

4. Σεισμική Απόκριση του Εδάφους

ή εδαφική «ενίσχυση» του σεισμικού κραδασμού

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

- 4.1** Παραδείγματα από πραγματικούς σεισμούς
- 4.2** Γενικά-ορισμοί
- 4.3** Αναλυτικές μέθοδοι
- 4.4** Εμπειρικές μέθοδοι
- 4.5** Αριθμητικές μέθοδοι

Πρόσθετο Διάγραμμα

- Steven Kramer: Chapter 7 (7.1 & 7.2) και Chapter 8
- Γιώργος Γκαζέτας: Κεφάλαιο 4 (4.2)
- SHAKE - Users' Manual

4.1. ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΑΠΟ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟΥΣ ΣΕΙΣΜΟΥΣ

Στα παραδείγματα από πραγματικούς σεισμούς που θα ακολουθήσουν
ας προσπαθήσουμε να ποσοτικοποιήσουμε την **επίδραση του
εδάφους**. Κρατήστε λοιπόν στοιχεία σχετικά με:

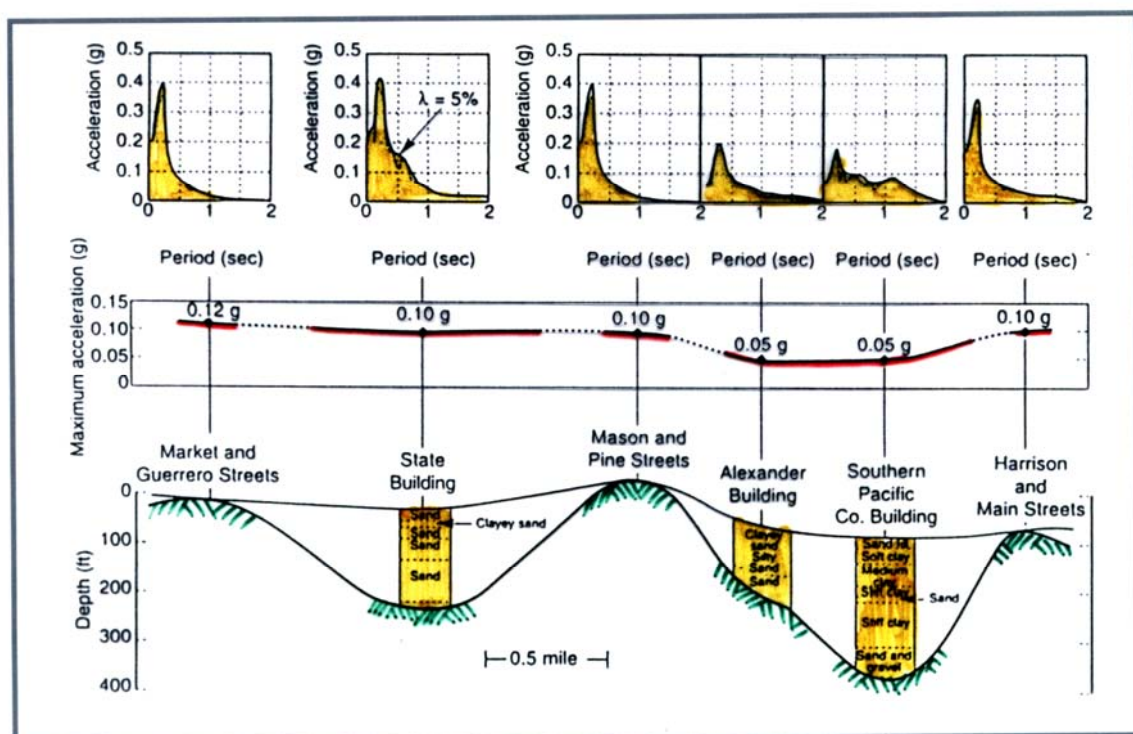
A. Τον **συντελεστή εδαφικής ενίσχυσης** →

B. Τους παράγοντες που τον διαμορφώνουν →

Γ. Αφορά μόνον την μέγιστη επιτάχυνση
ή και το ελαστικό φάσμα απόκρισης; →

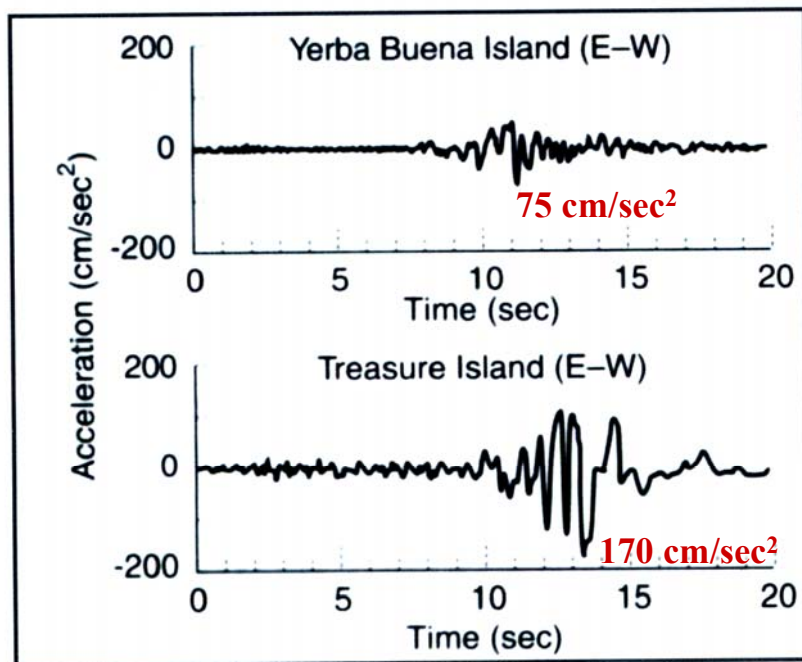


Παράδειγμα: Σεισμός San Francisco 1957



Μεταβολή της σεισμικής επιτάχυνσης ανάλογα με τις εδαφικές
συνθήκες στις θέσεις καταγραφής

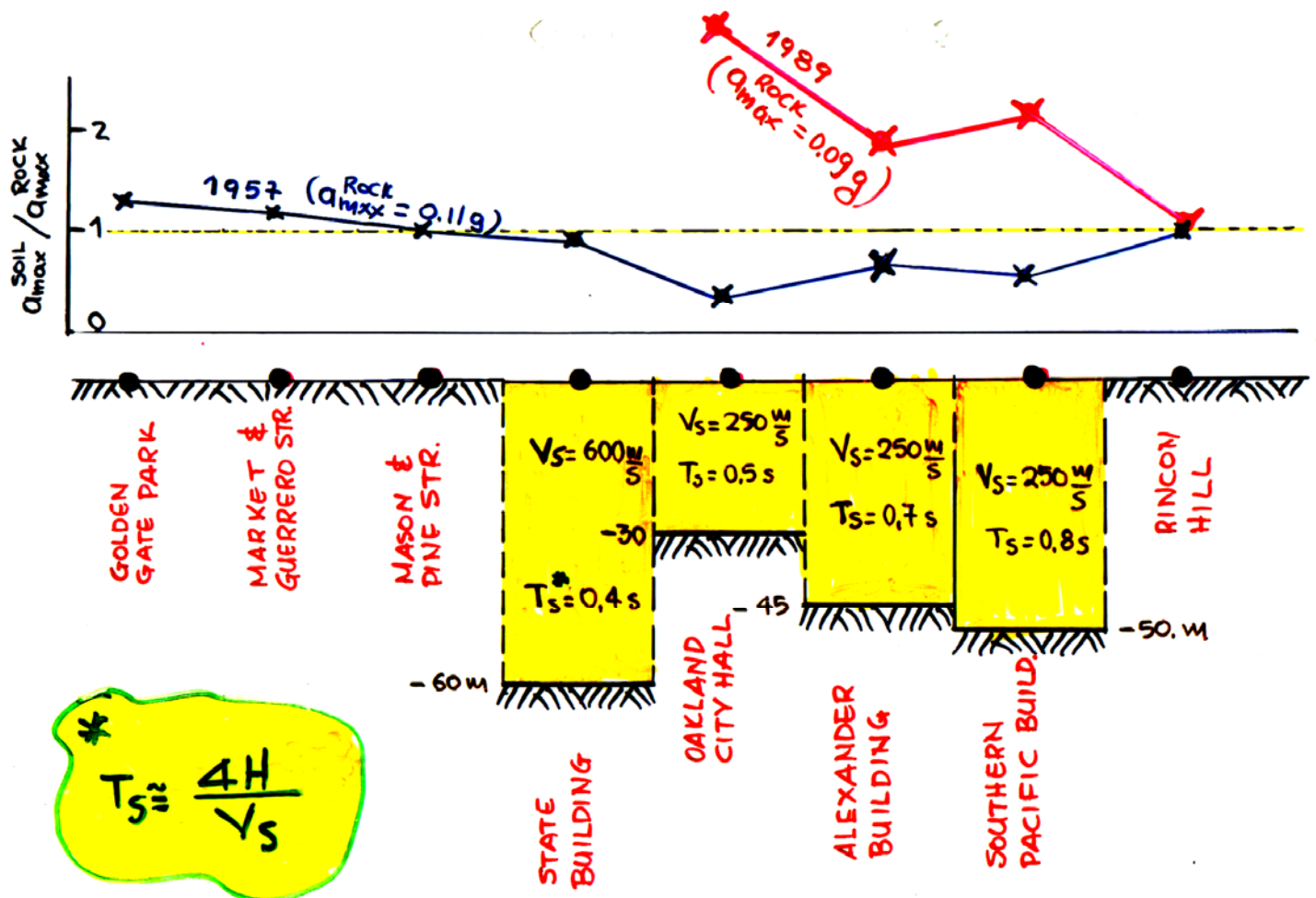
Παράδειγμα: Σεισμός San Francisco 1989



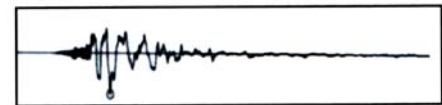
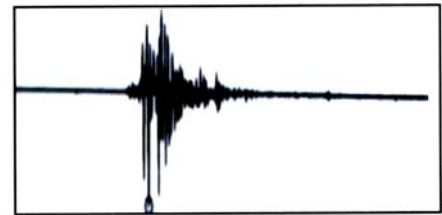
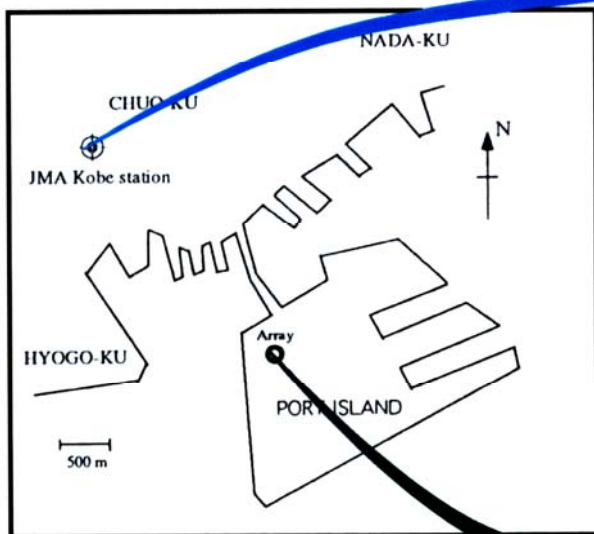
Καταγραφή σε
αναδυόμενο ΒΡΑΧΟ

Καταγραφή στην επιφάνεια
ΤΕΧΝΗΤΩΝ ΕΠΙΧΩΣΕΩΝ ΕΠΙ
αργιλικού πυθμένα (Bay
mud)

Ιδιότητα του εδάφους (πάχος, σύσταση, κλπ.) ή και του σεισμού:

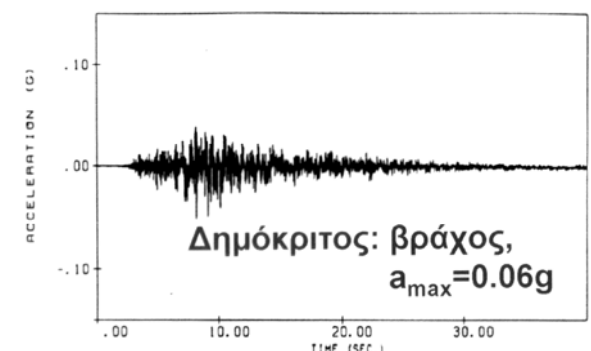
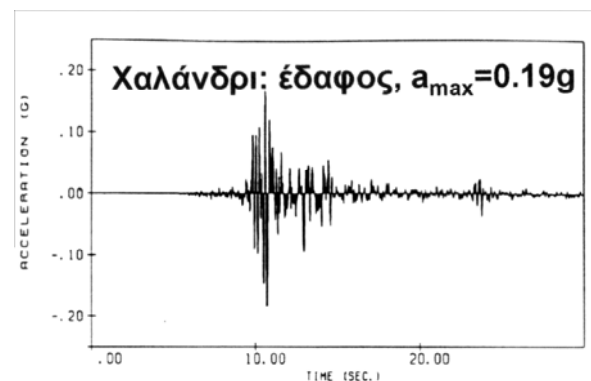
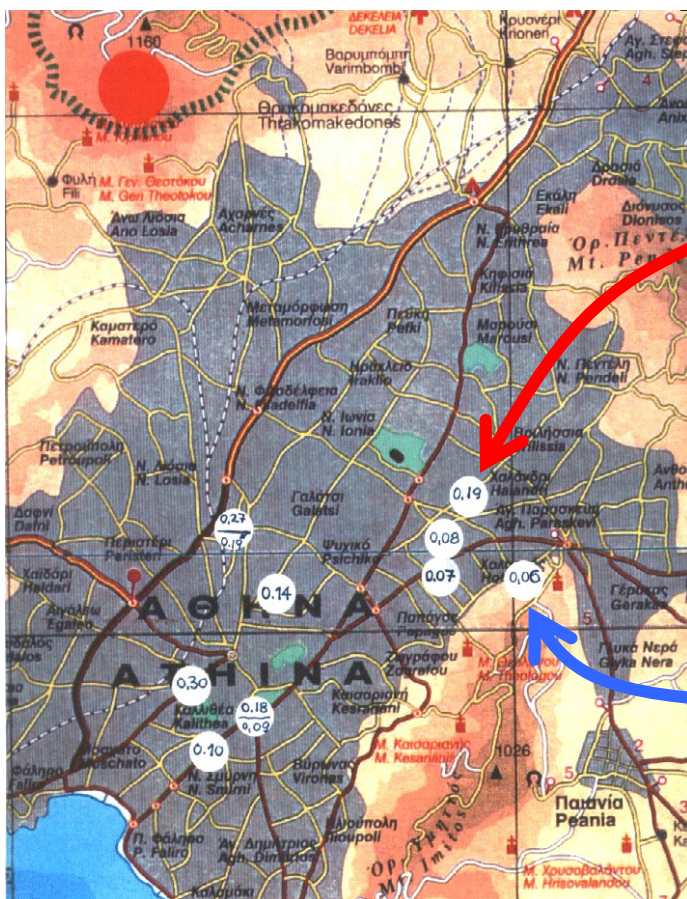


Παράδειγμα: Σεισμός Kobe 1995



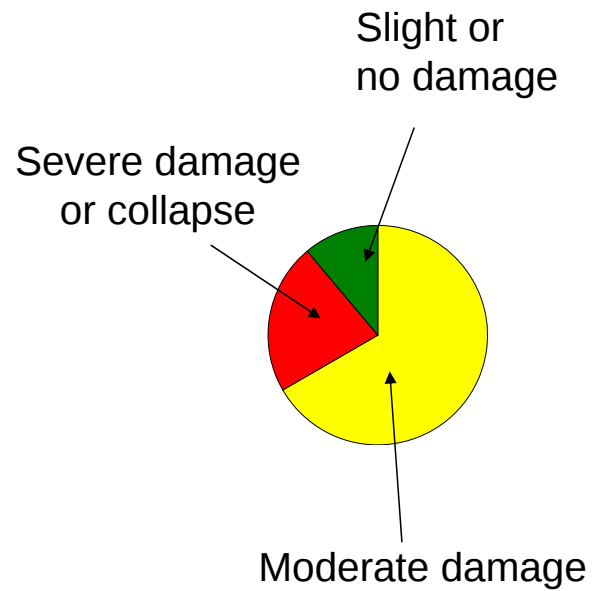
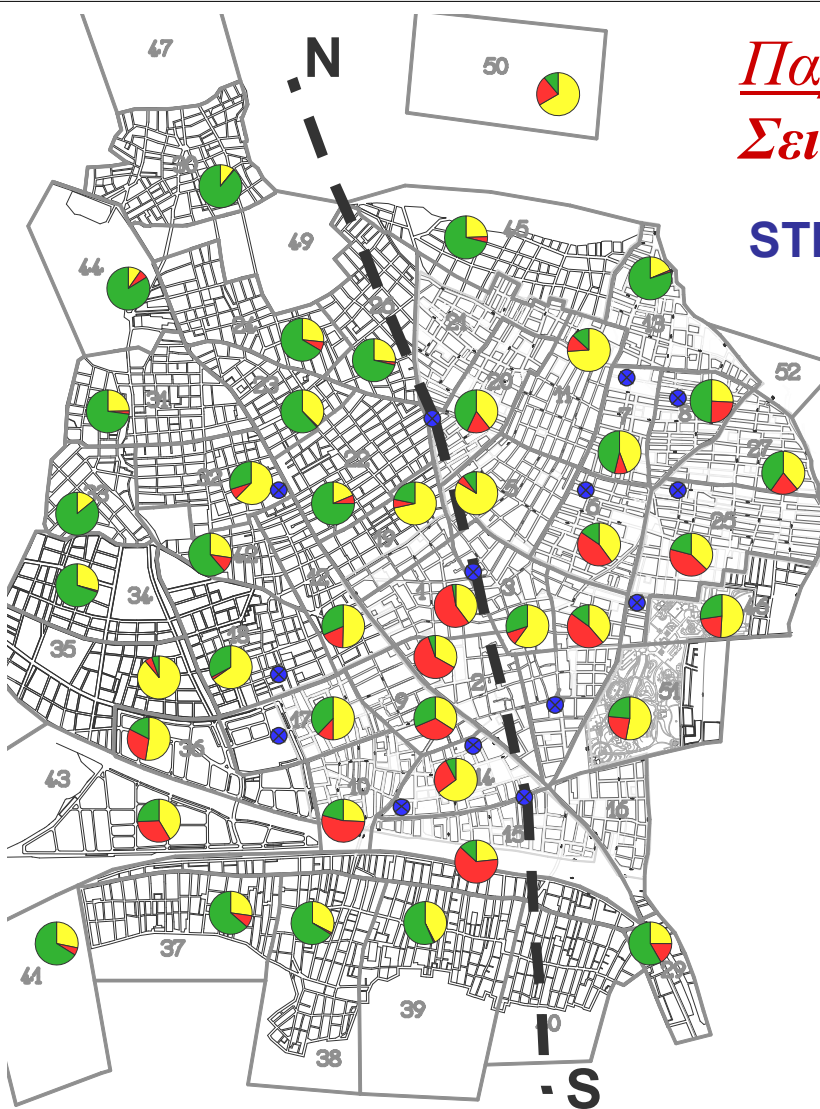
Array: Χαλαρό επίχωμα,
 $a_{max}=0.32g$

