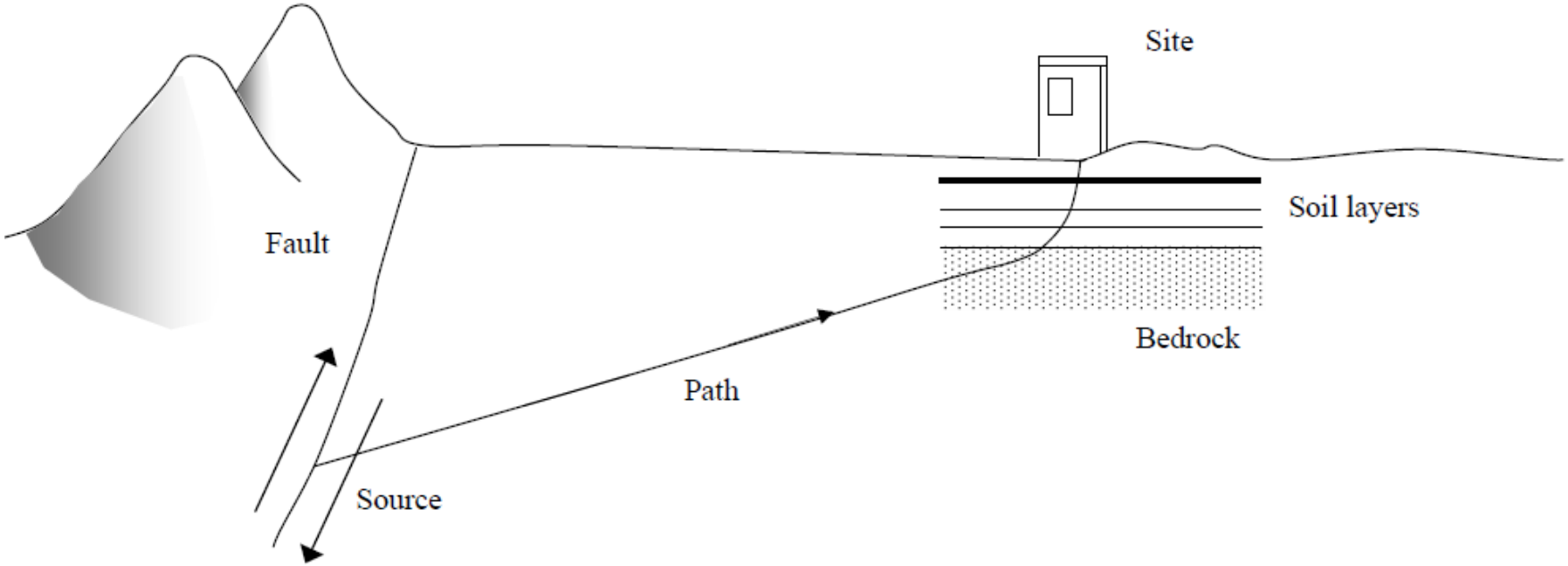
ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

Επιρροή εδαφικών συνθηκών στη σεισμική δόνηση

Γιάννης Ψυχάρης

Επιρροή εδαφικών συνθηκών

Διάδοση σεισμικών κυμάτων από την πηγή στην εξεταζόμενη θέση (Kramer, 1996)



Επιρροή εδαφικών συνθηκών

- **Επιρροή τοπικών εδαφικών συνθηκών**
  Αλλοίωση της κίνησης του βραχώδους υποβάθρου λόγω της απόκρισης (συνήθως ανελαστικής) του επιφανειακού εδαφικού σχηματισμού.

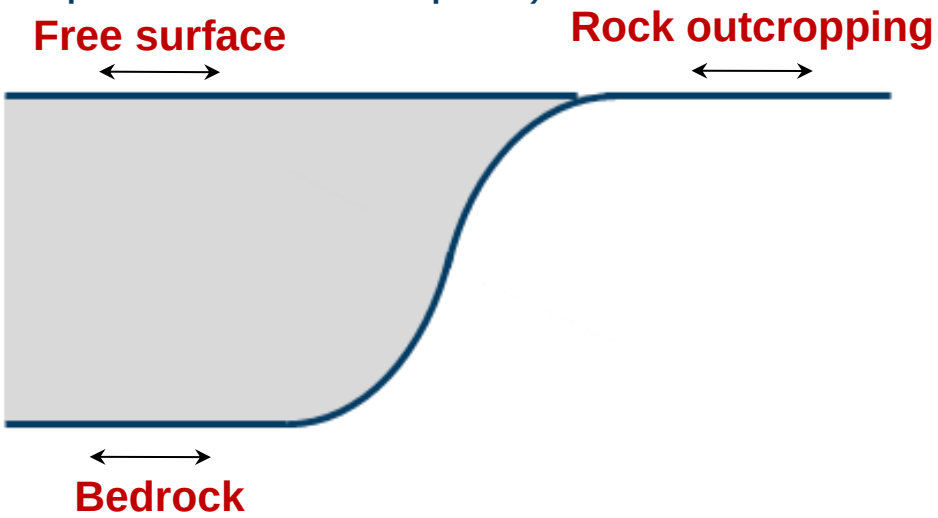
  Συνήθως υπολογίζεται με μονοδιάστατη μη-γραμμική ανάλυση μιας στήλης εδάφους.

- **Επιρροή "λεκάνης"**
  Επιρροή δισδιάστατης ή τρισδιάστατης διαμόρφωσης "λεκάνης" στην κίνηση της επιφάνειας του εδάφους, λόγω ανάκλασης των σεισμικών κυμάτων στις παρειές της λεκάνης.

- **Επιρροή τοπογραφίας**
  - Κορυφές λόφων (ridges)
  - Κοιλάδες (canyons)
  - Πλαγιές (slopes)

Βασικοί ορισμοί

- Κίνηση ελεύθερου πεδίου (Free surface motion)
  = κίνηση στην επιφάνεια ενός εδαφικού σχηματισμού
- Κίνηση βραχώδους υποβάθρου (Bedrock motion)
  = κίνηση στη βάση του εδαφικού σχηματισμού
- Κίνηση σε θέση αναδυόμενου υποβάθρου (Rock outcropping motion)
  = κίνηση σε θέση όπου το βραχώδες υπόβαθρο αναδύεται στην επιφάνεια του εδάφους



Επιρροή τοπικών εδαφικών συνθηκών

Κατηγοριοποίηση εδάφους (EC8)

Βασίζεται κυρίως στη μέση ταχύτητα διάδοσης των διατμητικών κυμάτων στα ανώτερα 30 m του εδαφικού σχηματισμού

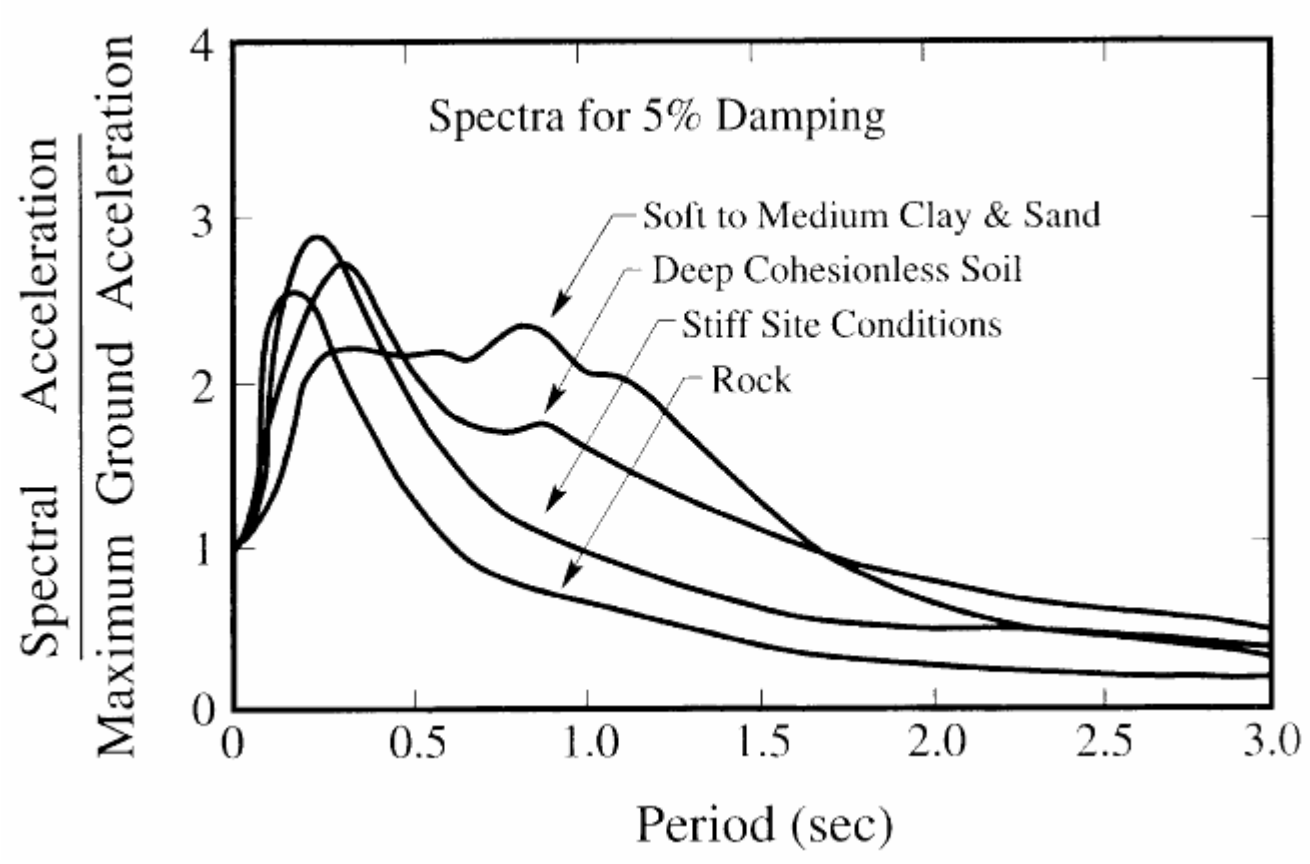
$$v_{S,30} = \frac{30}{\sum_{i=1,N} \frac{h_i}{v_i}}$$

