

7. Αντισεισμικός Σχεδιασμός Υπογείων Έργων

με την πολύτιμη συμβολή του

Γ. Κουρετζή

Δρ. Πολ. Μηχανικού Ε.Μ.Π.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

- 7.1 Σεισμοί και υπόγεια έργα**
- 7.2 Αντισεισμικός σχεδιασμός έναντι προσωρινών μετατοπίσεων**
- 7.3 Αντισεισμικός σχεδιασμός έναντι παραμενουσών μετατοπίσεων**

7.1 Σεισμοί και Υπόγεια Έργα

Πρόλογος

Η ενότητα που ακολουθεί αφορά στον αντισεισμικό σχεδιασμό «γραμμικών» υπογείων έργων, δηλαδή σηράγγων, οχετών ή αγωγών κυκλικής διατομής. Τα στοιχεία που παρουσιάζονται μπορούν εύκολα να επεκταθούν και σε έργα με μη κυκλική διατομή, δεν ισχύουν όμως ούτε κατά προσέγγιση για μη γραμμικά έργα, όπως υπόγειοι σταθμοί και αποθήκες ή φρέατα.

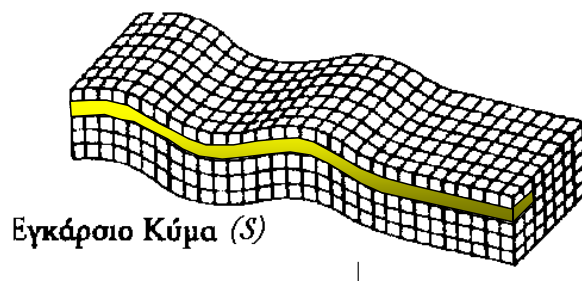
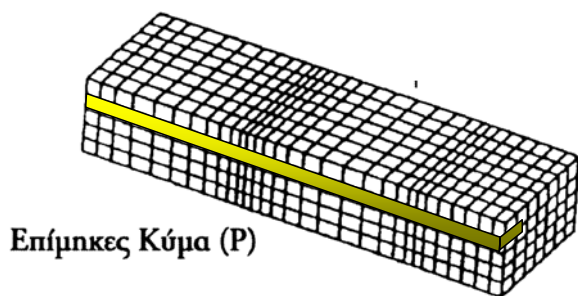
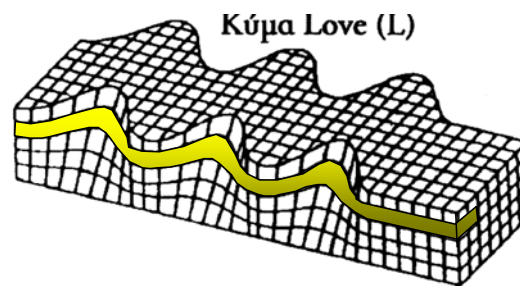
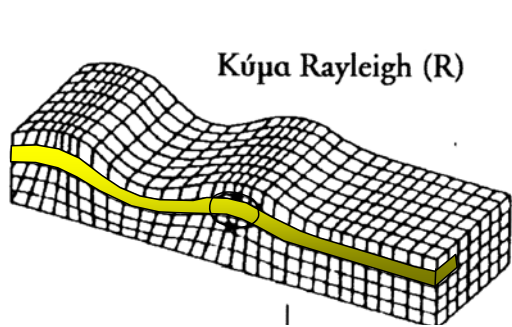
Ένα κοινό χαρακτηριστικό των εν λόγω γραμμικών έργων, που τα διαχωρίζει από τα περισσότερα επιφανειακά έργα, είναι η μεγάλη σχετικά ευκαμψία τους και η μικρή τους μάζα σχετικά με το περιβάλλον έδαφος. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα η απόκριση τους στις μετατοπίσεις που επιβάλλει το έδαφος να είναι άμεση, με περιορισμένα φαινόμενα αδρανειακής αλληλεπίδρασης. Έτσι, η ανάλυση τους μπορεί να γίνει στατικά (όχι ψευδο-στατικά), στον βαθμό βέβαια που οι μετατοπίσεις του εδάφους είναι εκ των προτέρων γνωστές.

Η ακόλουθη παρουσίαση επικεντρώνεται αρχικά στις βλάβες που οφείλονται στις προσωρινές (transient) και στις παραμένοντες (permanent) εδαφικές μετατοπίσεις που επιβάλλει ο σεισμός. Ακολούθως, παρουσιάζεται με λεπτομέρεια η μεθοδολογία υπολογισμού για την περίπτωση των προσωρινών μετατοπίσεων, στην οποία η αναλυτική αντιμετώπιση είναι εν πολλοίς ικανοποιητική.

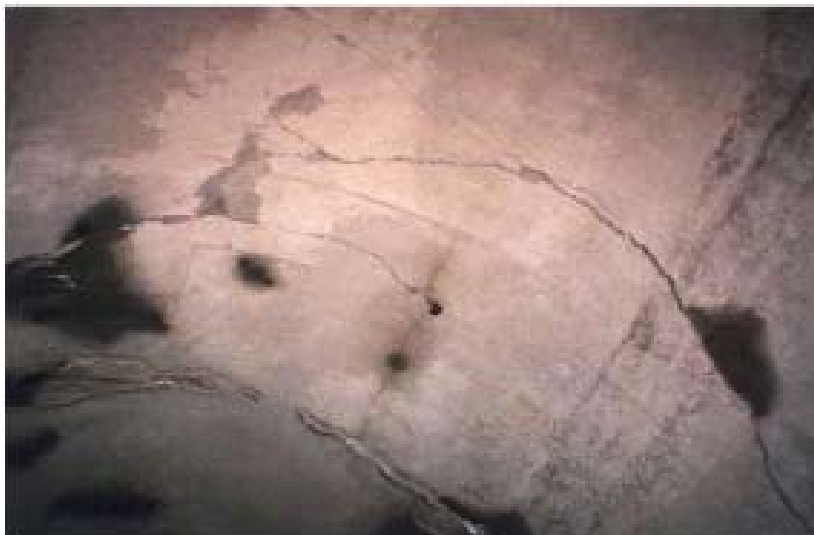
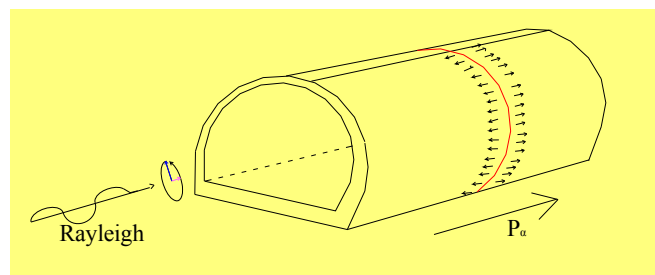
Η μεθοδολογία υπολογισμού για την περίπτωση των παραμενουσών μετατοπίσεων είναι περισσότερο σύνθετη, και επιπλέον απαιτεί την εφαρμογή μη γραμμικών ελαστο-πλαστικών αριθμητικών αναλύσεων για τις πλείστες των περιπτώσεων πρακτικού ενδιαφέροντος. Παρά το γεγονός αυτό, οι βασικές αρχές υπολογισμού περιγράφονται με την βοήθεια ενός πραγματικού παραδείγματος: τον έλεγχο του χαλύβδινου αγωγού μεταφοράς αργού πετρελαίου από την Θεσ-νίκη στα Σκόπια, στις περιοχές δύο ενεργών ρηγμάτων, ενός ορθού (normal) και ενός οριζόντιας ολίσθησης (strike-slip).