Παράδειγμα: Σεισμός της Αθήνας 1999

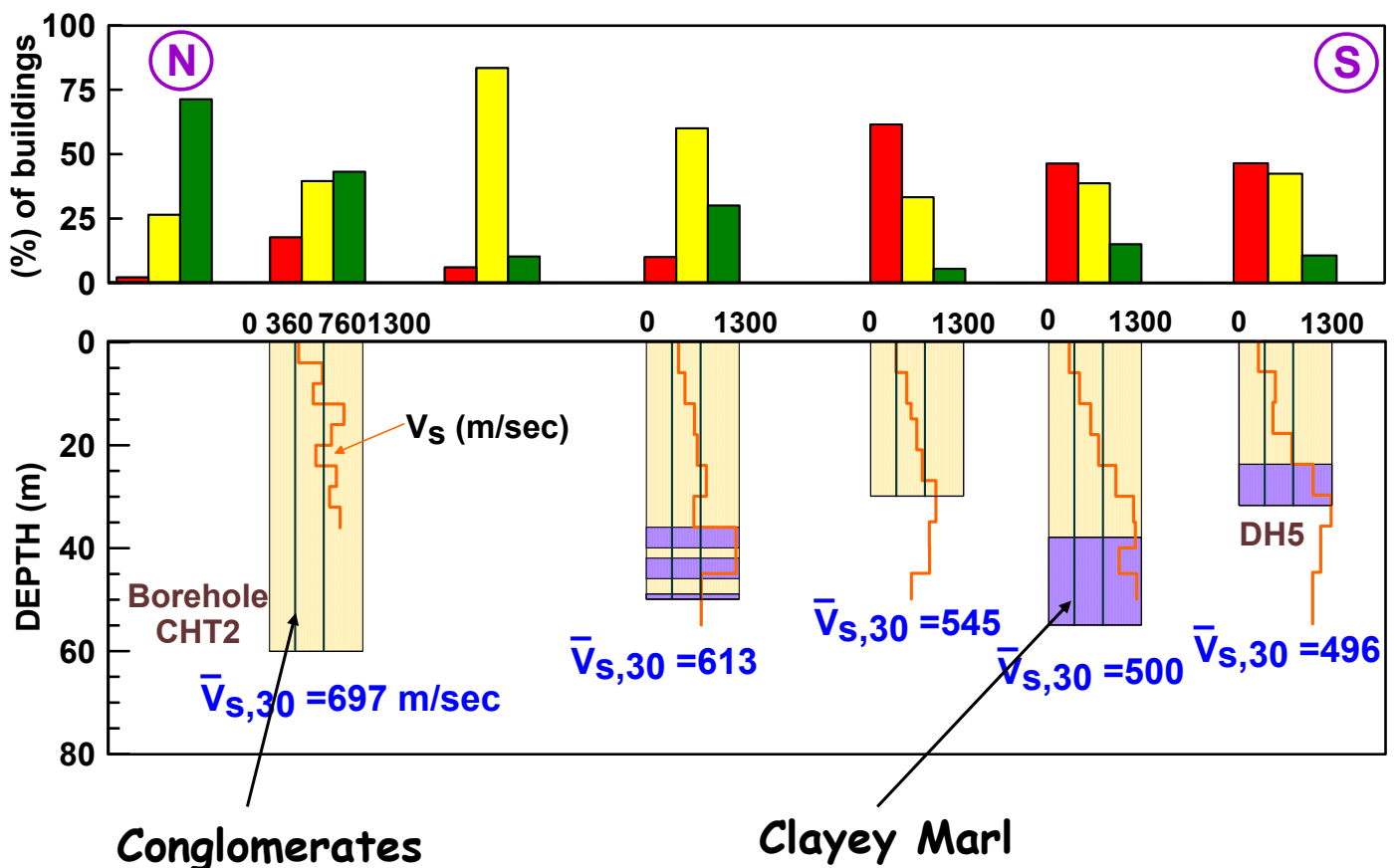


Παράδειγμα:
Σεισμός της Αθήνας 1999

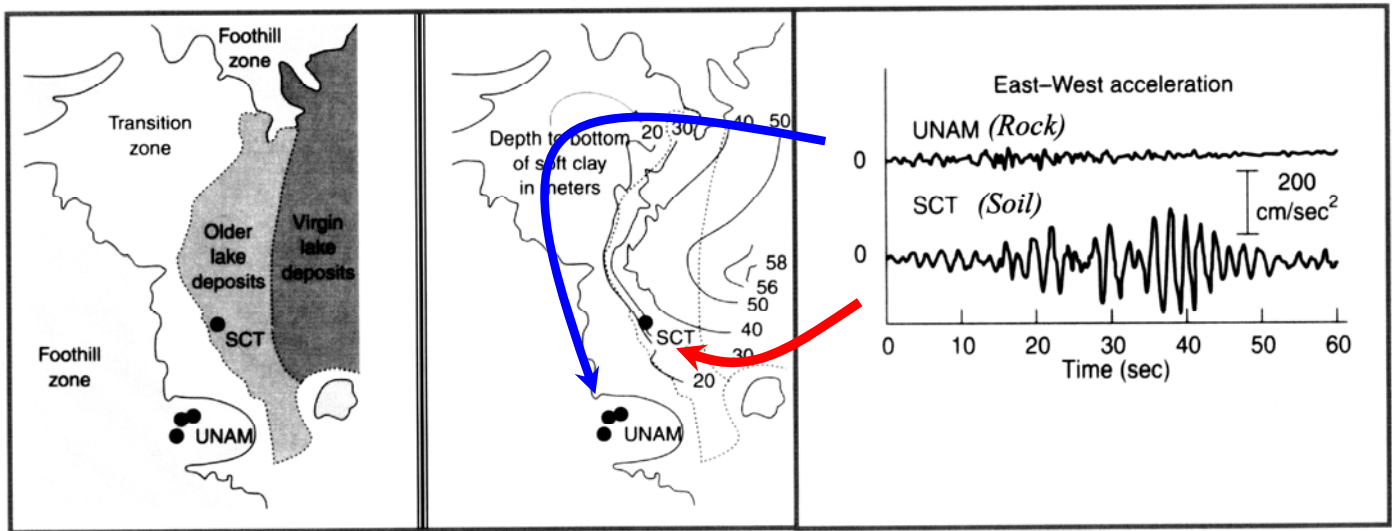
STIFF SOIL AMPLIFICATION
at Ano Liosia municipality



Cross-section N-S



Παράδειγμα: Σεισμός Mexico 1985

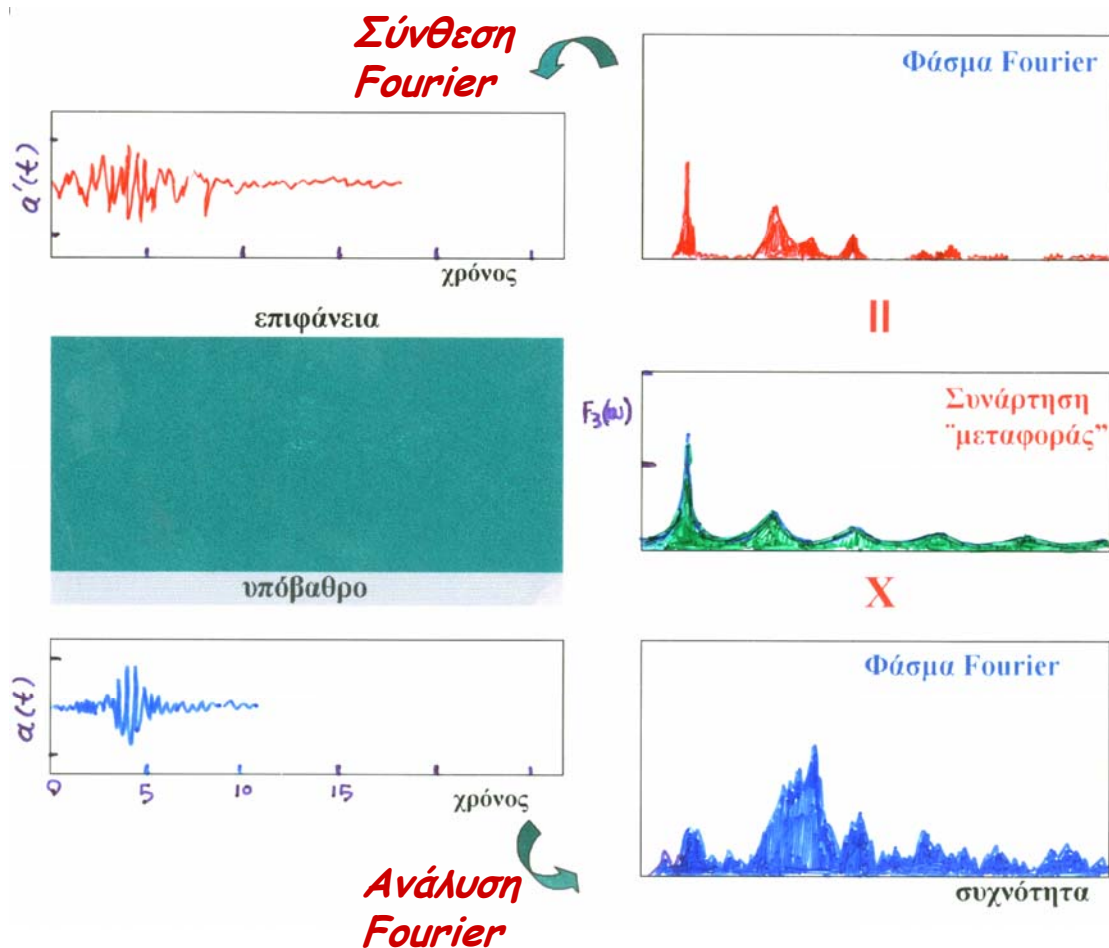


γεωλογία

πάχος εδάφους

Τυπικές καταγραφές σε
ΕΔΑΦΟΣ & ΒΡΑΧΟ

Μηχανισμός επίδρασης του ΕΔΑΦΟΥΣ



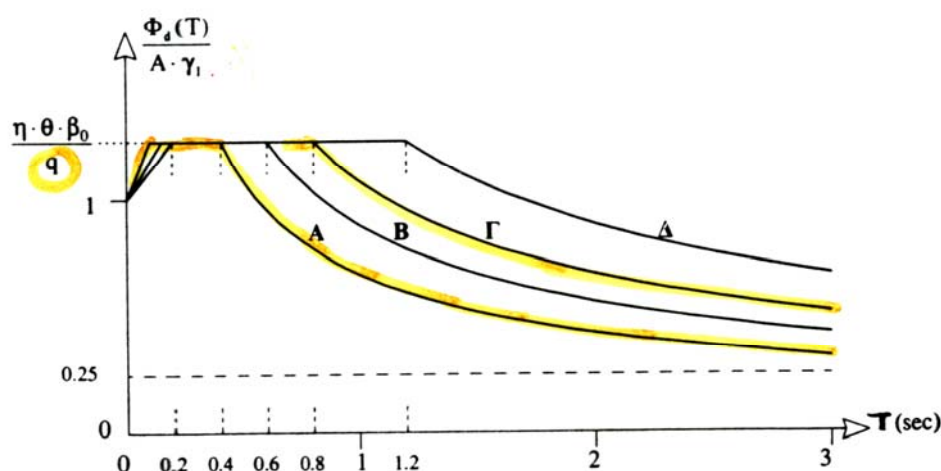
Μερικά (πρώτα) συμπεράσματα . . .

- A. Ο **συντελεστής εδαφικής ενίσχυσης** →
 - B. Παράγοντες που τον διαμορφώνουν →
 - Γ. Αφορά μόνον την μέγιστη επιτάχυνση
ή και το ελαστικό φάσμα απόκρισης; →
- (απαντήστε με βάση τα παραδείγματα που προηγήθηκαν)

Συχνά,

η επίδραση **ολίγων μέτρων μαλακού εδάφους**
είναι μεγαλύτερη από
την επίδραση **αρκετών χιλιομέτρων του στερεού φλοιού....**

επίδραση εδάφους και ο **EAK-2000**



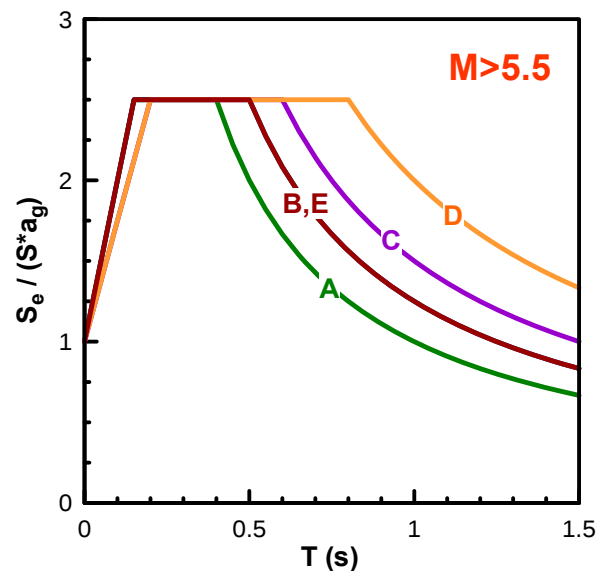
π.χ.

Κατηγορία B: Εντόνως αποσαθρωμένα βραχώδη ή εδάφη που από μηχανική άποψη μπορούν να εξομοιωθούν με κοκκώδη. Στρώσεις κοκκώδους υλικού μέσης πυκνότητας (και) πάχους μεγαλύτερου των 5μ, ή μεγάλης πυκνότητας (και) πάχους μεγαλύτερου των 70μ.

επίδραση εδάφους και ο EC-8

	Description	Parameters
A		
B		
C	Deep deposits of dense or medium-dense sand, gravel or stiff clay with thickness 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		

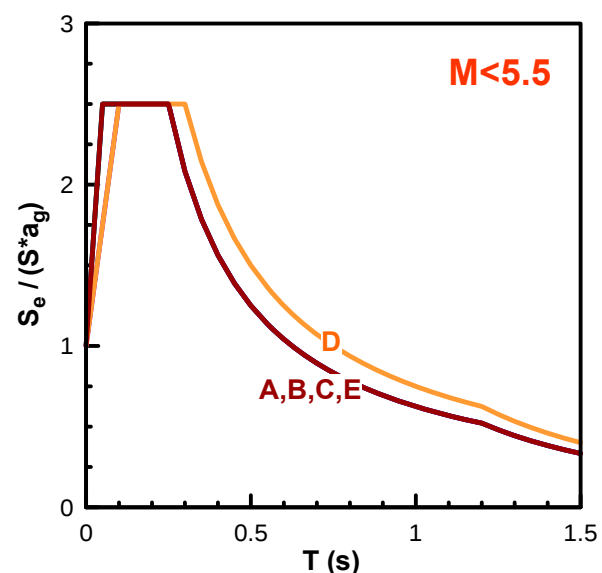
	S		T_B		T_C	
	M>5,5	M<5,5	M>5,5	M<5,5	M>5,5	M<5,5
A	1.0	1.0	0.15	0.05	0.4	0.25
B	1.2	1.35	0.15	0.05	0.5	0.25
C	1.15	1.5	0.20	0.10	0.6	0.25
D	1.35	1.8	0.20	0.10	0.8	0.30
E	1.4	1.6	0.15	0.05	0.5	0.25



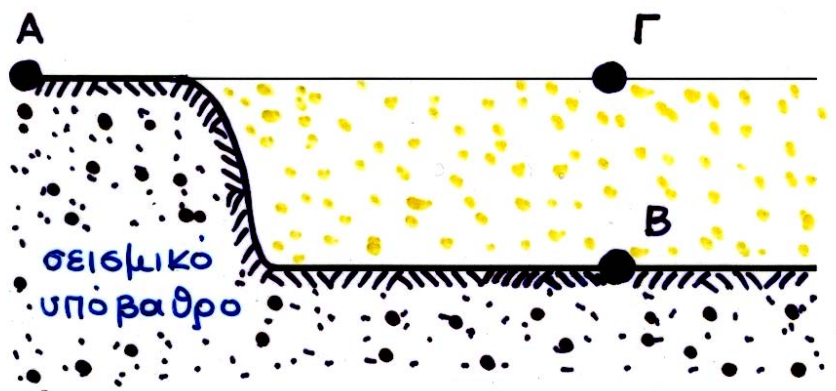
επίδραση εδάφους και ο EC - 8

	Description	Parameters
A		
B		
C	Deep deposits of dense or medium-dense sand, gravel or stiff clay with thickness 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



4.2 ΓΕΝΙΚΑ - ΟΡΙΣΜΟΙ



Η επίδραση του εδάφους εκφράζεται ως ο λόγος (ή το φάσμα) μεταφοράς της σεισμικής κίνησης, από το σεισμικό υπόβαθρο στην ελεύθερη επιφάνεια του εδάφους.