- h_i = πάχος στρώσης (m)
- v_i = ελαστική ταχύτητα διάδοσης διατμητικών κυμάτων
- N = πλήθος στρώσεων στα ανώτερα 30 m του εδάφους

Ground type	Description	Parameters		
		$v_{S,30}$ (m/s)	N_{SPT}	c_u (kPa)
A	Rock or other rock-like geological formation	> 800	_	_
B	Deposits of very dense sand, gravel, or very stiff clay	360 - 800	> 50	> 250
C	Deep deposits of dense or medium-dense sand, gravel or stiff clay	180 - 360	15 - 50	70 - 250
D	Deposits of loose-to-medium cohesionless soil or of predominantly soft-to-firm cohesive soil	< 180	< 15	< 70
E	A soil profile consisting of a surface alluvium layer with v_s values of type C or D and thickness varying between about 5 - 20 m, underlain by stiffer material with v_s > 800 m/s			

Επιρροή εδαφικών συνθηκών στο φάσμα απόκρισης

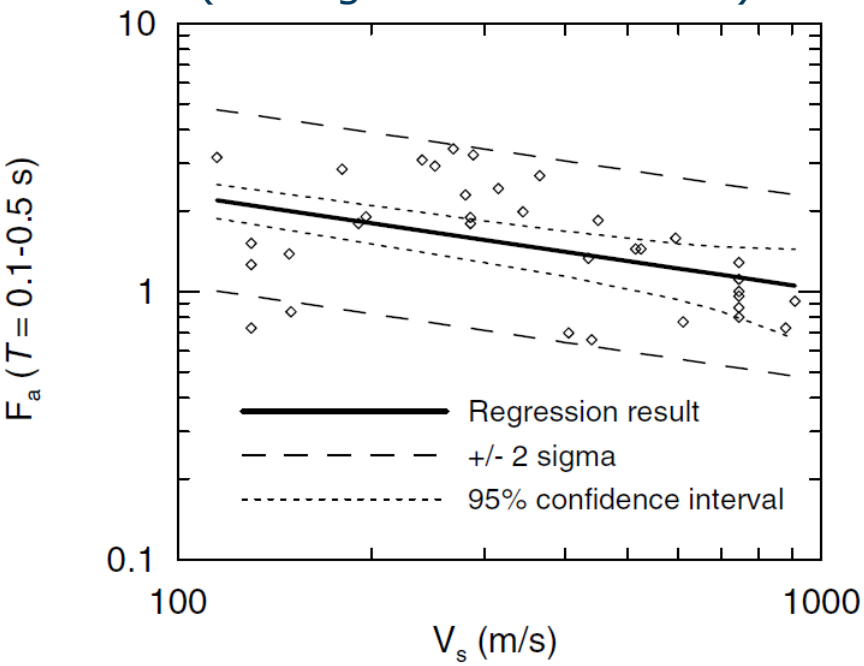
Μέσα κανονικοποιημένα φάσματα 107 σεισμικών καταγραφών ομαδοποιημένων σε 4 κατηγορίες εδάφους (Seed et al. 1976)



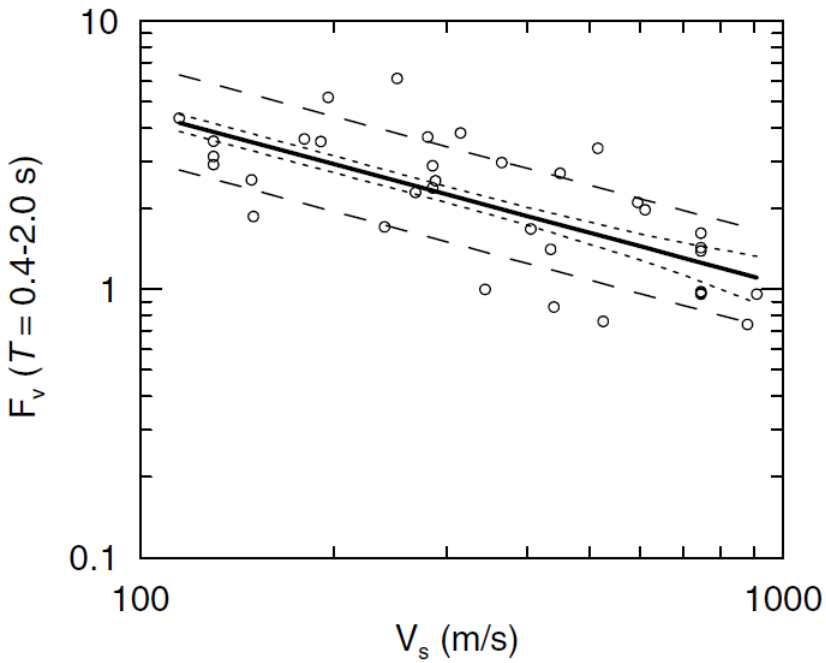
Φασματική μεγέθυνση

Μεταβολή φασματικής μεγέθυνσης με τη $V_{s\text{-}30}$ για τις καταγραφές του σεισμού Loma Prieta (1989)

Amplification of SA
(average for T=0.1-0.5 s)

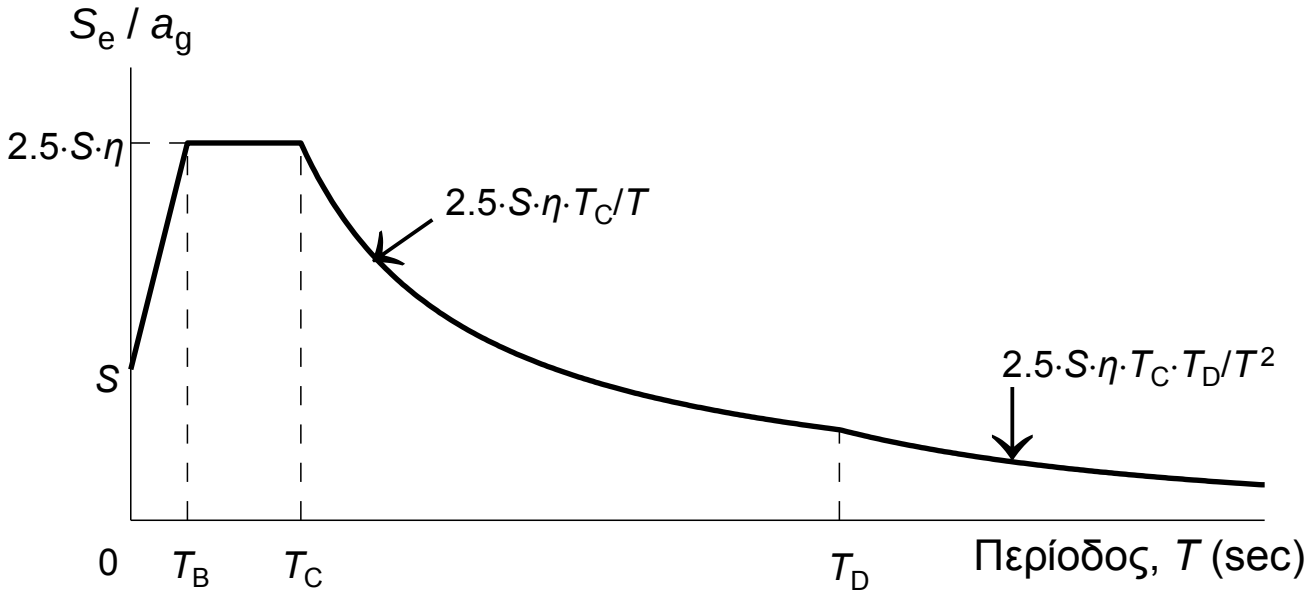


Amplification of SV
(average for T=0.4-2.0 s)