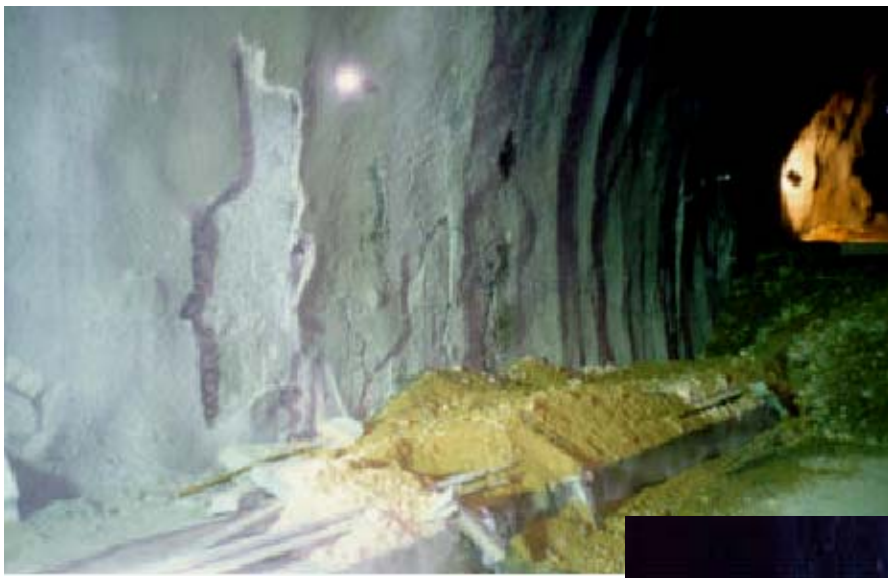
Οι προσωρινές (transient) μετατοπίσεις

που προκαλεί ο σεισμός οφείλονται αποκλειστικά στα σεισμικά κύματα

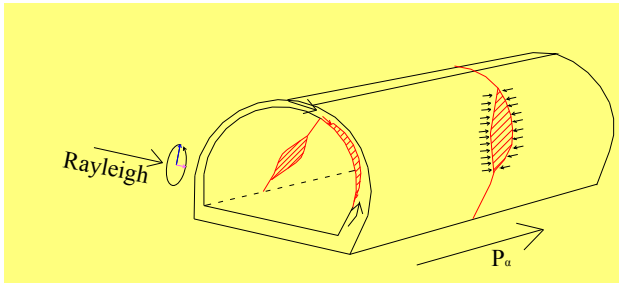


➤ Περιμετρικές ρωγμές

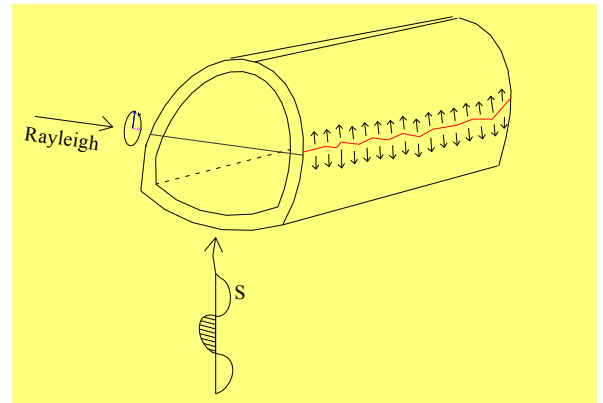


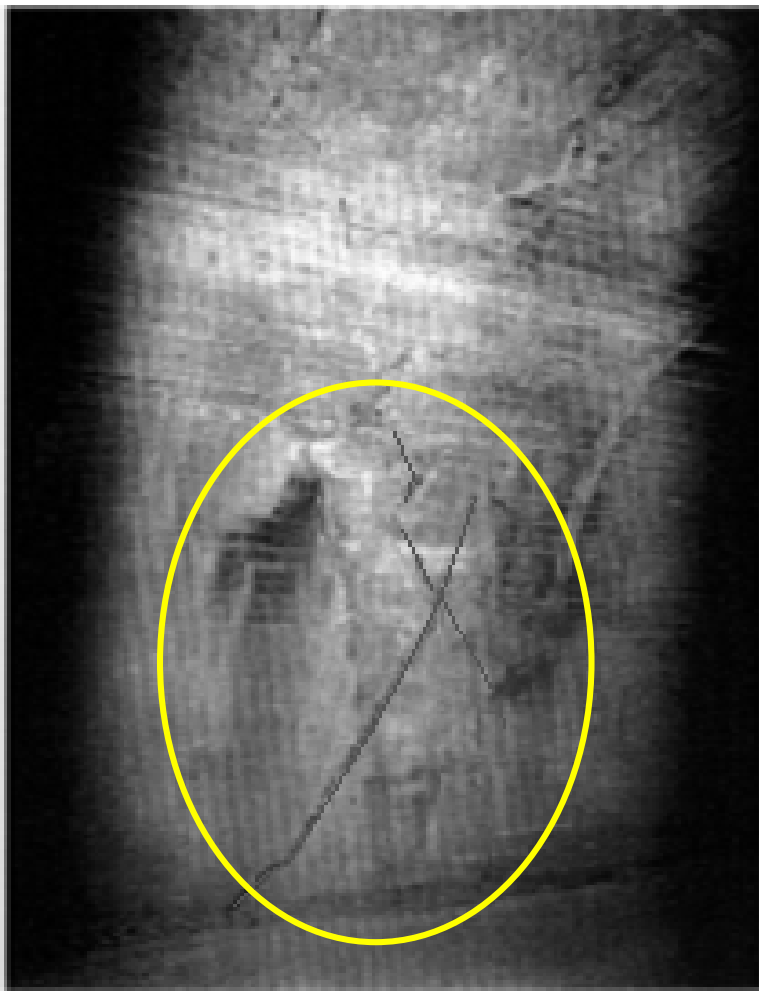


➤ Θρυμματισμός
σκυροδέματος -
θλίψη

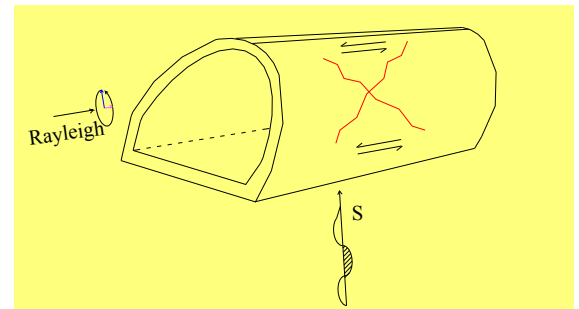


➤ Διαμήκεις ρωγμές

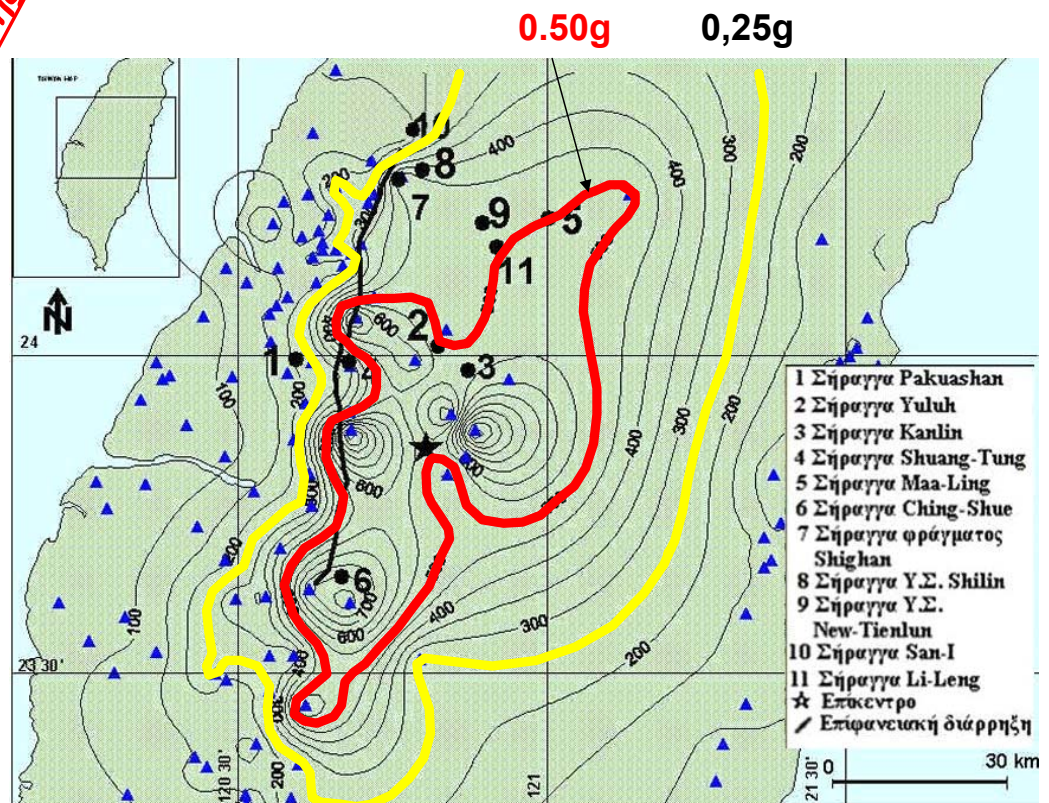




➤ Διατμητικές ρωγμές

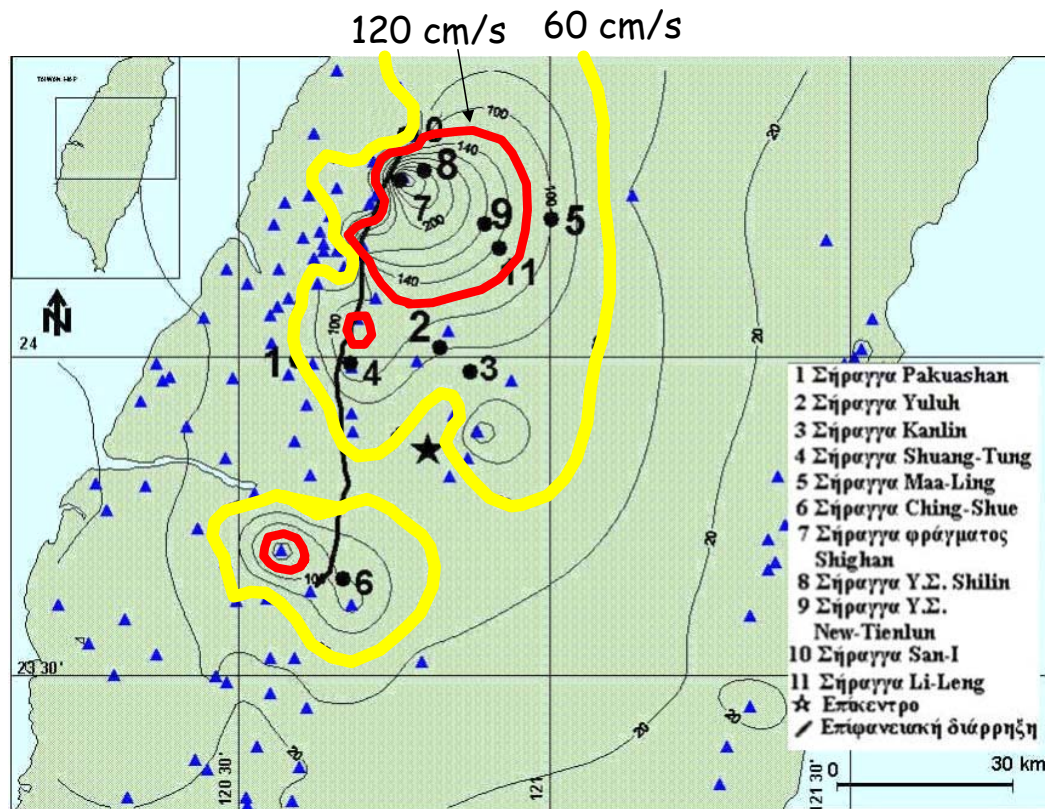


Πότε συντρέχουν λόγοι ανησυχίας για βλάβες λόγω της κυματικής διάδοσης.



Θέσεις υπογείων έργων (σηράγγων από σκυρόδεμα) με βλάβες από τον σεισμό **CHI-CHI** (1999) σε σχέση με την κατανομή των μέγιστων σεισμικών επιταχύνσεων στην επιφάνεια του εδάφους.

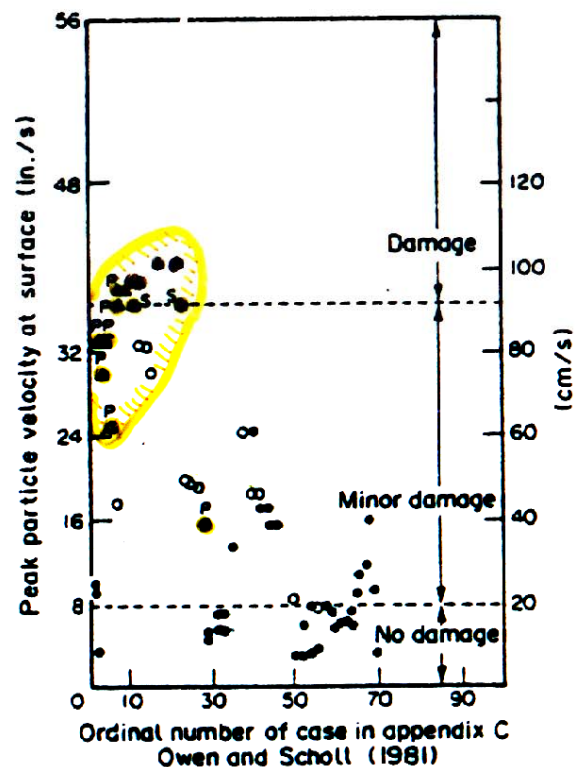
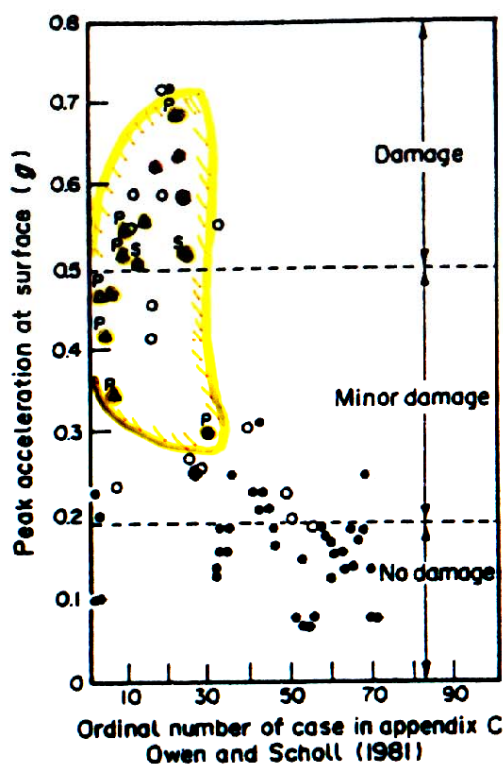
Προσέξτε ότι όλες οι θέσεις ευρίσκονται μέσα στο περίγραμμα των 0.25g



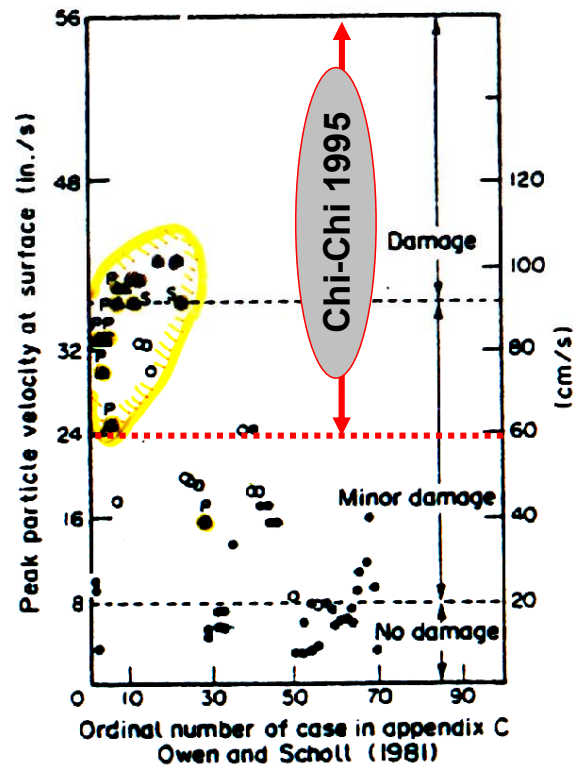
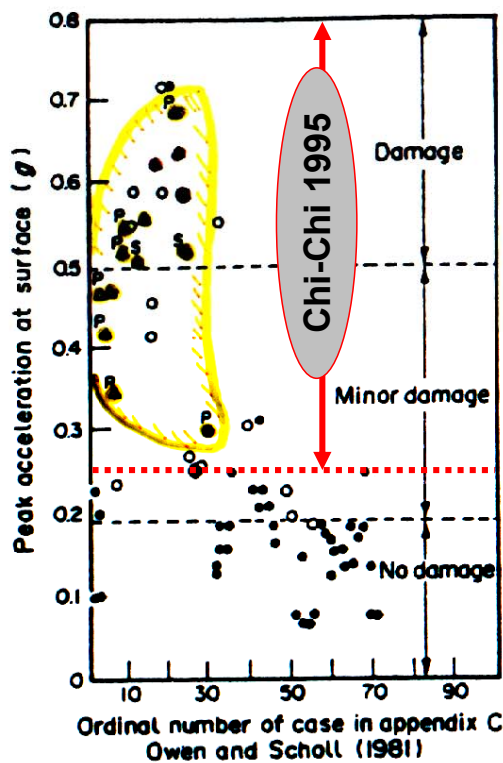
Θέσεις υπογείων έργων (σηράγγων από σκυρόδεμα) με βλάβες από τον σεισμό **CHI-CHI** (1999) σε σχέση με την κατανομή των μέγιστων σεισμικών ταχυτήτων στην επιφάνεια του εδάφους.

Προσέξτε ότι όλες οι θέσεις ευρίσκονται μέσα στο περίγραμμα των 60 cm/s

Συσχέτιση της ισχυρής κίνησης με αστοχίες σε υπόγεια έργα

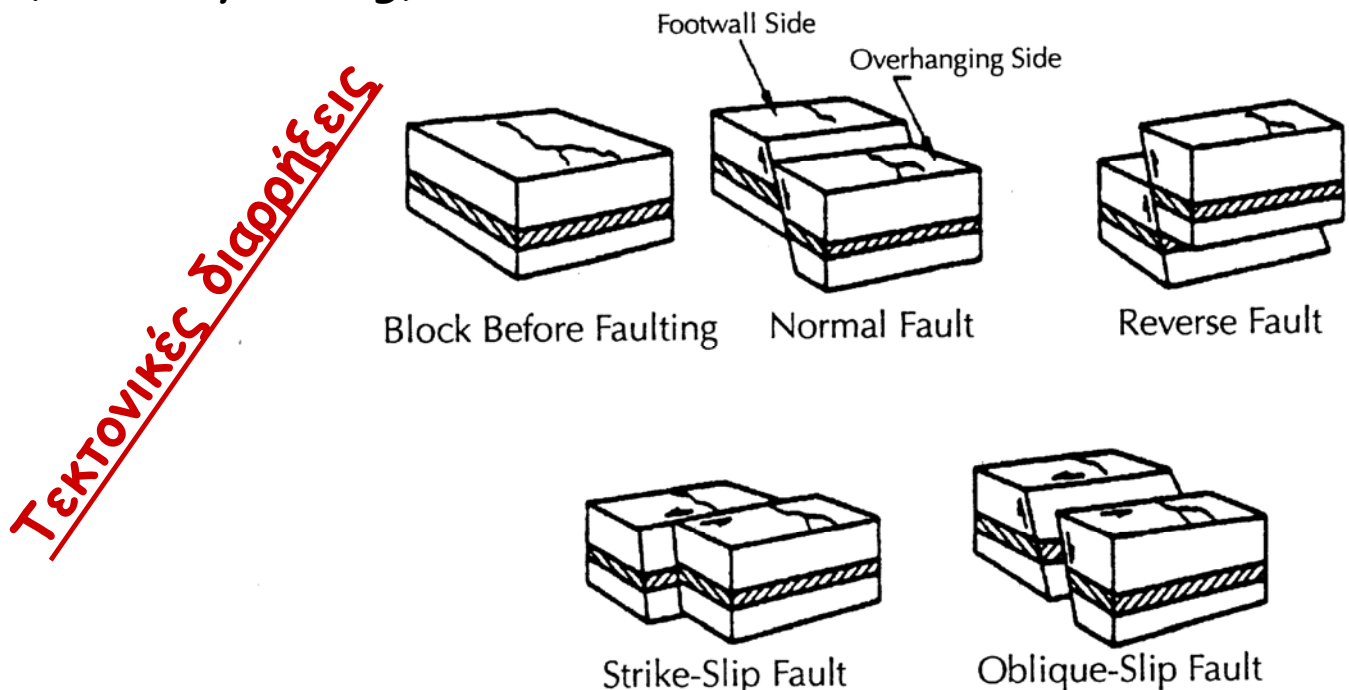


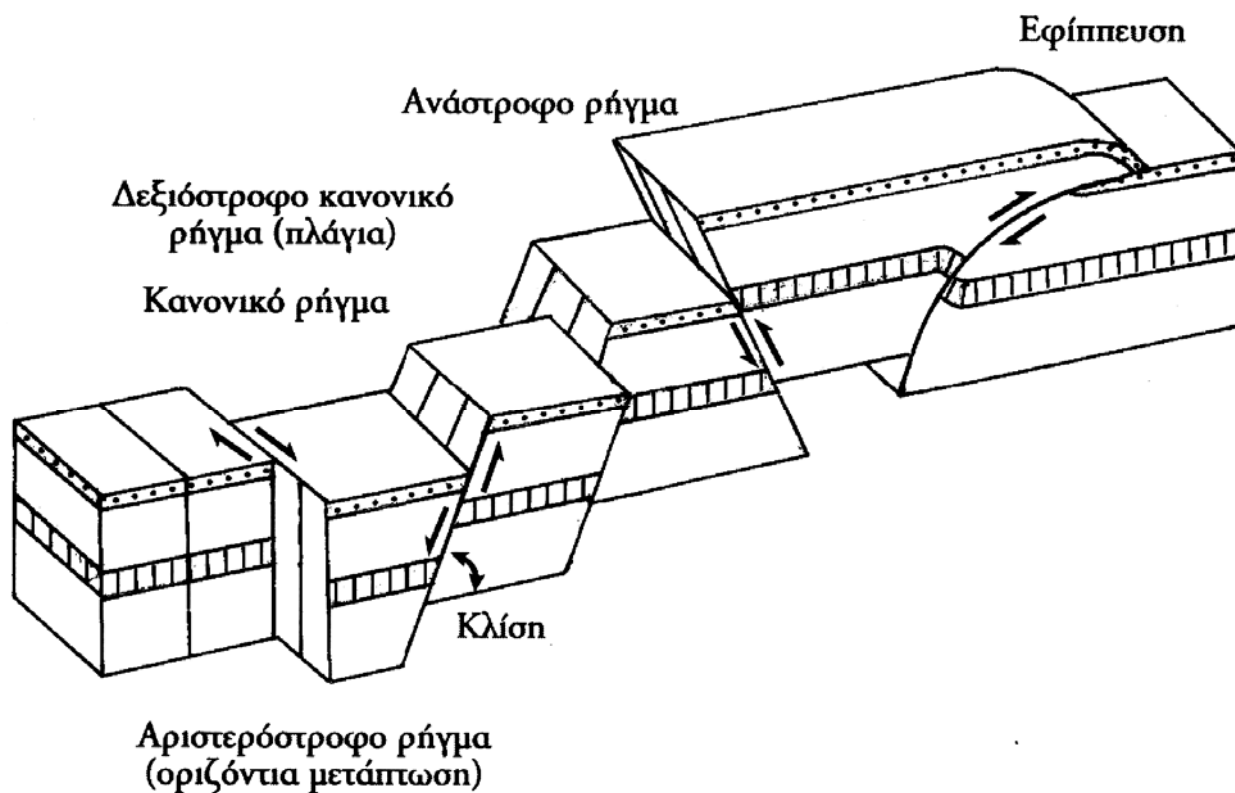
Συσχέτιση της ισχυρής κίνησης με αστοχίες σε υπόγεια έργα



Οι παραμένουσες (permanent) μετατοπίσεις

οφείλονται κατά κανόνα σε αστοχία του εδάφους κατά την διάρκεια ή λόγω του σεισμού. Κλασσικά παραδείγματα αποτελούν οι τεκτονικές διαρρήξεις **ρηγμάτων**, οι **κατολισθήσεις**, οι **αστοχίες απότομων πρανών**, και οι αστοχίες πρανών ήπιας κλίσης λόγω ρευστοποίησης (*lateral spreading*).

