" or "frequency domain" analyses) των εξισώσεων της κίνησης
- ✚ **Μη γραμμικές αναλύσεις**, με χρονική ολοκλήρωση (time domain analyses) των εξισώσεων της κίνησης

6.3.1 Ισοδύναμη Γραμμική Ανάλυση (frequency domain analysis)

Θεωρητικό Υπόβαθρο: Βασίζεται στην αναλυτική λύση για.....

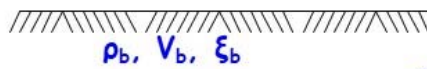
➤ **Ανομοιόμορφο** ιξωδο-ελαστικό έδαφος επί εύκαμπτου υποβάθρου:



Κίνηση στην στρώση m

$$u_m = (A_m e^{ik_m^* z_m} + B_m e^{-ik_m^* z_m}) e^{i\omega t}$$

$$\tau_m = G_m^* \frac{\partial u_m}{\partial z_m} = iG_m^* k_m^* (A_m e^{ik_m^* z_m} - B_m e^{-ik_m^* z_m}) e^{i\omega t}$$



για $z_m=0$:

$$\begin{cases} u_{m,0} = (A_m + B_m) e^{i\omega t} \\ \tau_{m,0} = iG_m^* k_m^* (A_m - B_m) e^{i\omega t} \end{cases}$$

για $z_m=h_m$:

$$\begin{cases} u_{m,h} = (A_m e^{ik_m^* h_m} + B_m e^{-ik_m^* h_m}) e^{i\omega t} \\ \tau_{m,h} = iG_m^* k_m^* (A_m e^{ik_m^* h_m} - B_m e^{-ik_m^* h_m}) e^{i\omega t} \end{cases}$$

Συνοριακές συνθήκες στην ελεύθερη επιφάνεια του εδάφους

$$\tau_{1,0} = 0 \Rightarrow A_1 = B_1$$

$$u_1 = 2A_1 \cos k_1^* z_1 e^{i\omega t}$$

$$\tau_1 = 2A_1 (iG_1^* k_1^*) \sin k_1^* z_1 e^{i\omega t}$$

Συνοριακές συνθήκες στις δι-επιφάνειες (μεταξύ των στρώσεων)

$$u_{m+1,0} = u_{m,h_m} \Rightarrow A_{m+1} + B_{m+1} = A_m e^{ik_m^* h_m} + B_m e^{-ik_m^* h_m}$$

$$\tau_{m+1,0} = \tau_{m,h_m} \Rightarrow A_{m+1} - B_{m+1} = \frac{k_m^* G_m^*}{k_{m+1}^* G_{m+1}^*} (A_m e^{ik_m^* h_m} - B_m e^{-ik_m^* h_m})$$

και τελικώς ...

$$A_{m+1} = \frac{1}{2} A_m (1 + a_m^*) e^{ik_m^* h_m} + \frac{1}{2} B_m (1 - a_m^*) e^{-ik_m^* h_m}$$

$$B_{m+1} = \frac{1}{2} A_m (1 - a_m^*) e^{ik_m^* h_m} + \frac{1}{2} B_m (1 + a_m^*) e^{-ik_m^* h_m}$$

$$\text{όπου } a_m^* = \frac{\rho_m V_m^*}{\rho_{m+1} V_{m+1}^*}$$

Προοδευτική επίλυση, από την ελεύθερη επιφάνεια του εδάφους ($j=1$) προς βαθύτερες στρώσεις ($j=m$)

$$\begin{aligned} \textcircled{j=1} \quad A_2 &= \frac{1}{2} A_1 (1 + a_1^*) e^{ik_1^* h_1} + \frac{1}{2} A_1 (1 - a_1^*) e^{-ik_1^* h_1} \\ &= A_1 (\cos k_1^* h_1 + ia_1^* \sin k_1^* h_1) \\ B_2 &= \frac{1}{2} A_1 (1 - a_1^*) e^{ik_1^* h_1} + \frac{1}{2} A_1 (1 + a_1^*) e^{-ik_1^* h_1} \\ &= A_1 (\cos k_1^* h_1 - ia_1^* \sin k_1^* h_1) \end{aligned}$$

ή,
συνοπτικά

$$\begin{aligned} A_2 &= f_1(k_1^* h_1) A_1 \\ B_2 &= g_1(k_1^* h_1) A_1 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \textcircled{j=2} \quad A_3 &= \frac{1}{2} A_2 (1 + a_2^*) e^{ik_2^* h_2} + \frac{1}{2} B_2 (1 - a_2^*) e^{-ik_2^* h_2} \\ &= A_1 \left[\frac{1}{2} f_1 \cdot (1 + a_2^*) e^{ik_2^* h_2} + \frac{1}{2} g_1 \cdot (1 - a_2^*) e^{-ik_2^* h_2} \right] \\ B_3 &= A_1 \left[\frac{1}{2} f_1 \cdot (1 - a_2^*) e^{ik_2^* h_2} + \frac{1}{2} g_1 \cdot (1 + a_2^*) e^{-ik_2^* h_2} \right] \end{aligned}$$

ή,
συνοπτικά

$$\begin{aligned} A_3 &= f_2(k_1^* h_1, k_2^* h_2) A_1 \\ B_3 &= g_2(k_1^* h_1, k_2^* h_2) A_1 \end{aligned}$$

$$\textcircled{j=m} \quad \Rightarrow \quad \begin{aligned} A_{m+1} &= A_1 \cdot f_{m-1}(k_1^* h_1, k_2^* h_2, \dots, k_m^* h_m) \\ B_{m+1} &= A_1 \cdot g_{m-1}(k_1^* h_1, k_2^* h_2, \dots, k_m^* h_m) \end{aligned}$$

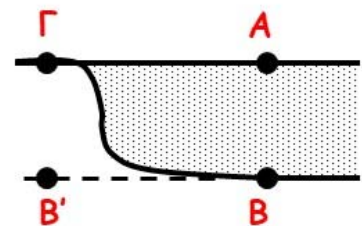
Λαμβάνοντας υπόψη ότι $A_1=B_1$, ο συντελεστής εδαφικής ενίσχυσης υπολογίζεται ως:

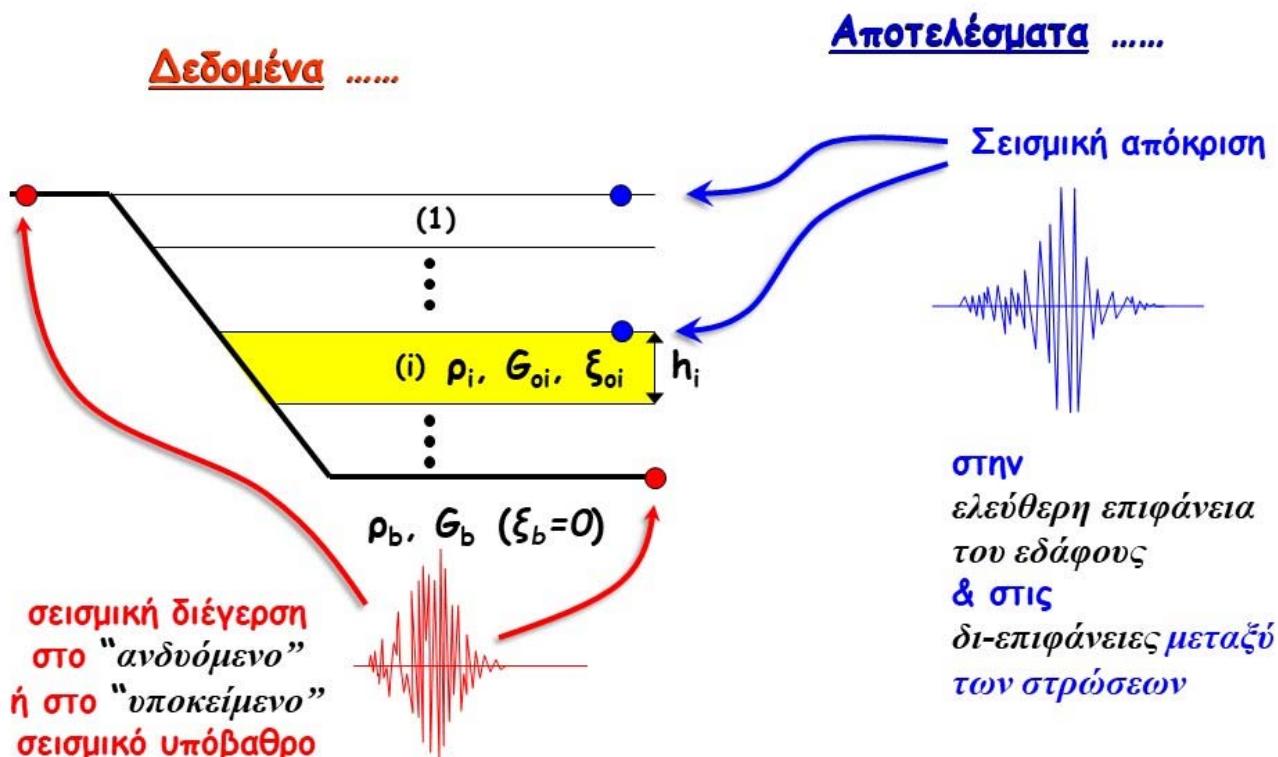
$$|F_3(\omega)| = \left| \frac{u_A}{u_B} \right| = \left| \frac{A_1 + B_1}{A_m + B_m} \right| = \left| \frac{2}{f_{m-1} + g_{m-1}} \right|$$

και, για $u_B \approx u_{B'}$

$$|F_4(\omega)| = \left| \frac{u_A}{u_\Gamma} \right| = \left| \frac{u_A}{u_B} \right| \left/ \left| \frac{u_\Gamma}{u_{B'}} \right| \right| \Rightarrow$$

$$|F_4(\omega)| = |F_\xi(\omega)| \cdot \sqrt{\cos^2(k_b H) + (\xi_b k_b H)^2}$$





Σειρά υπολογισμών

1° Βήμα: Ανάλυση της σεισμικής διέγερσης σε αρμονικές συνιστώσες με μετασχηματισμό Fourier

2° Βήμα: $G_i = G_{oi}$ και $\xi_i = \xi_{oi}$ για κάθε εδαφική στρώση i

3° Βήμα: Αναλυτικός υπολογισμός των συναρτήσεων μεταφοράς (transfer functions) $F_{i,j}$ για κάθε εδαφική στρώση και κάθε αρμονική συνιστώσα της διέγερσης

4° Βήμα: Αναλυτικός υπολογισμός της απόκρισης του εδάφους για κάθε αρμονική συνιστώσα της διέγερσης

5° Βήμα: Υπολογισμός της σεισμικής απόκρισης του εδάφους με ανάστροφο μετασχηματισμό Fourier

·
·
·
·
·

(συνεχίζεται)

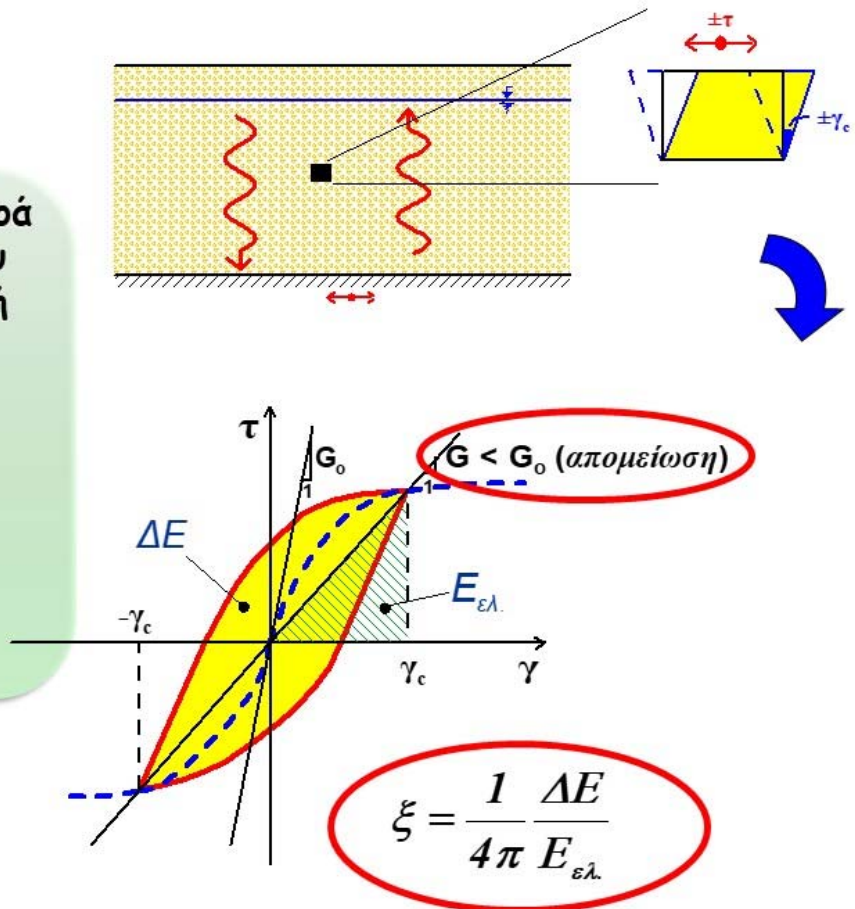
Η μηχανική συμπεριφορά του εδαφικού στοιχείου είναι όμως μη γραμμική ιξωδο-ελαστική,

και επομένως

$$G_i = G_i(\gamma) \neq G_{o,i}$$

&

$$\xi_i = \xi_i(\gamma) \neq \xi_{o,i}$$



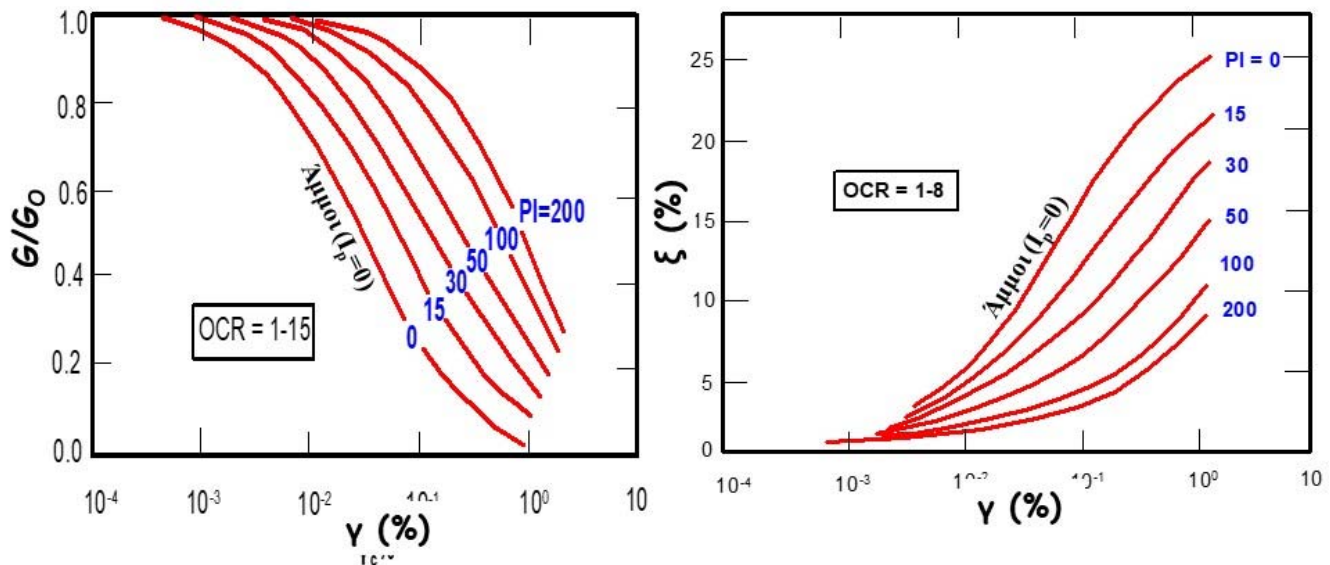
Άρα, ο πλήρης κατάλογος δεδομένων για την ισοδύναμη-γραμμική αριθμητική ανάλυση θα πρέπει να περιλαμβάνει:

- ✚ Την χρονοϊστορία επιτάχυνσης της σεισμικής διέγερσης.
- ✚ Το ελαστικό Μέτρο Διάτμησης $G_{\max,b}$ και η πυκνότητα ρ_b του σεισμικού υποβάθρου
- ✚ Το πάχος και το βάθος της κάθε εδαφικής στρώσης i
- ✚ Το ελαστικό Μέτρο Διάτμησης $G_{i,b}$ και η πυκνότητα ρ_i της κάθε εδαφικής στρώσης I

&

✚ Πειραματικές καμπύλες $G/G_{\max}$ - γ και ξ - γ για τις διαφορετικές εδαφικές στρώσεις (από την βιβλιογραφία ή από εργαστηριακές μετρήσεις "στήλης συντονισμού")

G/G_0 - γ & ξ - γ
Επίδραση τύπου εδάφους
(δια του Δείκτη Πλασιμότητας I_p ή PI)



(Vucetic & Dobry, 1991)

Πλήρης σειρά υπολογισμών

1° Βήμα: Ανάλυση της σεισμικής διέγερσης σε αρμονικές συνιστώσες με μετασχηματισμό Fourier

2° Βήμα: $G_i = G_{o,i}$ και $\xi_i = \xi_{o,i}$ για κάθε εδαφική στρώση i

3° Βήμα: Αναλυτικός υπολογισμός των συναρτήσεων μεταφοράς (transfer functions) $F_{i,j}$ για κάθε εδαφική στρώση και κάθε αρμονική συνιστώσα της διέγερσης

4° Βήμα: Αναλυτικός υπολογισμός της απόκρισης του εδάφους για κάθε αρμονική συνιστώσα της διέγερσης

5° Βήμα: Υπολογισμός της σεισμικής απόκρισης του εδάφους με ανάστροφο μετασχηματισμό Fourier

6° Βήμα: Υπολογισμός της μέγιστης τιμής της διατμητικής παραμόρφωσης $\gamma_{max,i}$ στο μέσον κάθε εδαφικής στρώσης i

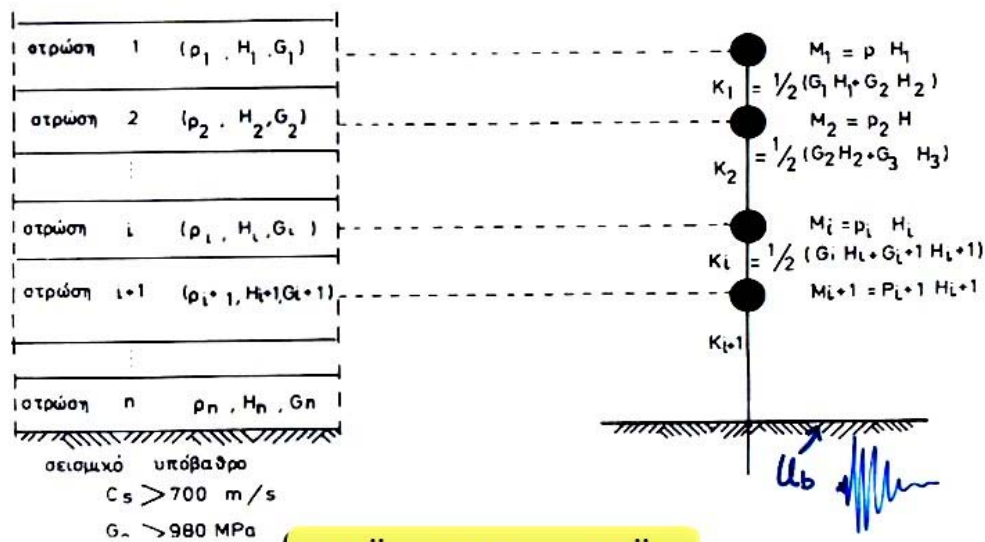
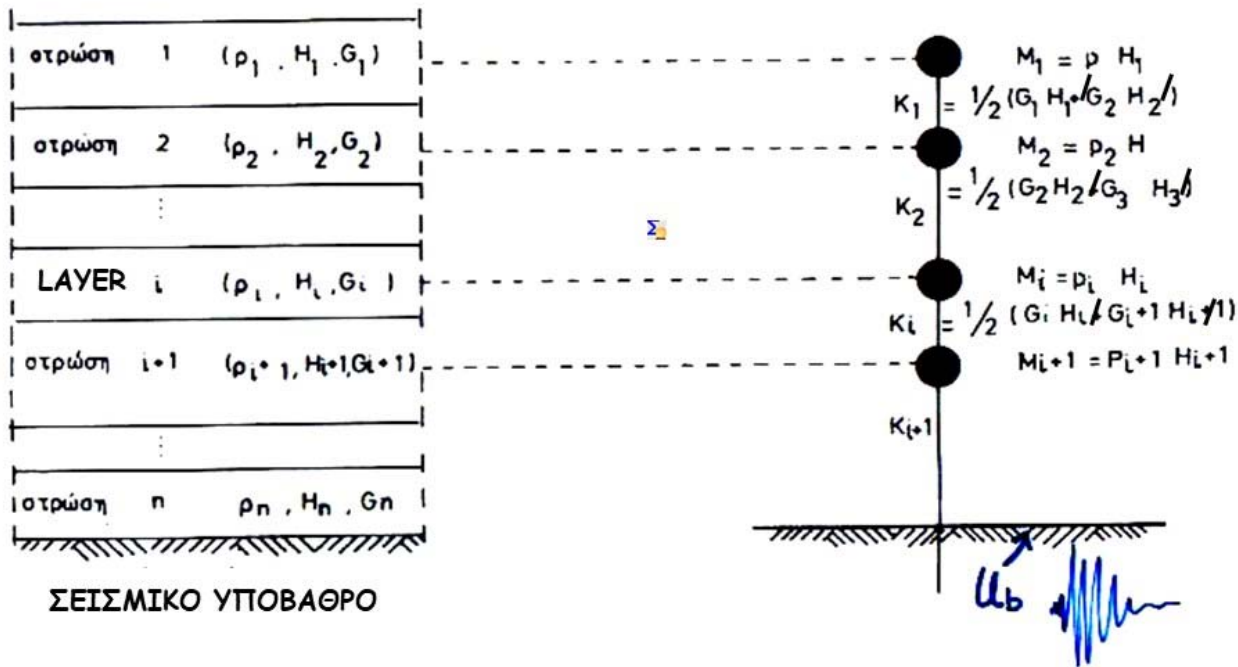
7° Βήμα: Υπολογισμός του ισοδύναμου Μέτρου Διάτμησης G_i και του λόγου απόσβεσης ξ_i για $\gamma_i = 2/3 \gamma_{max,i}$.