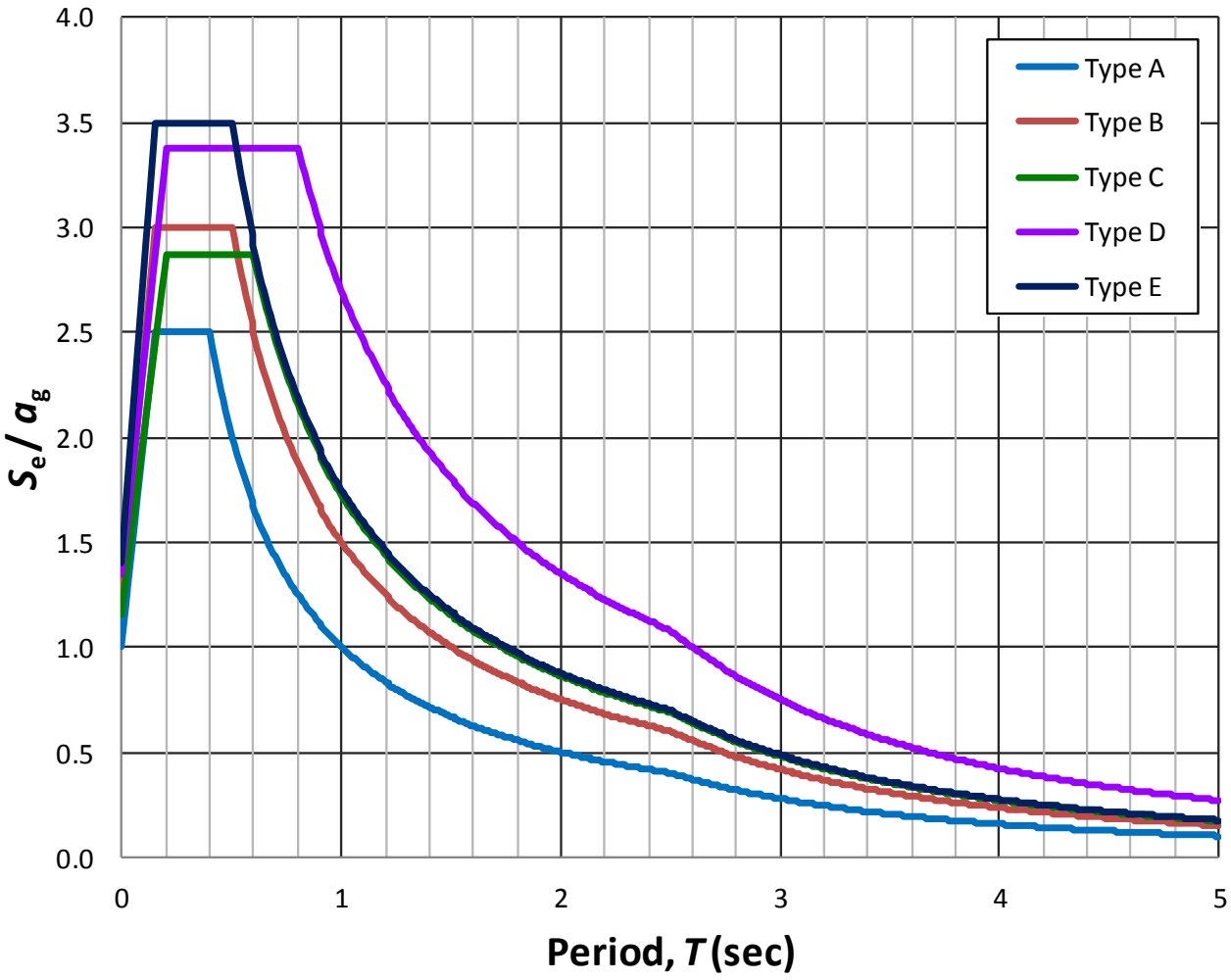
(Borcherdt & Glassmoyer, 1994)

EC8 – Ελαστικό φάσμα σχεδιασμού



Ground type	T_B (sec)	T_C (sec)	T_D (sec)	S
A	0.15	0.40	2.50	1.00
B	0.15	0.50	2.50	1.20
C	0.20	0.60	2.50	1.15
D	0.20	0.80	2.50	1.35
E	0.15	0.50	2.50	1.40

EC8 – Ελαστικό φάσμα σχεδιασμού



Ελαστική απόκριση εδάφους

Ισχύει για μικρούς σεισμούς → μικρές διατμητικές παραμορφώσεις ($\gamma < 10^{-5}$)

Ελαστική συμπεριφορά:

- Ο υπολογισμός της σεισμικής συμπεριφοράς του εδάφους γίνεται για το ελαστικό μέτρο διάτμησης:

$$G_{max}=\rho V_s^2$$

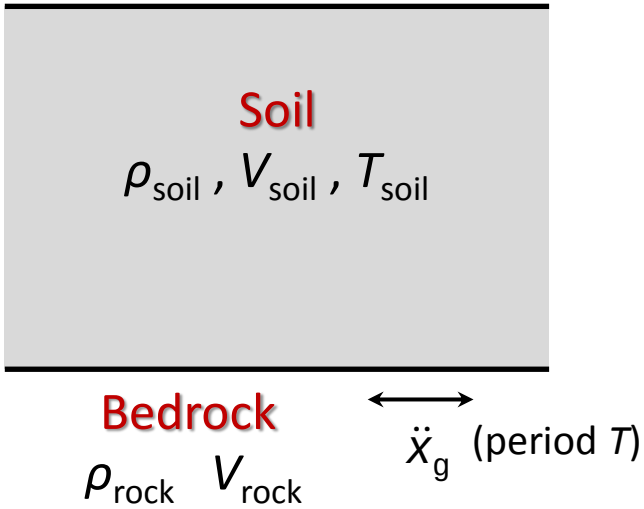
- Η διακύμανση της ταχύτητας V_s με το βάθος υπολογίζεται με επί τόπου μετρήσεις (downhole, crosshole, γεωφυσικές μέθοδοι)

Ελαστική απόκριση εδάφους

Μεγέθυνση εδαφικής κίνησης στην επιφάνεια (Kanai 1962)

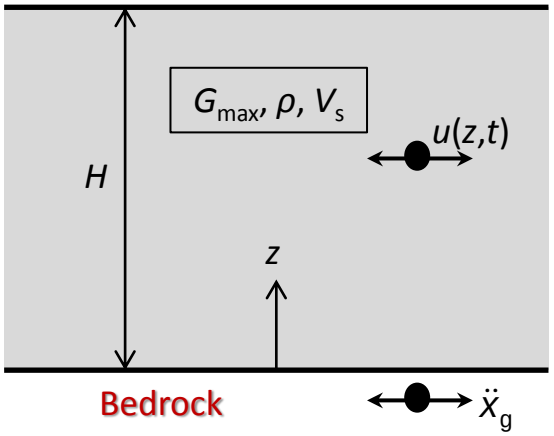
$$A(T) = \frac{1}{\sqrt{\left[\frac{1+\kappa}{1-\kappa}\left\{1-\left(\frac{T}{T_{\text{soil}}}\right)^2\right\}\right]^2 + \left(\frac{0.3}{\sqrt{T_{\text{soil}}}}\cdot\frac{T}{T_{\text{soil}}}\right)^2}}$$

- T = περίοδος σεισμικής διέγερσης στο βραχώδες υπόβαθρο
- T_{soil} = δεσπόζουσα περίοδος εδάφους
- $\kappa = \dfrac{\rho_{\text{soil}} \cdot V_{\text{soil}}}{\rho_{\text{rock}} \cdot V_{\text{rock}}}$



Ελαστική απόκριση ομογενούς εδάφους

Συμπεριφορά διατμητικού προβόλου



- Εξίσωση κίνησης

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - V_s^2 \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = -\ddot{x}_g \quad \text{όπου} \quad V_s = \sqrt{\frac{G_{max}}{\rho}}$$

- Ιδιοπερίοδοι

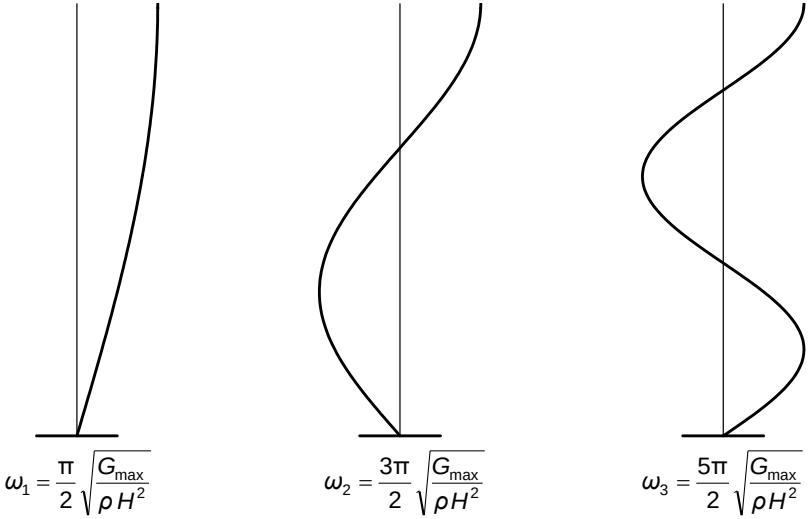
$$T_i = \frac{4H}{(2i-1)V_s}, \quad i = 1, 2, \ldots$$