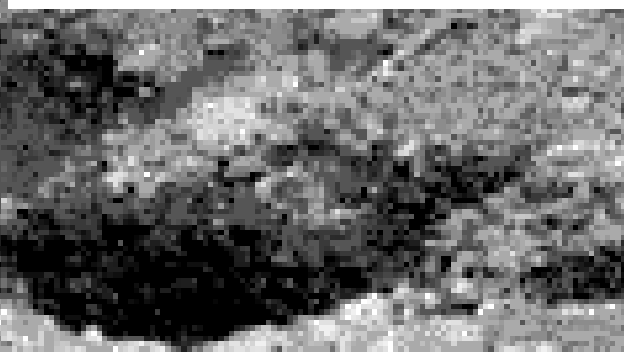
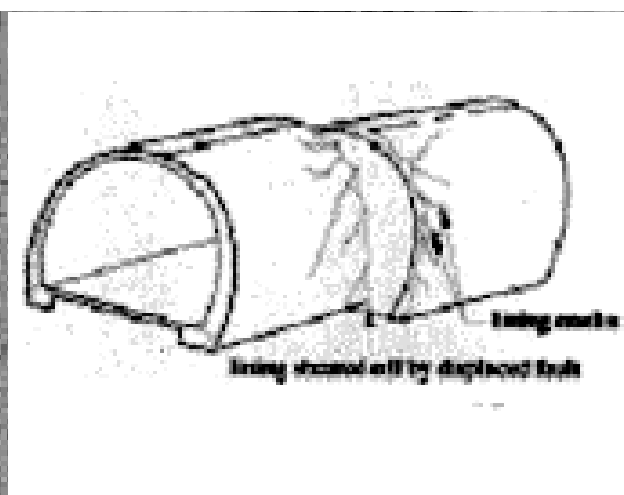




και στα ελληνικά

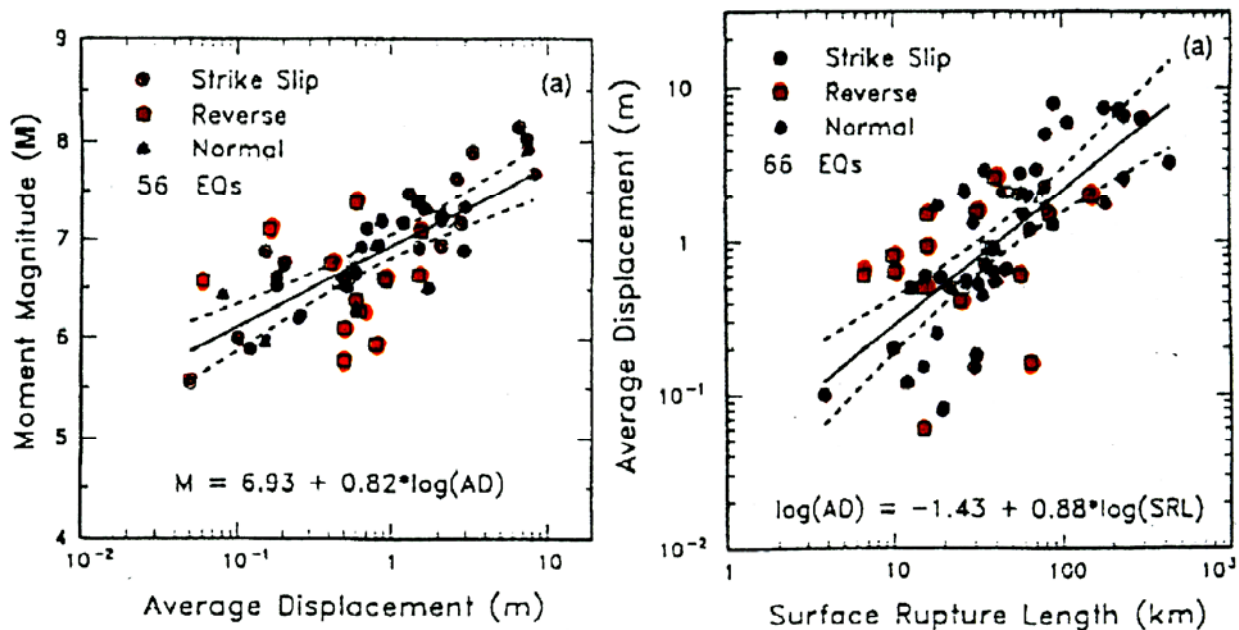
Κατάρρευση σήραγγας λόγω τεκτονικής διάρρηξης

(σήραγγα φράγματος Shih-Gang, Chi-Chi, 1999)



Εμπειρικές σχέσεις υπολογισμού της ΜΕΣΗΣ αναμενόμενης μετατόπισης λόγω τεκτονικών διαρρήξεων (Wells & Coppersmith, 1994).

Οι ΜΕΓΙΣΤΕΣ αναμενόμενες μετατοπίσεις είναι περίπου διπλάσιες.



Παραμένουσες
(permanent)
μετατοπίσεις

λόγω

ΑΣΤΟΧΙΑΣ
ΠΡΑΝΟΥΣ

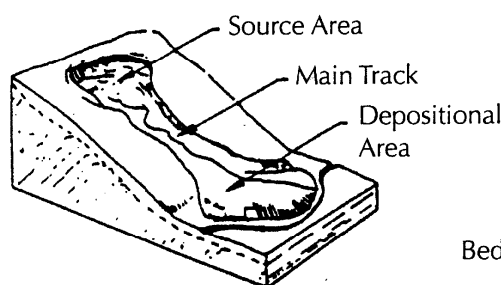


Rock Fall

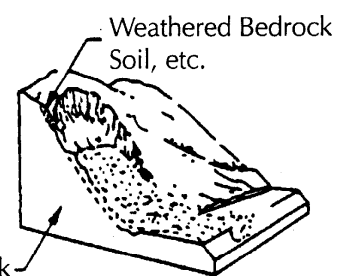


Rock Tumble

(a) Type I

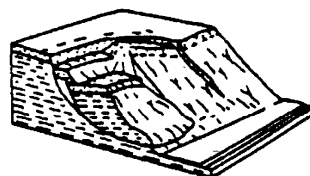


Earth Flow (Very Slow to Rapid)

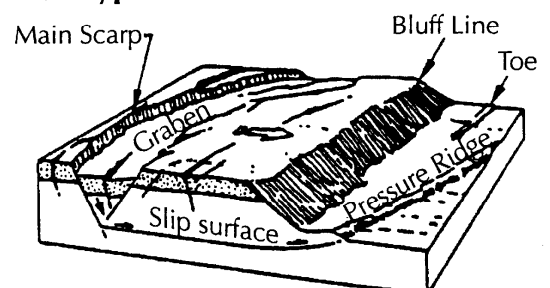


Debris Avalanche (Very Rapid to Extremely Rapid)

(b) Type II

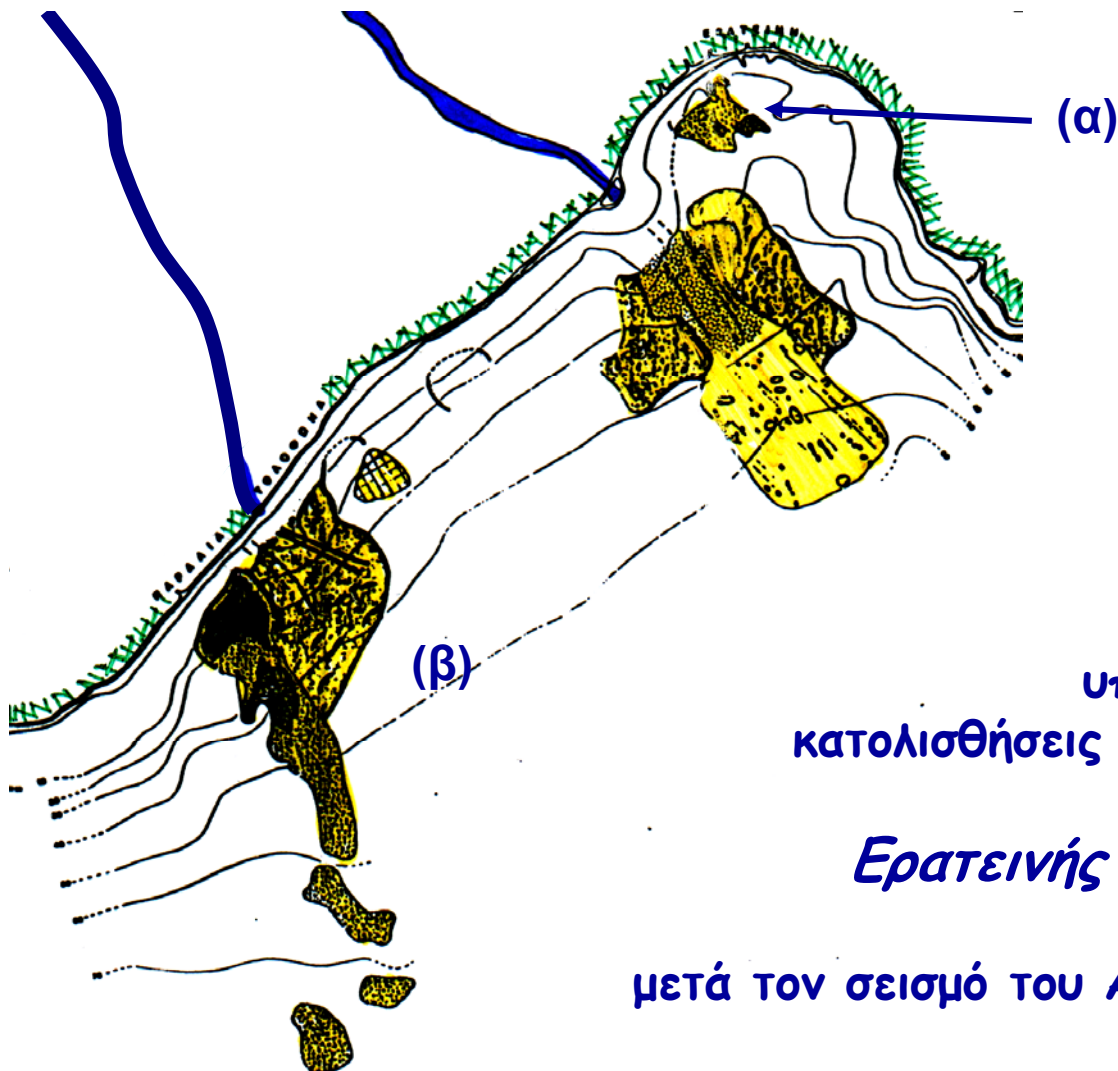


Earth Slump



Earth Block Slide

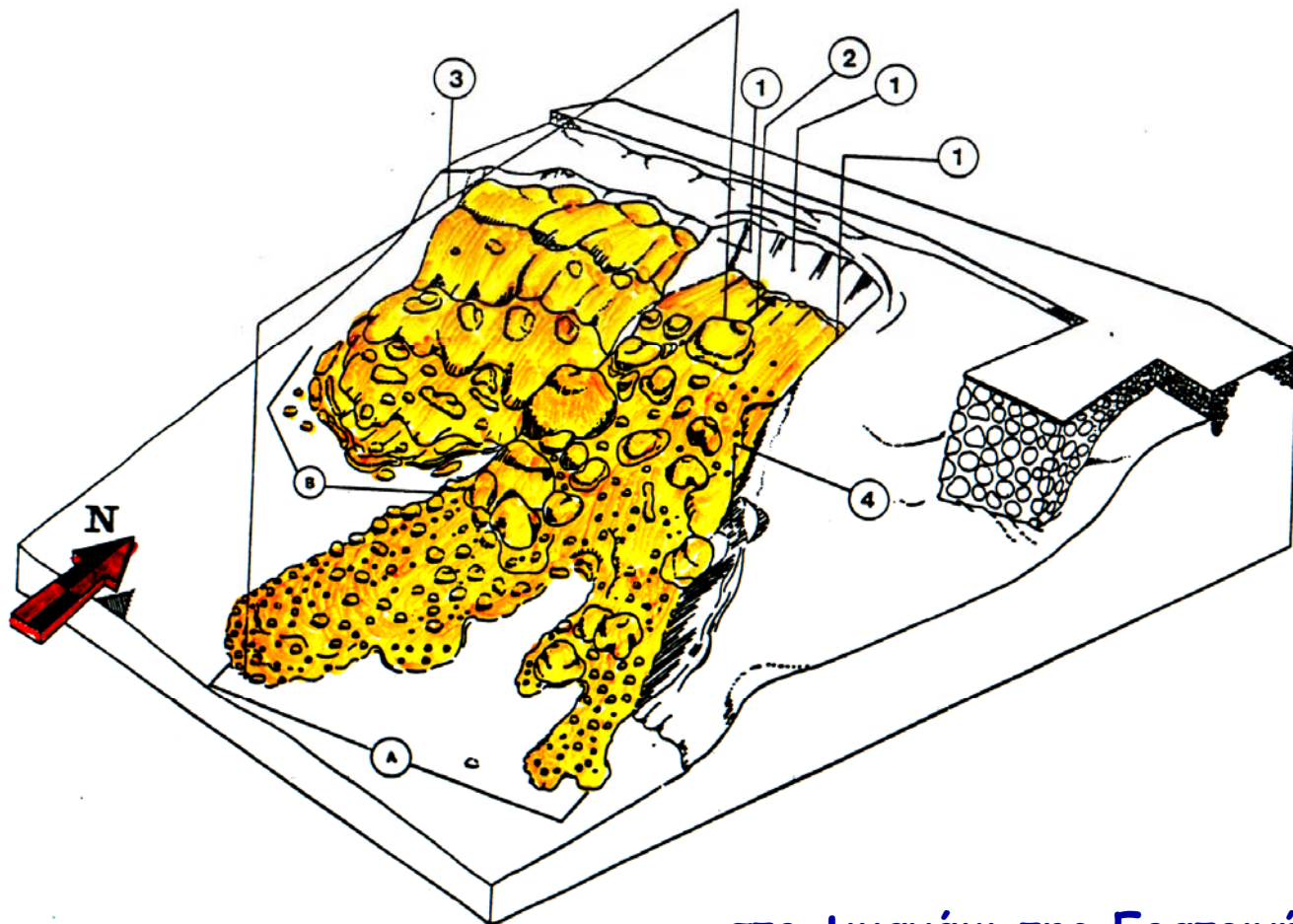
(c) Type III



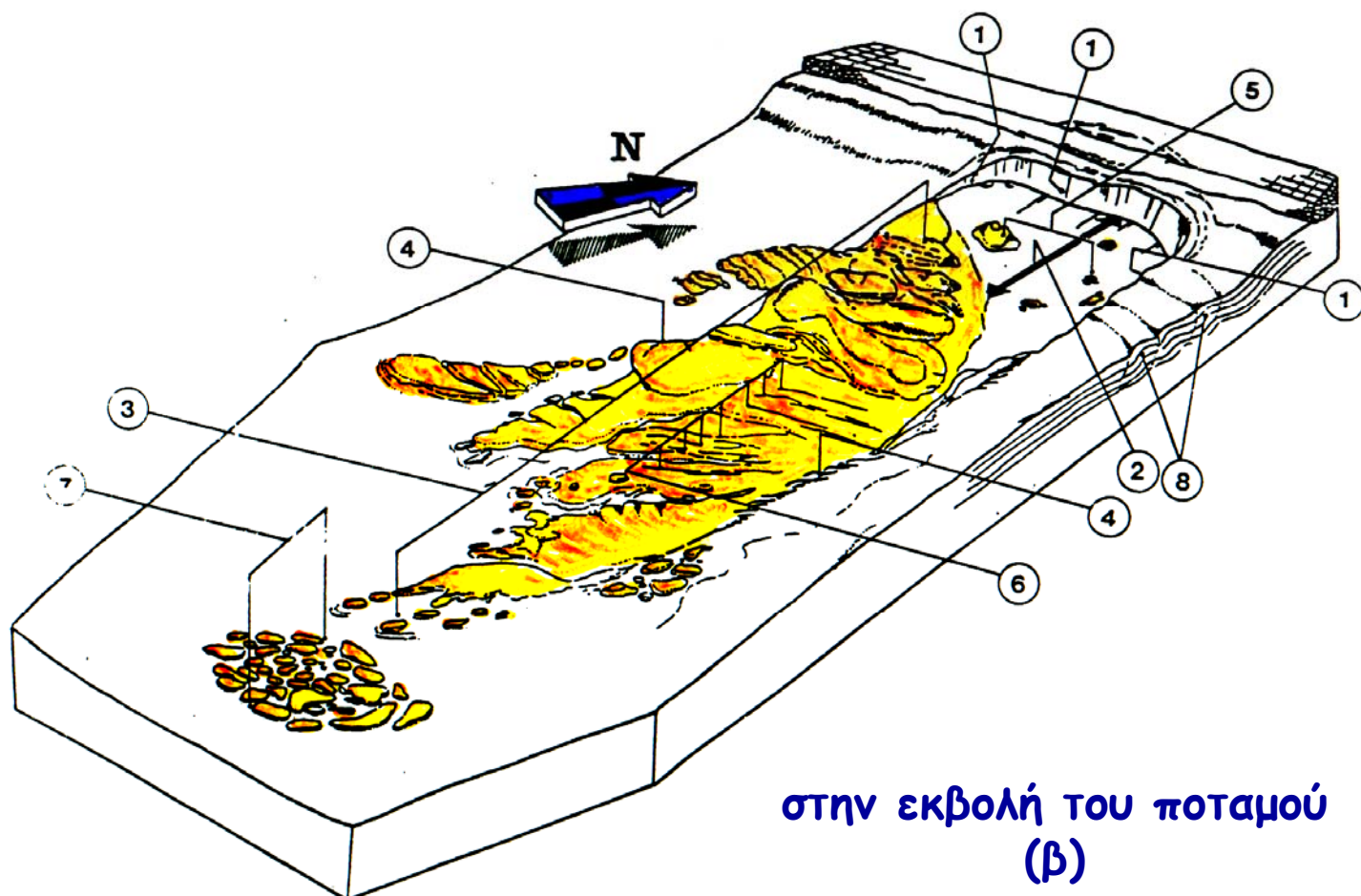
υπο-θαλάσσιες
κατολισθήσεις στην παραλία