(επαναληπτική επίλυση)

6.3.2 Μη-Γραμμική Ανάλυση (time domain analysis)

Θεωρητικό Υπόβαθρο:

Η στήλη εδάφους διακριτοποιείται σε στρώσεις και προσομοιώνεται ως πολυβάθμιο σύστημα συγκεντρωμένων μαζών και (ιξωδο-ελαστικών) ελατηρίων . . .



$$M\ddot{X} + KX = -M\ddot{U}_b$$

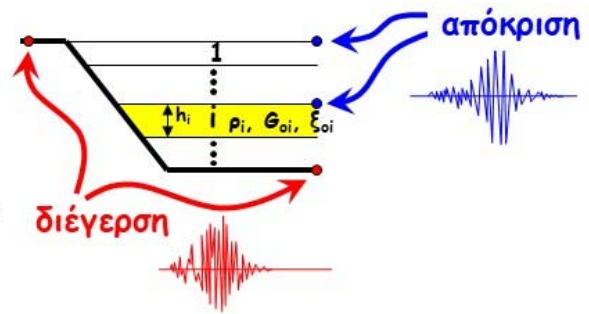
όπου

$$M = \begin{bmatrix} M_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & M_2 & \dots & \dots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & M_n \end{bmatrix}$$

$$K = \begin{bmatrix} K_1 & -K_1 & 0 & 0 \\ -K_1 & K_1 + K_2 & -K_2 & 0 \\ 0 & -K_2 & K_2 + K_3 & -K_3 \\ 0 & 0 & -K_3 & \ddots \end{bmatrix}$$

Τα βασικά **δεδομένα** των αναλύσεων περιλαμβάνουν:

- ✚ Την χρονοϊστορία επιτάχυνσης της σεισμικής διέγερσης
 - ✚ Το ελαστικό Μέτρο Διάτμησης $G_{\max, b}$ και η πυκνότητα ρ_b του σεισμικού υποβάθρου
 - ✚ Το πάχος και το βάθος της κάθε εδαφικής στρώσης i
 - ✚ Το ελαστικό Μέτρο Διάτμησης $G_{i, b}$ και η πυκνότητα ρ_i της κάθε εδαφικής στρώσης i
- ✚ Την σχέση διατμητικής τάσης-παραμόρφωσης (τ - γ) για μονοτονική και ανακυκλική φόρτιση της κάθε εδαφικής στρώσης i

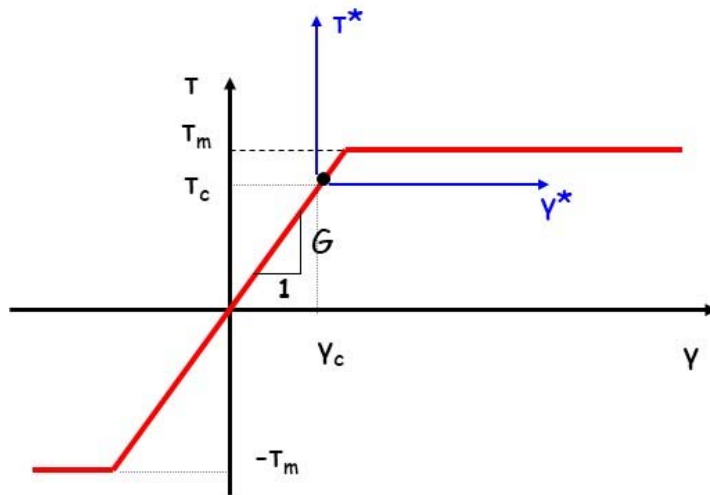


Εφαρμογή στην πράξη:

- Η επίλυση της προηγούμενης διαφορικής εξίσωσης γίνεται με χρονική ολοκλήρωση, για δεδομένες αρχικές και συνοριακές, καθώς και για δεδομένη χρονοϊστορία της διέγερσης στην βάση $U_b(t)$.
 - Δεδομένου ότι $G=f(\tau \text{ ή } \gamma)$, ισχύει επίσης ότι $K=f(X)$. Πρόκειται δηλαδή για μη-γραμμική διαφορική εξίσωση η οποία θα πρέπει να επιλυθεί επαναληπτικά (incrementally), σε πολύ μικρά χρονικά βήματα προκειμένου να εξασφαλισθεί σύγκλιση.
- Ανεξάρτητα από τον αλγόριθμο αριθμητικής επίλυσης, είναι απαραίτητο πλέον να ορισθεί η πλήρης καμπύλη διατμητικής τάσης-παραμόρφωσης (τ - γ) η οποία ελέγχει την σεισμική απόκριση σε φόρτιση-αποφόρτιση-επαναφόρτιση της κάθε εδαφικής στρώσης.

- Στην πραγματικότητα, η σχέση τ - γ που θα υιοθετηθεί αποτελεί ίσως τον κύριο παράγοντα που επηρεάζει την ακρίβεια των αριθμητικών αναλύσεων (βλ. Κεφαλαίο 5), γεγονός το οποίο οι περισσότεροι χρήστες αγνοούν ή παραβλέπουν.

Παράδειγμα (προς αποφυγή) αποτελεί το
"ελαστικό-απόλυτα πλαστικό"
 προσομοίωμα που εξετάστηκε στο
 προηγούμενο Κεφάλαιο



αρχική φόρτιση:

$$-T_m \leq (T = \gamma G) \leq T_m$$

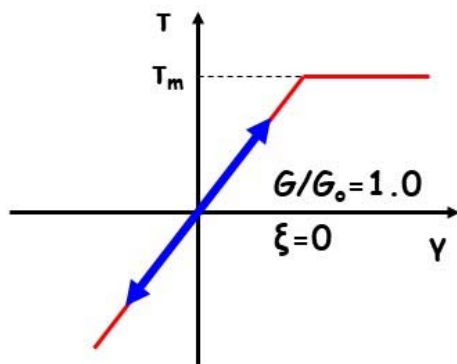
αποφόρτιση από (T_c, γ_c) :

$$-T_m^* \leq (T^* = \gamma^* G) \leq T_m^*$$

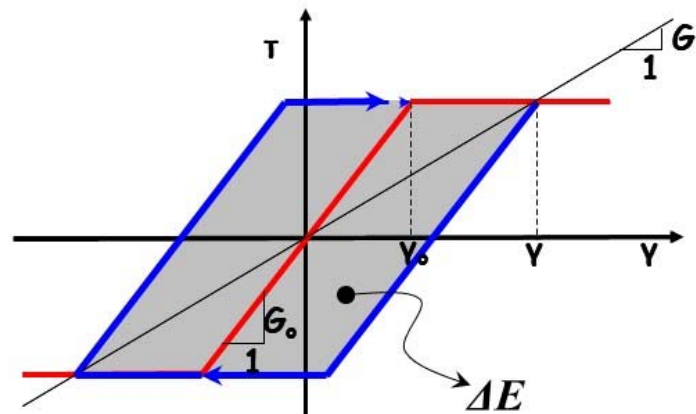
όπου.....

$$T^* = T - T_c, \quad \gamma^* = \gamma - \gamma_c$$

$$\& \quad T_m^* = T_m + |T_c|$$



Βρόχος
 ανακυκλικής
 φόρτισης για $T \leq T_m$

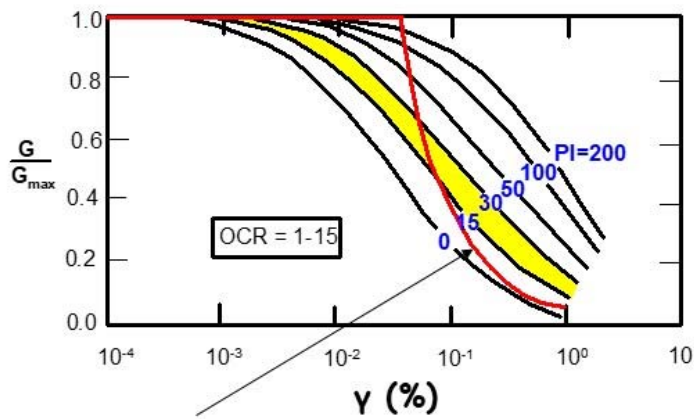


Βρόχος για $T \geq T_m$

$$\left. \begin{aligned} G &= \frac{\tau_m}{\gamma} \\ G_o &= \frac{\tau_m}{\gamma_o} \end{aligned} \right\} \frac{G}{G_o} = \frac{\gamma_o}{\gamma},$$

$$\xi = \frac{1}{4\pi} \frac{\Delta E}{E_{ελ}} = \frac{1}{4\pi} \frac{4\tau_m(\gamma - \gamma_o)}{\frac{1}{2}\tau_m\gamma} = \frac{2}{\pi} \left(1 - \frac{\gamma_o}{\gamma} \right)$$