- Ιδιομορφές

$$\varphi_i(z) = \sin\left[\frac{(2i-1)\pi z}{2H}\right]$$

- Συντελεστές συμμετοχής

$$\Gamma_i = \frac{4}{(2i-1)\pi}$$



Ανελαστική απόκριση εδάφους

Ισχύει για μεγάλους σεισμούς → μεγάλες διατμητικές παραμορφώσεις

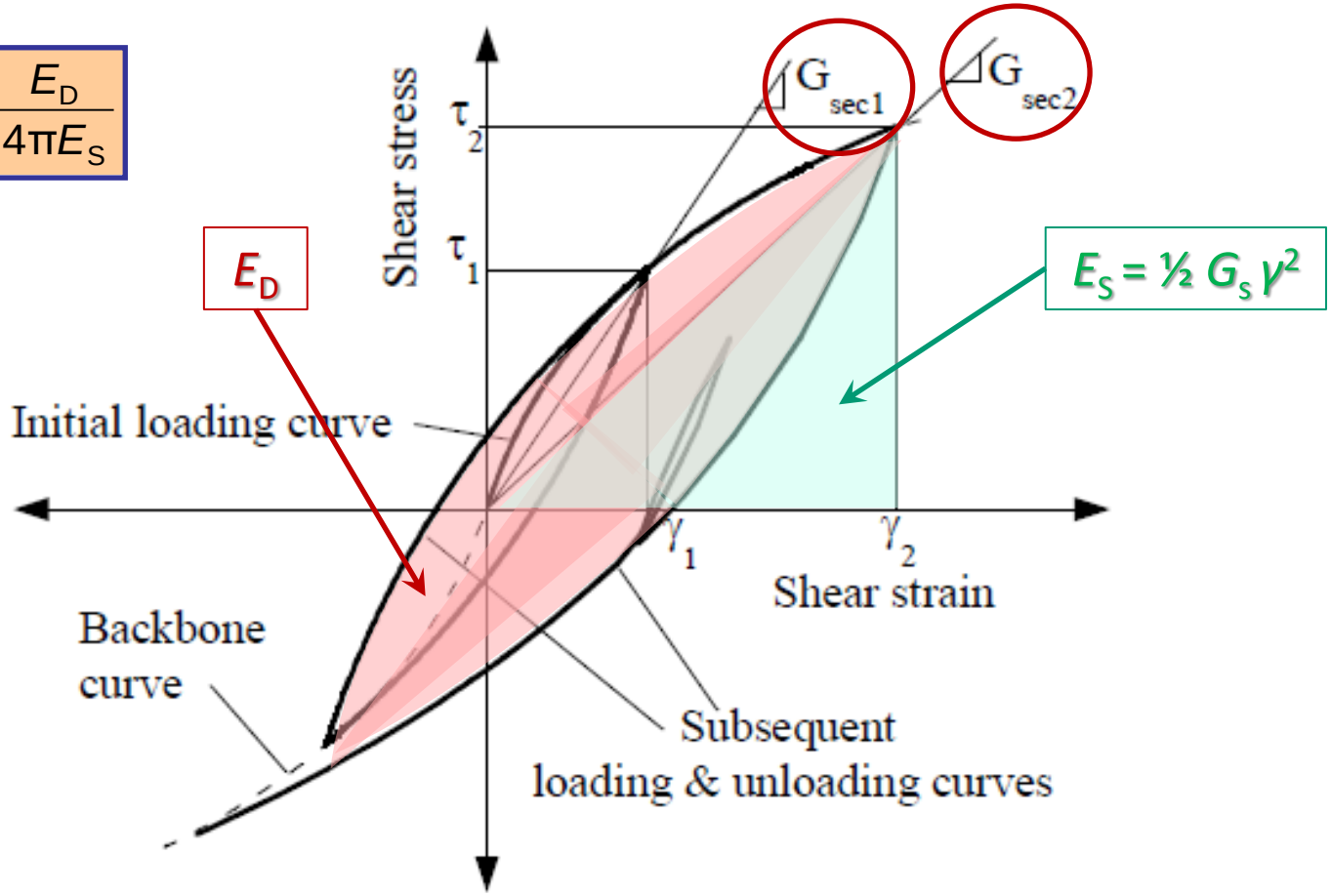
Ανελαστική συμπεριφορά:

- Ο υπολογισμός της σεισμικής συμπεριφοράς του εδάφους γίνεται χρησιμοποιώντας το **τέμνον μέτρο διάτμησης (secant shear modulus)** και την **υστερητική απόσβεση (hysteretic damping)**. Απαιτείται επαναληπτική διαδικασία.
- Απαιτούνται καμπύλες που δίνουν τη μεταβολή του G/G_{max} και της απόσβεσης συναρτήσει της διατμητικής παραμόρφωσης γ (υπάρχουν τυπικές τέτοιες καμπύλες στη βιβλιογραφία για διάφορους τύπους εδαφών).

Ανελαστική απόκριση εδάφους

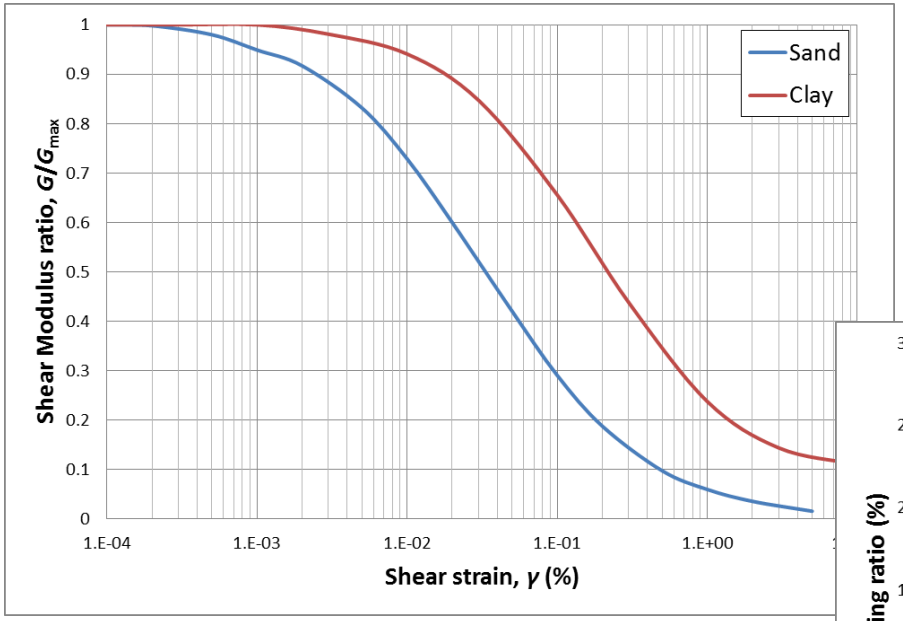
Ορισμοί: τέμνον μέτρο διάτμησης και υστερητική απόσβεση

$$\xi = \frac{E_D}{4\pi E_S}$$



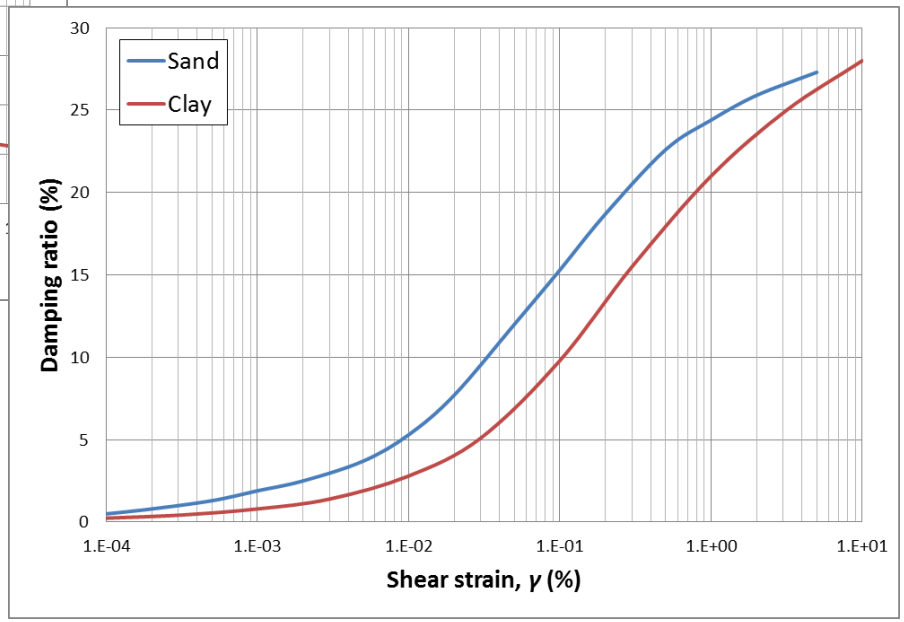
Καμπύλες G/G_{max} και απόσβεσης

G/G_{max}



Sand: Seed & Idriss – Average
Clay: Seed and Sun, 1989

Damping (%)



Sand: Seed & Idriss – Average
Clay: Idriss, 1990

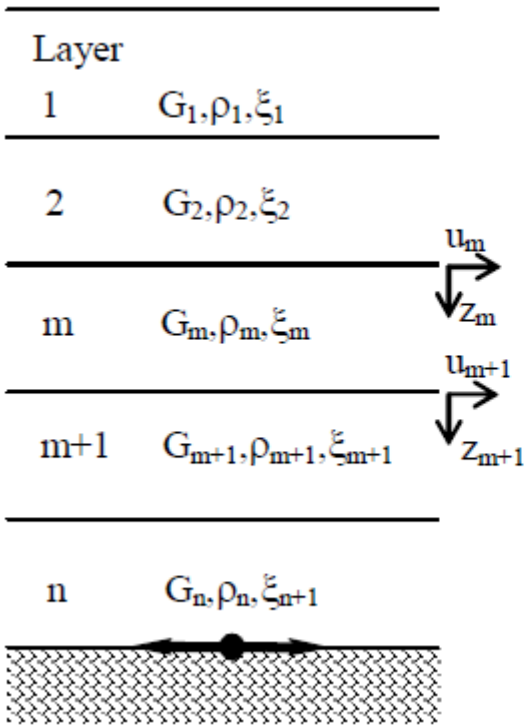
Μονοδιάστατη ανάλυση

- Υπολογίζεται η ανελαστική απόκριση εδαφικής στήλης
- Παραδοχές:
  - Όλες οι εδαφικές στρώσεις είναι οριζόντιες
  - SH σεισμικά κύματα που διαδίδονται κατακόρυφα από το βραχώδες υπόβαθρο
- ΔΕΝ μπορούν να ληφθούν υπόψη:
  - Κλίσεις εδαφικών στρώσεων
  - Ανώμαλη επιφάνεια εδάφους
  - Επιρροή λεκάνης
  - Επιρροή υπόγειων κατασκευών