Ερατεινής - Τολοφώνα

μετά τον σεισμό του Αιγίου (1995)



στο λιμανάκι της Ερατεινής
(α)

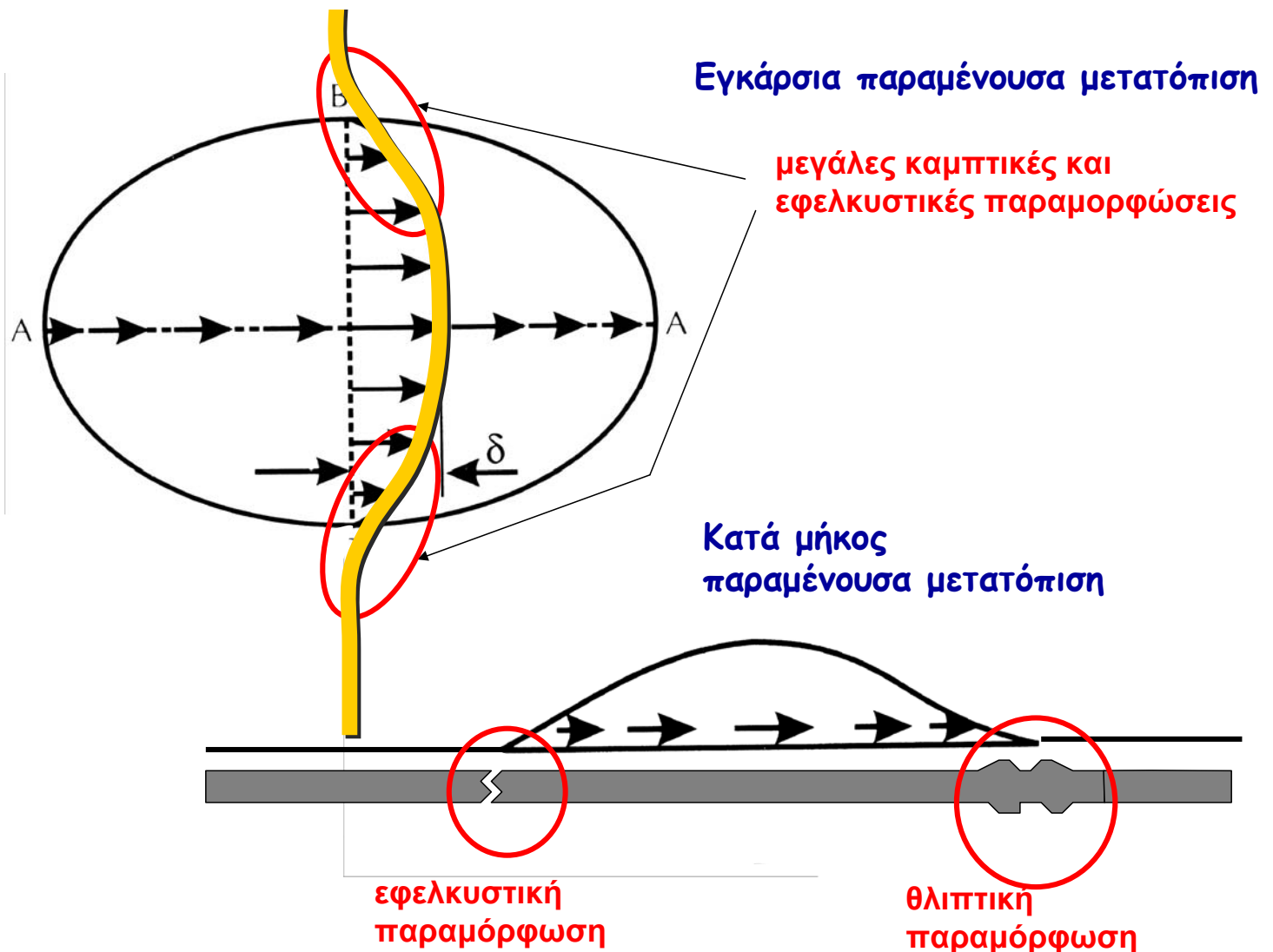
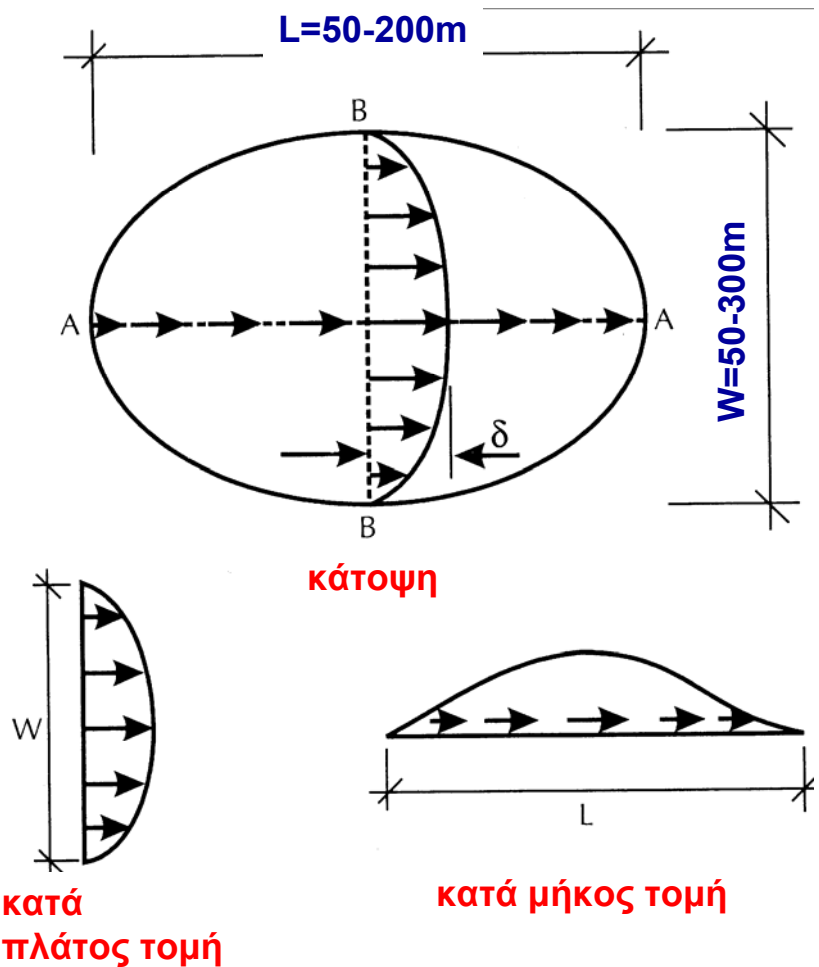


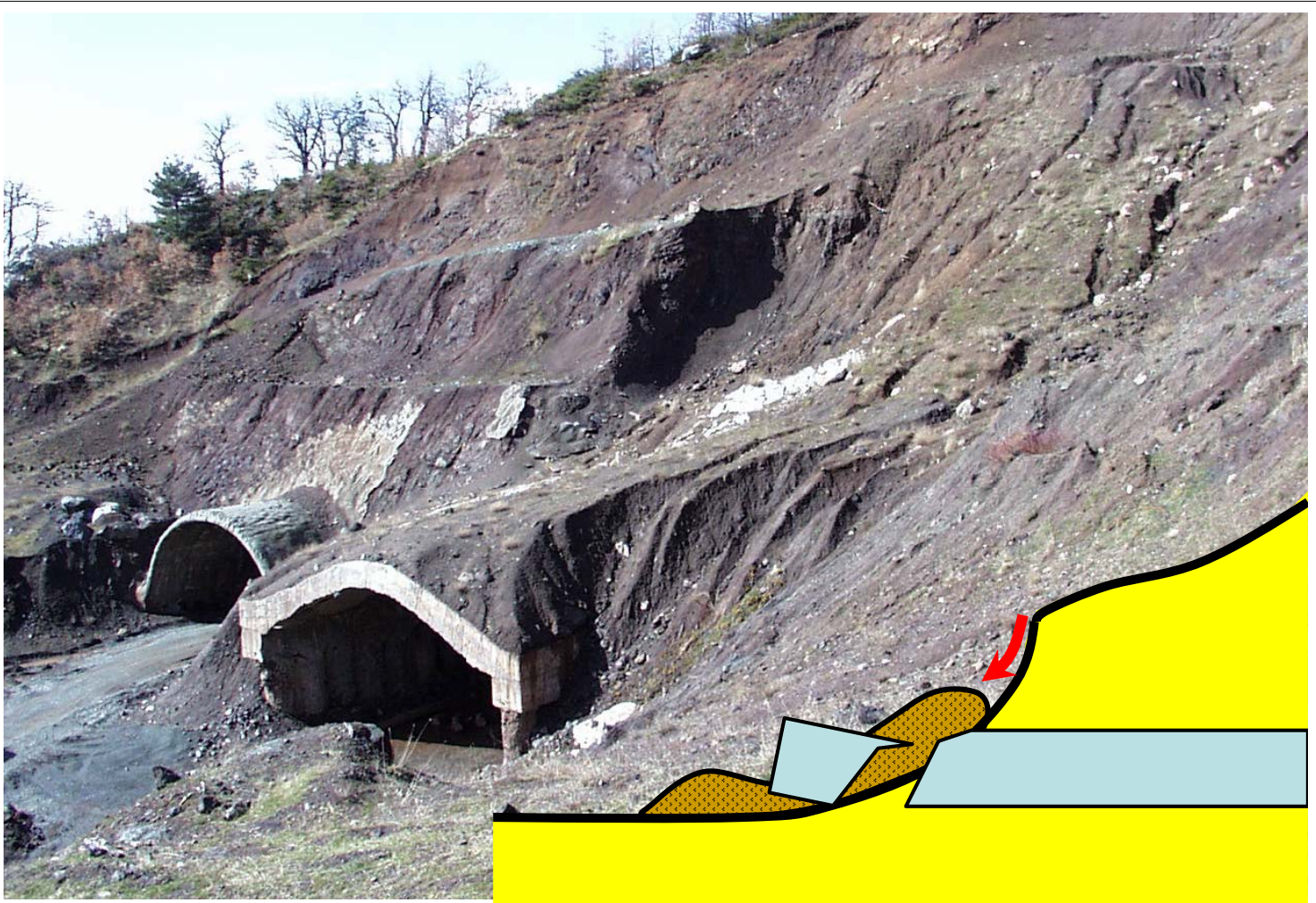
στην εκβολή του ποταμού
(β)

Στην περίπτωση αστοχίας πρανών κινητοποιούνται πολλές χιλιάδες κυβικών εδάφους, για μετατοπίσεις που μπορεί να κυμαίνονται από λίγα εκατοστά -έως- αρκετά μέτρα (όταν το έδαφος χάνει την αντοχή του κατά την διάρκεια της δόνησης, όπως για παράδειγμα λόγω ρευστοποίησης).

Ο υπολογισμός των εν λόγω μετατοπίσεων θα μας απασχολήσει σε επόμενες διαλέξεις.

Δεν είναι όμως εξίσου απλός (:) όπως στην περίπτωση των ρηγμάτων αφού υπεισέρχονται αρκετοί σεισμολογικοί-γεωτεχνικοί-τοπογραφικοί παράγοντες.





*Slope failure above the western portal of the Malakassi C Tunnel.
(E. Hoek & P. Marinos, 4th Report on Egnatia Highway Project, March 1999).*

7.2 Αντισεισμικός Σχεδιασμός Έναντι «Προσωρινών» Μετατοπίσεων

Πρόλογος.....

Σε σχέση με τις παραμένουσες (permanent), οι προσωρινές μετατοπίσεις είναι ευμενέστερες, και τούτο διότι οι μετατοπίσεις αυτές δεν είναι μόνον ... προσωρινές αλλά και μικρές σε σχέση με τις παραμένουσες.

Για παράδειγμα, ένας ισχυρότατος σεισμός με μέγιστη επιτάχυνση $a_{\max} = 0.80g$ και περίοδο περί τα 0.70sec οδηγεί σε μέγιστες εδαφικές μετατοπίσεις ολίγων μόνον cm,

$$S_{\max} = a_{\max} T^2 / (2\pi)^2 = 10 \text{ cm} \text{ μόνον}$$

αντίθετα με την παραμένουσα μετατόπιση που επιβάλλει η διάρρηξη του σεισμικού ρήγματος η οποία υπερβαίνει το 1.00 m.

ΑΠΟ ΤΗΝ ΑΛΛΗ ΠΛΕΥΡΑ όμως

η προσωρινή καταπόνηση λόγω των σεισμικών κυμάτων επιβάλλεται σε ολόκληρο πρακτικά το μήκος του υπόγειου έργου (αρκετά km), και όχι μόνον στην περιοχή του ρήγματος ($\pm 50\text{m}$). Επιπλέον, η καταπόνηση λόγω σεισμικών κυμάτων έχει μικρότερη «περίοδο επανεμφάνισης» (100-500 έτη) σε αντίθεση με την διάρρηξη των ενεργών ρηγμάτων όπου η Π.Ε. είναι 10,000-100,000 έτη.

Και οι δύο αυτοί παράγοντες, αυξάνουν σημαντικά την σπουδαιότητα των προσωρινών μετατοπίσεων.