Δηλαδή:

κίνηση στο σημείο Γ

κίνηση στο σημείο B

ή (συνηθέστερα)

κίνηση στο σημείο Γ

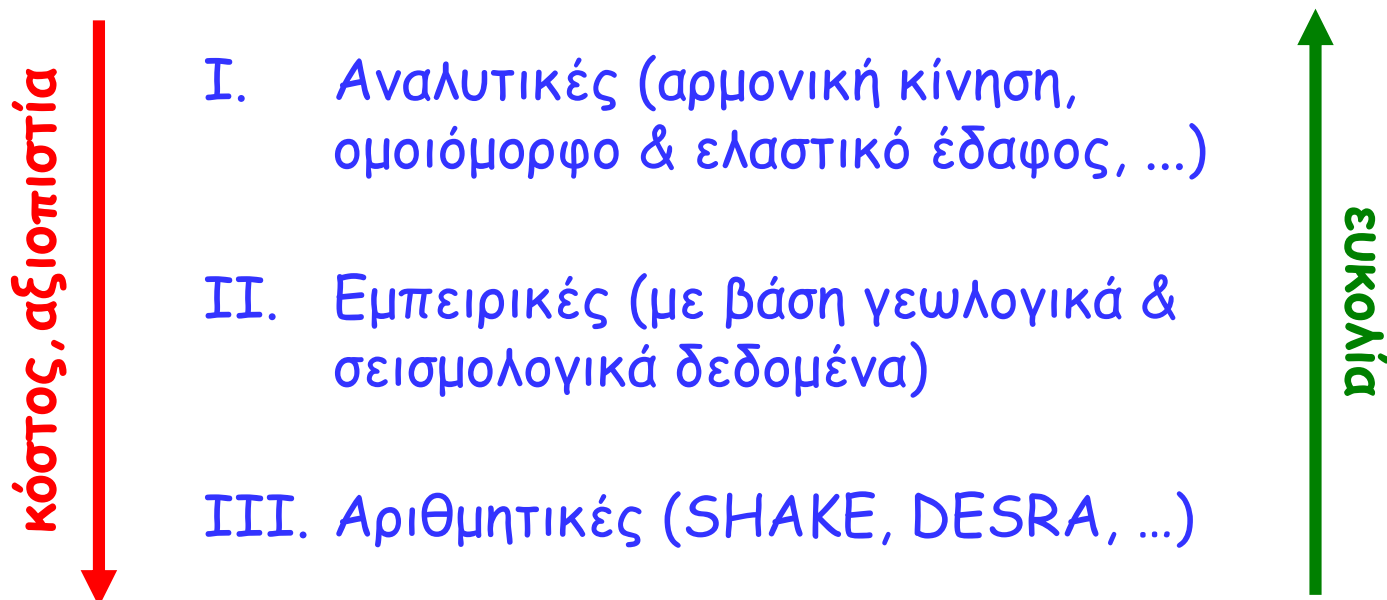
κίνηση στο σημείο A

Παρένθεση: Τι είναι το «**σεισμικό υπόβαθρο**»;

Οι γνώμες στο θέμα αυτό γενικά διίστανται. Συμβατικά, ως σεισμικό υπόβαθρο χαρακτηρίζονται γεωλογικοί σχηματισμοί με ταχύτητα μετάδοσης διατμητικών κυμάτων $V_s \geq 750 \text{ m/s}$. Ένας τέτοιος μονοσήμαντος ορισμός δεν είναι όμως πάντοτε σωστός. Στην πραγματικότητα, σεισμικό υπόβαθρο είναι ο σχηματισμός στην ελεύθερη επιφάνεια του οποίου αναφέρεται η σεισμική διέγερση.

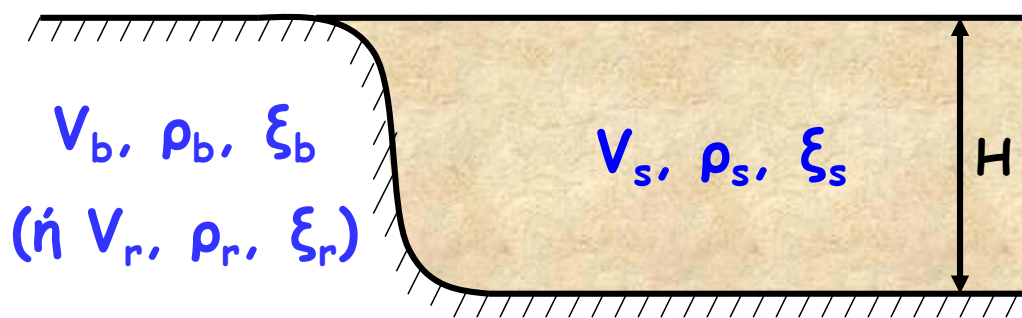
Για τα ελληνικά δεδομένα, όπου τα σεισμολογικά δεδομένα για «βράχο» έχουν προέλθει από καταγραφές στην ελεύθερη επιφάνεια στιφρών και συνεκτικών εδαφών και βράχων (βλ. κατηγορία εδάφους A στον ΝΕΑΚ) τον ρόλο του σεισμικού υποβάθρου παίζουν συνήθως οι Νεογενείς ή παλαιότεροι γεωλογικοί σχηματισμοί ή ακόμη και τα μέτρια έως καλά συγκολλημένα κροκαλοπαγή όταν δεν εναλλάσσονται με πρόσφατες εδαφικές αποθέσεις.

Για την ανάλυση-πρόβλεψη της εδαφικής επίδρασης είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν τρεις (3) κατηγορίες μεθόδων



4.3 ΑΝΑΛΥΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ

- Ομοιόμορφο ελαστικό έδαφος επί ακάμπτου υποβάθρου
- Ομοιόμορφο ισώδο-ελαστικό έδαφος επί ακάμπτου υποβάθρου
- Ομοιόμορφο ισώδο-ελαστικό έδαφος επί ευκάμπτου υποβάθρου
- Ανομοιόμορφο ισώδο-ελαστικό έδαφος επί ευκάμπτου υποβάθρου



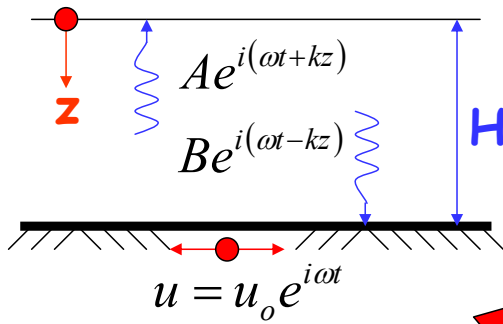
Ορισμοί για ελαστικό έδαφος ($\xi=0$) :

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

$$T_s = \frac{4H}{V_s}, T_b \text{ ή } T_r = \frac{4H}{V_b}$$

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

Ελαστικό έδαφος επί ΑΚΑΜΠΤΟΥ υποβάθρου



$$u = A e^{i(\omega t + kz)} + B e^{i(\omega t - kz)}$$

Συνοριακή συνθήκη : $\tau_{z=0} = 0$

$$G \frac{\partial u}{\partial z} \Big|_{z=0} = 0 \Rightarrow Gik [A e^{i(\omega t + kz)} + B e^{i(\omega t - kz)}] = 0$$

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

άρα : $u = 2A e^{i\omega t} \frac{e^{ikz} + e^{-ikz}}{2} = 2A e^{i\omega t} \cos kz$

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

άρα $u_o = 2A \cot kH$ ή $A = \frac{u_o}{2 \cos kH}$

τελικώς: **στάσιμο κύμα εύρους**

$$\bar{u}_o = 2A \cos kz = u_o \frac{\cos kz}{\cos kH}$$

**Συντελεστής
ενίσχυσης:**

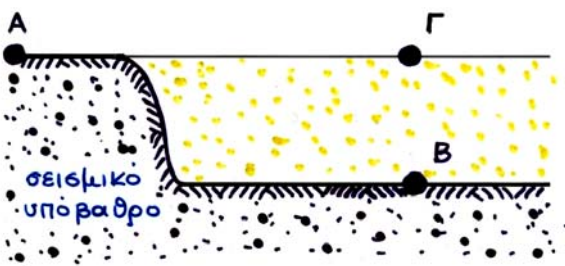
$$F_1(\omega) = \frac{\text{κίνηση } \Gamma}{\text{κίνηση } B} = \frac{1}{\cos kH} = \dots \frac{1}{\cos \left(\frac{\pi}{2} \frac{T_{soil}}{T_{exc.}} \right)}$$

συντονισμός:

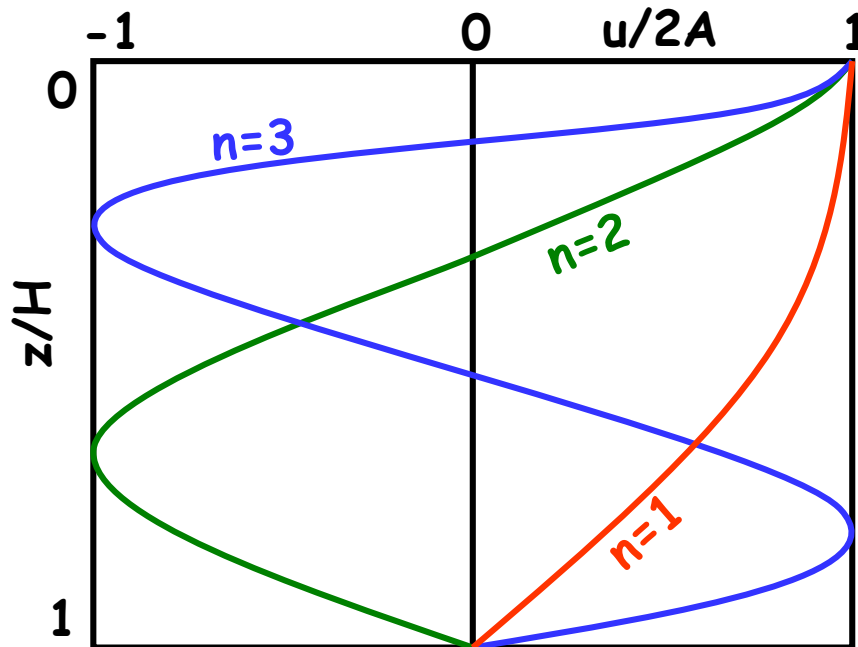
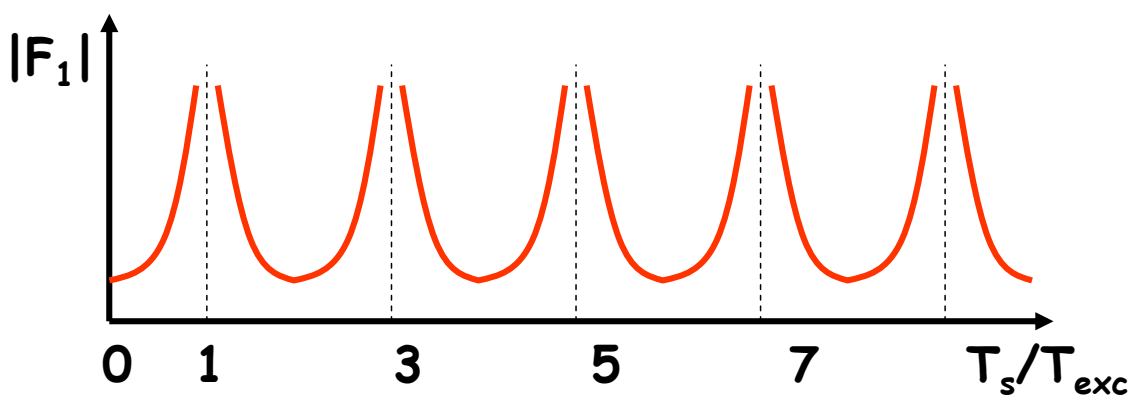
$$\frac{T_{soil}}{T_{exc}} = 2n - 1, \quad n = 1, 2, \dots$$

ιδιομορφές:

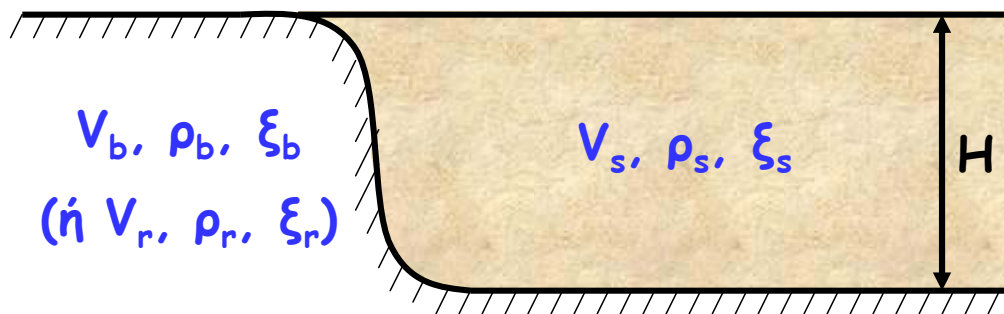
$$\frac{u}{2A} = \cos \left[\frac{\pi}{2} (2n - 1) \frac{z}{H} \right]$$



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



Ιξωδο-ελαστικό έδαφος επί ΑΚΑΜΠΤΟΥ υποβάθρου



**Ορισμοί για ελαστικό
έδαφος ($\xi=0$)**

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

$$T_s = \frac{4H}{V_s}, T_b \text{ ή } T_r = \frac{4H}{V_b}$$

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

**Ορισμοί για ιξώδο-ελαστικό
έδαφος ($\xi \neq 0$)**

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

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

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

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

Ισχύουν οι προηγούμενες σχέσεις αρκεί οι **πραγματικές** παράμετροι του εδάφους να αντικατασταθούν με τις αντίστοιχες **μιγαδικές**.

**συντελεστής
ενίσχυσης**

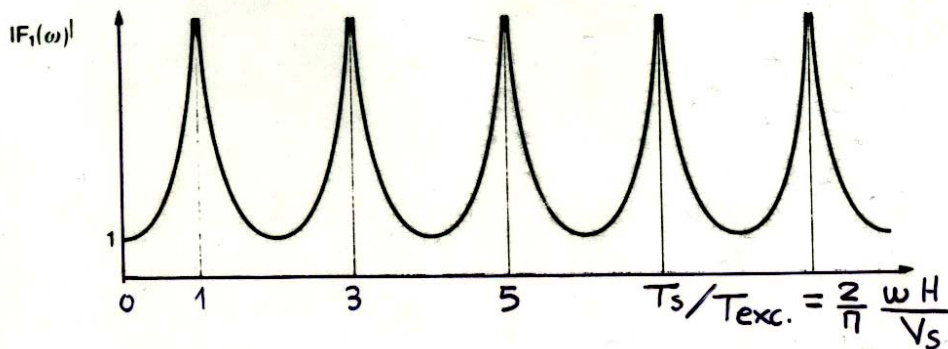
$$F_2(\omega) = \frac{1}{\cos k^* H} \cong \frac{1}{\cos[kH(1-i\xi)]} = \frac{1}{\cos(kH - i\xi kH)}$$

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

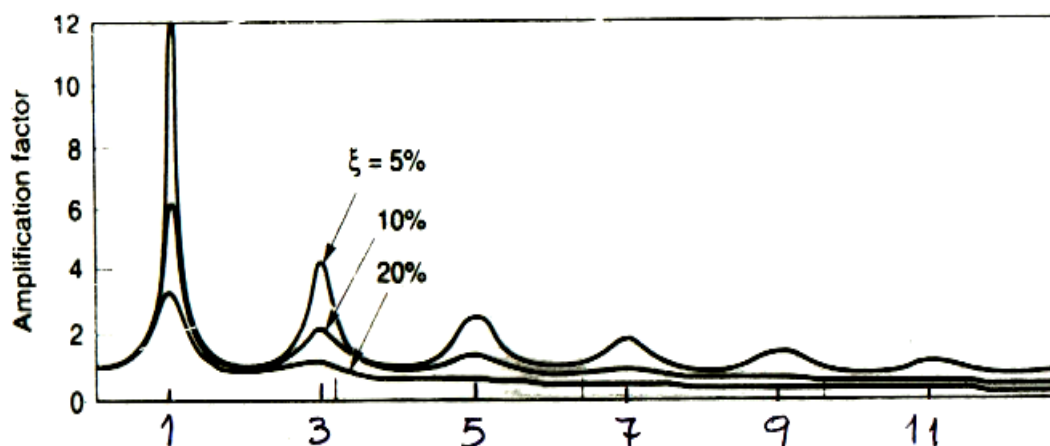
$$|F_2(\omega)| \approx \frac{1}{\sqrt{\cos^2 kH + (kH\xi)^2}} \quad \text{όπου } \kappa = \omega / V_s$$

$$\max |F_2(\omega)| = \frac{2}{(2n-1)\pi} \frac{1}{\xi} \quad \text{όταν } kH \approx (2n-1)\frac{\pi}{2}$$

$$\text{ή } \frac{T_{soil}}{T_{exc}} = 2n-1$$



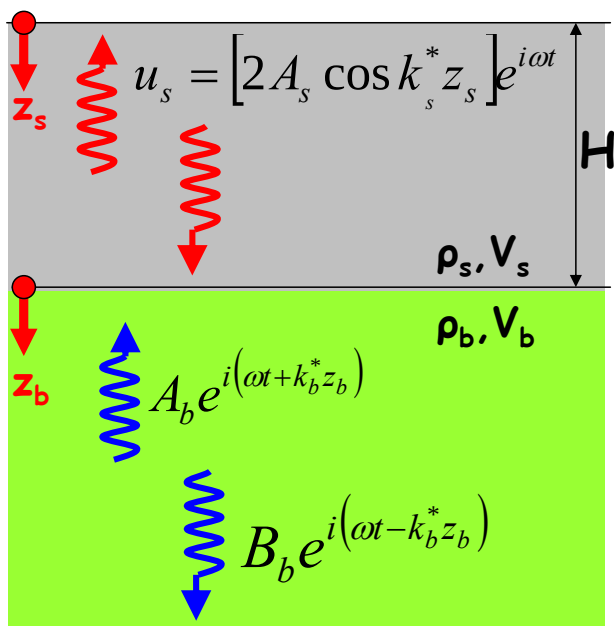
**ελαστικό
έδαφος επί
ΑΚΑΜΠΤΟΥ
βράχου**



**ιξωδο-
ελαστικό
έδαφος επί
ΑΚΑΜΠΤΟΥ
βράχου**

Ομοιόμορφο ιξωδο-ελαστικό έδαφος επί

ΕΥΚΑΜΠΤΟΥ υποβάθρου



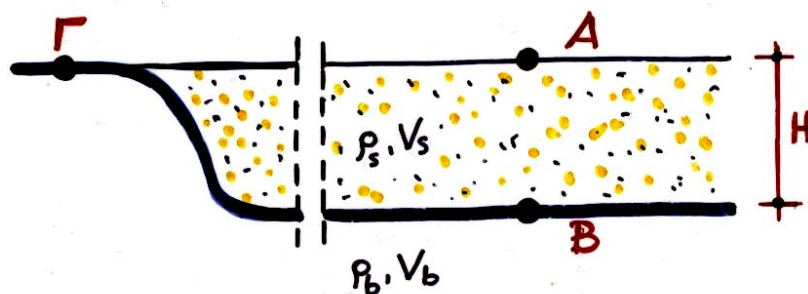
Συνοριακές συνθήκες:

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

$$z_b = 0, z_s = H : u_s(H) = u_b(0) \text{ \& } G_s \frac{\partial u_s}{\partial z_s} = G_b \frac{\partial u_b}{\partial z_b}$$

$$\Rightarrow \begin{cases} A_b = \frac{1}{2} A_s \left[(1 + a^*) e^{ik_s^* H} + (1 - a^*) e^{-ik_s^* H} \right] \\ B_b = \frac{1}{2} A_s \left[(1 - a^*) e^{ik_s^* H} + (1 + a^*) e^{-ik_s^* H} \right] \end{cases}$$

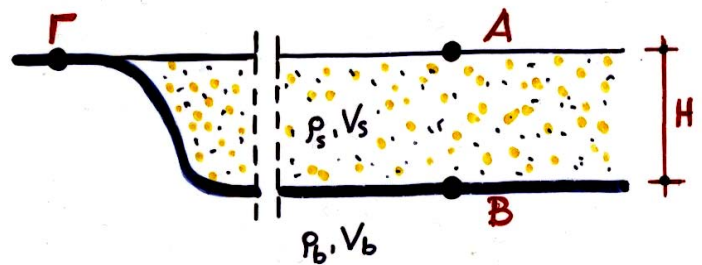
$$a^* = \frac{\rho_s V_s^*}{\rho_b V_b^*} = \frac{\rho_s V_s}{\rho_b V_b} \frac{1 + i\xi_s}{1 + i\xi_b} = a \frac{1 + i\xi_s}{1 + i\xi_b}$$



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

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

Στην πράξη, όμως,
ενδιαφέρει κυρίως ο λόγος
 U_A/U_Γ :



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

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

όπου

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

$$a_s = \frac{\rho_s V_s}{\rho_b V_b}$$

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

$$|F_4(\omega)| = \frac{1}{[\cos^2(k_s H) + (\bar{\xi}_s k_s H)^2]^{1/2}} = |F_3(\omega)|$$

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

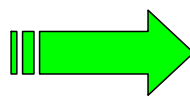
όπου :

$$\bar{\xi}_s = \xi_s + \frac{2}{\pi} a_s \frac{T_{exc.}}{T_s}, \quad a_s = \frac{\rho_s V_s}{\rho_b V_b}$$

Σημαντικές παράμετροι:

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

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



$$T_s / T_{exc}$$

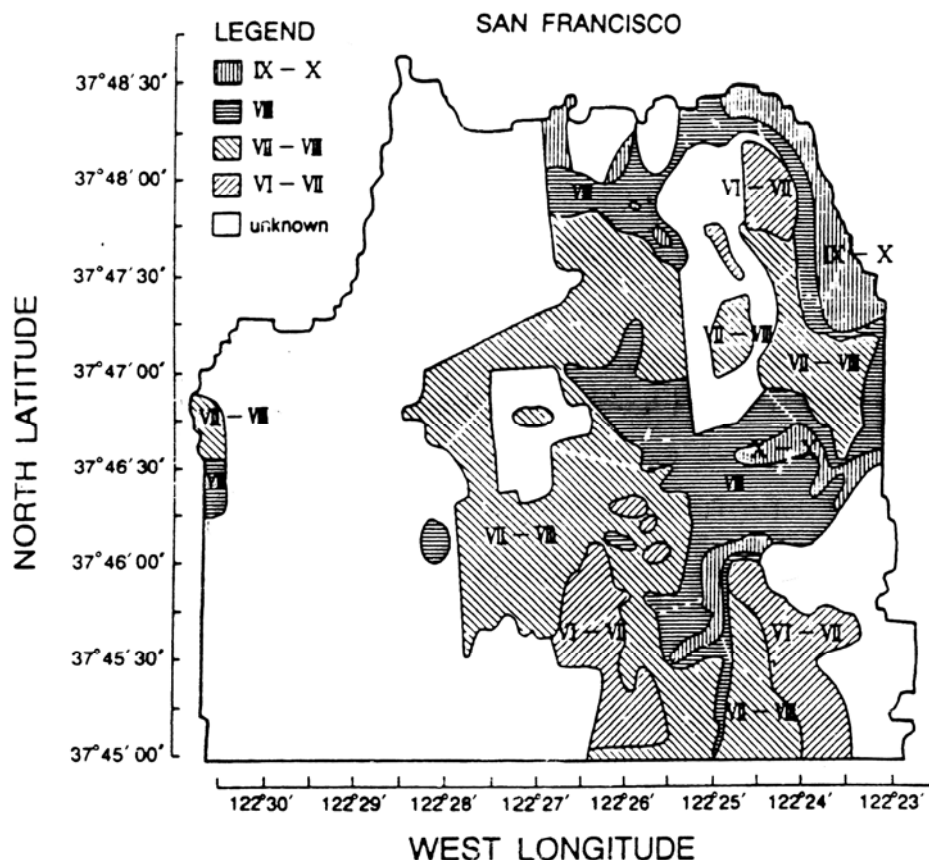
$$\xi_s$$

$$a_s = \frac{\rho_s V_s}{\rho_b V_b} \approx \frac{T_b}{T_s} \quad (\text{ή} \quad \frac{T_b}{T_{exc}})$$

4.4 ΕΜΠΕΙΡΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ

- Ανάλυση βλαβών από παλαιούς σεισμούς
- Συσχετισμοί με την (επιφανειακή) Γεωλογία
- Σχέσεις εξασθένισης a_{max} , V_{max} ,
- Συσχέτιση με την ταχύτητα C_s
- Αντισεισμικοί Κανονισμοί
- Εμπειρικές σχέσεις (βλ. Παράρτημα Α)

Ανάλυση βλαβών από παλαιούς σεισμούς: Χάρτης ισόσειστων του San Francisco από τον σεισμό του 1906



Συσχετισμοί με την (επιφανειακή) Γεωλογία: Συντελεστές μέσης φασματικής ενίσχυσης

Geological unit	Relative amplification factor
<u>Borcherdt and Gibbs (1976)</u>	
Bay mud	11.2
Alluvium	3.9
Santa Clara Formation	2.7
Great Valley sequence	2.3
Franciscan Formation	1.6
Granite	1.0
<u>Shima (1978)</u>	
Peat	1.6
Humus soil	1.4
Clay	1.3
Loam	1.0
Sand	0.9
<u>Midonikawa (1987)</u>	
Holocene	3.0
Pleistocene	2.1
Quaternary volcanic rocks	1.6
Miocene	1.5
Pre-Tertiary	1.0

Σχέσεις εξασθένισης
 $a_{max}, V_{max}, \dots$

π.χ. Sabetta & Pugliese (1987)

$$\log a_{max} = 0.31 M_s - \log \sqrt{R^2 + 5.8^2} + 0.17 S - 1.56$$

$$\log V_{max} = 0.46 M_s - \log \sqrt{R^2 + 3.6^2} + 0.13 S - 0.71$$

$$S = \begin{cases} 0 & \text{για "ΒΡΑΧΟ"} \\ 1 & \text{για "ΕΔΑΦΟΣ"} \end{cases}$$

$$\frac{a_{max}^{ΕΔ.}}{a_{max}^{ΒΡ.}} = 10^{0.17} = 1.50$$

$$\frac{V_{max}^{ΕΔ.}}{V_{max}^{ΒΡ.}} = 10^{0.13} = 1.35$$

Παρατήρηση: Οι εμπειρικές σχέσεις εκτίμησης της εδαφικής ενίσχυσης του σεισμικού κραδασμού είναι εν γένει μειωμένης ακρίβειας, και δεν θα πρέπει να χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές Μηχανικού. Εξαίρεση αποτελούν οι Αντισεισμικοί Κανονισμοί και οι εμπειρικές σχέσεις του Παραρτήματος Α που μπορούν να χρησιμοποιούνται για συνήθη έργα ή για προκαταρκτικούς υπολογισμούς.

Δηλαδή....

- Ανάλυση βλαβών από ~~παλαιούς~~ σεισμούς
- Συσχετισμοί με την ~~(επιφανειακή)~~ Γεωλογία
- Σχέσεις εξασθένισης ~~a_{max} , V_{max} ,~~
- Συσχέτιση με την ~~τάχυνση~~ C_s
- Αντισεισμικοί Κανονισμοί ✓
- Εμπειρικές σχέσεις (βλ. Παράρτημα Α) ✓

4.5 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ

Είναι οι πλέον αξιόπιστες, και για τον λόγο αυτό χρησιμοποιούνται πολύ συχνά (πλέον) στην πράξη. Λαμβάνουν συστηματικά υπόψη την ανομοιομορφία του εδάφους, την μη-αρμονική μορφή της σεισμικής διέγερσης, καθώς και την μη γραμμική συμπεριφορά του εδάφους υπό δυναμική φόρτιση.

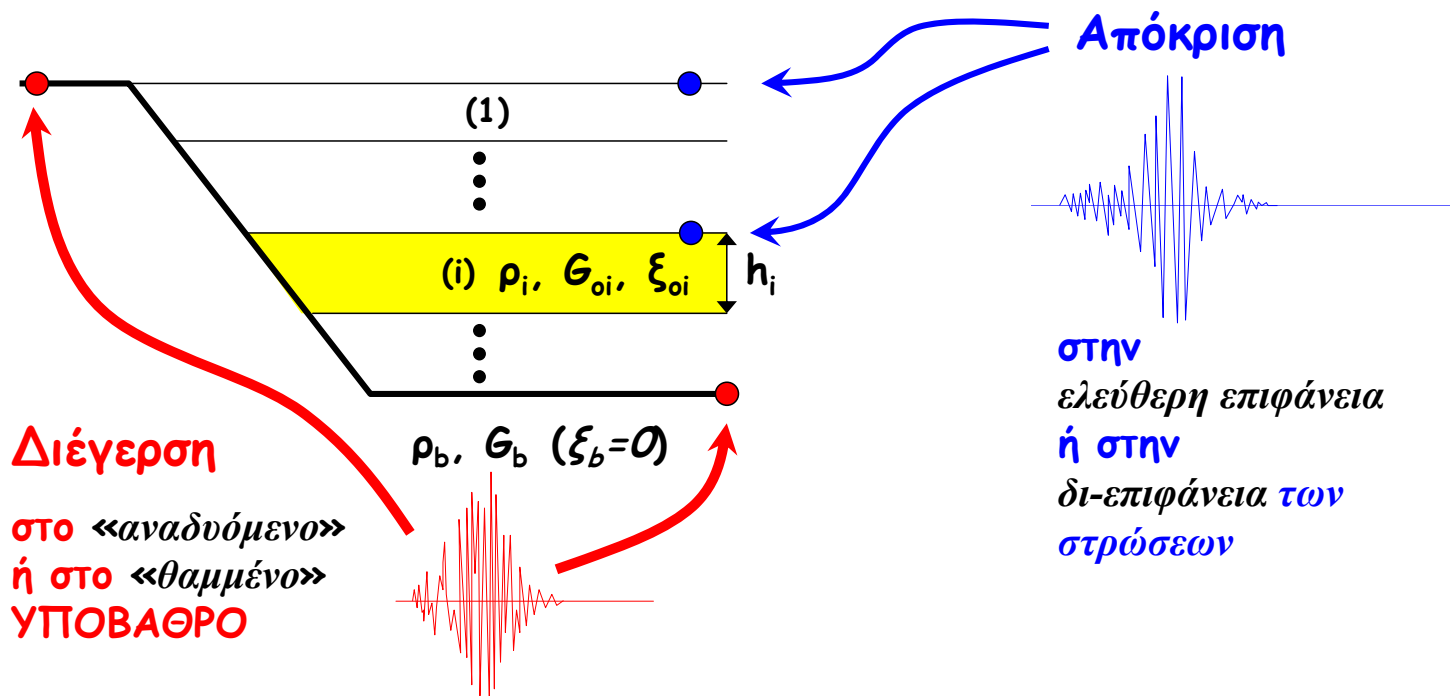
Διακρίνονται σε δύο κατηγορίες:

✚ **ΙΣΟΔΥΝΑΜΕΣ ΓΡΑΜΜΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ**
(ή *FREQUENCY DOMAIN ANALYSES*)

✚ **ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ**
(ή *TIME DOMAIN ANALYSES*)

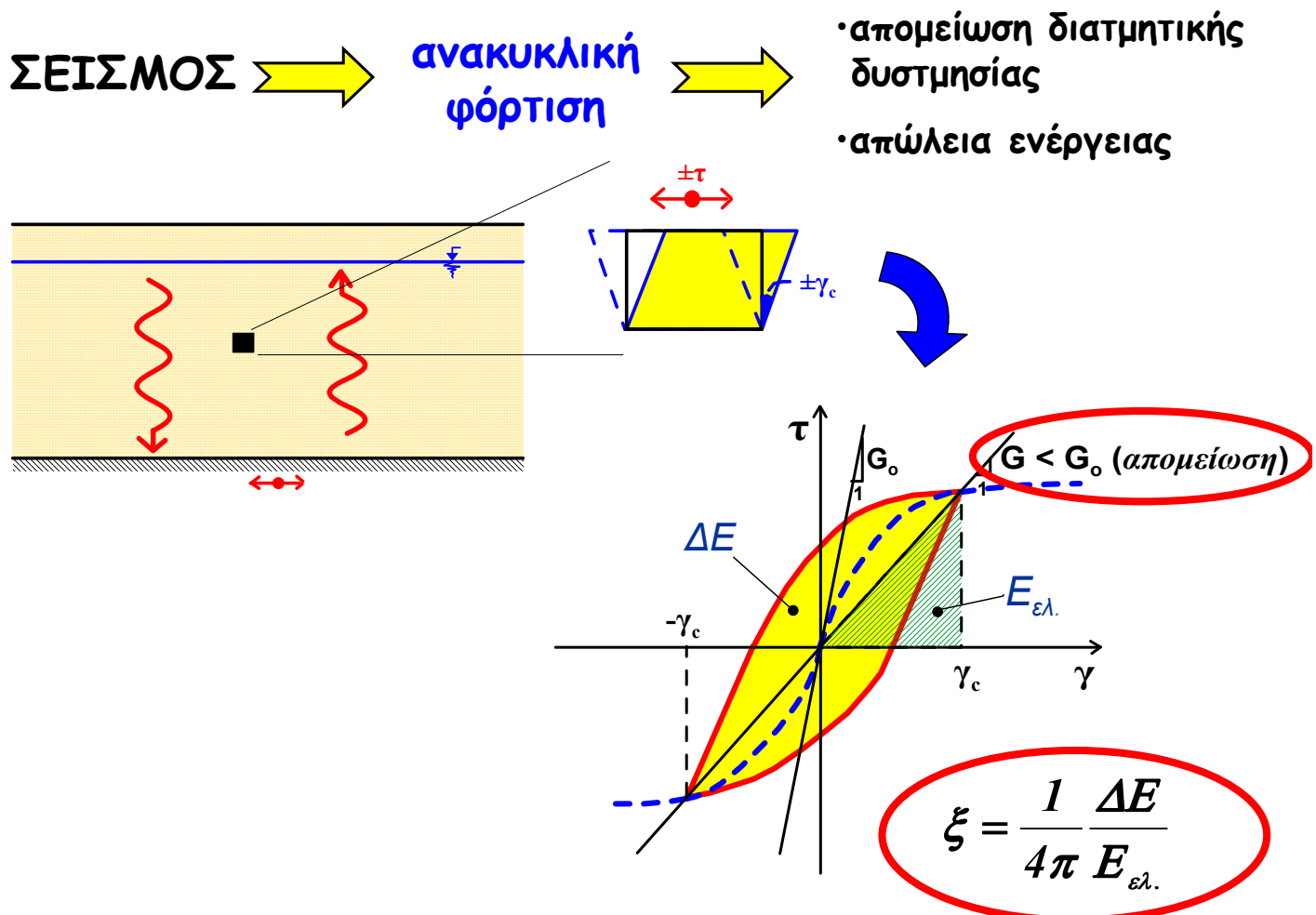
(Α) ΙΣΟΔΥΝΑΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

(ή ανάλυση κατά συχνότητα, ή ανάλυση τύπου SHAKE, ή complex response method in the frequency domain)



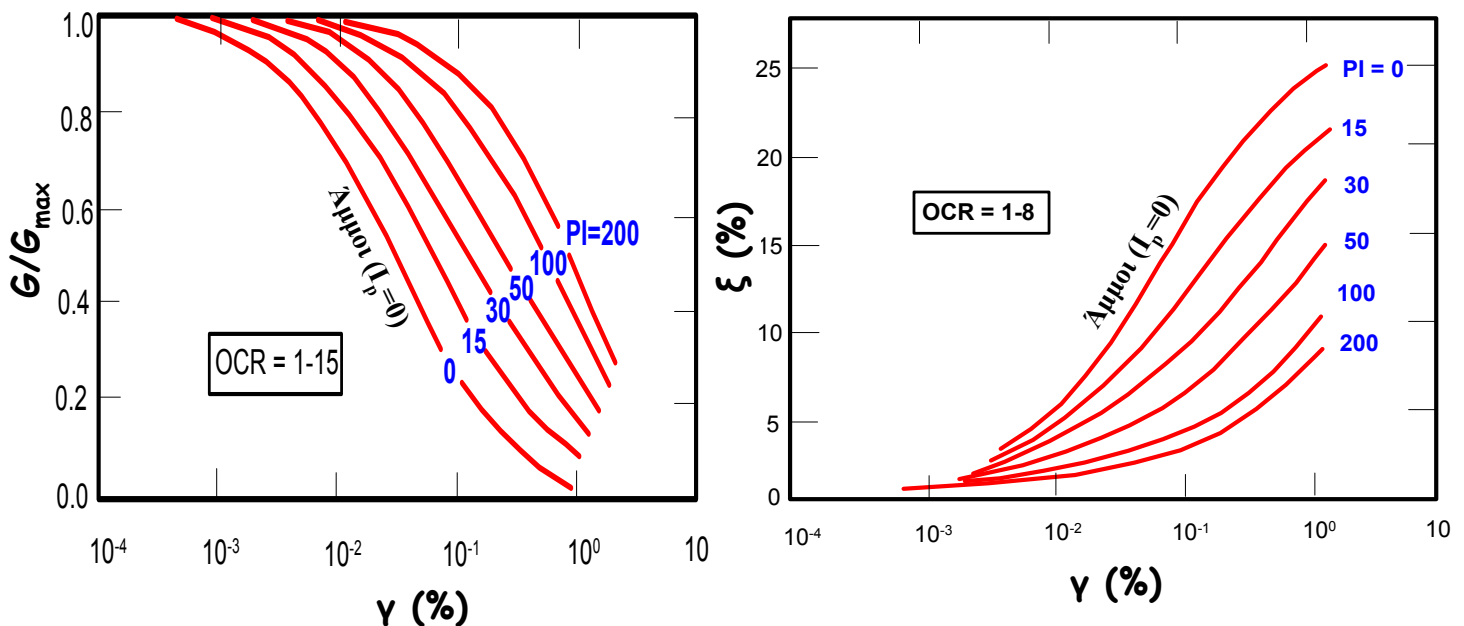
Τα βασικά δεδομένα περιλαμβάνουν:

- Την χρονοϊστορία της (επιτάχυνσης) διέγερσης.
- Το ελαστικό μέτρο διάτμησης $G_{o,b}$ και την πυκνότητα μάζας ρ_b του σεισμικού υποβάθρου
- Το βάθος (από την ελεύθερη επιφάνεια) και το πάχος κάθε εδαφικής στρώσης i
- Το αντίστοιχο ελαστικό μέτρο διάτμησης $G_{o,i}$ και η πυκνότητα μάζας ρ_i
- Τις καμπύλες μεταβολής του μέτρου διάτμησης και του λόγου υστερικής απόσβεσης με το εύρος της επιβαλλόμενης διατμητικής παραμόρφωσης (G/G_o - γ και ξ - γ)



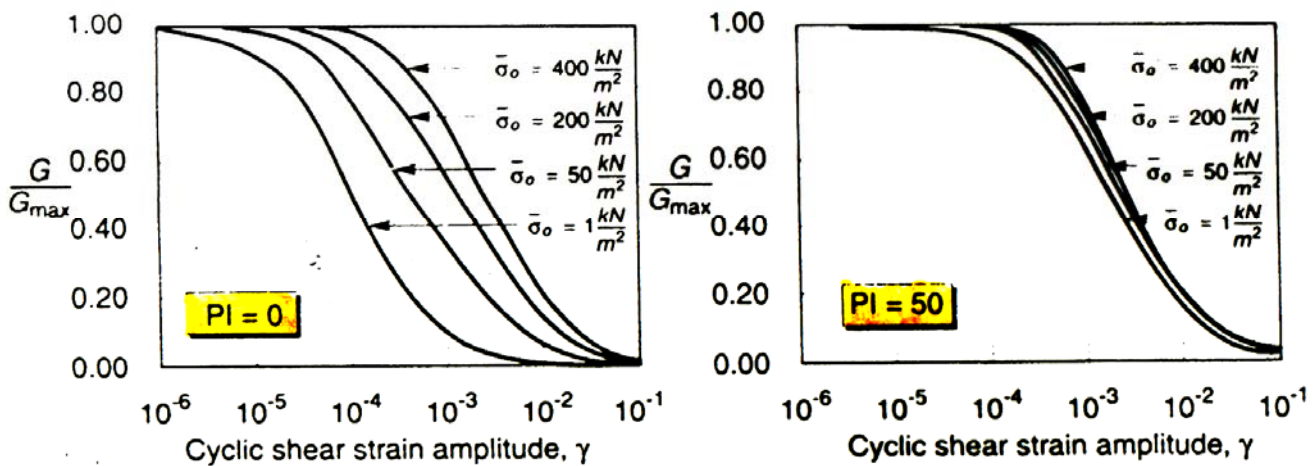
Προσομοίωση της μη-γραμμικής συμπεριφοράς του εδάφους με βάση πειραματικές μετρήσεις

Επίδραση τύπου εδάφους (μέσω του I_p ή PI)



(Vucetic & Dobry, 1991)

επιπλέον, επίδραση τάσης στερεοποίησης (κυρίως για άμμους)



(Ishibashi 1992)

$$\frac{G}{G_{max}} = K(\gamma, PI) \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_o} \right)^{m(\gamma, PI) - m_o}$$

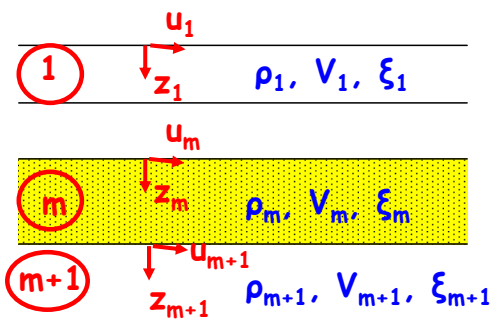
$$K(\gamma, PI) = 0.5 \left\{ 1 + \tanh \left[\ln \left(\frac{0.000102 + n(PI)}{\gamma} \right)^{0.492} \right] \right\}$$

$$m(\gamma, PI) - m_o = 0.272 \left\{ 1 - \tanh \left[\ln \left(\frac{0.000556}{\gamma} \right)^{0.4} \right] \right\} \exp(-0.0145 PI^{1.3})$$

$$n(PI) = \begin{cases} 0.0 & \text{για } PI = 0 \\ 3.37 \times 10^{-6} PI^{1.404} & \text{για } 0 < PI \leq 15 \\ 7.0 \times 10^{-7} PI^{1.976} & \text{για } 15 < PI \leq 70 \\ 2.7 \times 10^{-5} PI^{1.115} & \text{για } PI > 70 \end{cases}$$

Η μέθοδος της ΙΣΟΔΥΝΑΜΗΣ ΓΡΑΜΜΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ στηρίζεται στην αναλυτική λύση για...

ΑΝΟΜΟΙΟΜΟΡΦΟ βίσκο-ελαστικό έδαφος επί ευκάμπτου βράχου



κίνηση στο στρώμα m

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

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



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 $z_m=h_m$:

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

Συνοριακές συνθήκες στην ελεύθερη επιφάνεια

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

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

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

Συνοριακές συνθήκες μεταξύ στρωμάτων

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

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

Τελικώς δε

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

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

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

Σταδιακή εφαρμογή από την ελεύθερη επιφάνεια ($i=1$) προς τα κάτω ($i=m$)

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

ή
συνοπτικά

$$\begin{aligned} A_2 &= a_1(k_1^* h_1) A_1 \\ B_2 &= \beta_1(k_1^* h_1) A_1 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \textcircled{i=2} \quad A_3 &= \frac{1}{2} A_2 (1 + a_2^*) e^{ik_2^* h_2} + \frac{1}{2} B_2 (1 - a_2^*) e^{-ik_2^* h_2} \\ &= A_1 \left[\frac{1}{2} a_1 (1 + a_2^*) e^{ik_2^* h_2} + \frac{1}{2} \beta_1 (1 - a_2^*) e^{-ik_2^* h_2} \right] \\ B_3 &= A_1 \left[\frac{1}{2} a_1 (1 - a_2^*) e^{ik_2^* h_2} + \frac{1}{2} \beta_1 (1 + a_2^*) e^{-ik_2^* h_2} \right] \end{aligned}$$

ή
συνοπτικά

$$\begin{aligned} A_3 &= a_2(k_1^* h_1, k_2^* h_2) A_1 \\ B_3 &= \beta_2(k_1^* h_1, k_2^* h_2) A_1 \end{aligned}$$

$$\textcircled{i=m} \quad \Rightarrow \quad \begin{aligned} A_m &= A_1 a_{m-1}(k_1^* h_1, k_2^* h_2, \dots, k_m^* h_m) \\ B_m &= A_1 \beta_{m-1}(k_1^* h_1, k_2^* h_2, \dots, k_m^* h_m) \end{aligned}$$

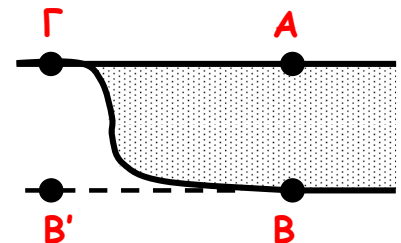
Στην περίπτωση αυτή, και λαμβάνοντας υπόψη ότι $A_1 = B_1$:

$$|F_3(\omega)| = \left| \frac{u_A}{u_B} \right| = \left| \frac{A_I + B_I}{A_m + B_m} \right| = \left| \frac{2}{a_{m-1} + \beta_{m-1}} \right|$$

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

$$|F_4(\omega)| = |F_3(\omega)| / \sqrt{\cos^2(k_b H) + (\xi_b k_b H)^2}$$

$$\boxed{(u_B = u_{B'})}$$



Μεθοδολογία επίλυσης

Βήμα 1ο: Ανάλυση της διέγερσης σε άθροισμα αρμονικών συνιστωσών κατά Fourier

Βήμα 2ο: $G_1 = G_{o,1}$ και $\xi_1 = \xi_o$

Βήμα 3ο: Εκτίμηση των συναρτήσεων μεταφοράς $F_{i,j}$ για όλα τα στρώματα εδάφους και όλες τις αρμονικές συνιστώσες της διέγερσης

Βήμα 4ο: Εκτίμηση της αρμονικής απόκρισης του εδάφους για κάθε αρμονική συνιστώσα της διέγερσης

Βήμα 5ο: Αντίστροφος μετασχηματισμός Fourier των αρμονικών συνιστωσών της απόκρισης του εδάφους για τον υπολογισμό της συνισταμένης απόκρισης του εδάφους

Βήμα 6ο: Εκτίμηση του μέγιστου εύρους διατμητικής παραμόρφωσης $\gamma_{\max}$ στο μέσον κάθε στρώσης εδάφους

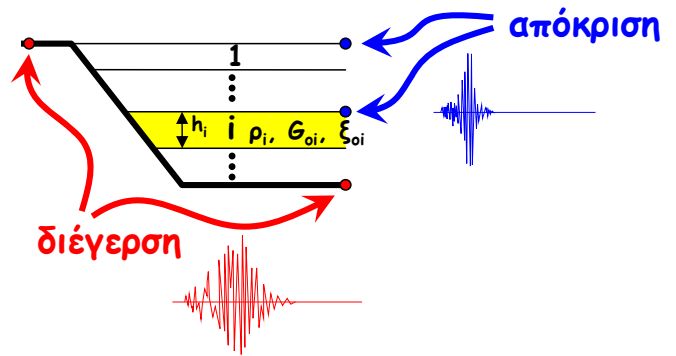
Βήμα 7ο: Προσδιορισμός των συμβατών προς τα $2/3 \gamma_{\max}$ τιμών του μέτρου διάτμησης G και του λόγου υστερητικής απόσβεσης ξ

(B) ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

(ή ανάλυση με χρονική ολοκλήρωση, ή time domain analysis)

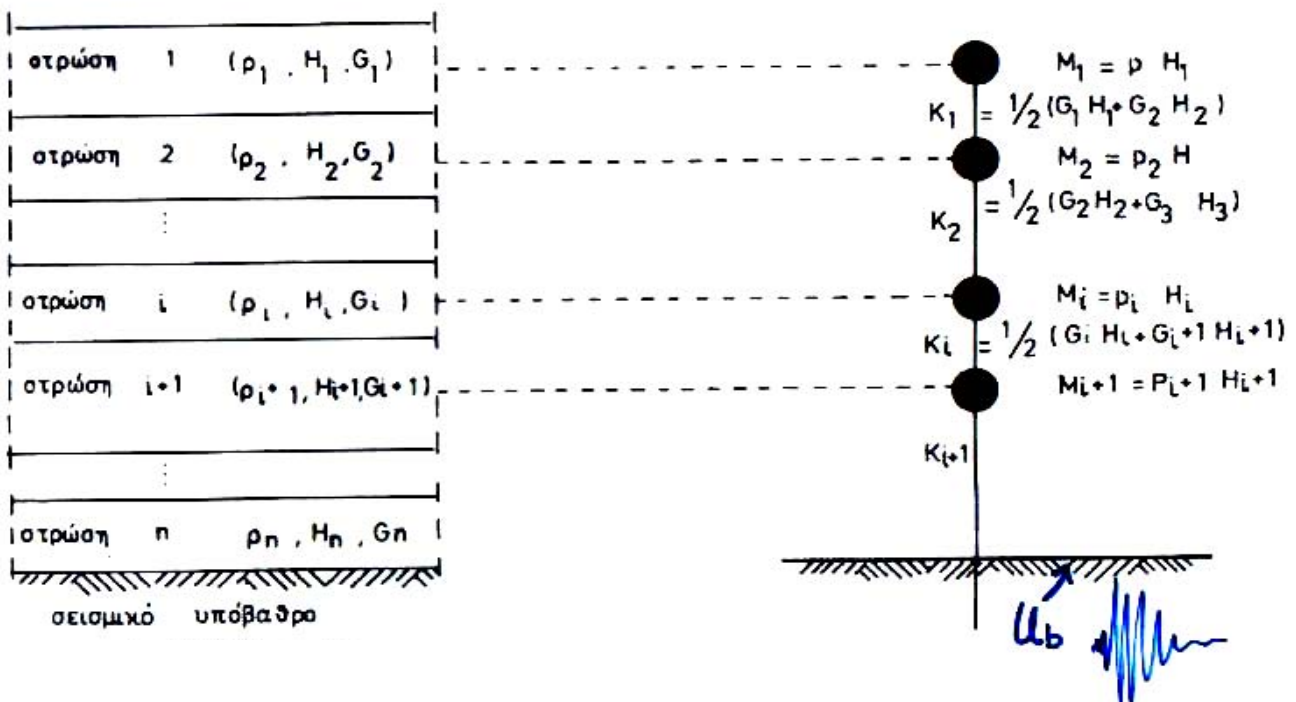
Τα βασικά δεδομένα περιλαμβάνουν:

- Την χρονο-ιστορία της (επιτάχυνσης) διέγερσης
- Το ελαστικό μέτρο διάτμησης $G_{o,b}$ και την πυκνότητα μάζας ρ_b του σεισμικού υποβάθρου
- Το βάθος και το πάχος κάθε εδαφικής στρώσης i
- Το αντίστοιχο ελαστικό μέτρο διάτμησης $G_{o,i}$ και την πυκνότητα μάζας ρ_i

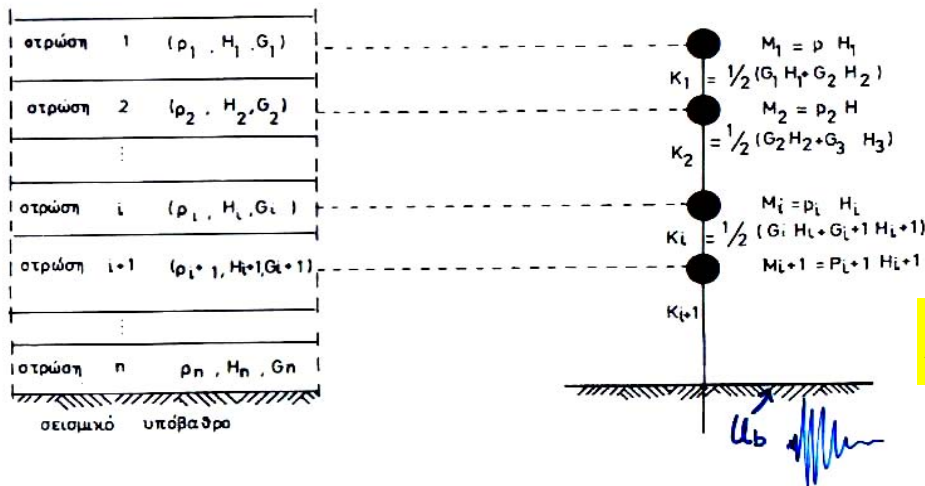


• Τις σχέσεις διατμητικής τάσης - διατμητικής παραμόρφωσης (τ-γ) για μονοτονική και ανακυκλική φόρτιση (φόρτιση, αποφόρτιση και επαναφόρτιση)

Προσομοίωση μίας εδαφικής απόθεσης με σύστημα συγκεντρωμένων μαζών και ιξωδο-ελαστικών ελατηρίων



Προσομοίωση μίας εδαφικής απόθεσης με σύστημα συγκεντρωμένων μαζών και ιξωδο-ελαστικών ελατηρίων



$$M\ddot{U} + KU = -M\ddot{U}_b$$

όπου $M = \begin{bmatrix} M_1 & & & \\ & M_2 & & \\ & & \ddots & \\ & & & M_n \end{bmatrix}$ και $K = \begin{bmatrix} K_1 & -K_1 & 0 & 0 \\ -K_1 & K_1 + K_2 & -K_2 & 0 \\ 0 & -K_2 & K_2 + K_3 & -K_3 \\ 0 & 0 & -K_3 & \ddots \end{bmatrix}$

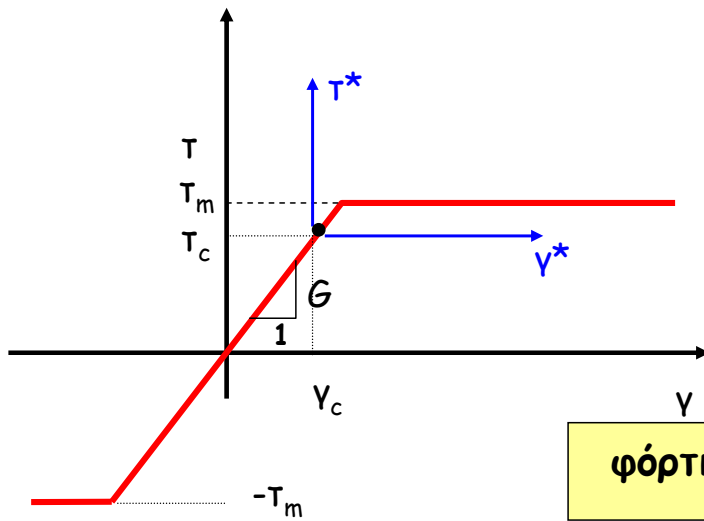
Δεδομένου ότι η $G=f$ (τ ή γ) τότε και $K=f(U)$. Δηλαδή πρόκειται για μία μη γραμμική διαφορική εξίσωση, η επίλυση της οποίας θα πρέπει να γίνει σε μικρά χρονικά βήματα (αρκετά μικρά ώστε να εξασφαλίζεται η σύγκλιση).