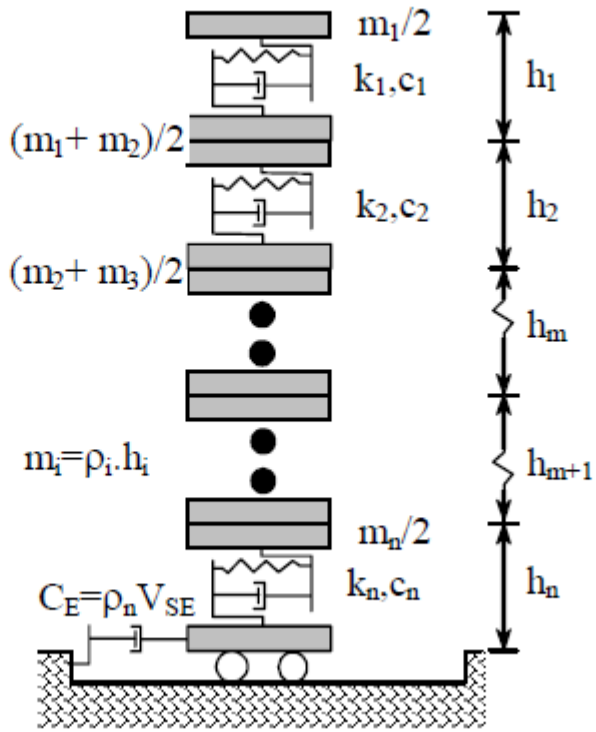
  Σε τέτοιες περιπτώσεις απαιτούνται αναλύσεις 2 ή 3 διαστάσεων

Ισοδύναμο ελαστικό σύστημα

Soil layers



Equivalent MDOF lamped-mass model



Layer Properties
G : shear modulus
ρ : density
ξ : damping ratio
V_s: shear wave velocity
h : thickness

Equivalent Lumped Mass Model
k: stiffness
c: viscous damping

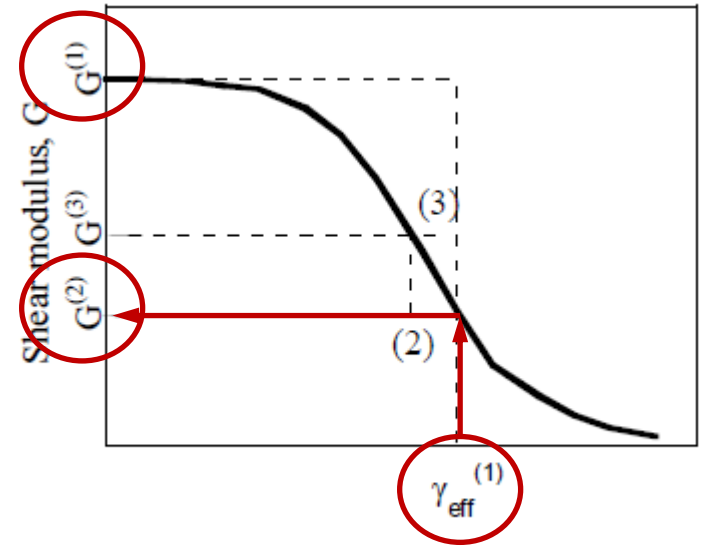
Elastic Rock Base

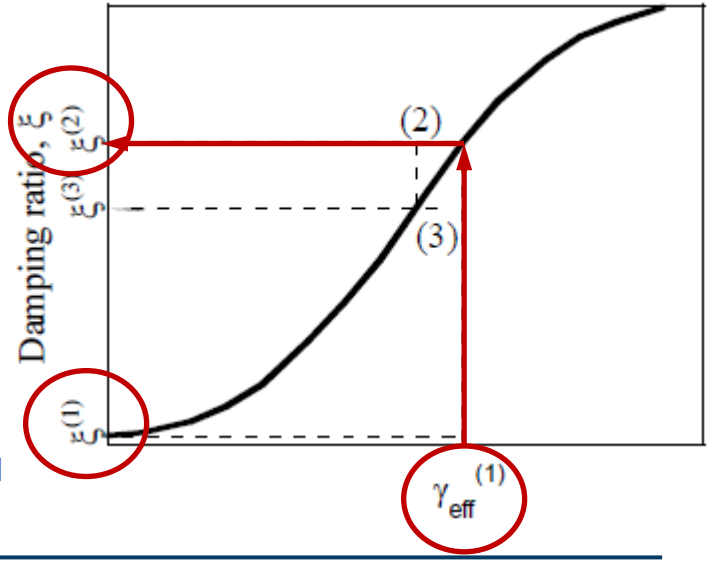
(Park & Hashash, 2004)

Ισοδύναμη ελαστική ανάλυση

Επαναληπτική διαδικασία

- Αρχική εκτίμηση του μέτρου διάτμησης και της απόσβεσης
- Υπολογισμός της χρονοϊστορίας της διατμητικής παραμόρφωσης κάθε στρώσης για τη δεδομένη σεισμική διέγερση στο βραχώδες υπόβαθρο
- Υπολογισμός της μέγιστης διατμητικής παραμόρφωσης κάθε στρώσης και της αντίστοιχης "ενεργούς" διατμητικής παραμόρφωσης (~65% της μέγιστης)
- Από καμπύλες G/G_{max} και ξ υπολογίζεται νέα εκτίμηση του μέτρου διάτμησης και της απόσβεσης
- Επανάληψη της διαδικασίας έως σύγκλιση

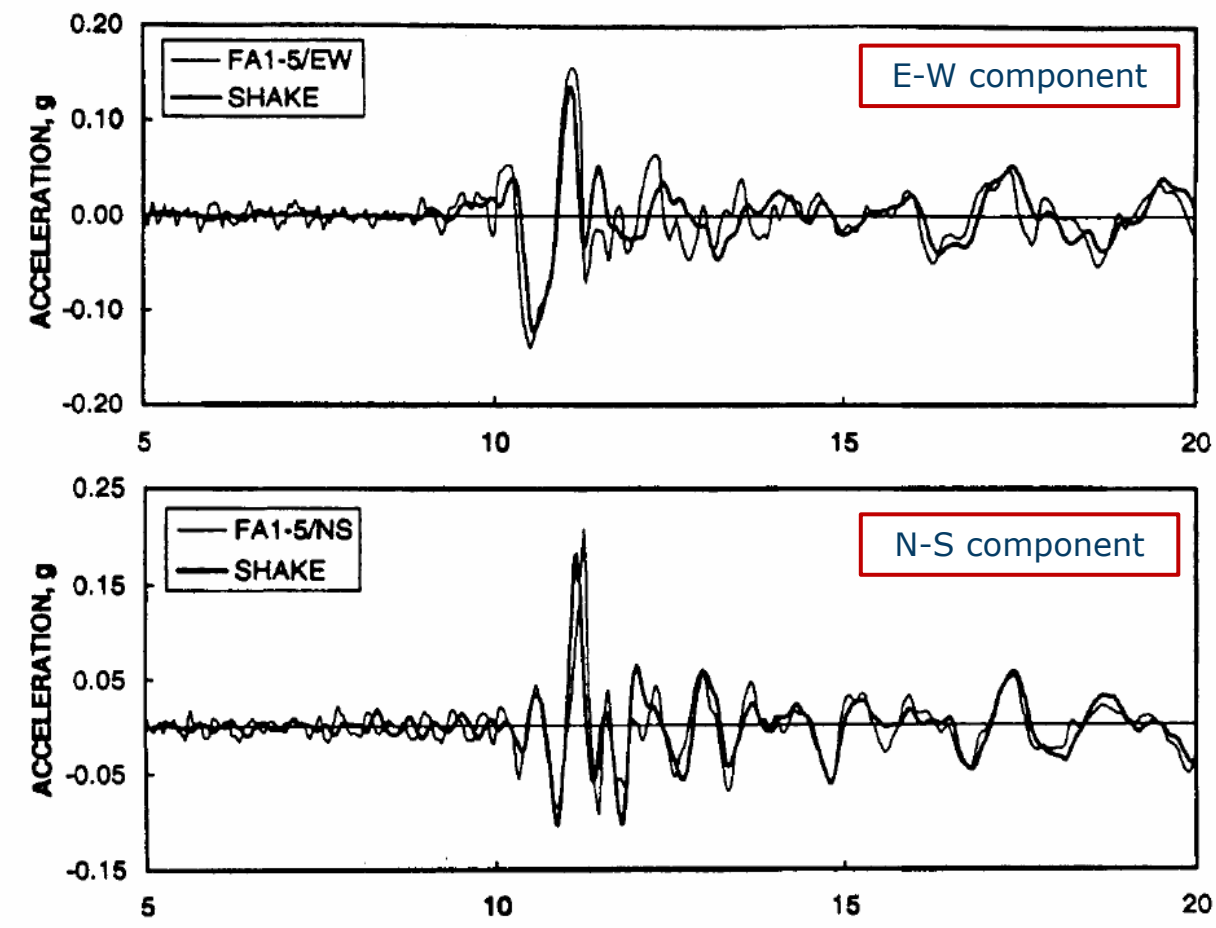




Περιορισμός: Σε κάθε επανάληψη λαμβάνεται υπόψη σταθερό μέτρο διάτμησης (υπερεκτιμά τη στιφρότητα)