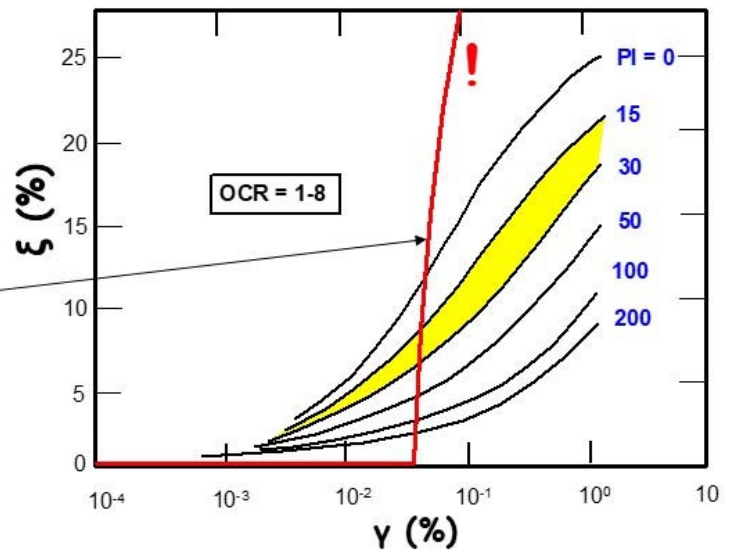
$$\xi = \frac{2}{\pi} \left(1 - \frac{G}{G_o} \right) = 0 \sim 0.65$$



σύγκριση με πειραματικά αποτελέσματα

ΡΑΓΔΑΙΑ απομείωση
του μέτρου διάτμησης G

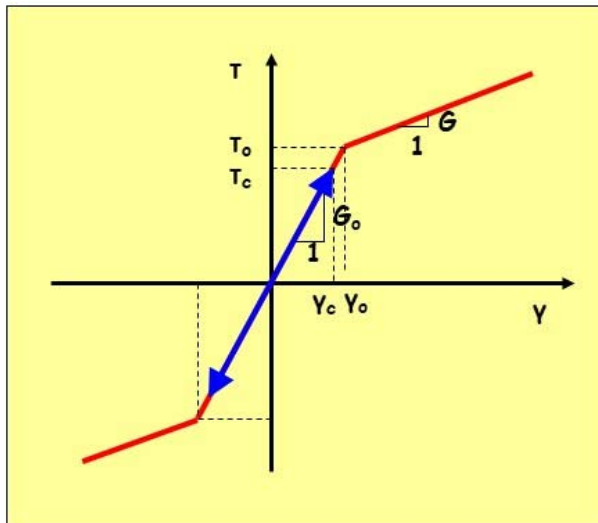
και (ακόμη χειρότερα)
ΡΑΓΔΑΙΑ & υπερβολικά
ΜΕΓΑΛΗ αύξηση του ξ



ή (ακόμη χειρότερα), το.....

✚ “Δι-γραμμικό” προσομοίωμα

Το προσομοίωμα αυτό αναπτύχθηκε κατ’ επέκταση του προηγούμενου ελαστικού-απόλυτα πλαστικού προσομοιώματος, με την ελπίδα να βελτιώσει την ακρίβεια των υπολογισμών. Αλλά



(α) $|\tau| \leq |\tau_o|$

$$\gamma_c = \frac{\tau}{G_o}$$

$$\gamma - \gamma_c = \frac{\tau - \tau_c}{G_o}$$

φόρτιση

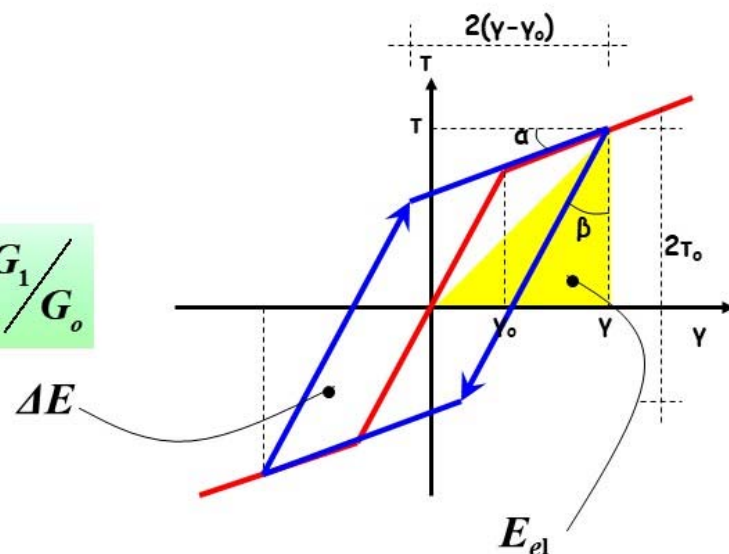
αποφόρτιση –
επαναφόρτιση

$$\frac{G}{G_o} = 1$$

$$\xi = 0$$

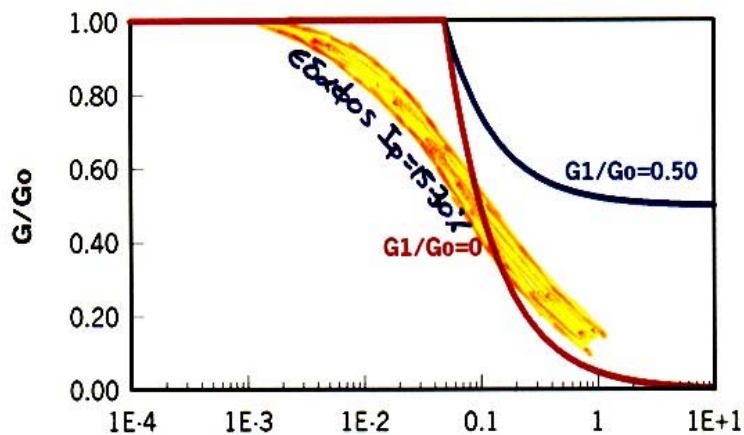
(β) $|\tau| \geq |\tau_o|$

$$\frac{G}{G_o} = \frac{\gamma_o}{\gamma} \left(1 - \frac{G_1}{G_o} \right) + \frac{G_1}{G_o}$$