Η επίλυση της ανωτέρω διαφορικής εξίσωσης γίνεται με «εν-χρόνω» ολοκλήρωση, για δεδομένες αρχικές συνθήκες και δεδομένη χρονική μεταβολή της διέγερσης (μετατόπιση) στην βάση U_b .

Ανεξαρτήτως αλγορίθμου επίλυσης, θα πρέπει απαραίτητα να ορισθεί η σχέση διατμητικών τάσεων-παραμορφώσεων (τ-γ) που διέπει την δυναμική απόκριση (φόρτιση-αποφόρτιση-επαναφόρτιση) των διάφορων εδαφικών στρώσεων.

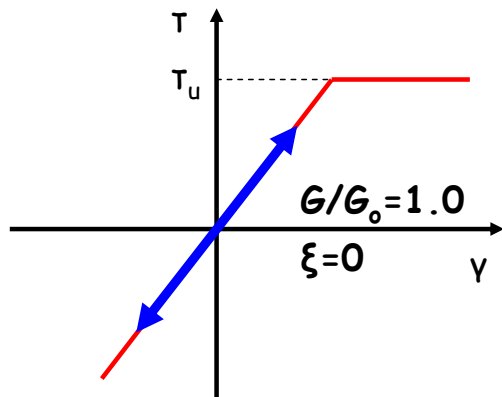
Στην πραγματικότητα η ακρίβεια των αριθμητικών προβλέψεων εξαρτάται κατά κύριο λόγο από την σχέση τ-γ που έχει υιοθετηθεί, κάτι που οι περισσότεροι χρήστες αγνοούν ή παραβλέπουν.

(α) Ελαστικό - απολύτως πλαστικό

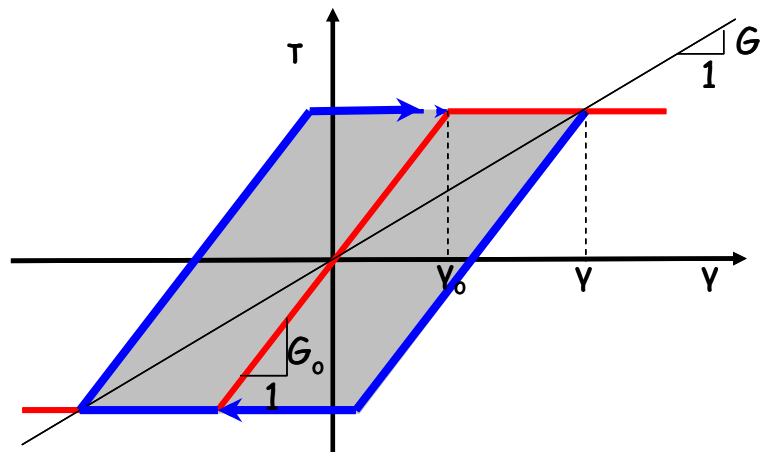


φόρτιση: $-T_m \leq T = \gamma G \leq T_m$

αποφόρτιση από (T_c, γ_c) : $-T_m^* \leq T^* = \gamma^* G \leq T_m^*$
 όπου $T^* = T - T_c$, $\gamma^* = \gamma - \gamma_c$ και $T_m^* = T_m + |T_c|$



Βρόχος για $T \leq T_m$

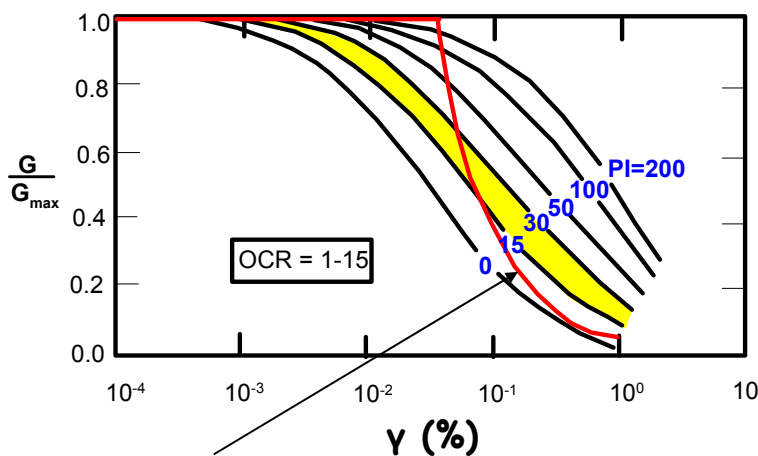


Βρόχος για $T \geq T_m$

$$G = \frac{\tau_m}{\gamma} \left\{ \begin{array}{l} G = \frac{\gamma_o}{\gamma} \\ G_o = \frac{\tau_m}{\gamma_o} \end{array} \right.$$

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

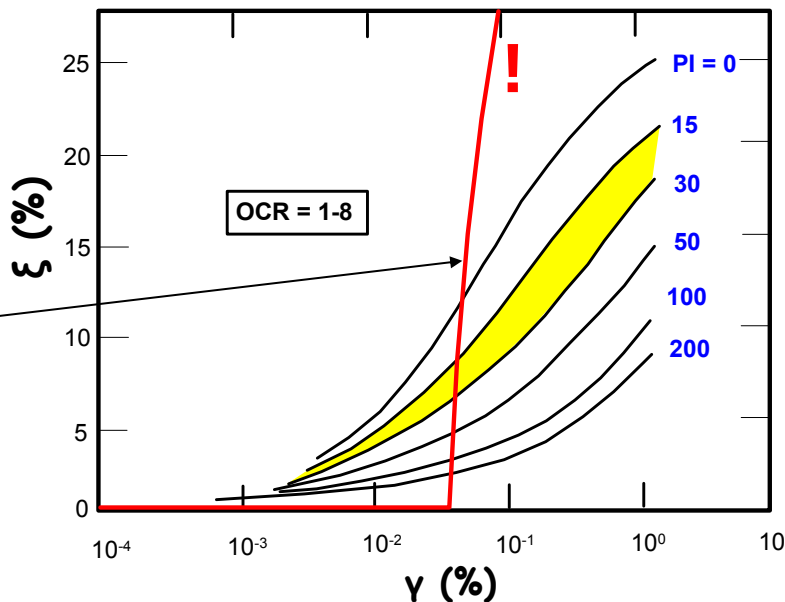
$$\xi = \frac{2}{\pi} \left(1 - \frac{G}{G_o} \right) = 0 \sim 0.65$$



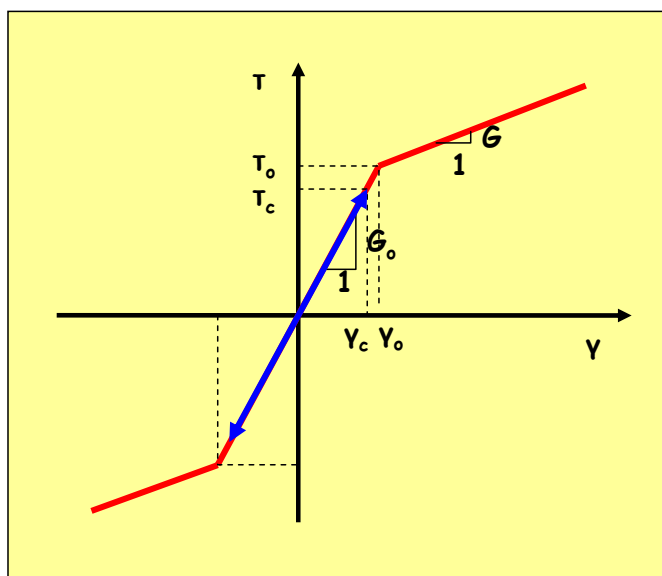
Ραγδαία απομείωση του μέτρου διάτμησης G

Και ακόμη χειρότερα, ραγδαία και υπερβολική αύξηση του λόγου κρίσιμης απόσβεσης ξ

Τι σημαίνουν όλα αυτά για την πρόβλεψη της σεισμικής απόκρισης του εδάφους;



(β) Ελαστοπλαστικό - διγραμμικό



$$(a) |\tau| \leq |\tau_o|$$

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

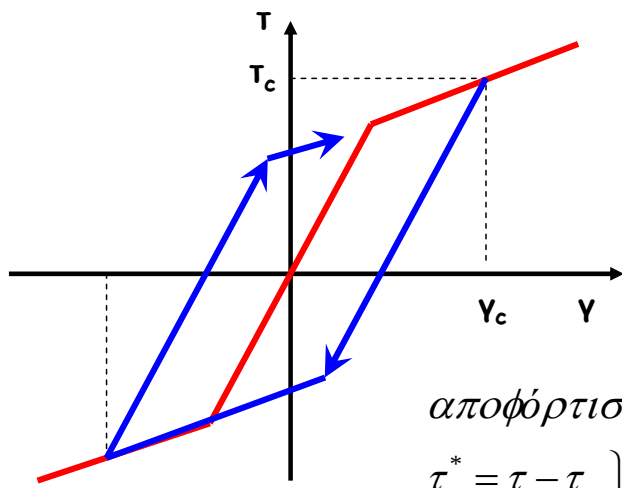
φόρτιση

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

αποφόρτιση - επαναφόρτιση

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

$$\xi = 0$$



$$(\beta) |\tau| \geq |\tau_o|$$

$$\phi\acute{o}\rho\tau\iota\sigma\eta: \gamma - \gamma_o = \frac{\tau - \tau_o}{G_1} \Rightarrow \gamma = \gamma_o + \frac{\tau - \tau_o}{G_1}$$

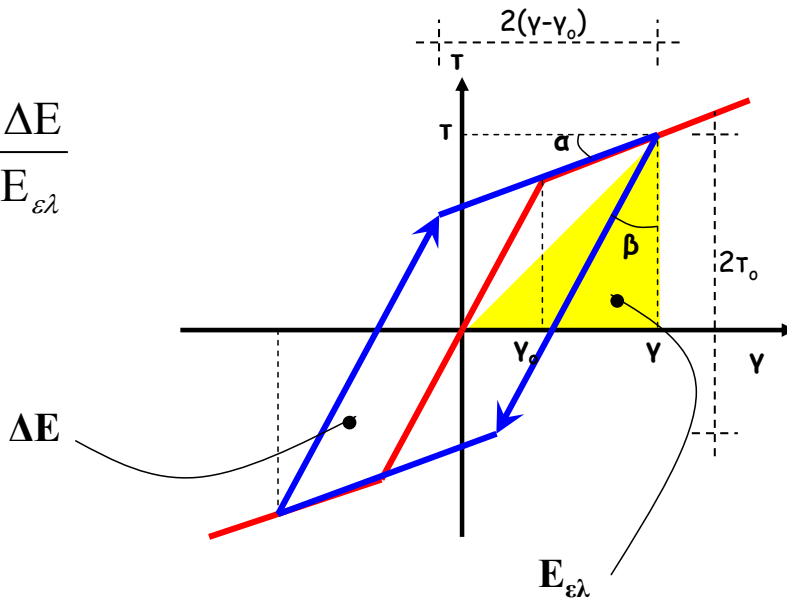
αποφόρτιση από γ_c, τ_c :

$$\left. \begin{array}{l} \tau^* = \tau - \tau_c \\ \gamma^* = \gamma - \gamma_c \\ \tau_o^* = 2\tau_o \end{array} \right\} \quad G = \frac{\tau}{\gamma} \Rightarrow \left. \begin{array}{l} \tau = G\gamma \\ \tau_o = G_o\gamma_o \end{array} \right\} \quad \gamma = \gamma_o + \frac{G\gamma - G_o\gamma_o}{G_1}$$

$$\gamma = \gamma_o + \frac{G/G_o \gamma - \gamma_o}{G_1/G_o} \Rightarrow G/G_o \gamma - \gamma_o + G_1/G_o \gamma_o = G_1/G_o \gamma$$

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

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



$$\begin{aligned} \Delta E &= \frac{2(\gamma - \gamma_o)}{\cos \alpha} \frac{2\tau_o}{\cos \beta} \cos(\alpha + \beta) = \frac{2(\gamma - \gamma_o)2\tau_o}{\cos \alpha \cos \beta} (\cos \alpha \cos \beta - \sin \alpha \sin \beta) \\ &= 4(\gamma - \gamma_o)\tau_o (1 - \tan \alpha \tan \beta) \end{aligned} \quad \left. \begin{array}{l} \tan \alpha = G_1 \\ \tan \beta = \tan(90 - \beta') = \cot \beta' = \frac{1}{G_o} \end{array} \right\} \quad \Delta E = 4(\gamma - \gamma_o)\tau_o \left(1 - \frac{G_1}{G_o} \right)$$

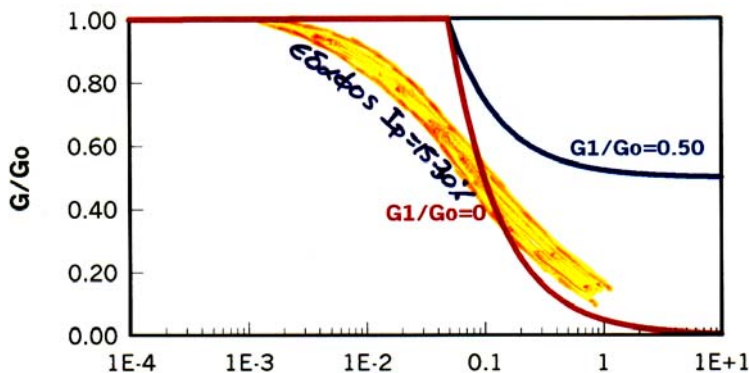
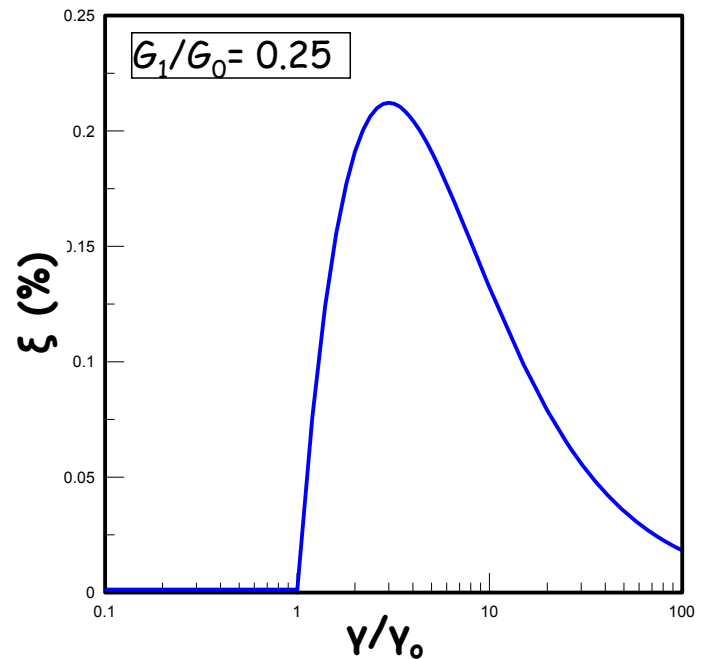
$$\Delta E = 4(\gamma - \gamma_o) \tau_o \left(1 - \frac{G_1}{G_o} \right)$$

$$E = \frac{1}{2} \tau \gamma$$

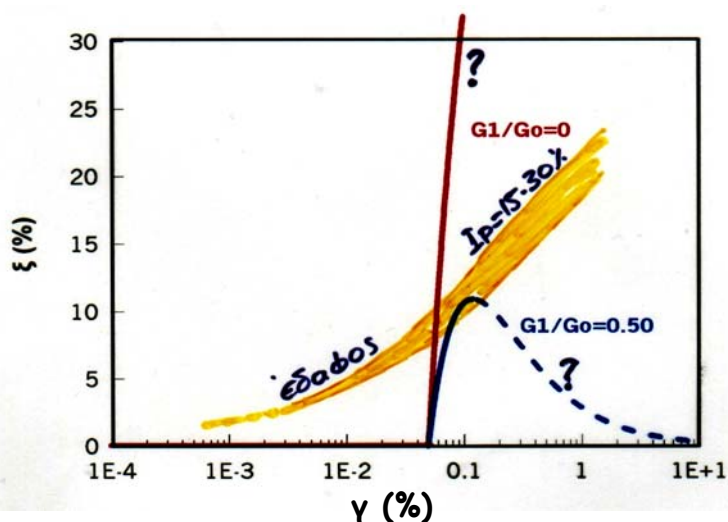
$$\xi = \frac{1}{4\pi} \frac{4(\gamma - \gamma_o) \tau_o \left(1 - \frac{G_1}{G_o} \right)}{\frac{1}{2} \tau \gamma} =$$

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

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



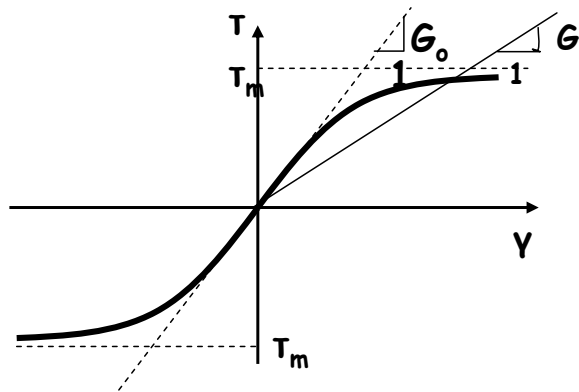
Σύγκριση δι-γραμμικού
ελαστοπλαστικού
προσομοιώματος με
πειραματικά
αποτελέσματα



Ποιες είναι οι συνέπειες στην
πρόβλεψη της σεισμικής απόκρισης
του εδάφους;