Επαλήθευση

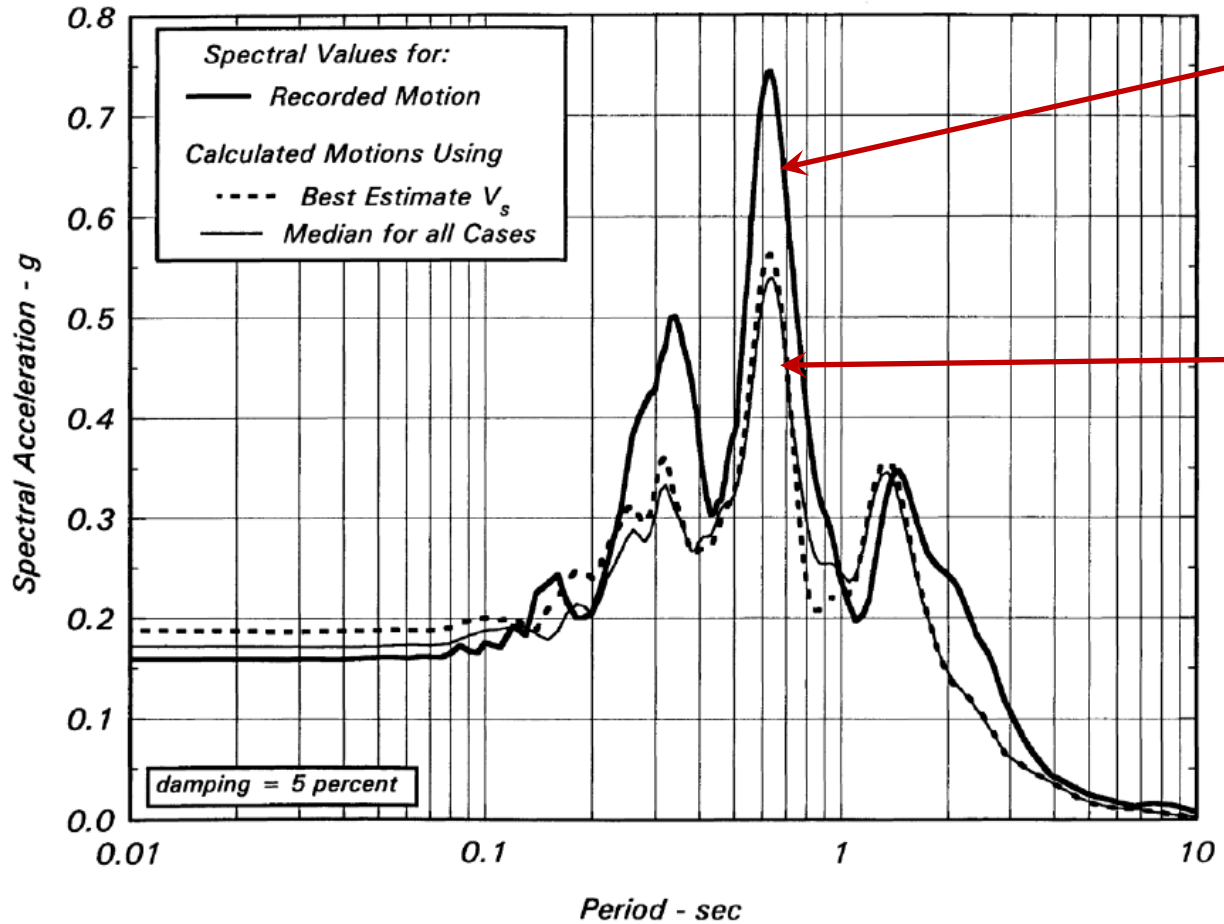
Σύγκριση πραγματικών καταγραφών με προβλέψεις προγράμματος SHAKE



(Borja et al. 1999)

Επαλήθευση

Σύγκριση φασμάτων απόκρισης (Treasure Island station, Loma Prieta, 1989 earthquake)



Πραγματική καταγραφή

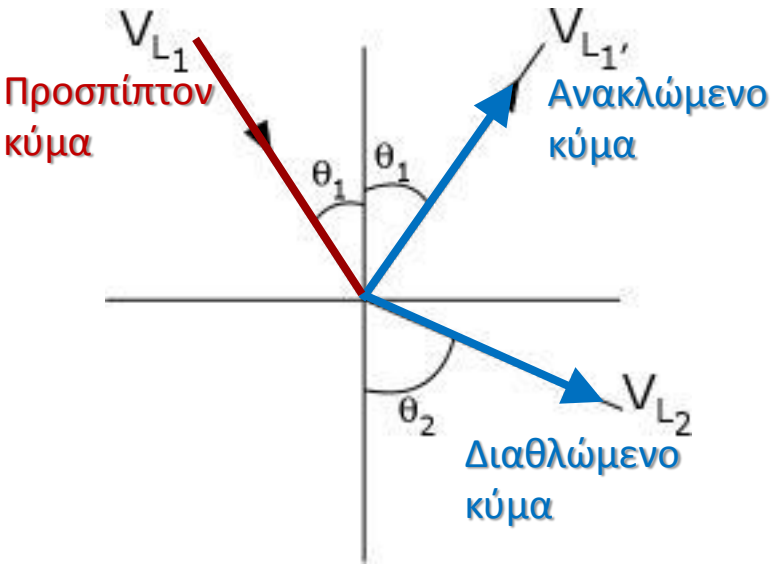
Από υπολογισμό της εδαφικής κίνησης με βάση παρακείμενες καταγραφές σε βραχώδεις εξάρσεις

(Idriss 1993)

Επιρροή λεκάνης

Νόμος του Snell

- Όταν ένα κύμα συναντήσει διεπιφάνεια αλλαγής υλικού *διαθλάται* και *ανακλάται* σύμφωνα με το **νόμο του Snell**.

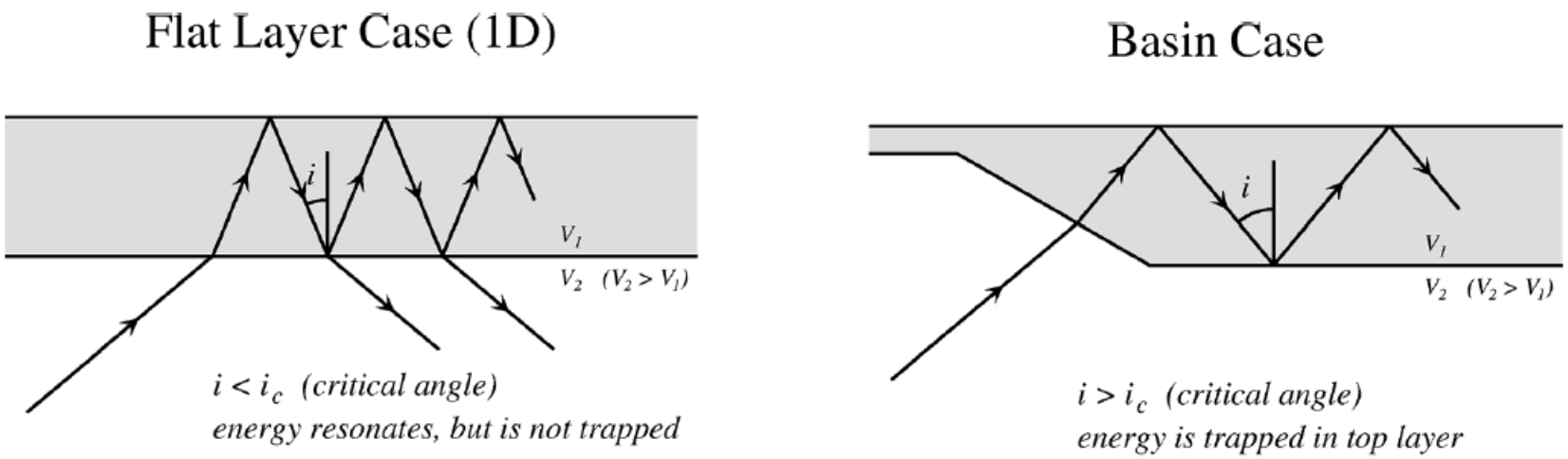


$$\frac{\sin\theta_1}{V_{L1}} = \frac{\sin\theta_2}{V_{L2}}$$

- **Κρίσιμη γωνία πρόσπτωσης:** $\theta_c = \sin^{-1}(V_{L1}/V_{L2})$

  Εάν $\theta_1 > \theta_c$ δεν υπάρχει διαθλώμενο κύμα, αλλά μόνον ανακλώμενο.

Επιρροή λεκάνης



(Stewart et al. 2001)