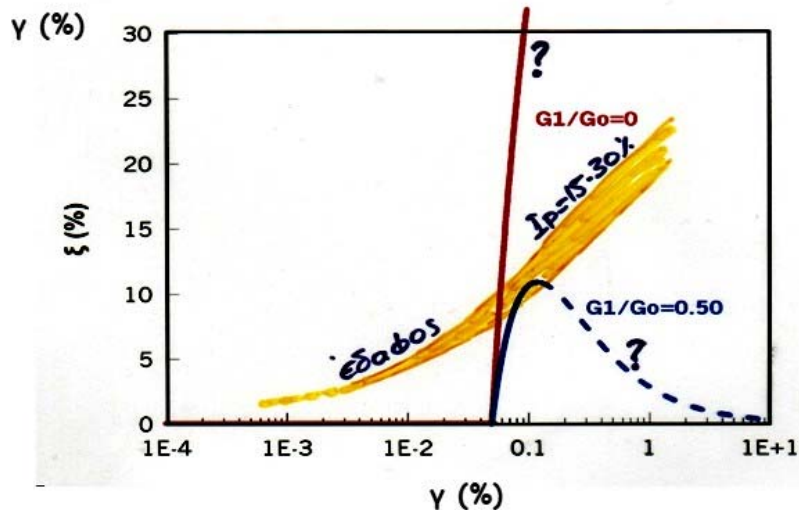
$$\xi = \frac{1}{4\pi} \frac{\Delta E}{E_{\varepsilon\lambda}} \Rightarrow \dots$$

$$\xi = \frac{2 \left(1 - \frac{\gamma_o}{\gamma} \right) \frac{\gamma_o}{\gamma} \left(1 - \frac{G_1}{G_o} \right)}{\pi \left(\frac{G_1}{G_o} + \frac{\gamma_o}{\gamma} \left(1 - \frac{G_1}{G_o} \right) \right)}$$



σύγκριση με πειραματικά αποτελέσματα

σχόλια ???



Ερώτηση 6.4

Πως κρίνετε την αξιοπιστία του προηγούμενων προσομοιωμάτων όσον αφορά στην ανακυκλική ιξωδο-ελαστική συμπεριφορά των εδαφικών στρώσεων; Ποιες θα είναι οι συνέπειες από την χρησιμοποίησή τους σε υπολογισμούς της σεισμικής απόκρισης (π.χ. της μέγιστης σεισμικής επιτάχυνσης) του εδάφους;

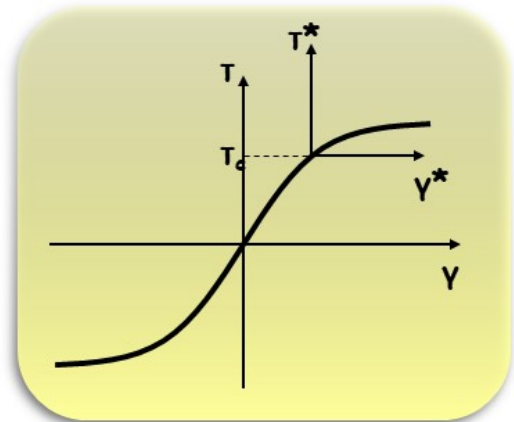
Υπάρχουν βέβαια και κάποια αξιολογημένα προσομοιώματα, όπως το.....

✦ Προσομοίωμα "Ramberg-Osgood (1943)"

Μονοτονική φόρτιση

$$\gamma = \frac{\tau}{G_{\max}} \left[1 + \left(\frac{1}{a_y} - 1 \right) \left(\frac{|\tau|}{\tau_1} \right)^{w-1} \right]$$

$$\text{για } \left. \begin{matrix} a_y = 0.64 \\ w = 2 \end{matrix} \right\} \gamma = \frac{\tau}{G_{\max}} \left(1 + 0.5625 \frac{|\tau|}{\tau_1} \right)$$



Αποφόρτιση-επαναφόρτιση από (τ_c, γ_c)

$$\gamma^* = \gamma - \gamma_c$$

$$\tau^* = \tau - \tau_c$$

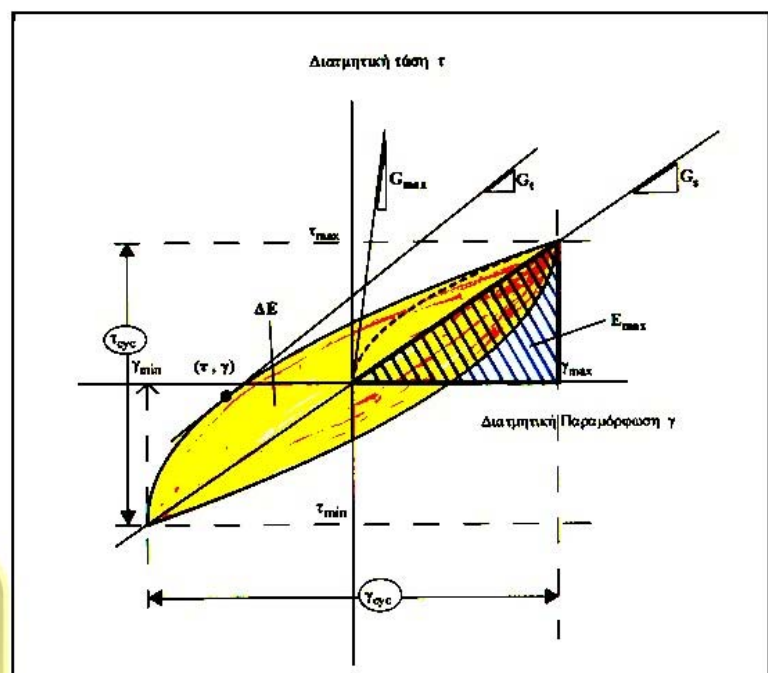
$$\tau_1^* = 2\tau_1$$

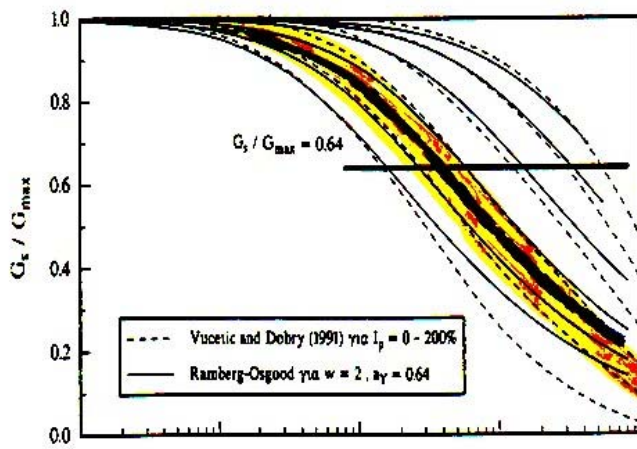
$$\frac{G}{G_{\max}} = \frac{1}{1 + \left(\frac{1}{a_y} - 1 \right) \frac{|\tau_c|}{\tau_1}}$$

$$\xi = \frac{2}{\pi} \left(\frac{w-1}{w+1} \right) \left(1 - \frac{G}{G_{\max}} \right)$$

$$\left. \begin{matrix} a_y = 0.64 \\ w = 2 \end{matrix} \right\} \frac{G}{G_{\max}} = \frac{1}{1 + 0.56 \frac{|\tau_c|}{\tau_1}}$$

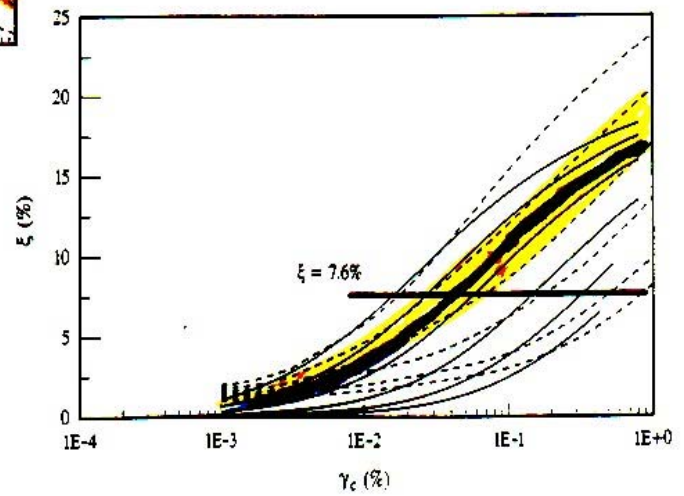
$$\xi = \frac{2}{3\pi} \left(1 - \frac{G}{G_{\max}} \right)$$





σύγκριση με πειραματικά
αποτελέσματα.....