(Α) ΟΡΙΣΜΟΙ - ΠΑΡΑΔΟΧΕΣ

Παραδοχές

- Αρμονικό κύμα
- Δεν υπάρχει ολίσθηση στην διεπιφάνεια εδάφους-κατασκευής
- Η αλληλεπίδραση εδάφους-κατασκευής μπορεί να αγνοηθεί (συντελεστής κινηματικής αλληλεπίδρασης F)

Για να ισχύει η 3η παραδοχή θα πρέπει...

$$F = \frac{2E_m(1-\nu_l^2)\left(\frac{D}{2}\right)^3}{E_l(1+\nu_m)t^3} > 20$$

E_m =μέτρο ελαστικότητας εδάφους
 E_l =μέτρο ελαστικότητας ΥΕ
 ν_m =λόγος Poisson εδάφους
 ν_l =λόγος Poisson ΥΕ
 D =διάμετρος ΥΕ
 t =πάχος διατομής

Τυπικό παράδειγμα Ι: χαλύβδινος αγωγός (π.χ. κύριος αγωγός Φυσικού Αερίου)

$E_m=1\text{GPa}$ ($C_s=400\text{m/sec}$)
 $E_l=210\text{GPa}$
 $\nu_m=0.33$
 $\nu_l=0.2$
 $D=1\text{m}$
 $t=0.01\text{m}$

$F \approx 850 \gg 20$

Τυπικό παράδειγμα II : σήραγγα Ο/Σ (π.χ. σήραγγα ΜΕΤΡΟ)

$$\left. \begin{array}{l} E_m = 1 \text{ GPa} \text{ (} C_s = 400 \text{ m/sec)} \\ E_l = 30 \text{ GPa} \\ \nu_m = 0.33 \\ \nu_l = 0.2 \\ D = 10 \text{ m} \\ t = 0.25 \text{ m} \end{array} \right\} F \cong 385 \gg 20$$

Τυπικό παράδειγμα III : αποχετευτικός αγωγός από Ο/Σ

$$\left. \begin{array}{l} E_m = 1 \text{ GPa} \text{ (} C_s = 400 \text{ m/sec)} \\ E_l = 30 \text{ GPa} \\ \nu_m = 0.33 \\ \nu_l = 0.2 \\ D = 2.5 \text{ m} \\ t = 0.1 \text{ m} \end{array} \right\} F \cong 95 \gg 20$$

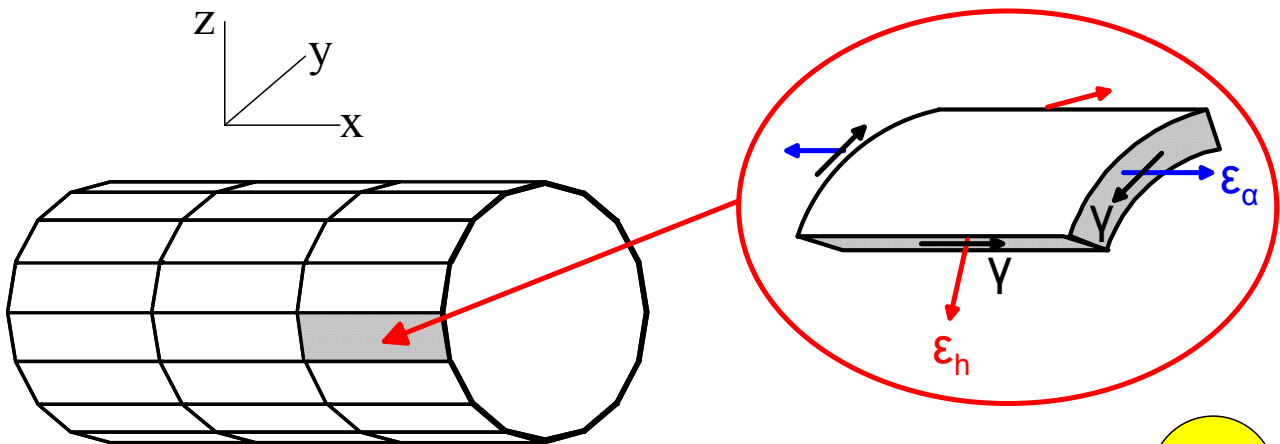
Παραδοχές (συνέχεια)

- Αρμονικό κύμα
- Δεν υπάρχει ολίσθηση στην διεπιφάνεια εδάφους-κατασκευής
- Η αλληλεπίδραση εδάφους-κατασκευής μπορεί να αγνοηθεί (**συντελεστής κινηματικής αλληλεπίδρασης F**)

Άμεση συνέπεια των δυο τελευταίων παραδοχών είναι ότι **οι μετατοπίσεις του Υπογείου Έργου (ΥΕ) ταυτίζονται με τις μετατοπίσεις του εδάφους**

Οι υπολογισμοί παρακάτω γίνονται σε όρους παραμορφώσεων και όχι τάσεων, γιατί ο σεισμός επιβάλλει παραμορφώσεις στα ΥΕ και όχι αδρανειακές δυνάμεις, όπως στα συνήθη κτιριακά έργα. Στόχος του σχεδιασμού είναι να παραλάβει το ΥΕ αυτές τις δεδομένες παραμορφώσεις χωρίς να αστοχήσει.

Παραμορφώσεις σε λεπτότοιχα υπόγεια έργα

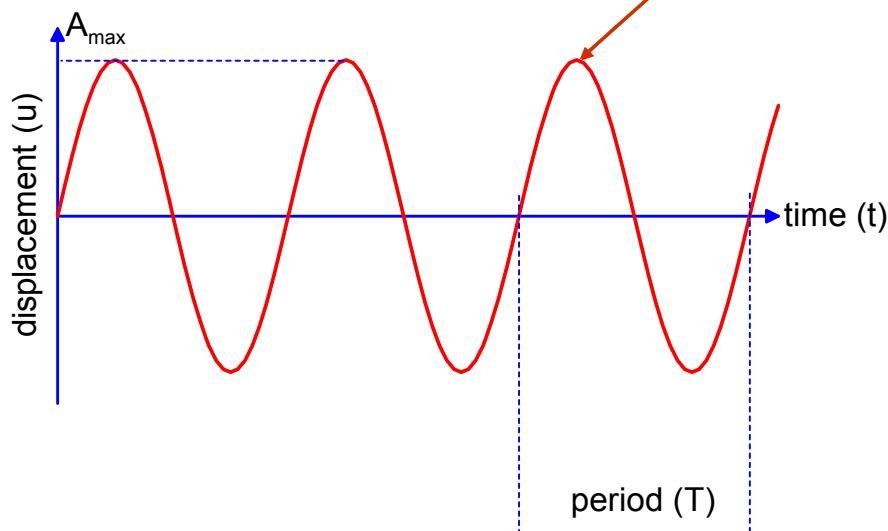


Προσομοιώνοντας το ΥΕ σαν 3-Δ κέλυφος έχουμε ουσιαστικά 3 είδη παραμορφώσεων (και αντίστοιχων τάσεων)...

- αξονικές παραμορφώσεις ϵ_α
- διατμητικές παραμορφώσεις στο επίπεδο της διατομής γ
- περιφερειακές (hoop) παραμορφώσεις ϵ_h

Αγνοούνται δηλαδή οι ορθές και οι διατμητικές παραμορφώσεις στην εξωτερική και στην εσωτερική επιφάνεια του κελύφους (γιατί άραγε ;;)

αρμονική διέγερση: $u = A_{\max} \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda}(x - Ct)\right)$

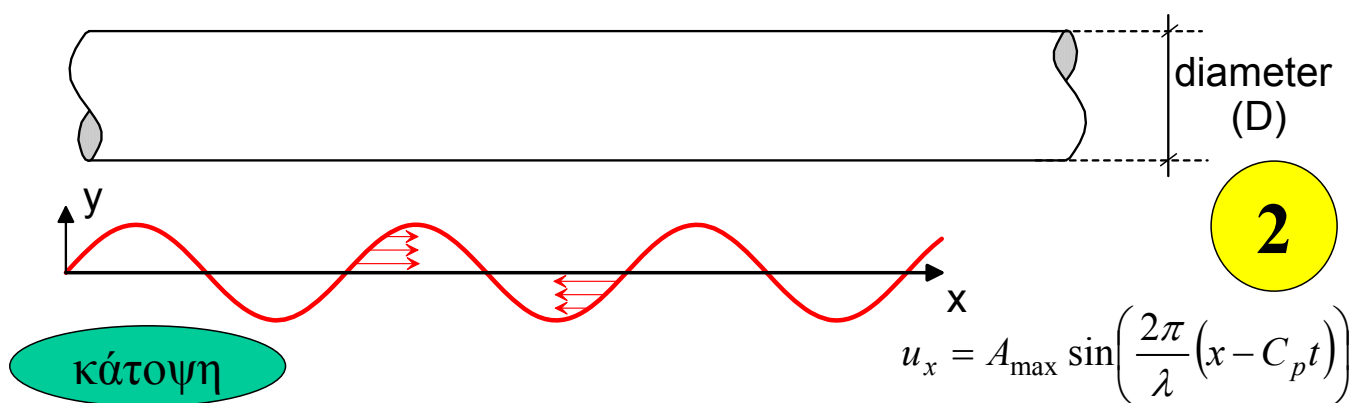


λ =μήκος κύματος C =ταχύτητα διάδοσης t =χρόνος

(B) Απλές (αλλά βασικές) περιπτώσεις κυμάτων

- ✚ Κύμα P διαδιδόμενο κατά μήκος του άξονα (στο επίπεδο xy)
- ✚ Κύμα S διαδιδόμενο κατά μήκος του άξονα (στο επίπεδο xy)
- ✚ Εγκάρσιο κύμα P (στο επίπεδο yz)
- ✚ Εγκάρσιο κύμα S (στο επίπεδο yz)
- ✚ Εγκάρσιο κύμα S (στο επίπεδο xz)

Κύμα P διαδιδόμενο κατά μήκος του άξονα (στο επίπεδο xy)



παραμόρφωση εδάφους
και ΥΕ:

$$\varepsilon_a = \varepsilon_x = \frac{\partial u_x}{\partial x} = \frac{2\pi A_{\max}}{\lambda} \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda}(x - C_p t)\right)$$

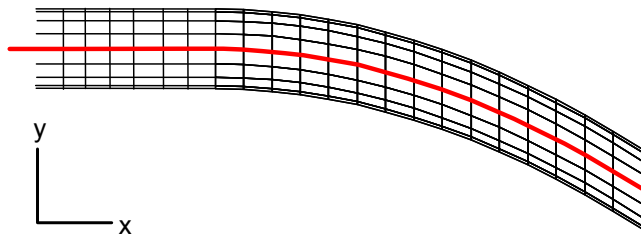
πλάτος παραμόρφωσης

και επομένως...

$$\varepsilon_{a,\max} = \frac{2\pi A_{\max}}{\lambda} = \frac{V_{\max}}{C_p}$$

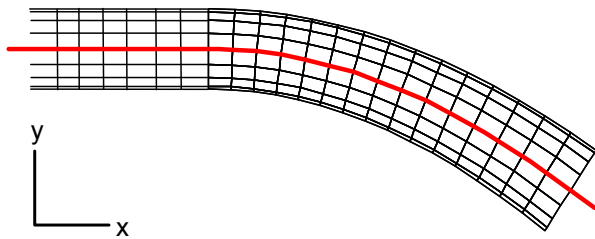
μέγιστη ταχύτητα
ταλάντωσης
εδαφικού στοιχείου

Κύμα S διαδιδόμενο κατά μήκος του άξονα (στο επίπεδο xy)



Η παραδοχή μη-ολίσθησης στην διεπιφάνεια εδάφους-ΥΕ αντιστοιχεί σε ένα μοντέλο διατμητικής δοκού (“shear beam” model)

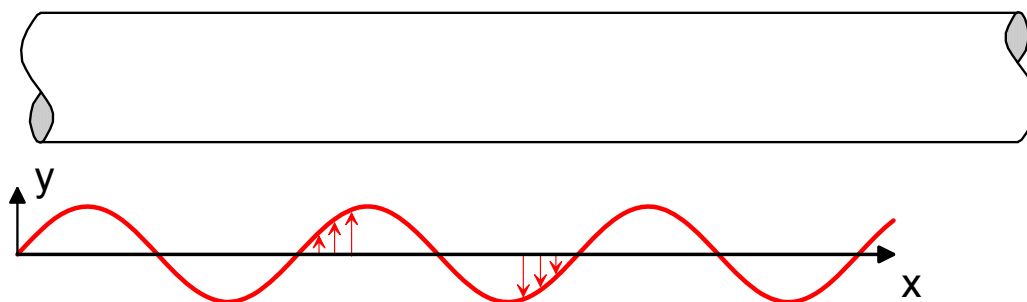
Αν δεν υπάρχει ολίσθηση, δεν υπάρχει σχετική μετακίνηση των «διατομών»- άρα και καμπτικές παραμορφώσεις



αν υποθέσουμε **πλήρη** ολίσθηση στην διεπιφάνεια εδάφους-ΥΕ αναπτύσσονται μόνο καμπτικές και όχι διατμητικές παραμορφώσεις (μοντέλο καμπτικής δοκού - “bending beam” model)

*Στην πράξη πάντα θα έχουμε κάποια ολίσθηση, ειδικά σε ισχυρές διεγέρσεις
Χρησιμοποιούμε όμως την παραδοχή μη-ολίσθησης ως συντηρητική*

χρησιμοποιώντας λοιπόν το “shear beam model”...



κάτοψη

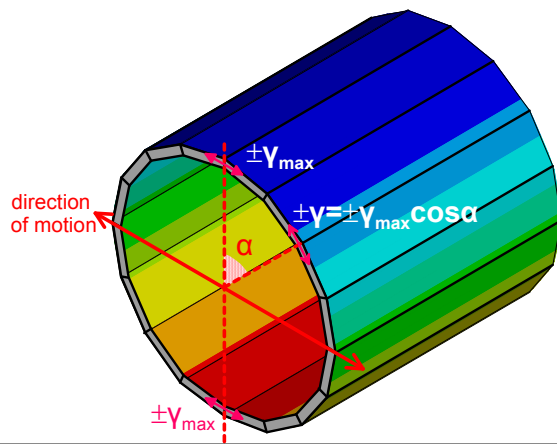
$$u_y = A_{\max} \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda}(x - C_s t)\right)$$

παραμόρφωση εδάφους
και ΥΕ:

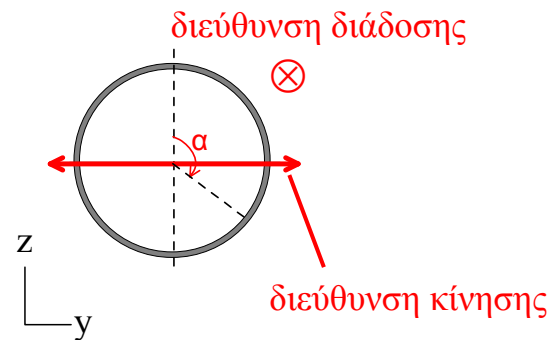
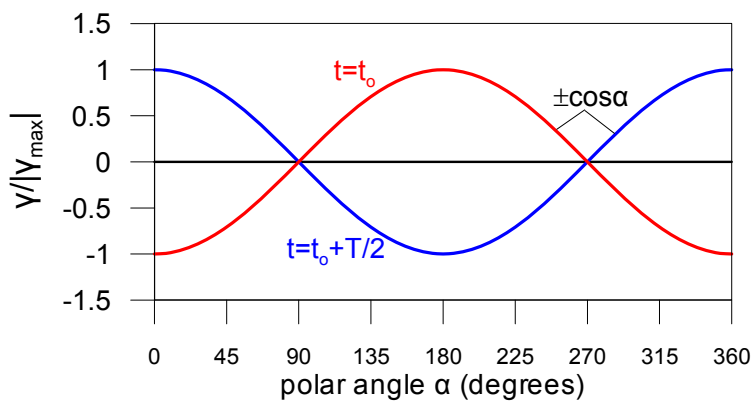
$$\gamma = \frac{\partial u_y}{\partial x} = \frac{V_{\max}}{C_s} \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda}(x - C_s t)\right)$$

$$\gamma_{\max} = \frac{V_{\max}}{C_s}$$

κατανομή των παραμορφώσεων στην διατομή

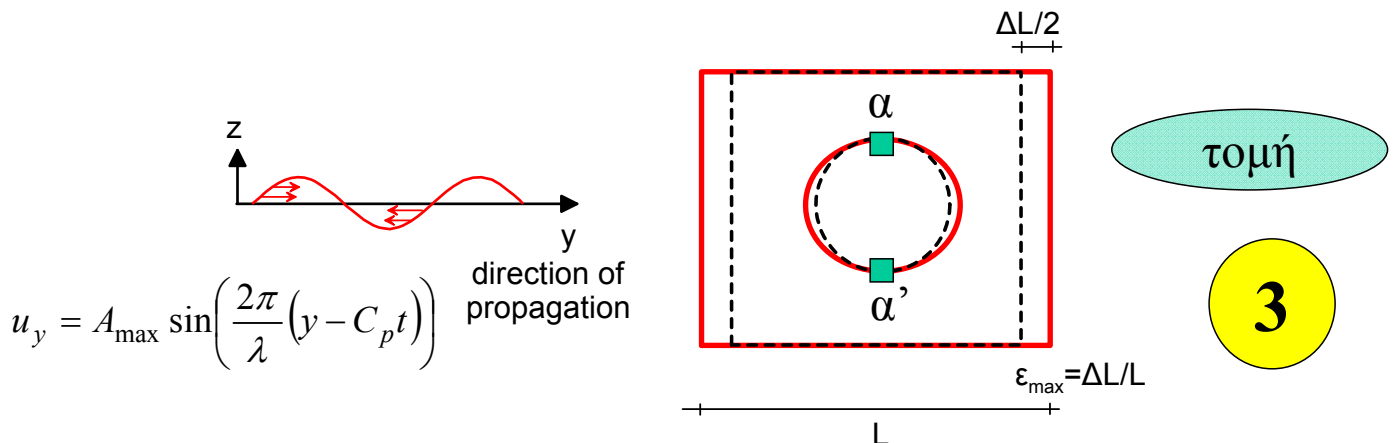


οι παραμορφώσεις σε ένα 3-Δ κέλυφος (πλην της αξονικής βεβαίως) δεν διατηρούν μια σταθερή τιμή κατά μήκος της περιφέρειας της διατομής-είναι συναρτήσεις της πολικής ακτίνας α και, φυσικά, του χρόνου