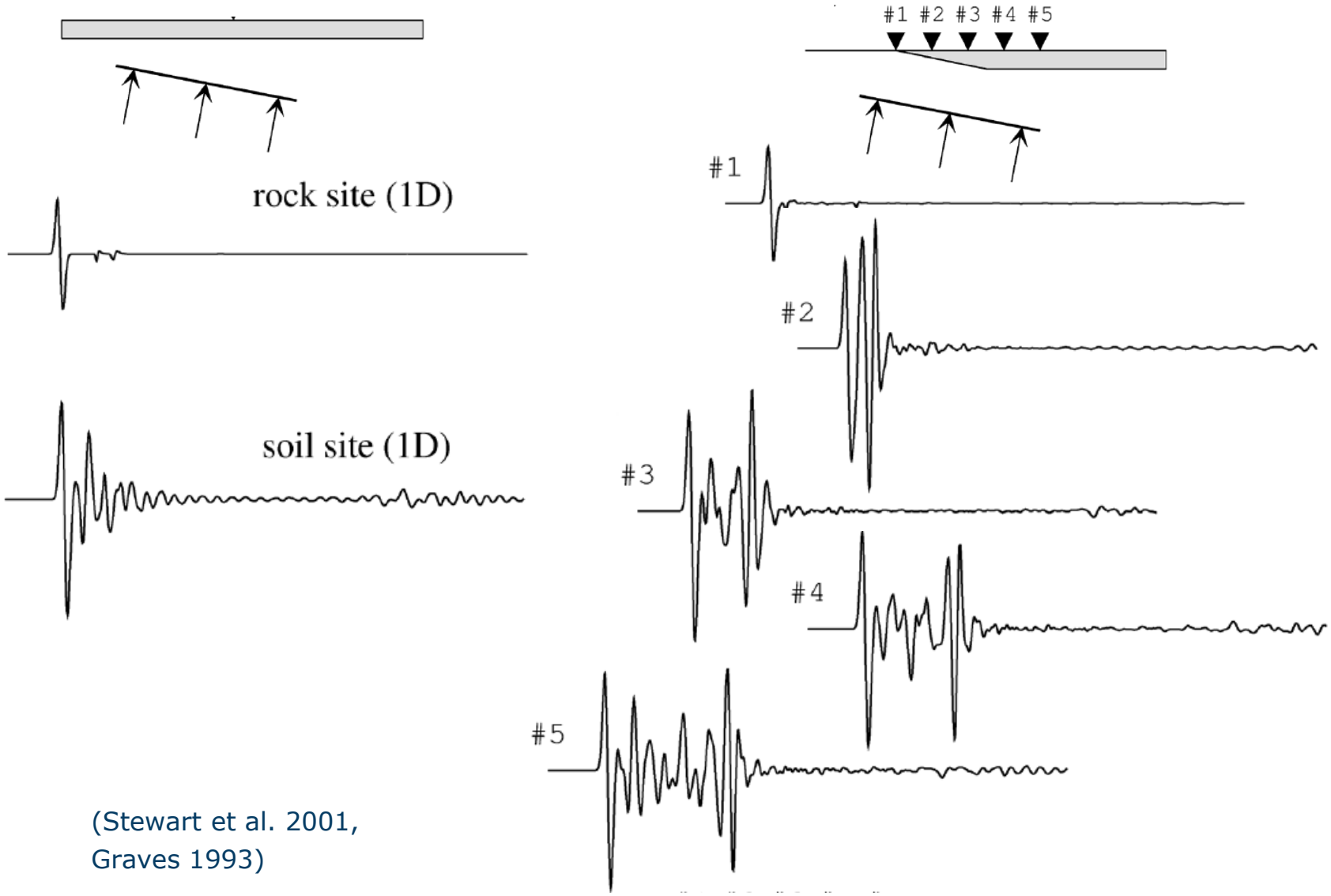
Επίπεδη εδαφική στρώση απείρου μήκους

Τα σεισμικά κύματα δεν μπορούν να παγιδευτούν στην εδαφική στρώση → μέρος της ενέργειας εκτονώνεται λόγω των διαθλάσεων

Περίπτωση λεκάνης (basin)

Τα σεισμικά κύματα μπορεί να παγιδευτούν μέσα στη λεκάνη, εάν προκύψουν γωνίες πρόσπτωσης μεγαλύτερες από την κρίσιμη γωνία → όλη η ενέργεια εγκλοβίζεται μέσα στην εδαφική στρώση

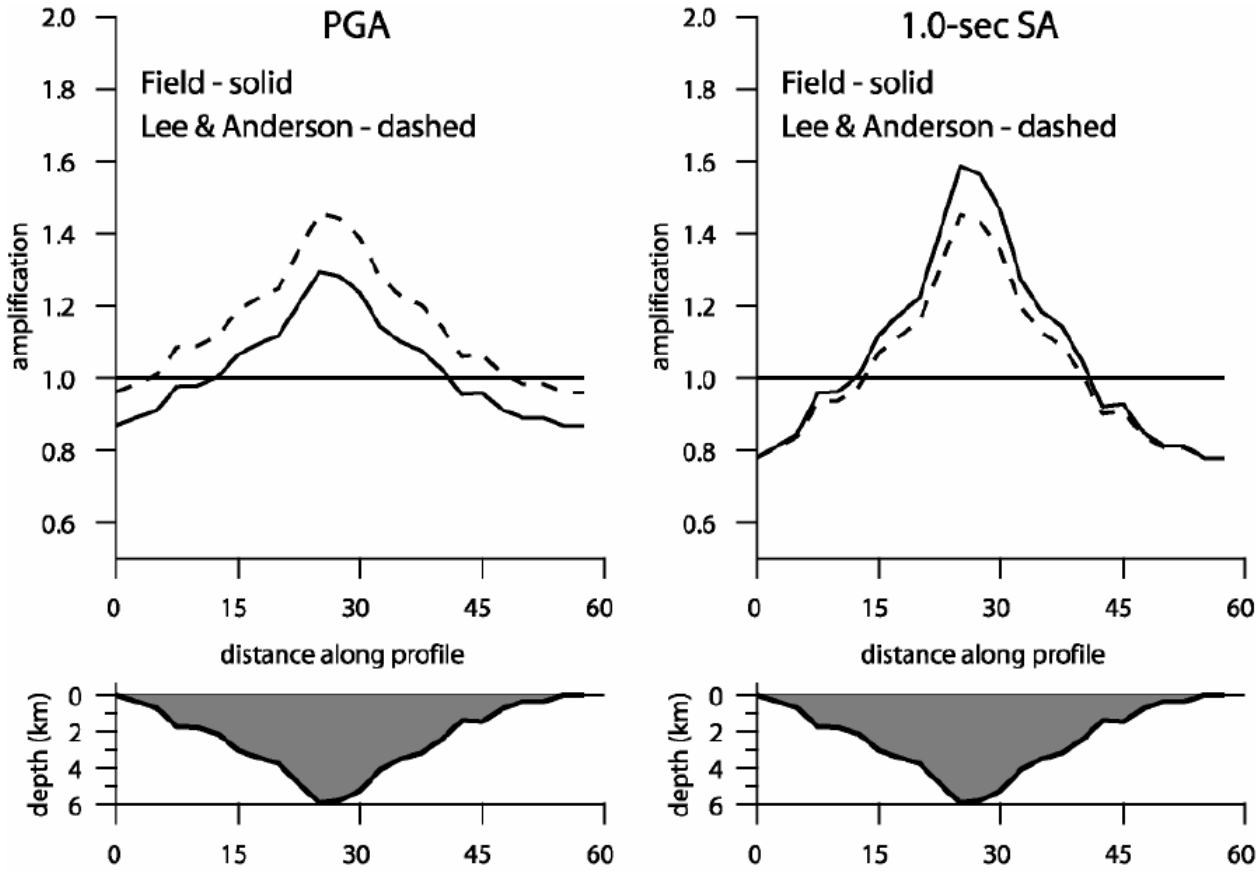
Επιρροή λεκάνης



(Stewart et al. 2001,
Graves 1993)

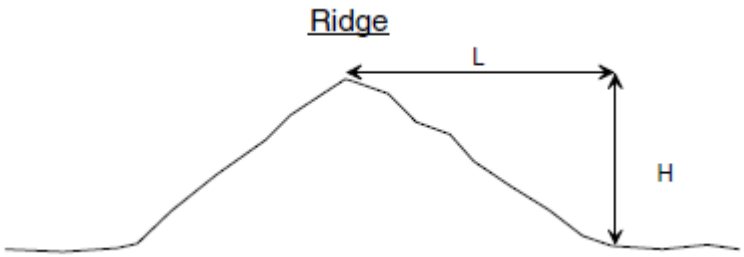
Επιρροή λεκάνης

Συντελεστές ενίσχυσης της εδαφικής κίνησης, συγκρινόμενοι με τους προβλεπόμενους για την κατηγορία του εδάφους που αντιστοιχεί στο πάχος της εδαφικής στρώσης σε κάθε θέση (Field et al. 2000)

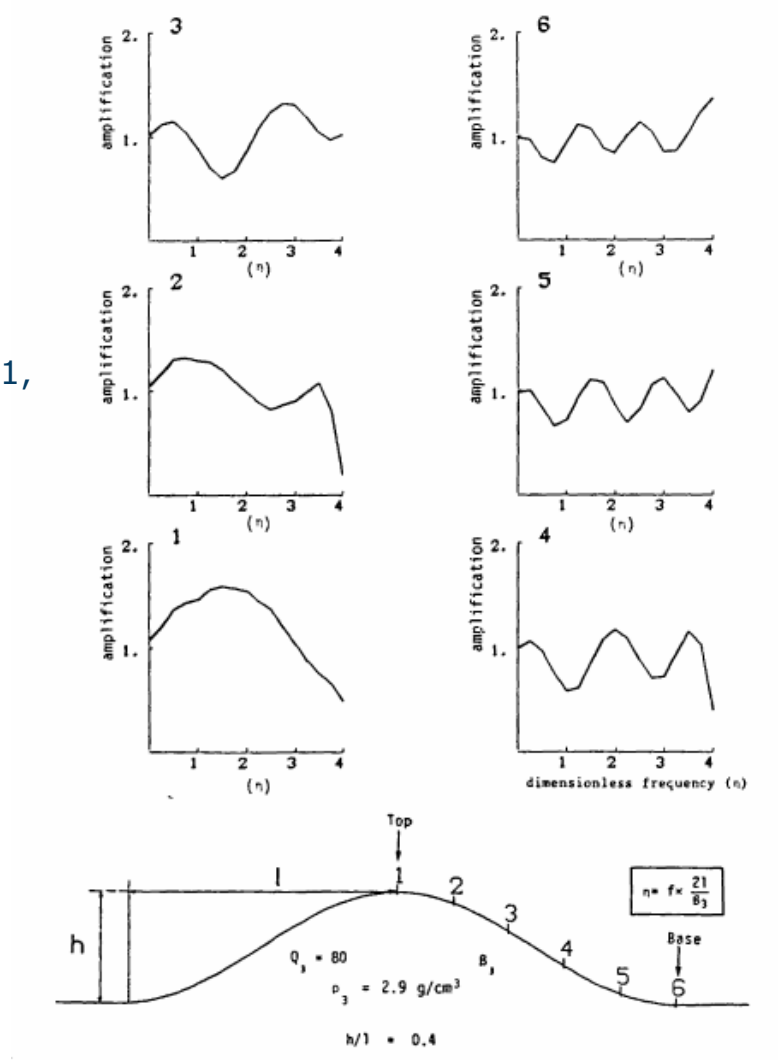


Επιρροή τοπογραφίας

Κορυφές λόφων (Ridges)