(Δ) ΑΠΛΑ ΥΣΤΕΡΗΤΙΚΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΑ

(α) το «Υπερβολικό» προσομοίωμα



Μονοτονική
φόρτιση - αποφόρτιση

$$\gamma = \frac{\tau}{G_o} \frac{1}{1 - \frac{|\tau|}{|\tau_m|}}$$

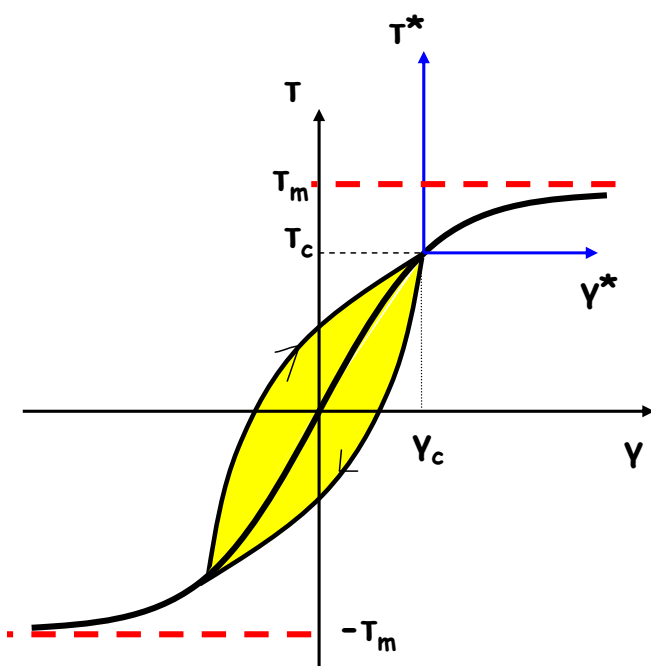
$$\dot{\gamma} \quad \tau = \frac{G_o \gamma}{1 + \frac{G_o}{|\tau_m|} |\gamma|} \Rightarrow$$

$$\frac{G}{G_o} = [1 + (G_o/|\tau_m|)|\gamma|]^{-1}$$

Η σχέση αυτή για το G/G_o ισχύει ανεξαρτήτως του τρόπου με τον οποίο θα ορισθεί η ανακυκλική φόρτιση-αποφόρτιση-επαναφόρτιση (βλέπε παρακάτω)

Ανακυκλική φόρτιση - αποφόρτιση κατά MASING (1926)

(οδηγεί πάντοτε σε συμμετρικούς βρόγχους υστέρησης)



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

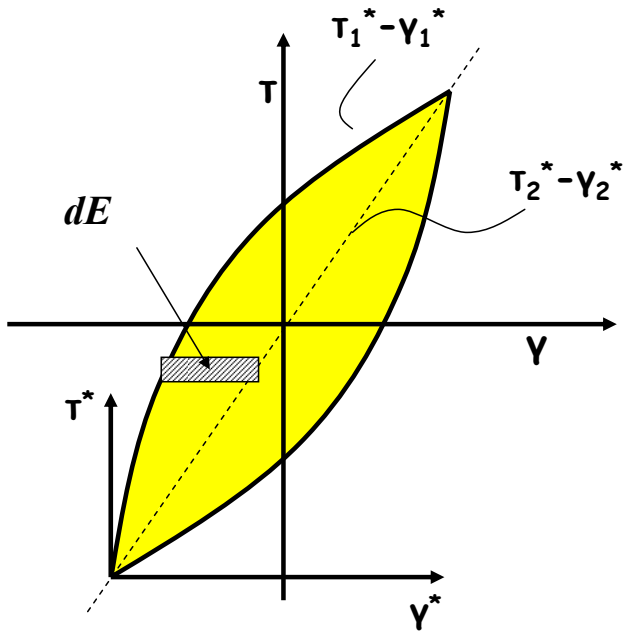
$$\tau^* = \tau - \tau_c$$

$$G_o^* = G_o$$

$$\tau_m^* = 2\tau_m$$

$$\acute{\alpha}\rho\alpha \quad \gamma - \gamma_c = \frac{\tau - \tau_c}{G_o} \frac{1}{1 - \frac{|\tau - \tau_c|}{2\tau_m}}$$

$$\acute{\eta} \quad \tau - \tau_c = \frac{G_o(\gamma - \gamma_c)}{1 + \left(\frac{G_o}{2\tau_m}\right)|\gamma - \gamma_c|}$$



$$\gamma_1^* = \frac{\tau^*}{G} = \frac{\tau^*}{G_o \left(1 - \frac{2\tau_c}{2\tau_m}\right)} = \frac{\tau^*}{G_o \left(1 - \frac{\tau_c}{\tau_m}\right)}$$

$$\gamma_1^* = \frac{\tau^*}{G_o} \frac{1}{1 - \frac{\tau^*}{2\tau_m}}$$

$$\begin{aligned} \frac{dE}{d\tau^*} &= \gamma_2^* - \gamma_1^* = \frac{\tau^*}{G_o} \left[\frac{1}{1 - \frac{\tau^*}{2\tau_m}} - \frac{1}{1 - \frac{\tau_c}{\tau_m}} \right] = \\ &= \frac{\tau^*}{G_o} \left[\frac{2\tau_m}{2\tau_m - \tau^*} - \frac{2\tau_m}{2\tau_m - 2\tau^*} \right] = \\ &= \frac{\tau^*}{G_o} \left[\frac{2\tau_m^2 - 2\tau_m\tau_c - 2\tau_m^2 + \tau^*\tau_m}{(2\tau_m - \tau^*)(\tau_m - \tau_c)} \right] \end{aligned}$$

$$\frac{dE}{d\tau^*} = \frac{\tau^* \tau_m}{G_o (\tau_m - \tau_c)} \frac{(\tau^* - 2\tau_c)}{2\tau_m - \tau^*} \Rightarrow$$

$$\Delta E = \frac{2\tau_m}{G_o (\tau_m - \tau_c)} \int_0^{2\tau_c} \frac{\tau^* (\tau^* - 2\tau_c)}{2\tau_m - \tau^*} d\tau^*$$

$$E = \frac{1}{2} \tau_c \gamma_c = \frac{1}{2} \frac{\tau_c^2}{G} = \frac{1}{2} \frac{\tau_c^2}{G_o \left(1 - \frac{\tau_c}{\tau_m}\right)}$$

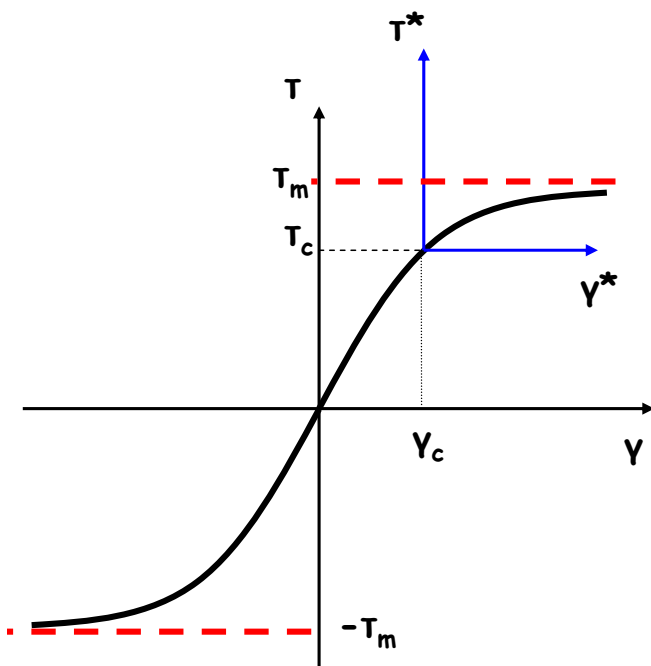
$$\xi = \frac{1}{4\pi} \frac{\Delta E}{E} = \frac{2}{\pi} (1 + 2\alpha) + \frac{4}{\pi} (\alpha^2 + \alpha) \ln \frac{G}{G_o} =$$

$$\xi = \frac{2}{\pi} \left[1 - 2\alpha \ln \frac{G}{G_o} \right]$$

$$\mu\epsilon \quad a = \frac{\tau_m}{G_o} \frac{1}{\gamma} \quad \kappa\alpha l \quad \frac{G}{G_o} = \frac{1}{1 + \frac{1}{a}}$$

Ανακυκλική φόρτιση - αποφόρτιση κατά ΡΥΚΕ (1979)

(οδηγεί σε μη συμμετρικούς βρόγχους υστέρησης)



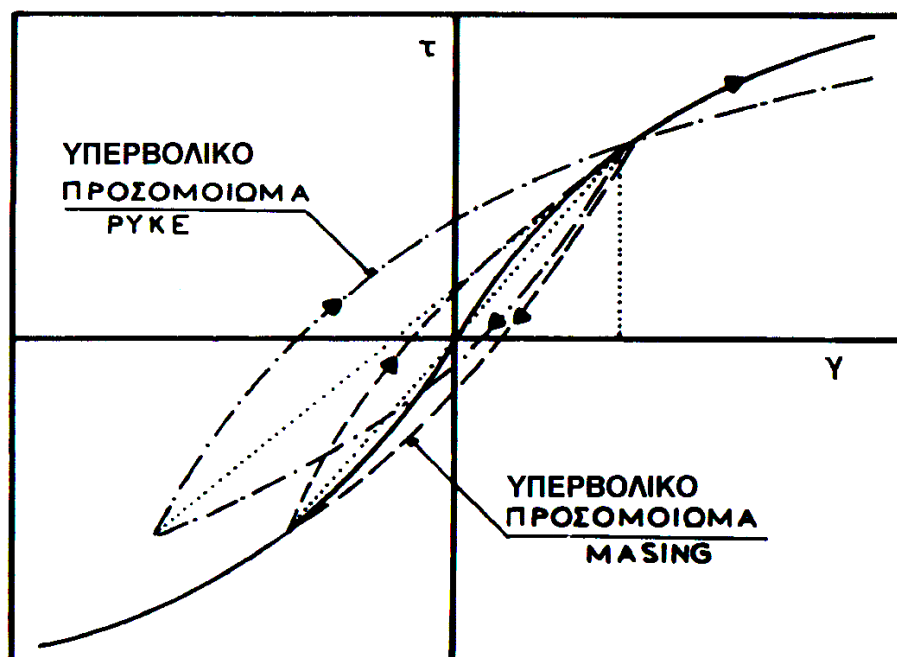
$$\gamma^* = \gamma - \gamma_c$$

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

$$G_o^* = G_o$$

$$\tau_m^* = \tau_m + |\tau_c| = \tau_m \left(1 + \frac{|\tau_c|}{\tau_m} \right)$$

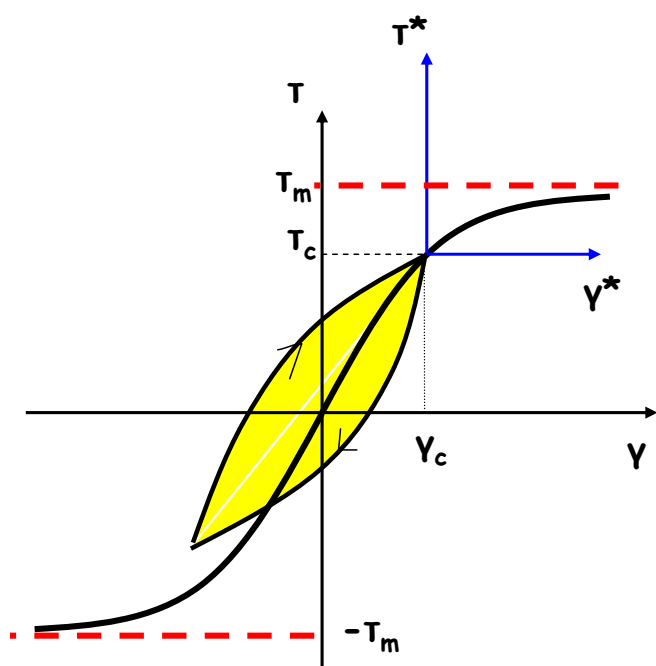
Τυπικοί βρόγχοι υστέρησης για το υπερβολικό προσομοίωμα με αποφόρτιση - επαναφόρτιση κατά Masing και κατά Pyke



Ανακυκλική

φόρτιση - αποφόρτιση κατά ΡΥΚΕ (1979)

(οδηγεί σε μη συμμετρικούς βρόγχους υστέρησης)



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

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

$$G_o^* = G_o$$

$$\tau_m^* = \tau_m + |\tau_c| = \tau_m \left(1 + \frac{|\tau_c|}{\tau_m} \right)$$

$$\acute{\alpha}\rho\alpha \quad \gamma - \gamma_c = \frac{\tau - \tau_c}{G_o} \frac{1}{1 - \frac{|\tau - \tau_c|}{\tau_m \left(1 + \frac{|\tau_c|}{\tau_m} \right)}}$$

$$\acute{\eta} \quad \tau - \tau_c = \frac{G_o (\gamma - \gamma_c)}{1 + \left(\frac{G_o}{\tau_m + |\tau_c|} \right) |\gamma - \gamma_c|}$$

Ομοίως...

$$\frac{G}{G_o} = \frac{a^2(a+2)}{a^2+4a+2}$$

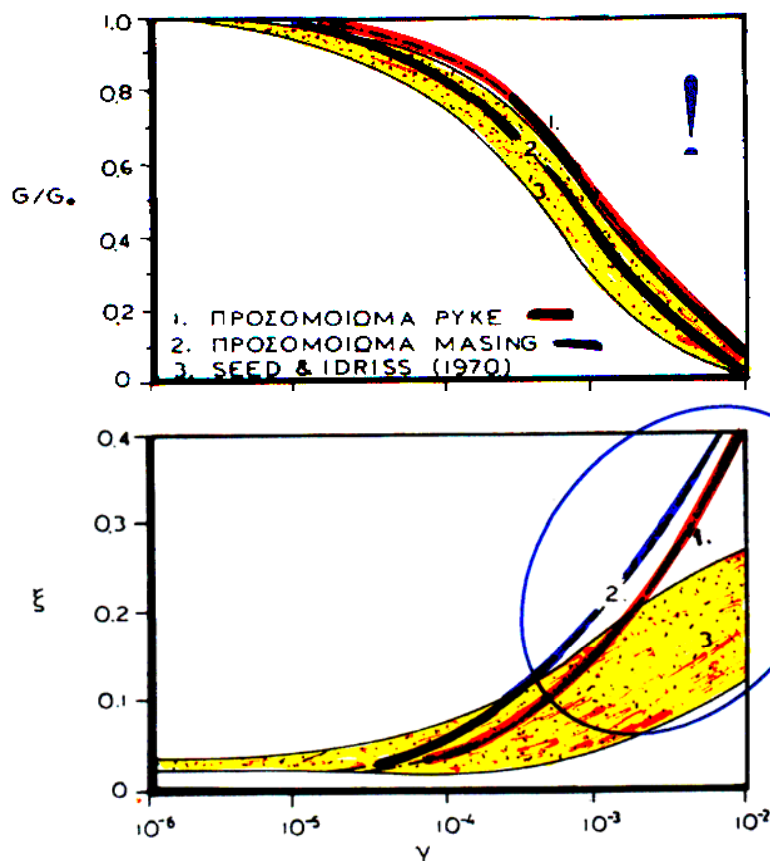
$$\xi = \frac{\alpha+1}{2\pi} \left[-\frac{4C_1}{C_1a+2} + 2C_1 + 2C_2 - C_1^2 a \ln \left(1 + \frac{2}{C_1a} \right) - C_2^2 a \ln \left(1 + \frac{2}{C_2a} \right) \right]$$

$$a = \frac{\tau_m}{G_o} \frac{1}{\gamma}$$

$$C_1 = 1 + \frac{1}{a+1}$$

$$C_2 = 1 - \frac{1}{a+1} + \frac{2a+4}{a^2+4a+2}$$

Σύγκριση με πειραματικές καμπύλες

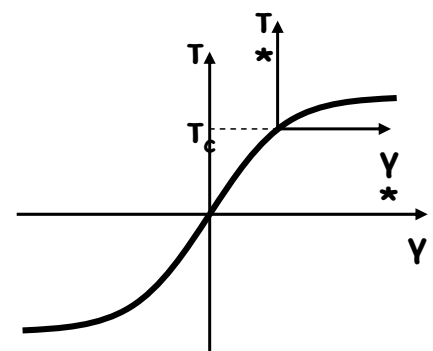


(β) Το υστερητικό προσομοίωμα Ramberg-Osgood (1943)

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

$$\begin{aligned} \gamma^* &= \gamma - \gamma_c \\ \tau^* &= \tau - \tau_c \\ \tau_1^* &= 2\tau_1 \end{aligned}$$

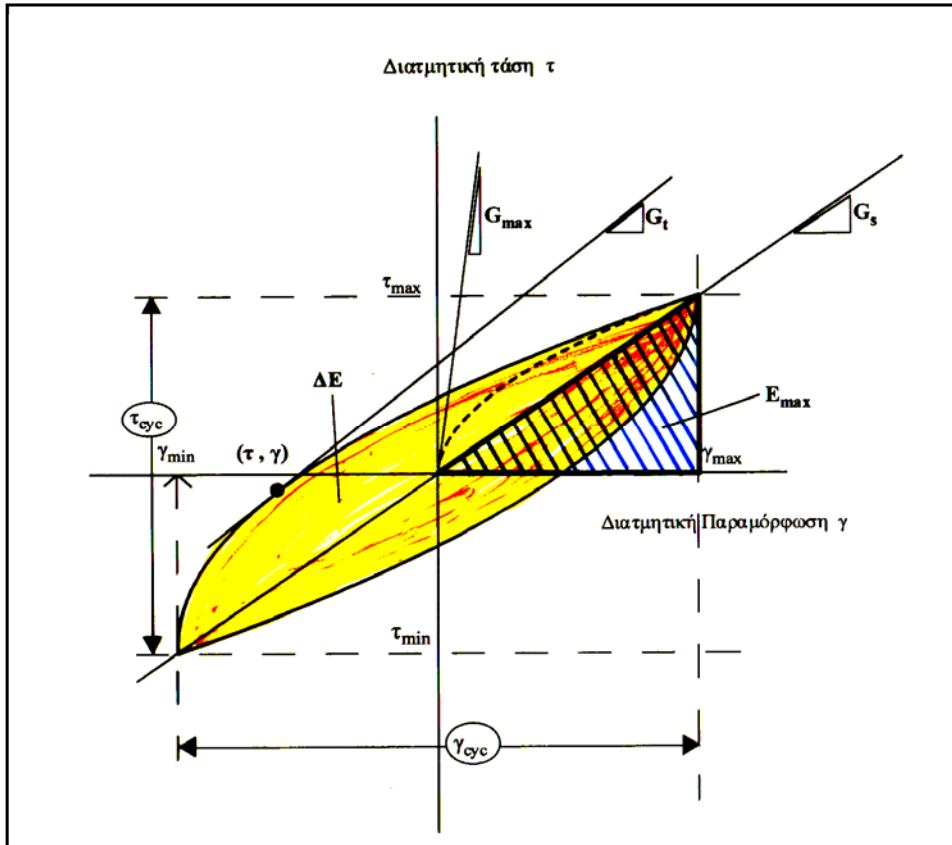
$$\frac{G}{G_{\max}} = \frac{1}{1 + \left(\frac{1}{a_y} - 1 \right) \frac{|\tau_c|^{w-1}}{\tau_1}}$$