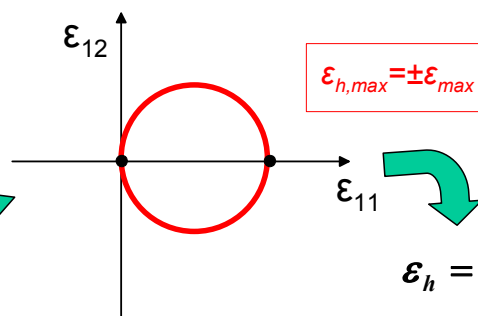
η γωνία α μετράται από τον άξονα z με την φορά των δεικτών του ρολογιού

Εγκάρσιο κύμα P (στο επίπεδο yz)



παραμόρφωση εδάφους:

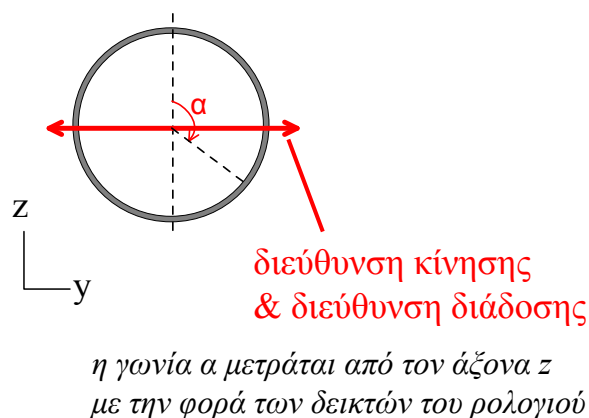
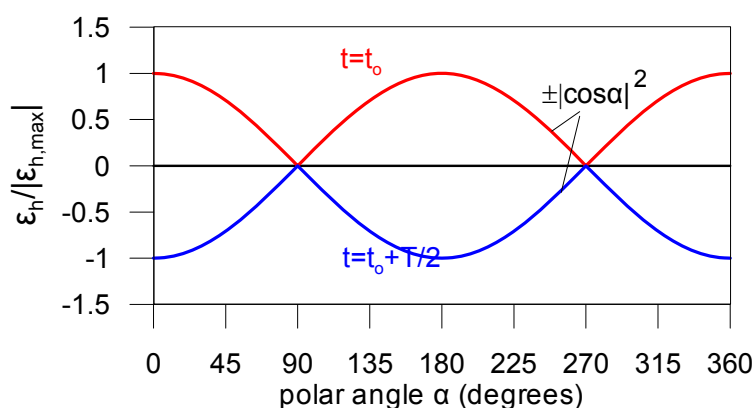
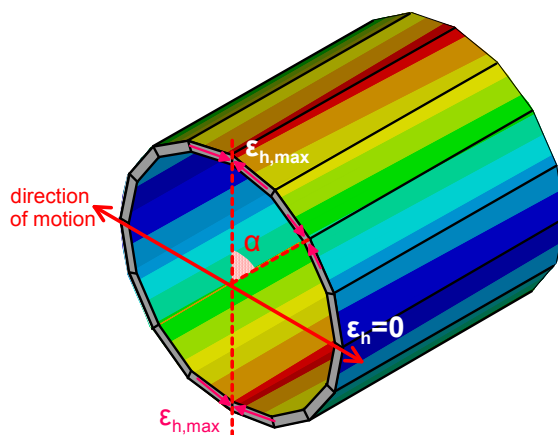
$$\varepsilon_y = \frac{\partial u_y}{\partial y}$$



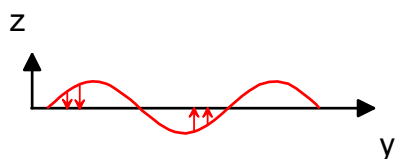
παραμόρφωση ΥΕ στα σημεία α & α' :

$$\varepsilon_h = \varepsilon_y = \frac{V_{max}}{C_p} \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} (y - C_p t)\right)$$

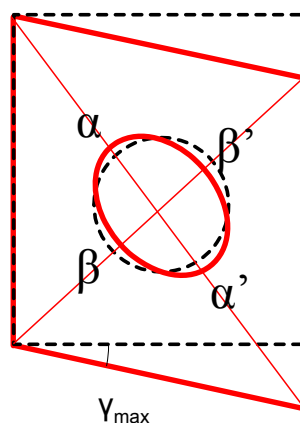
κατανομή των παραμορφώσεων στην διατομή



Εγκάρσιο κύμα S (στο επίπεδο yz)



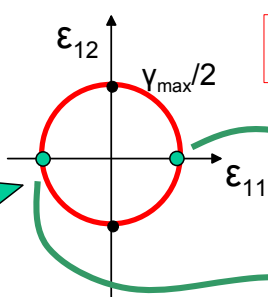
$$u_z = A_{\max} \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda}(y - C_s t)\right) \quad \text{direction of propagation}$$



τομή

παραμόρφωση
εδάφους:

$$\gamma_{yz} = \frac{\partial u_z}{\partial y}$$



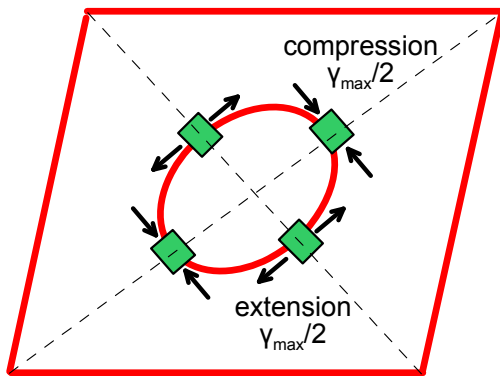
$$\epsilon_{h,\max} = V_{\max}/2$$

παραμόρφωση ΥΕ:

$$\epsilon_{h,\alpha\alpha'} = \gamma_{yz} / 2 = \frac{V_{\max}}{2C_s} \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda}(y - C_s t)\right)$$

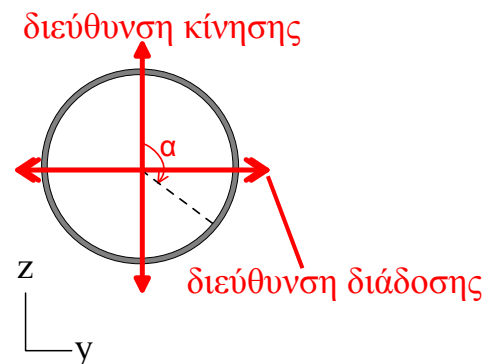
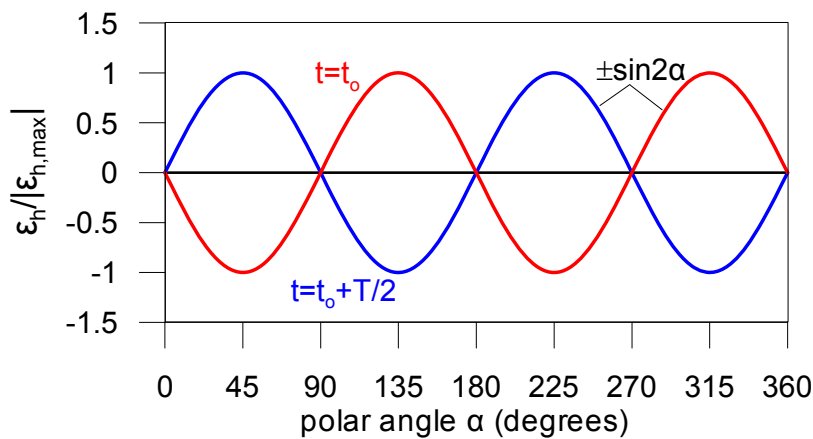
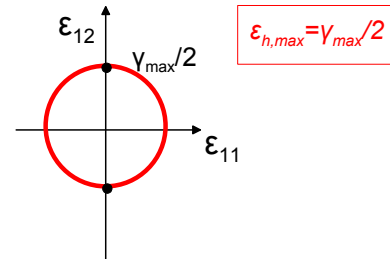
$$\epsilon_{h,\beta\beta'} = -\gamma_{yz} / 2 = \frac{V_{\max}}{2C_s} \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda}(y - C_s t)\right)$$

κατανομή των παραμορφώσεων στην διατομή:

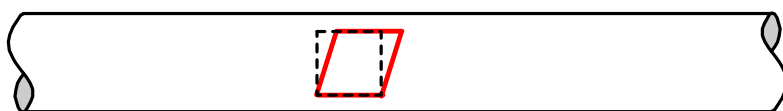


οι μέγιστες κύριες παραμορφώσεις (εφελκυστικές και θλιπτικές) εμφανίζονται σε επίπεδο με κλίση $\pm 45^\circ$

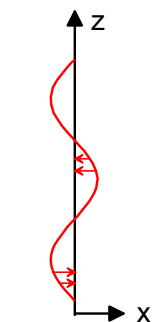
(γιατί ;)



Εγκάρσιο κύμα S (στο επίπεδο xz)



direction of propagation



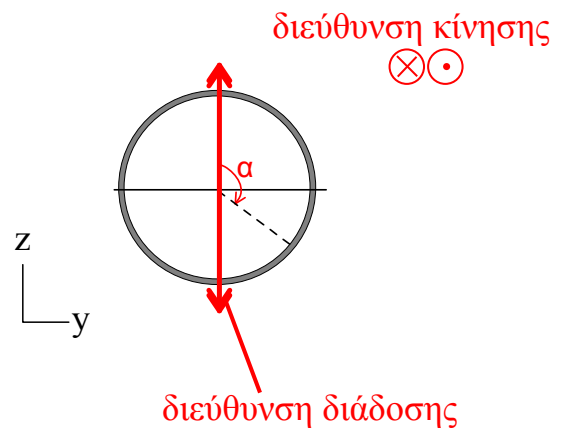
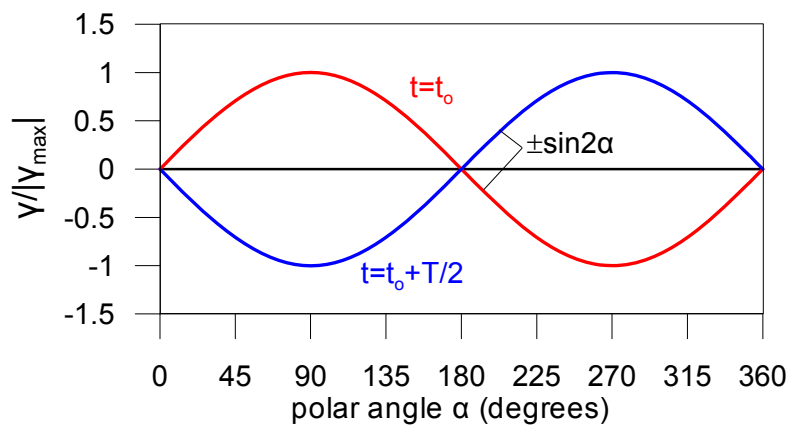
$$u_x = A_{\max} \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda}(z - C_s t)\right)$$

όψη

παραμόρφωση εδάφους
και ΥΕ:

$$\gamma = \frac{\partial u_x}{\partial z} = \frac{V_{\max}}{C_s} \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda}(z - C_s t)\right)$$

κατανομή των παραμορφώσεων στην διατομή



Στην περίπτωση αυτή έχουμε διάτμηση (όπως στην περίπτωση κύματος S που διαδίδεται παράλληλα στον άξονα του αγωγού στο επίπεδο xy) αλλά με διαφορετική κατανομή στην διατομή

Συνοπτικά...

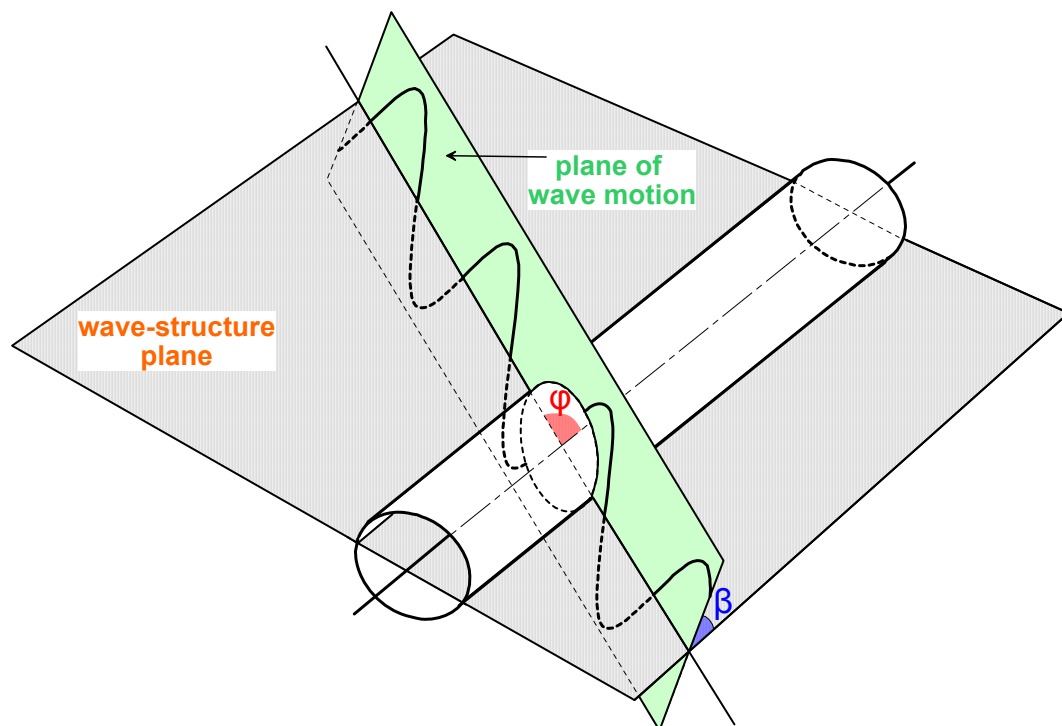
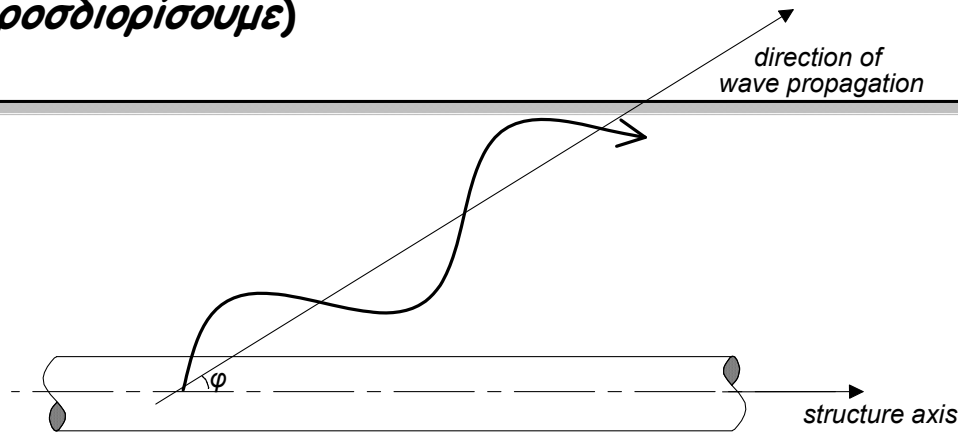
Περίπτωση	$\epsilon_{a,\max}$	$\gamma_{\max}$	$\epsilon_{h,\max}$
P κατά μήκος του άξονα (xy)	$V_{\max}/C_p$		
S κατά μήκος του άξονα (xy)		$V_{\max}/C_s$	
εγκάρσιο P (yz)			$V_{\max}/C_p$
εγκάρσιο S (yz)			$V_{\max}/2C_s$
εγκάρσιο S (xz)		$V_{\max}/C_s$	