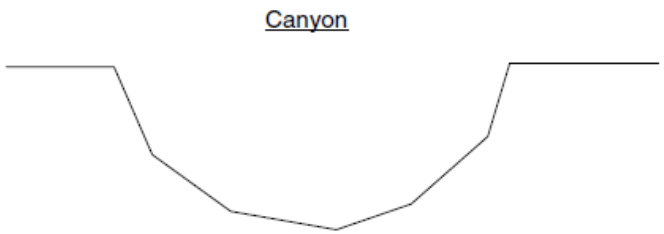


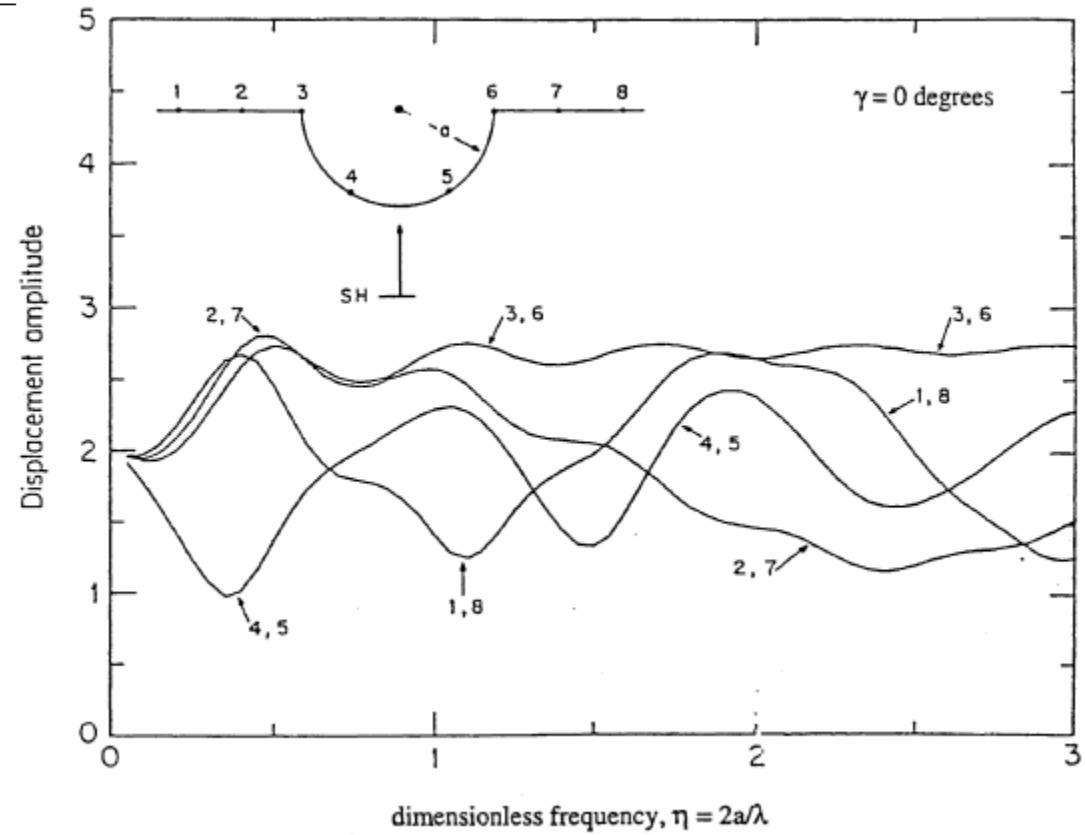
(Stewart et al. 2001, Geli et al. 1988)



- Η ενίσχυση στην κορυφή γίνεται μέγιστη για μήκος κύματος ίσο με το μισό πλάτος του λόφου
- Η αντίστοιχη μέγιστη φασματική ενίσχυση είναι περίπου 1.6

Κοιλάδες (Canyons)

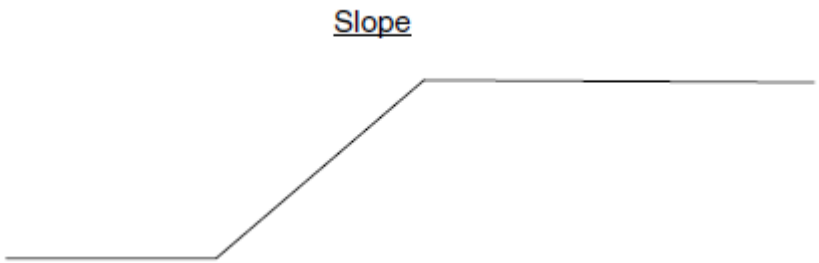




- Η μέγιστη ενίσχυση συμβαίνει κοντά στην άκρη της κοιλάδας για μήκος κύματος ίσο ή μικρότερο της διάστασης της κοιλάδας
- Σε αυτή την περίπτωση, η μέγιστη ενίσχυση είναι περίπου 1.4

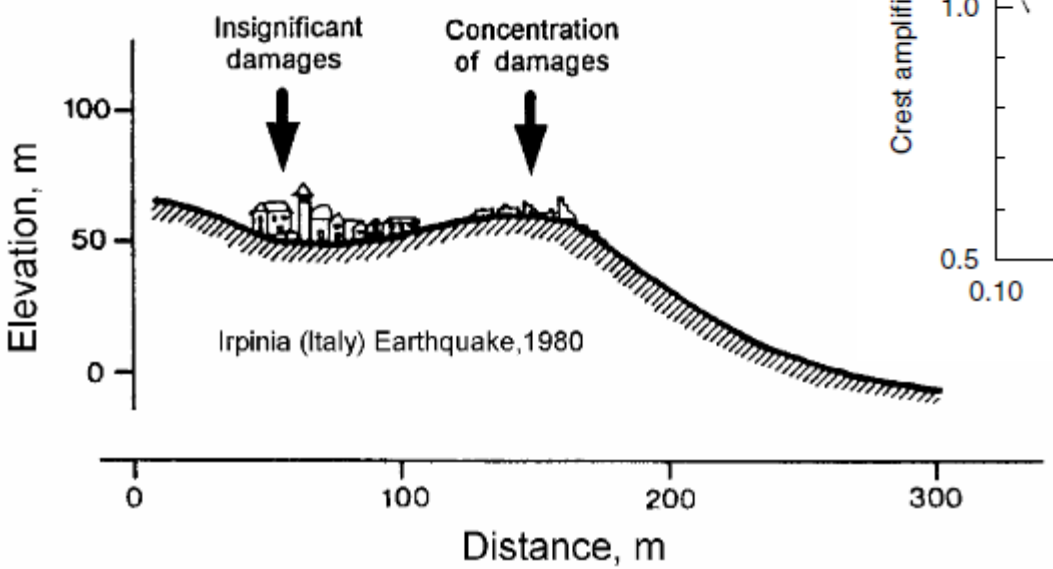
(Trifunac 1973)

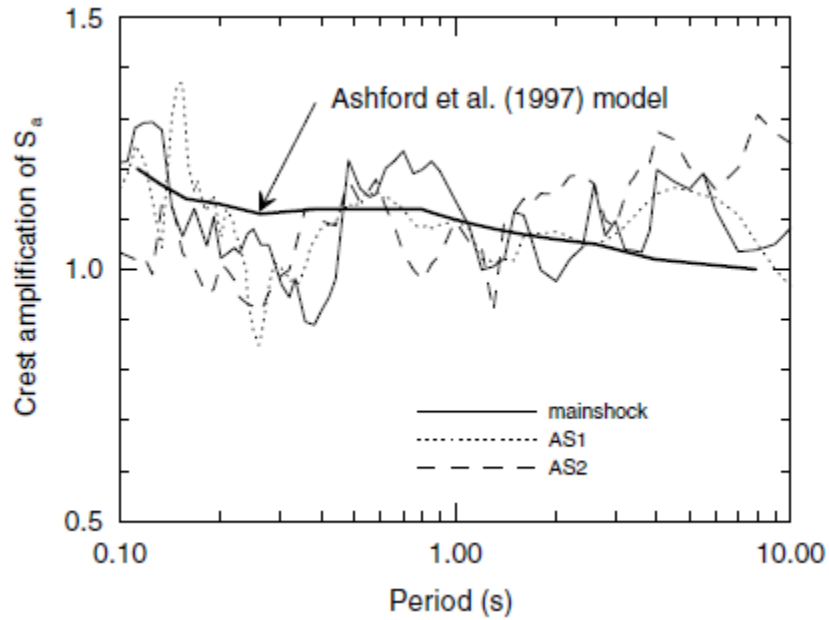
Πλαγιές (Slopes)



Φασματική ενίσχυση στην κορυφή πλαγιάς ύψους 21 m με κλίση 3:1 (ορ:κατ)

- Μέγιστη ενίσχυση κορυφής ~ 1.2





(Stewart & Sholtis 1999)

EC8 – Συντελεστές τοπογραφικής ενίσχυσης

EN-1998-5, Appendix A

- **Isolated cliffs and slopes**
  A value $S_T > 1,2$ should be used for sites near the top edge
- **Ridges with crest width significantly less than the base width**
  A value $S_T > 1,4$ should be used near the top of the slopes for average slope angles greater than 30° and a value $S_T > 1,2$ should be used for smaller slope angles
- **Presence of a loose surface layer**
  In the presence of a loose surface layer, the smallest S_T value given above should be increased by at least 20%
- **Spatial variation of amplification factor**
  The value of S_T may be assumed to decrease as a linear function of the height above the base of the cliff or ridge, and to be unity at the base.