σχόλια ???



Εφαρμογή στην πράξη:

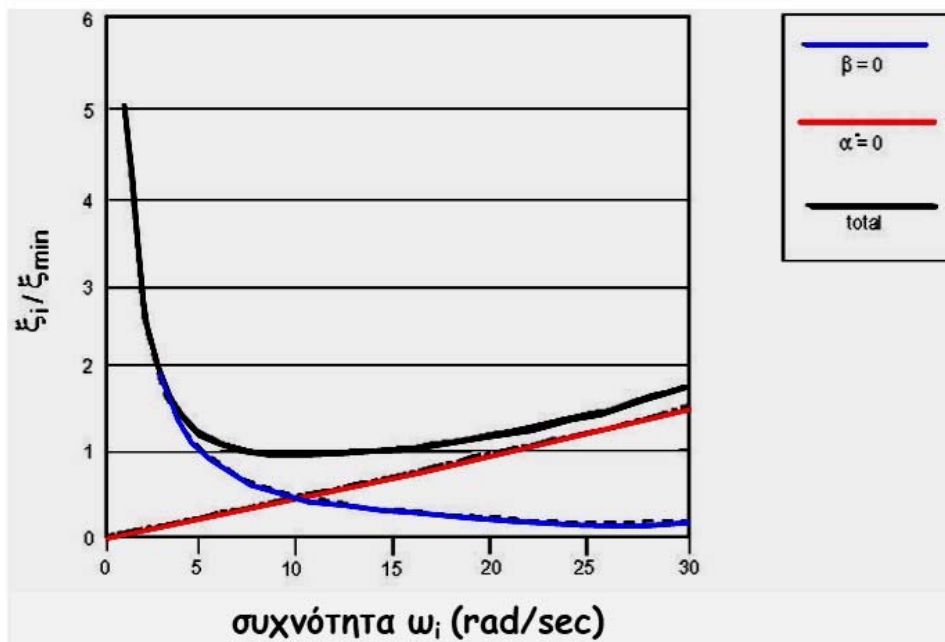
(συνέχεια)

➤ Οι τιμές του ξ που υπολογίζονται από όλες πρακτικά τις σχέσεις τ - γ έχουν δύο κοινά χαρακτηριστικά:

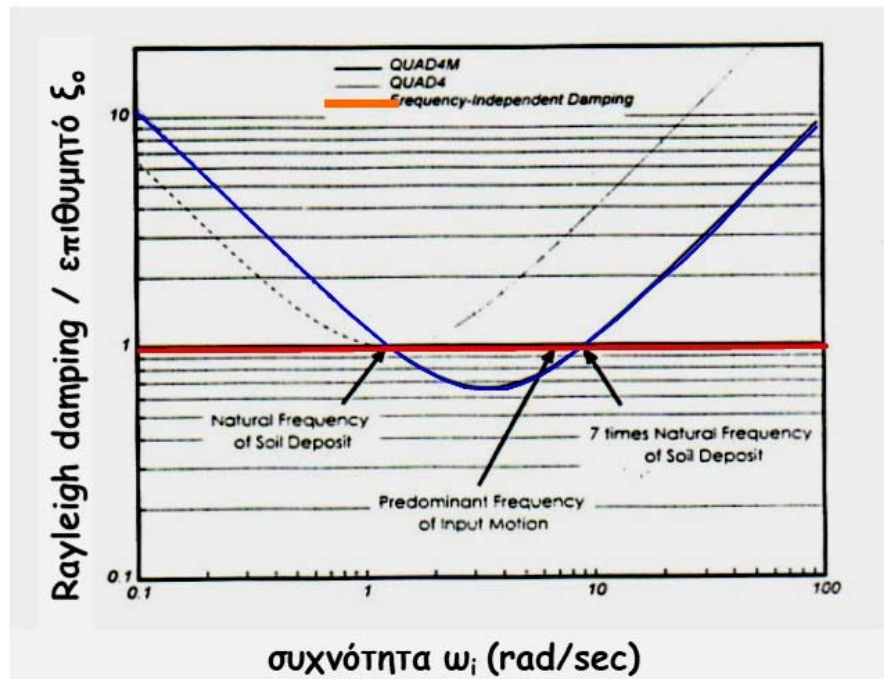
(α) Είναι ανεξάρτητες από την συχνότητα της φόρτισης

(β) **Μηδενίζονται όταν $\gamma \rightarrow 0$** (αντί για το $\xi_0 = 2-4\%$ που ισχύει για πραγματικά εδάφη)

➤ Λόγω του (β) παραπάνω, θα πρέπει να εισαχθεί πρόσθετη (τεχνητή) απώλεια ενέργειας, γνωστή ως **"Rayleigh" damping**, η οποία ορίζεται συναρτήσει της μάζας και της δυσκαμψίας του συστήματος ως **$C = \alpha M + \beta K$** και επομένως εξαρτάται από την συχνότητα της φόρτισης.



- Κατά τον ορισμό του Rayleigh Damping, η επιλογή των παραμέτρων α και β πρέπει να είναι τέτοια ώστε η τιμή του να παραμένει περίπου σταθερή (ίση προς την επιθυμητή) για ένα εύρος συχνοτήτων ω_i που περιλαμβάνει την ιδιο-συχνότητα της εδαφικής απόθεσης και την δεσπόζουσα συχνότητα της διέγερσης.



Η **μη-γραμμική (time domain) ανάλυση** είναι θεωρητικά πιο συνεπής, δεν βασίζεται δηλαδή σε κάποιες προσεγγιστικές παραδοχές που αντιβαίνουν βασικές αρχές της Μηχανικής. Κατά την εφαρμογή της όμως θα πρέπει να ληφθούν υπόψη και να αντιμετωπιστούν κατάλληλα κάποιες συνήθεις "πηγές λάθους" οι οποίες μπορεί να οδηγήσουν σε ανακριβή αποτελέσματα.

Κατ' αρχήν, θα πρέπει να εξασφαλισθεί ότι **το λογισμικό που χρησιμοποιείται είναι εφοδιασμένο με το κατάλληλο προσομοίωμα της σχέσης τ-γ** για ανακυκλική διατμητική φόρτιση του εδάφους. Επιπλέον, χρειάζεται ιδιαίτερη προσοχή κατά τον **ορισμό της τιμής του ξ (Rayleigh damping)** σε πολύ μικρές διατμητικές παραμορφώσεις, μια και αυτή η παράμετρος εξαρτάται από την συχνότητα της φόρτισης και μπορεί να πάρει (κατά λάθος) ιδιαίτερα υψηλές τιμές (βλ. σχήμα σε προηγούμενη διαφάνεια).

Υπό τις ανωτέρω προϋποθέσεις, η εν λόγω μέθοδος είναι η πλέον αξιόπιστη και ενδεδειγμένη για εφαρμογές με έντονα μη-γραμμική συμπεριφορά του εδάφους (π.χ. πολύ ισχυρή δόνηση σε μαλακό έδαφος).

(συνέχεια ...)

Το βασικό πλεονέκτημα της **ισοδύναμης-γραμμικής frequency domain ανάλυσης** είναι η απλότητα και η ευκολία εφαρμογής. Επισημαίνεται όμως ότι η εν λόγω μέθοδος **παραβιάζει μια βασική αρχή της Μηχανικής:**

Εφαρμόζει επαλληλία των αρμονικών συνιστωσών της σεισμικής απόκρισης παρά το γεγονός ότι η ανακυκλική συμπεριφορά του εδάφους είναι μη-γραμμική ιξωδο-ελαστική !

Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να υπο-εκτιμάται (over-damped) η συμβολή των υψί-συχνων συνιστωσών της διέγερσης, ενώ αντίθετα υπερ-εκτιμάται (under-damped) η συμβολή των συνιστωσών με χαμηλές συχνότητες. Στην πράξη όμως, αυτές οι ανακρίβειες δεν είναι ιδιαίτερα σημαντικές και μπορεί να γίνουν αποδεκτές, υπό την προϋπόθεση ότι οι διατμητικές παραμορφώσεις του εδάφους δεν ξεπερνούν το 0.03-0.10% περίπου (για μικρής-μέτριας έντασης σεισμικές δονήσεις και συνήθη έδαφη).

Άσκηση 6.1

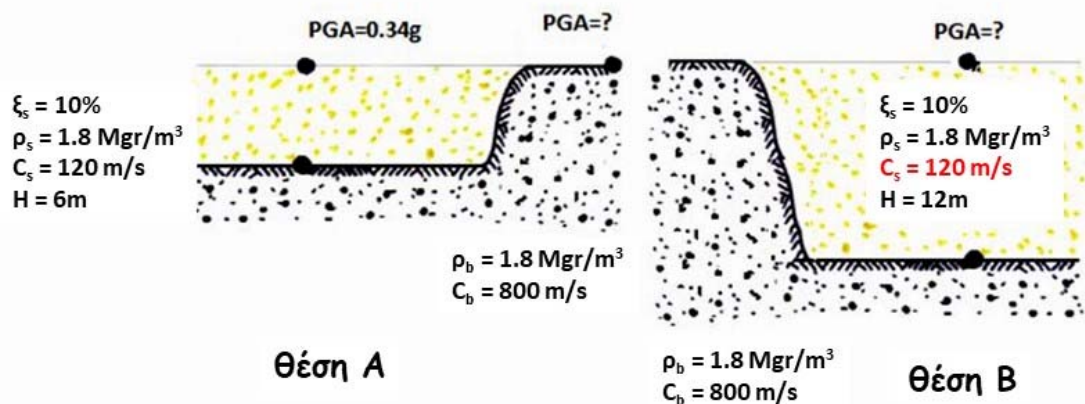
Αναζητήστε στην διεθνή βιβλιογραφία μία τουλάχιστον τεκμηριωμένη αναφορά σε πρόσθετα περιστατικά εδαφικής «ενίσχυσης» του σεισμικού κραδασμού από πρόσφατους ισχυρούς σεισμούς. Η παρουσίαση να γίνει συνοπτικά (όχι πάνω από 2-3 σελίδες για κάθε περιστατικό), κυρίως με σχήματα και τις αναγκαίες επεξηγήσεις.

Άσκηση 6.2:

Εάν στην επιφάνεια του εδάφους της Θέσης Α καταγράφηκε σεισμική κίνηση με μέγιστη επιτάχυνση $PGA=0.34g$ και δεσπόζουσα περίοδο $T_{exc}=0.50sec$, να εκτιμηθεί (προσεγγιστικά) η τιμή της μέγιστης επιτάχυνσης PGA :

- α) στην επιφάνεια του αναδυόμενου σεισμικού υποβάθρου της θέσης Α
- β) στην επιφάνεια του εδάφους της θέσης Β

Υπόδειξη: να γίνει η παραδοχή ιξωδο-ελαστικού εδάφους



Άσκηση 6.3:

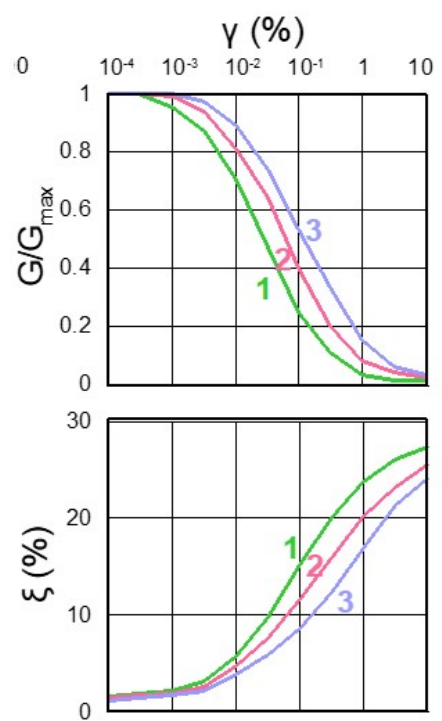
Να επαναληφθεί η Άσκηση 6.2 για μη-γραμμικό ιξωδο-ελαστικό έδαφος, εάν η μεταβολή του ανηγμένου Μέτρου Διάτμησης $G/G_{\max}$ και του κρίσιμου λόγου υστερητικής απόσβεσης ξ συναρτήσει της επιβαλλόμενης διατμητικής παραμόρφωσης δίνεται από τα παράπλευρα σχήματα (καμπύλη 2).

Να θεωρηθεί ότι η κατανομή της διατμητικής τάσης λόγω σεισμού με το βάθος δίνεται από την σχέση:

$$\tau_d = 0.65 (PGA/g) \sigma_{vo} r_d$$

$$\text{με } r_d = 1 - 0.015 z \text{ (m)} \geq 0.50$$

Υπόδειξη: Η επίλυση να γίνει επαναληπτικά (1-2 επαναλήψεις αρκούν)



Άσκηση 6.4

Σε συνέχεια της Άσκησης 5.5, να υπολογίσετε την ισοδύναμη τιμή της (ομοιόμορφης) επιτάχυνσης στην βάση του στρώματος της άμμου καθώς και στην ελεύθερη επιφάνεια του σεισμικού υποβάθρου.

Για τους υπολογισμούς να θεωρηθεί απλοποιητικά ότι:

- Η ταχύτητα διάδοσης διατμητικών κυμάτων στο σεισμικό υπόβαθρο είναι $C_{s,b}=600\text{m/s}$, ενώ η πυκνότητα του υποβάθρου είναι $\rho_b=2.2\text{Mg/m}^3$.
- Η δεσπόζουσα περίοδος της σεισμικής διέγερσης είναι $T_{exc}=0.50\text{sec}$.
- Η ταχύτητα διάδοσης διατμητικών κυμάτων στο στρώμα της άμμου είναι ομοιόμορφη με το βάθος.
- Ο λόγος υστερητικής απόσβεσης της άμμου είναι επίσης ομοιόμορφος με το βάθος και δίνεται από την σχέση:

$$\xi = 0.25 \cdot \left(1 - \frac{G}{G_o} \right)$$

Άσκηση 6.5

Κατά την διάρκεια ασθενούς σεισμικής δόνησης σε θέση αλλουβιακών αποθέσεων επί άκαμπτου σχετικά σεισμικού υποβάθρου (βλ. Σχήμα), η μέγιστη σεισμική επιτάχυνση που καταγράφηκε ήταν $PGA_A = 0.20g$ στην ελεύθερη επιφάνεια του σεισμικού υποβάθρου και $PGA_B = 0.16g$ στην ελεύθερη επιφάνεια των αλλουβίων ($PGA_B/PGA_A = 0.80 < 1.0$).



Εάν στην ίδια περιοχή επαναληφθεί μια ισχυρή σεισμική δόνηση με διπλάσια μέγιστη επιτάχυνση $PGA_A = 2 \times 0.20g = 0.40g$, άλλα παρόμοιο φασματικό (συχνοτικό) περιεχόμενο, πόση περιμένετε ότι θα είναι η κορυφαία επιτάχυνση στην επιφάνεια των αλλουβίων, $PGA_B = 2 \times 0.16g = 0.32g$, μικρότερη ή μεγαλύτερη;

Αιτιολογήστε την επιλογή σας (π.χ. με αναφορά στην απόκριση μονοβάθμιου ταλαντωτή με αρμονική διέγερση στην βάση).

[Φεβρουάριος 2019]