(Γ) Γενίκευση των Απλοποιημένων Λύσεων

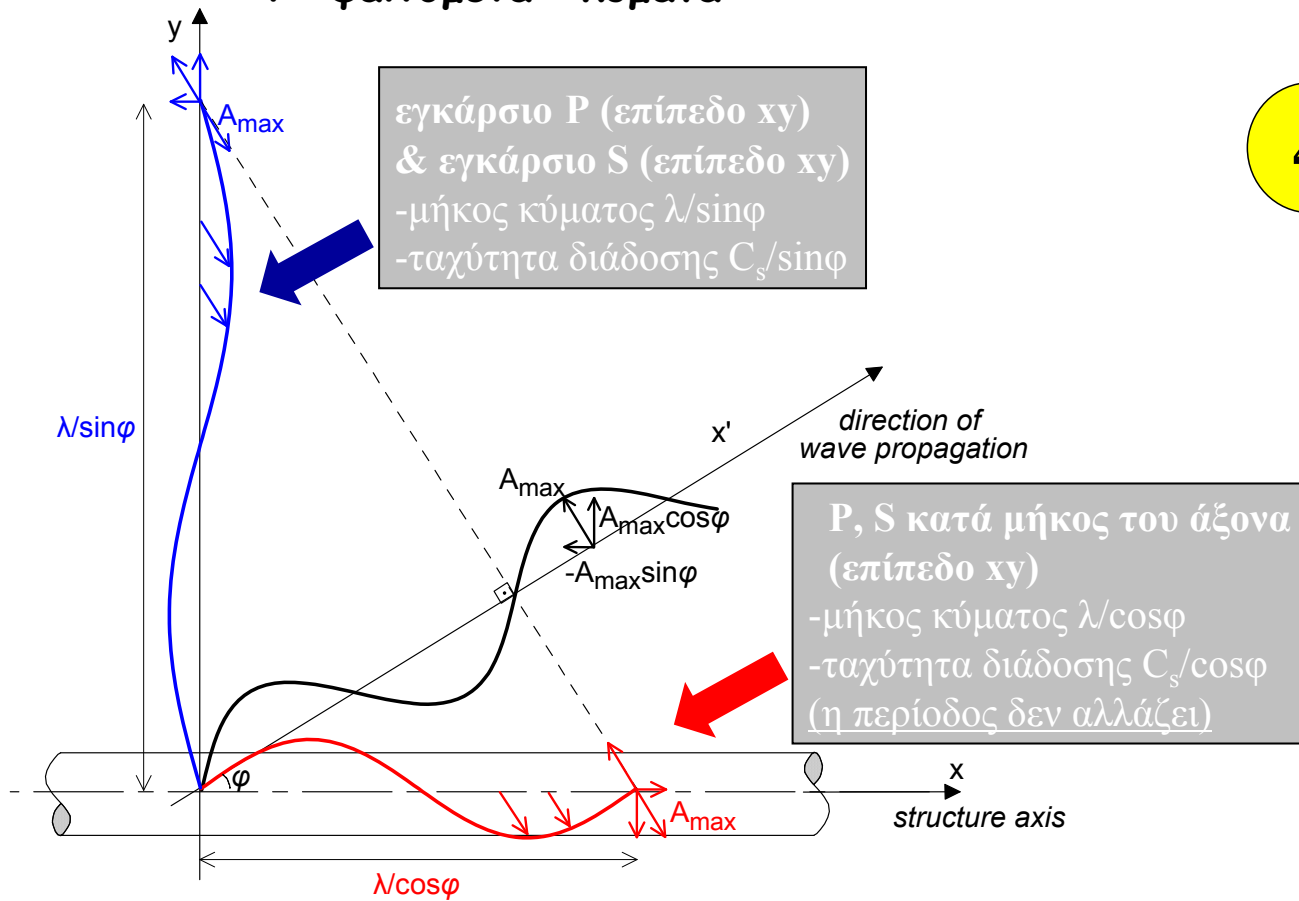
Στην πράξη,

το κύμα συναντά τον άξονα υπό μια τυχαία γωνία φ , στο επίπεδο που σχηματίζουν ο άξονας του ΥΕ και η διεύθυνση διάδοσης.

Ο προσανατολισμός του επιπέδου αυτού είναι τυχαίος στον 3-Δ χώρο (δεν υπάρχει πρακτικά τρόπος να το προβλέψουμε ή να το προσδιορίσουμε)



Έστω, για παράδειγμα, ένα κύμα SV (με κίνηση στο επίπεδο διάδοσης xy). Από την γεωμετρία προκύπτουν 4 «φαινόμενα» κύματα:



Για την εύρεση των μέγιστων παραμορφώσεων σχεδιασμού στην περίπτωση αυτή (αλλά και γενικότερα) απαιτείται:

α) επαλληλία των παραμορφώσεων (κατανομή στην διατομή) που προκύπτουν από τα διάφορα «φαινόμενα» κύματα

β) μεγιστοποίηση των σχέσεων που προκύπτουν ως προς τις άγνωστες γωνίες ϕ και β (η γωνία β ορίζεται από το επίπεδο της κίνησης και το επίπεδο διάδοσης και έχει νόημα μόνο για κύματα S)

ακολουθώντας αυτή την διαδικασία για κύματα S και P υπό γωνία ω προς τον άξονα, καταλήγουμε τελικά στις εξής μέγιστες παραμορφώσεις...

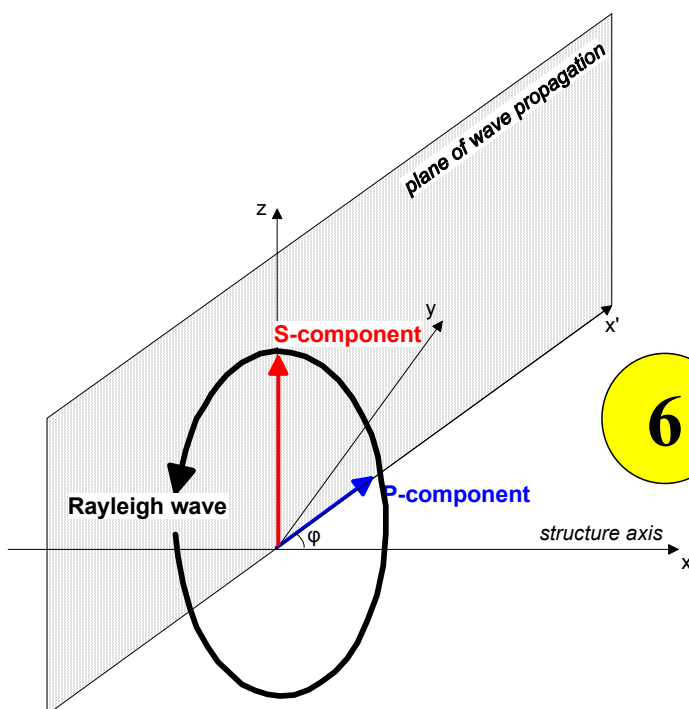
μέγιστες παραμορφώσεις	κύμα S (κανονικοποιημένη ως προς το λόγο $V_{\max}/C_s$)	κύμα P (κανονικοποιημένη ως προς το λόγο $V_{\max}/C_p$)
αξονική ε_a	0.50	1.00
διατμητική γ	1.00	1.00
hoop ε_h	0.50	1.00
von Mises ε_{vM}	$0.87/(1+\nu_l)$	$1.00/(1+\nu_l)$
μέγιστη κύρια ε_1	0.71	1.00
ελάχιστη κύρια ε_3	-0.71	-1.00

5

ΠΡΟΣΟΧΗ: οι μέγιστες αυτές παραμορφώσεις δεν συμβαίνουν στην ίδια θέση της διατομής. Επομένως, η απευθείας επαλληλία τους αποτελεί συντηρητική προσέγγιση.

Επίσης, στην πράξη,

τα ΥΕ κατασκευάζονται σχετικά κοντά στην επιφάνεια του εδάφους και επομένως υφίστανται την επίδραση κυμάτων Rayleigh (π.χ. σε κοιλάδες, κοντά σε πρηνή, σε μεγάλη απόσταση από την διάρρηξη)



Ένα κύμα Rayleigh ισοδυναμεί με ένα ανεξάρτητο κύμα P και ένα ανεξάρτητο κύμα SV που διαδίδονται υπό γωνία φ με διαφορά φάσης $\pi/2$

ΠΡΟΣΟΧΗ: δεν προσθέτουμε .. έτσι απλά τις παραμορφώσεις από τις 2 μορφές κυμάτων για να βρούμε τις μέγιστες τιμές, γιατί δεν συμβαίνουν την ίδια χρονική στιγμή.

Μέγιστες παραμορφώσεις από τις δυο συνιστώσες ενός κύματος Rayleigh (υπό γωνία προς τον άξονα του ΥΕ):

μέγιστες παραμορφώσεις	κύμα R (κανονικοποιημένη ως προς το λόγο $V_{max,V}/C_R$)
αξονική ε_a	0.68
διατμητική γ	1
hoop ε_h	0.68
von Mises ε_{vM}	$0.86/(1 + \nu_1)$
μέγιστη κύρια ε_1	0.68
ελάχιστη κύρια ε_3	-0.68

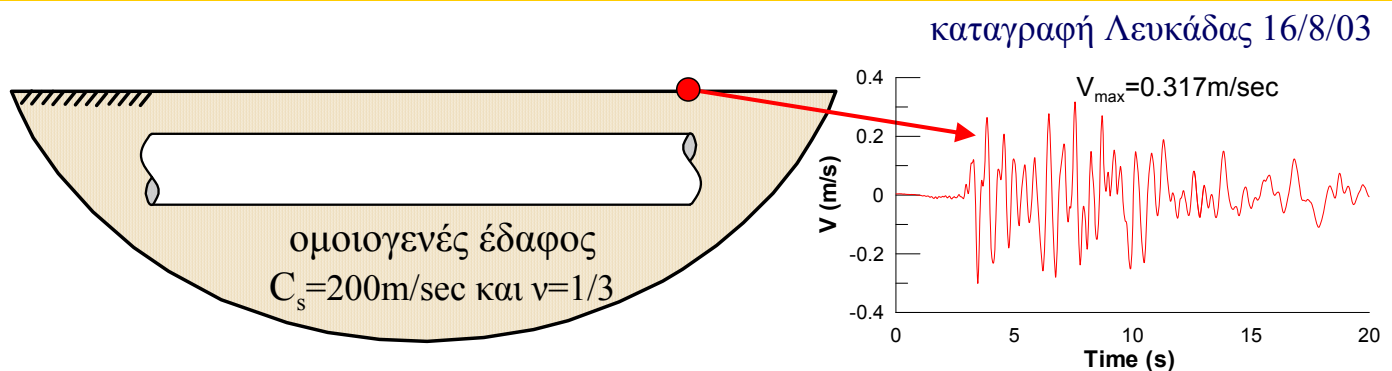
7

Σημείωση:

Η ταχύτητα των κυμάτων Rayleigh $C_R \approx 0.94 C_s$ θα πρέπει να λαμβάνεται σε βάθος $z = 1.0 \lambda_R$

Για εξ-ΑΣΚΗΣΗ στο σπίτι, αξίζει να αποδείξετε τις παραπάνω σχέσεις για κύμα R !

1^η άσκηση για το σπίτι



να γίνει ο έλεγχος σεισμικής επάρκειας των παρακάτω υπογείων έργων:

αγωγός από χάλυβα με

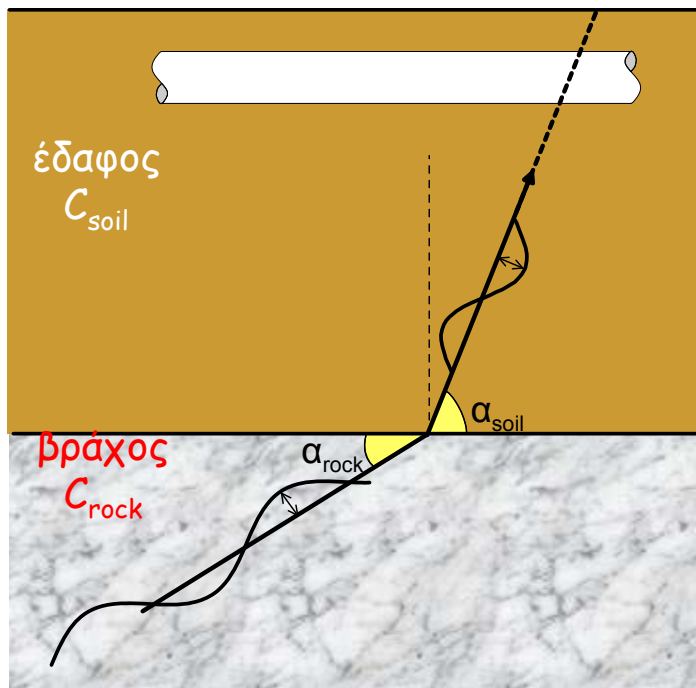
- $D = 1.5 \text{ m}$, $t = 0.015 \text{ m}$
- $\varepsilon_{all}^{compression} = 40t/d \text{ (}\%) < 5\% \text{ (EC8)}$
- $\varepsilon_{all}^{extension} = 2\%$ για συνεχές υλικό
 $= 0.5\%$ για περιμετρικές συγκολλήσεις

σήραγγα από Ο/Σ με

- $D = 10 \text{ m}$, $t = 0.20 \text{ m}$
- $\varepsilon_{all}^{compression} = 0.35\%$
- $\varepsilon_{all}^{extension} = 2\%$

Να εξηγηθεί σαφώς και να αιτιολογηθεί η επιλογή των σχέσεων που θα χρησιμοποιήσετε.