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

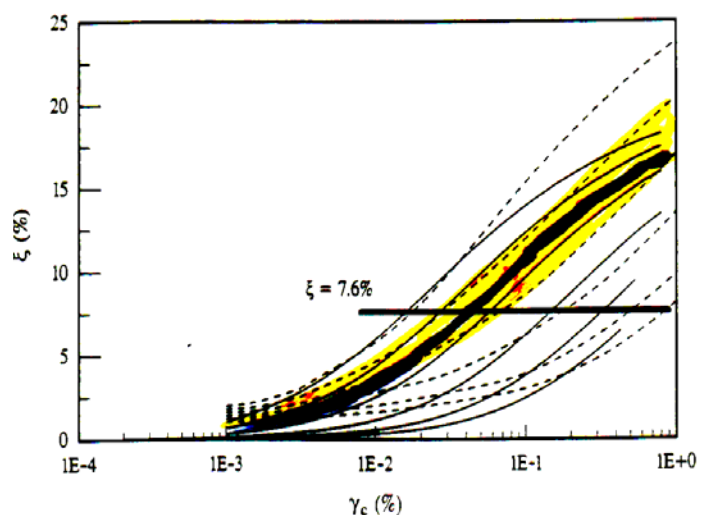
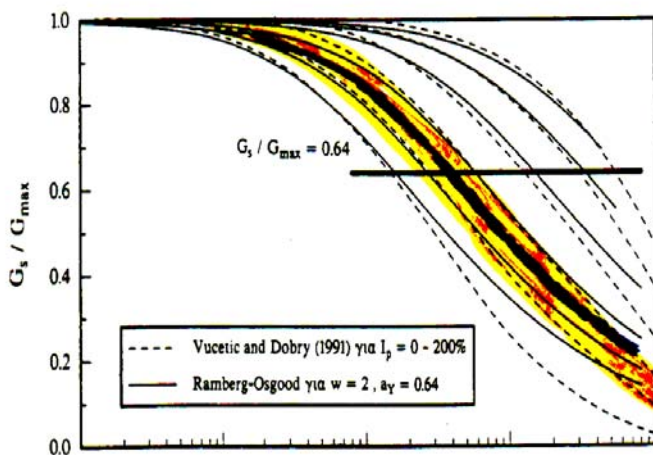
$$\left. \begin{matrix} a_y = 0.64 \\ w = 2 \end{matrix} \right\} \frac{G}{G_{\max}} = \frac{1}{1 + 0.56 \frac{|\tau_c|}{\tau_1}}$$

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

Τυπικός βρόγχος υστερήσεως για το υπερβολικό προσομοίωμα Ramberg-Osgood



Σύγκριση με πειραματικές καμπύλες



Με σωστή επιλογή των παραμέτρων του προσομοιώματος αυτού μπορούμε να πετύχουμε ικανοποιητική συμφωνία με τα πειραματικά αποτελέσματα. Η δυνατότητα αυτή δεν μας δίνεται με τα υπόλοιπα προσομοιώματα που παρουσιάσαμε προηγουμένως.

1^η Άσκηση για το σπίτι . . .

- ✚ Να προσαρμόσετε το ελαστο-πλαστικό προσομοίωμα στις καμπύλες $G/G_{\max}$ των Vucsetić & Dobry για $G/G_{\max}=0.50$, για διάφορες τιμές του δείκτη πλαστιμότητας PI . Κατόπιν να σχεδιάσετε τις θεωρητικές και τις πειραματικές σχέσεις $G/G_{\max} - \gamma$ και $\xi - \gamma$
- ✚ Υπάρχει και πόση είναι η μέγιστη τιμή του ξ που προκύπτει από τα διάφορα θεωρητικά προσομοιώματα;

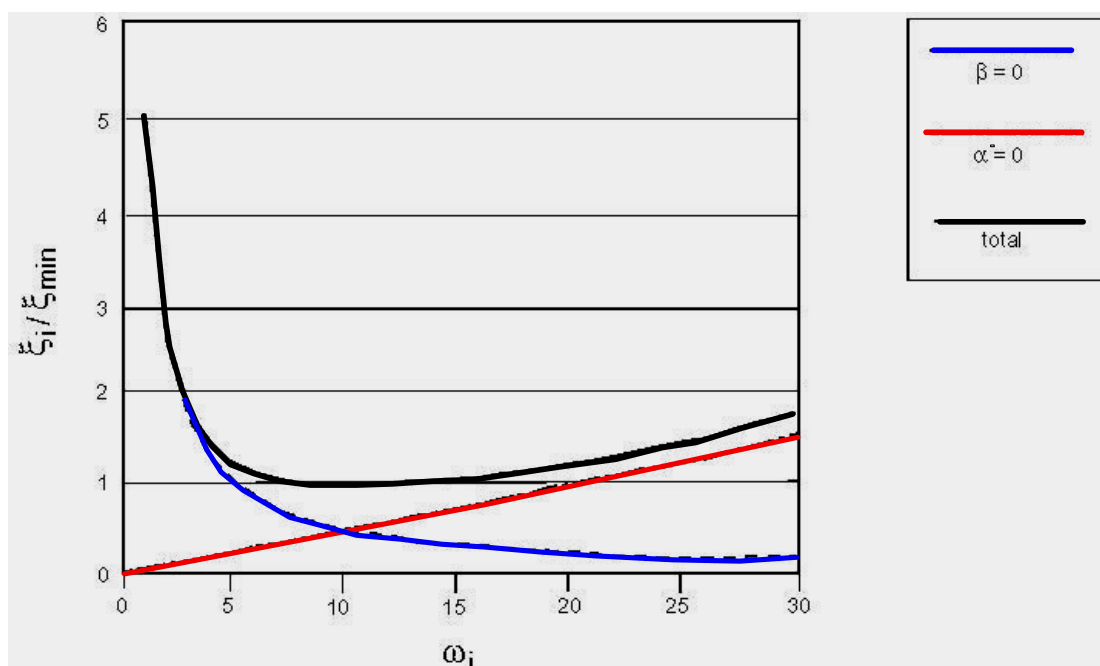
(Ε) Σχολιασμός αριθμητικών μεθόδων υπολογισμού της εδαφικής απόκρισης

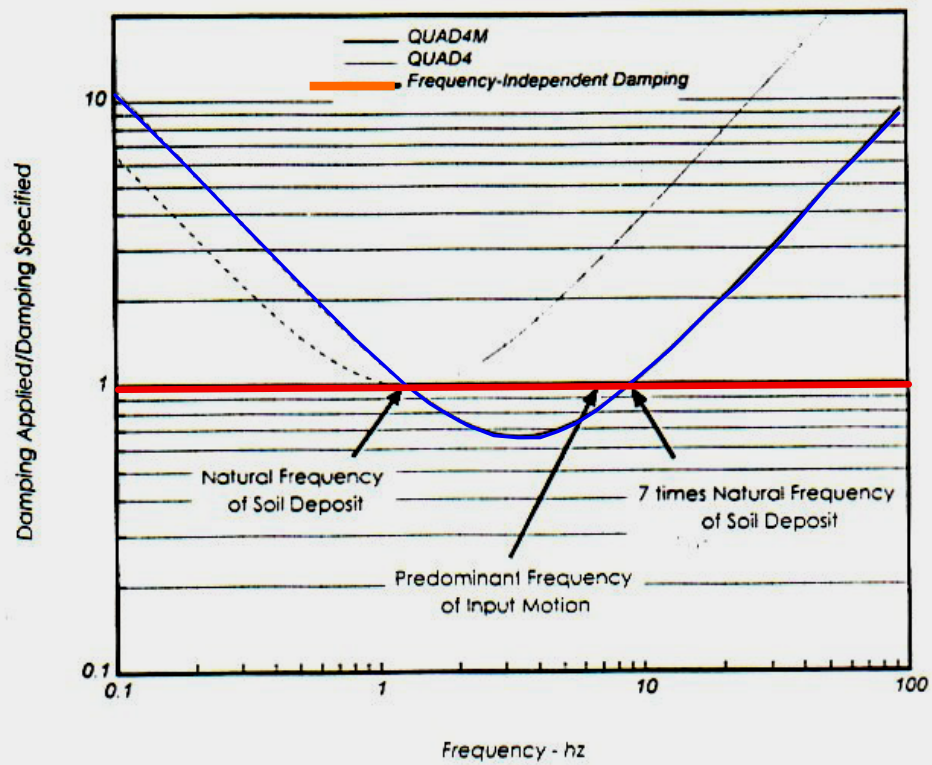
Το βασικό πλεονέκτημα της **ισοδύναμης-γραμμικής ολοκλήρωσης** (ή **frequency domain analysis**) έγκειται στην απλότητα των υπολογισμών, οι οποίοι δεν απαιτούν πολύπλοκο λογισμικό και ιδιαίτερη εξοικείωση του χρήστη με υπολογιστικούς κώδικες για μη-γραμμική ανάλυση. Από την άλλη πλευρά όμως **παραβιάζει ένα θεμελιώδη Νόμο της Μηχανικής**: εφαρμόζει επαλληλία των δυναμικών φορτίσεων παρά το γεγονός ότι η μηχανική συμπεριφορά του εδάφους σε ανακυκλική φόρτιση είναι μη-γραμμική. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να υπο-εκτιμάται η συμβολή των υψηλόσυχων συνιστωσών της δόνησης και να υπερ-εκτιμάται η συμβολή των χαμηλόσυχων συνιστωσών.

Η **μη γραμμική ανάλυση (με εν χρόνω ολοκλήρωση)** είναι απαλλαγμένη από την αδυναμία αυτή και παρέχει θεωρητικά μεγαλύτερη ακρίβεια. Στην πράξη όμως έχει και αυτή αρκετούς περιορισμούς που δυσχεραίνουν την εφαρμογή της. Πρώτα -πρώτα, θα πρέπει να είμαστε σίγουροι ότι υπάρχει το κατάλληλο υστερητικό προσομοίωμα. Επιπλέον, προσοχή χρειάζεται στην προσομοίωση της απόσβεσης ενέργειας σε πολύ μικρές παραμορφώσεις, μια και η απόσβεση αυτή είναι συχνотικά εξαρτημένη (τύπου Rayleigh) και μπορεί να πάρει παράλογα υψηλές τιμές εάν δεν είμαστε προσεκτικοί (βλέπε σχήμα επόμενης σελίδας). Πάντως, θα πρέπει να ομολογήσουμε ότι αυτή η μεθοδολογία είναι η μόνη δόκιμη για πολύ ισχυρές δονήσεις ή / και πολύ μαλακά εδάφη όπου αναμένεται έντονα μη γραμμική συμπεριφορά και πιθανή αστοχία του εδάφους (π.χ. ρευστοποίηση).

Παράδειγμα μεταβολής του λόγου υστερητικής απόσβεσης Rayleigh με την κυκλική συχνότητα

$$C = \alpha M + \beta K$$





2^η Άσκηση για το σπίτι:

επίδραση του εδάφους στον σεισμό της Λευκάδας (2003)

Στα σχήματα που ακολουθούν σας δίνονται τα παρακάτω στοιχεία σχετικά με την καταγραφή της πρόσφατης (2003) ισχυρής δόνησης στην πόλη της Λευκάδας:

-επιταχυνσιογραφήματα και ελαστικά φάσματα απόκρισης (5% απόσβεση) των δύο οριζόντιων καταγραφών στην επιφάνεια του εδάφους (κόκκινη γραμμή).

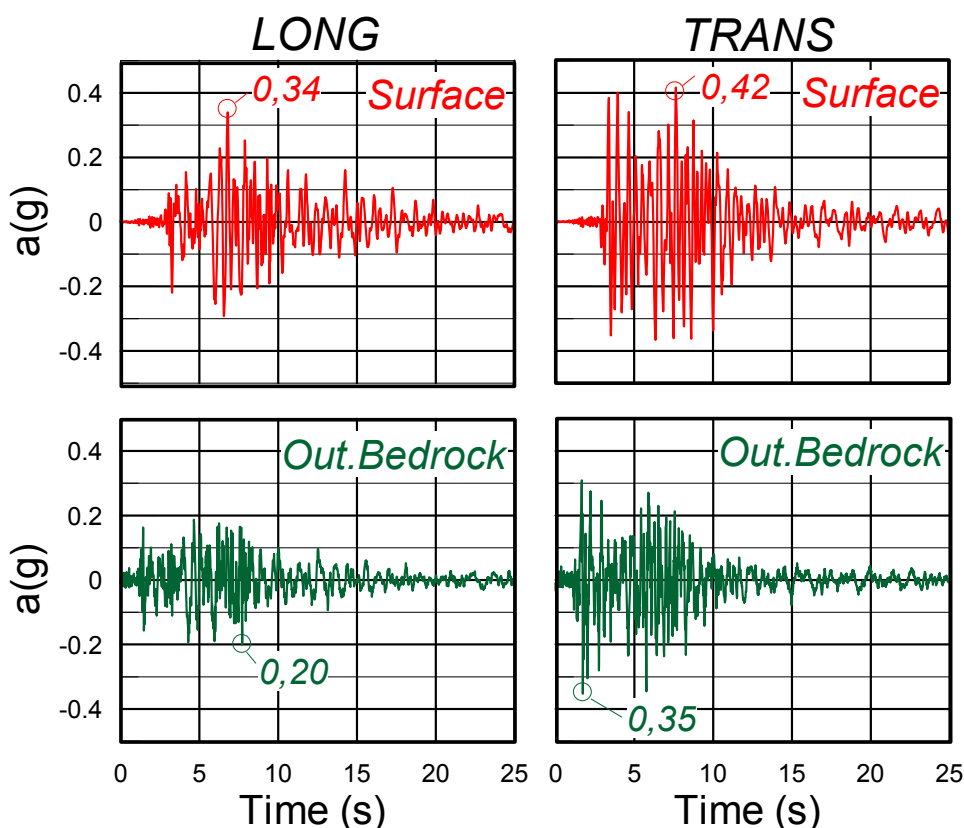
-επιταχυνσιογραφήματα και ελαστικά φάσματα απόκρισης (5% απόσβεση) των δύο οριζόντιων καταγραφών στην επιφάνεια του σεισμικού υποβάθρου (πράσινη γραμμή), όπως υπολογίσθηκαν με μη γραμμική αριθμητική ανάλυση

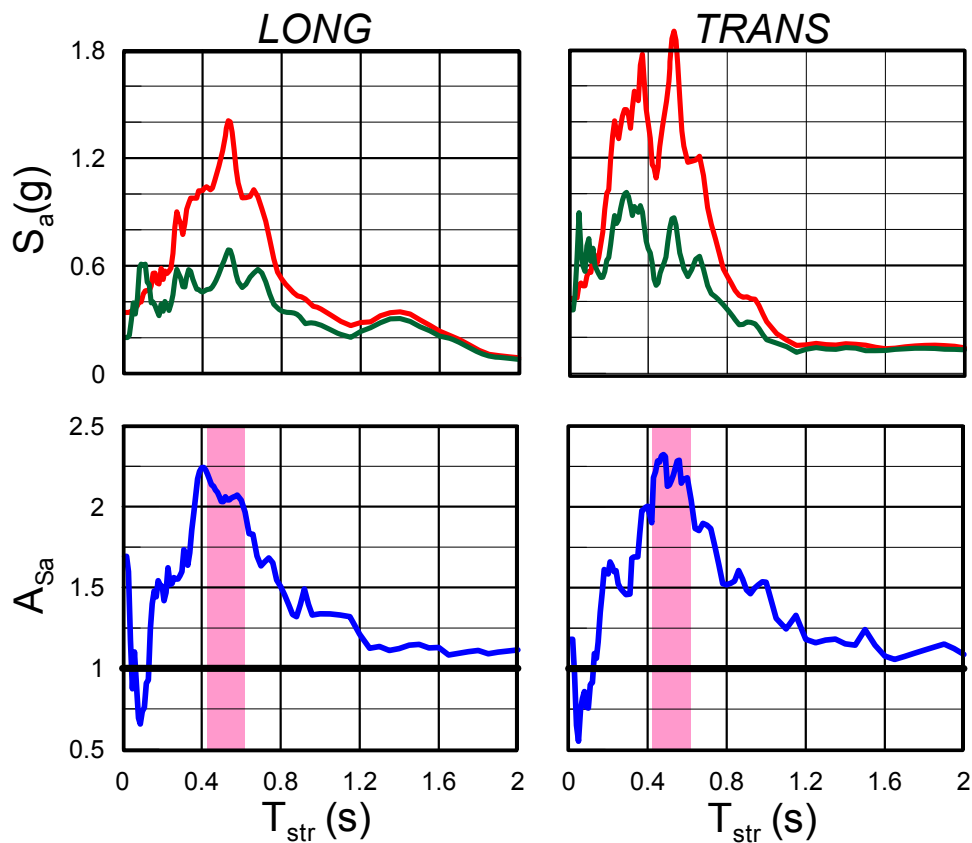
-Η εδαφική τομή στις θέσεις καταγραφής.

ΖΗΤΕΙΤΑΙ: Με την ισοδύναμη γραμμική μέθοδο, να υπολογίσετε την μέγιστη επιτάχυνση και το ελαστικό φάσμα επιταχύνσεων στην επιφάνεια του εδάφους, έχοντας σαν δεδομένη την διέγερση στην ελεύθερη επιφάνεια του σεισμικού υποβάθρου.

Πως συγκρίνονται τα αποτελέσματα σας με τις καταγραφές; Μπορείτε να επαναλάβετε τους υπολογισμούς θεωρώντας ελαστο-πλαστική σχέση τάσεων παραμορφώσεων για τις στρώσεις του εδάφους; Μπορείτε να σχολιάσετε κάποιες τουλάχιστον από τις διαφορές;

(Οι υπολογισμοί δεν είναι απαραίτητο να γίνουν και για τις δύο συνιστώσες. Θα πρότεινα την LONG)





Εδαφική Τομή στην Θέση καταγραφής