(Δ) Υπόγεια Έργα σε μαλακό έδαφος επί βράχου



τα σεισμικά κύματα προσπίπτουν στην διεπιφάνεια εδάφους-υποβάθρου υπό τυχαία γωνία α_{rock} , διαθλώνται, και διαδίδονται στην εδαφική στρώση

σύμφωνα με το νόμο του Snell:

$$\cos \alpha_{soil} = \cos \alpha_{rock} \frac{c_{soil}}{c_{rock}}$$

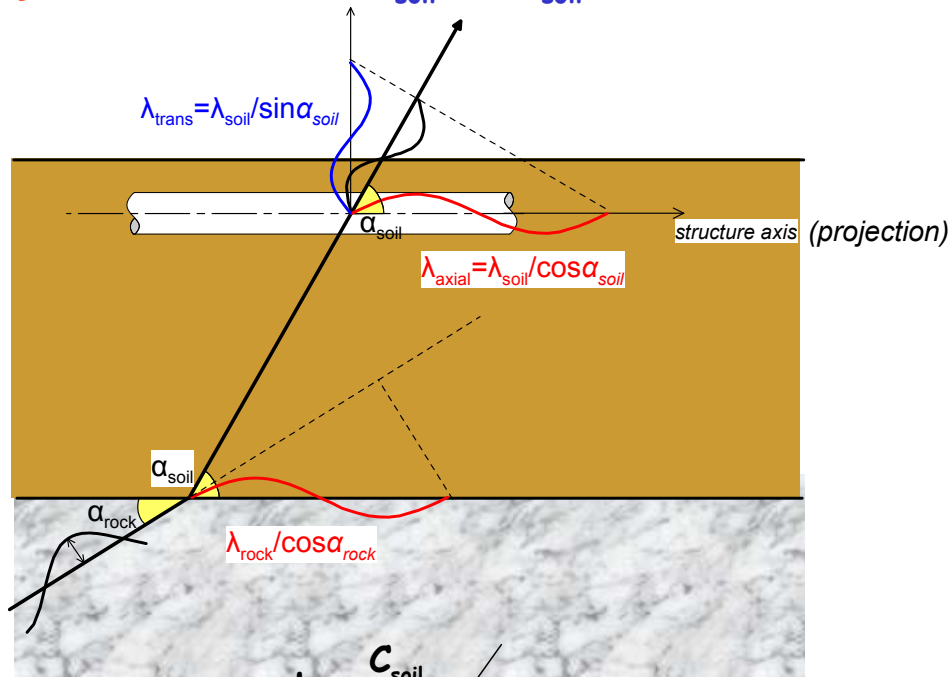
η περίοδος του διαθλώμενου κύματος δεν αλλάζει άρα...

$$\lambda_{soil} = \lambda_{rock} \frac{c_{soil}}{c_{rock}}$$

καθώς το διαθλώμενο κύμα συναντά το ΥΕ έργο υπό γωνία α_{soil} προκύπτουν φαινόμενα κύματος κατά μήκος και εγκάρσια στον άξονα του (όπως πριν)

A. ένα φαινόμενο κύμα που

διαδίδεται **οριζόντια** με ταχύτητα $c_{soil}/\cos \alpha_{soil}$



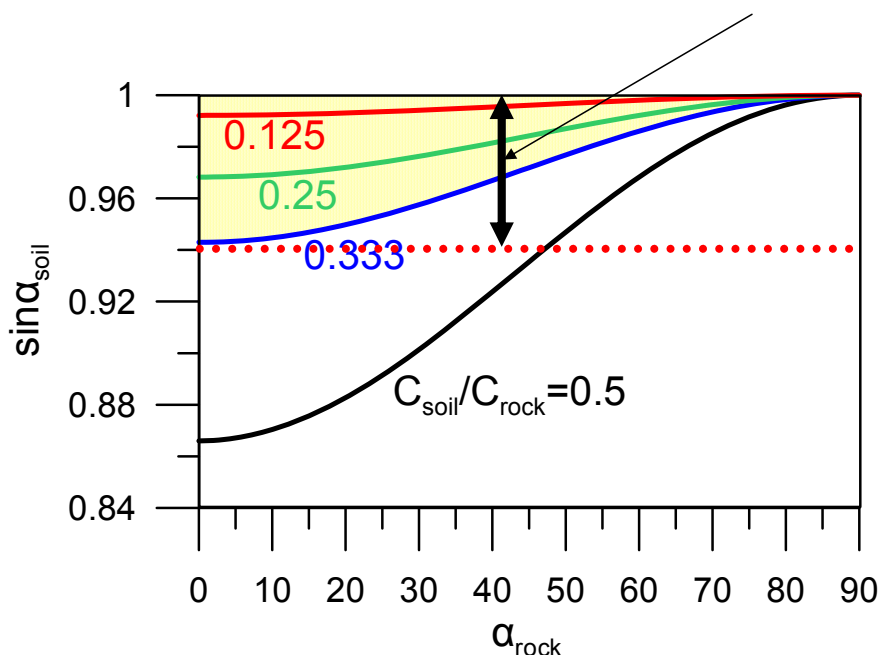
και μήκος κύματος:

$$\lambda_{horiz} = \frac{\lambda_{soil}}{\cos \alpha_{soil}} = \frac{\lambda_{rock} \frac{c_{soil}}{c_{rock}}}{\cos \alpha_{soil}} \Rightarrow \lambda_{horiz} = \frac{\lambda_{rock}}{\cos \alpha_{rock}}$$

Δηλαδή, το οριζόντιο φαινόμενο κύμα είναι ισοδύναμο με το φαινόμενο κύμα που διαδίδεται κατά μήκος της δι-επιφάνειας εδάφους-υποβάθρου.

Β. ένα φαινόμενο κύμα που διαδίδεται
κατακόρυφα με ταχύτητα $C_{\text{soil}}/\sin \alpha_{\text{soil}}$

Όμως: $\sin \alpha_{\text{soil}} = \sqrt{1 - \cos^2 \alpha_{\text{soil}}} = \sqrt{1 - \cos^2 \alpha_{\text{rock}} \left(\frac{C_{\text{soil}}}{C_{\text{rock}}} \right)^2} \approx 1$



και επομένως, η ταχύτητα του κατακόρυφου φαινόμενου κύματος θα είναι
πρακτικά ίση με την ταχύτητα του εδάφους C_{soil} (και $\lambda_{\text{trans}} = \lambda_{\text{soil}} = C_{\text{soil}} T$)

συγκριτικά με την περίπτωση κύματος σε ομοιογενή βράχο έχουμε μια ακόμα άγνωστη
παράμετρο: -την γωνία α_{rock}

οι παραμορφώσεις σχεδιασμού υπολογίζονται επαλληλίζοντας τις παραμορφώσεις
στην διατομή και ακολούθως μεγιστοποιώντας τις αναλυτικές σχέσεις ως προς τις
άγνωστες γωνίες φ , β και α_{rock} ...

κανονικοποιημένες παραμορφώσεις* $\frac{\varepsilon}{V_{\text{max}}/C_{\text{soil}}}$	κύμα S ($C=C_s$)	κύμα P ($C=C_p$)
αξονική ε_a	$0.50 C_{\text{soil}}/C_{\text{rock}}$	$0.3 C_{\text{soil}}/C_{\text{rock}}$
διατμητική γ	$0.43 C_{\text{soil}}/C_{\text{rock}} + 0.98$	$2.0 C_{\text{soil}}/C_{\text{rock}}$
hoop ε_h	$0.36 C_{\text{soil}}/C_{\text{rock}} + 0.50$	$0.5 C_{\text{soil}}/C_{\text{rock}} + 1.0$
von Mises ε_{vM}	$(0.38 C_{\text{soil}}/C_{\text{rock}} + 0.85)/(1+\nu_1)$	$(0.58 C_{\text{soil}}/C_{\text{rock}} + 1.0)/(1+\nu_1)$
μέγιστη κύρια ε_1	$0.5 C_{\text{soil}}/C_{\text{rock}} + 0.5$	$0.63 C_{\text{soil}}/C_{\text{rock}} + 1.0$
ελάχιστη κύρια ε_3	$-0.5 C_{\text{soil}}/C_{\text{rock}} - 0.5$	$-0.63 C_{\text{soil}}/C_{\text{rock}} - 1.0$

8

Οι σχέσεις του παραπάνω πίνακα ισχύουν για τιμές του λόγου $C_{\text{soil}}/C_{\text{rock}}$ μικρότερες από 0.35. Σε άλλη
περίπτωση οι σχέσεις αυτές είναι συντηρητικές, και είναι προτιμότερη η χρήση των αποτελεσμάτων
για ομοιογενή βράχο

σύγκριση με τις οδηγίες της ALA-ASCE (2001)

ALA-ASCE 2001 $\epsilon_a = V_{\max} / aC$

$V_{\max}$ = peak ground velocity generated by ground shaking

C = apparent propagation velocity for seismic waves, **conservatively (?)** assumed to be equal to 2000 m/s.

a = 1 for P and R waves, 2 for S waves

σύγκριση με τις οδηγίες της ALA-ASCE (2001)

ALA-ASCE 2001 $\epsilon_a = V_{\max} / aC$

$V_{\max}$ = peak ground velocity generated by ground shaking

C = apparent propagation velocity for seismic waves, **conservatively (?)** assumed to be equal to 2000 m/s.

a = 1 for P and R waves, 2 for S waves

παραμορφώσεις	Κύμα S ($C=C_s$)	Κύμα P ($C=C_p$)
αξονική ϵ_a	$0.50 \cdot V_{\max} / C_{\text{rock}}$	$0.3 \cdot V_{\max} / C_{\text{rock}}$
διατμητική γ	$(0.98 + 0.43 \cdot C_{\text{soil}} / C_{\text{rock}}) \cdot V_{\max} / C_{\text{soil}}$	$2.00 \cdot V_{\max} / C_{\text{rock}}$
hoop ϵ_h	$(0.50 + 0.36 \cdot C_{\text{soil}} / C_{\text{rock}}) \cdot V_{\max} / C_{\text{soil}}$	$(1.00 + 0.50 \cdot C_{\text{soil}} / C_{\text{rock}}) \cdot V_{\max} / C_{\text{soil}}$

σύγκριση με τις οδηγίες της ALA-ASCE (2001)

δεδομένα: $C_{soil}=200\text{m/sec}$
 $C_{rock}=2000\text{m/sec}$ (σε μεγάλο βάθος)
 $C_p=2C_s$
 $V_{max}=75\text{cm/sec}$

παραμορφώσεις	ομοιογενής βράχος		μαλακό έδαφος		κύμα Rayleigh
	κύμα S	κύμα P	κύμα S	κύμα P	
αξονική ε_a	0.019%	0.019%	0.019%	0.005%	0.255%
διατμητική γ	0.037%	0.019%	0.383%	0.037%	0.375%
hoop ε_h	0.019%	0.019%	0.201%	0.196%	0.255%

ALA-ASCE 2001

$$\varepsilon_a = \frac{V_{max}}{aC} = 0.037\% \text{ (θεωρώντας συντηρητικά } a=1)$$

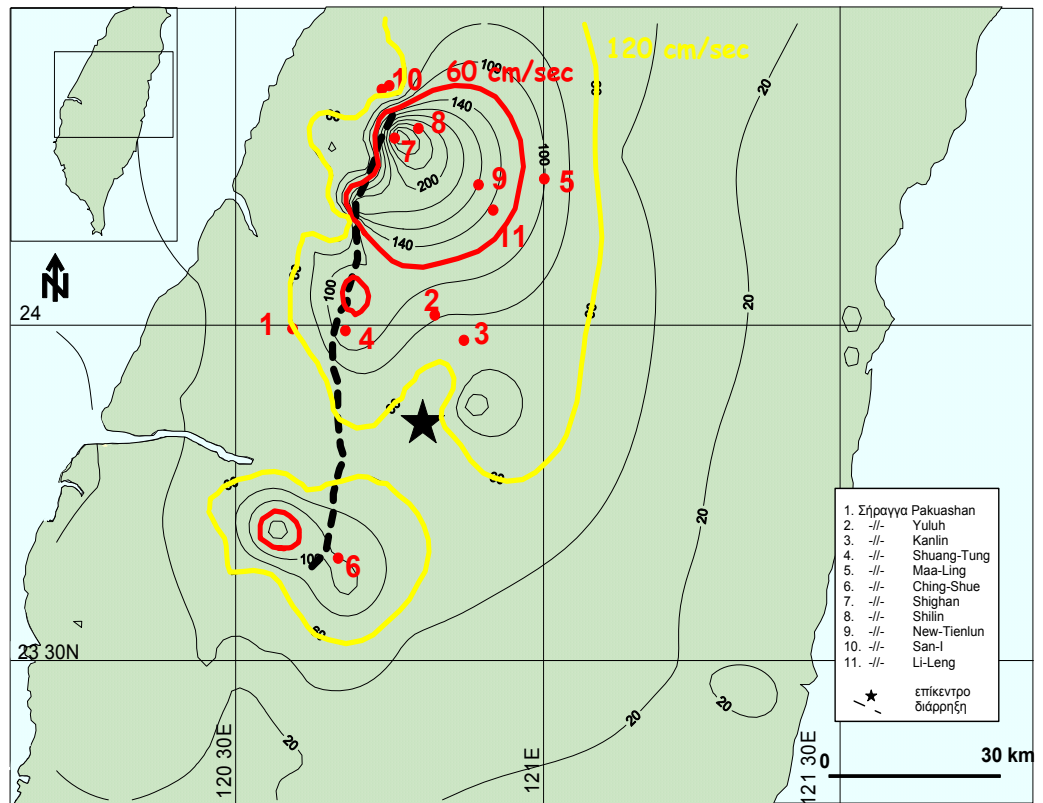
Κάποιο από τα δυο πρέπει να πέφτει έξω...!

2^η άσκηση για το σπίτι

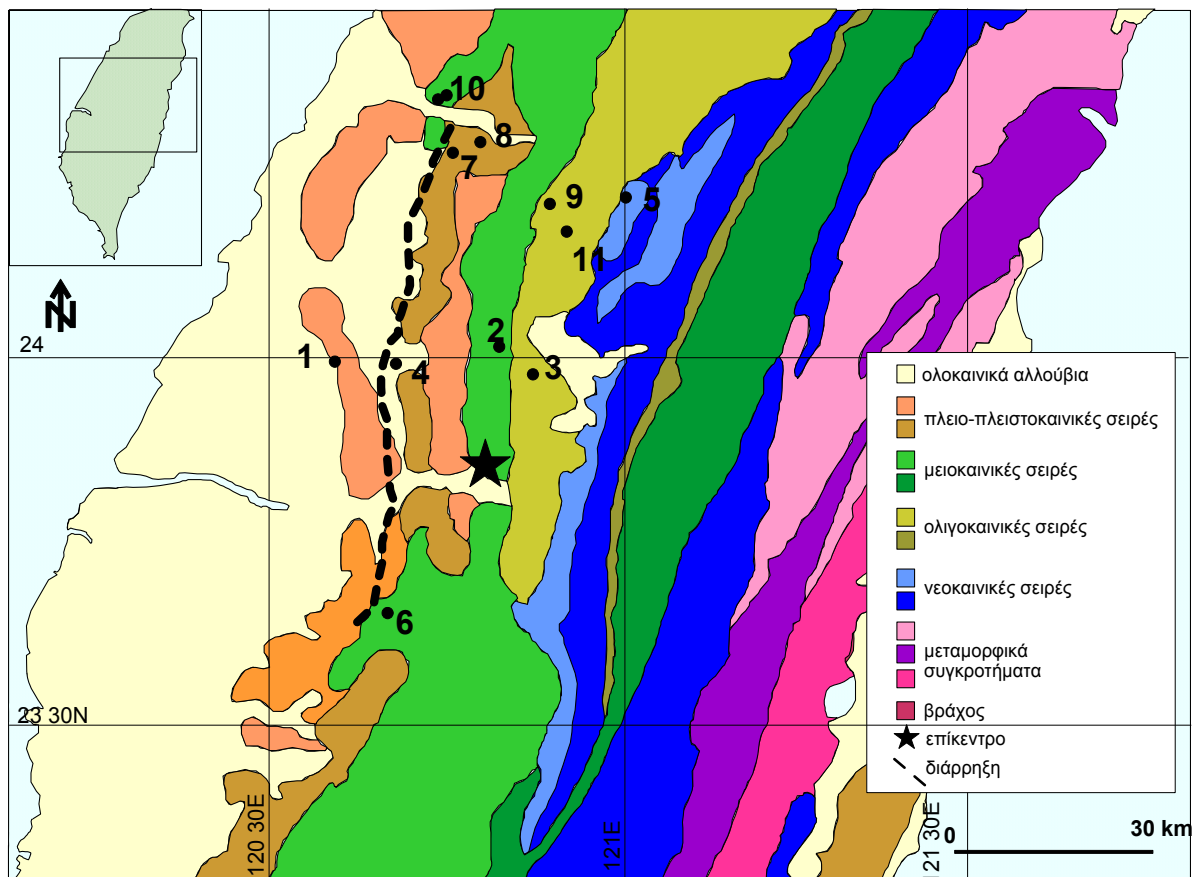
Να επαναληφθεί η επίλυση της προηγούμενης άσκησης για την περίπτωση που το μαλακό ομοιογενές έδαφος ($C_{S,SOIL}=200\text{m/s}$) ακολουθείται από μαργαϊκό υπόβαθρο ($C_{S,ROCK}=700\text{m/s}$) σε βάθος 30 m από την ελεύθερη επιφάνεια.

(Ε) Σύγκριση με αστοχίες σε ΥΕ από σκυρόδεμα: σεισμοί Kobe, Chi-Chi, Duzce

Χάρτης ισοσειστών
(ως προς την V_{max}), με τις θέσεις των υπόγειων έργων που υπέστησαν βλάβες κατά τον σεισμό του Chi-Chi(1999).



Γεωλογικές συνθήκες στις θέσεις θέσεις των υπόγειων έργων που υπέστησαν βλάβες κατά τον σεισμό του Chi-Chi(1999)



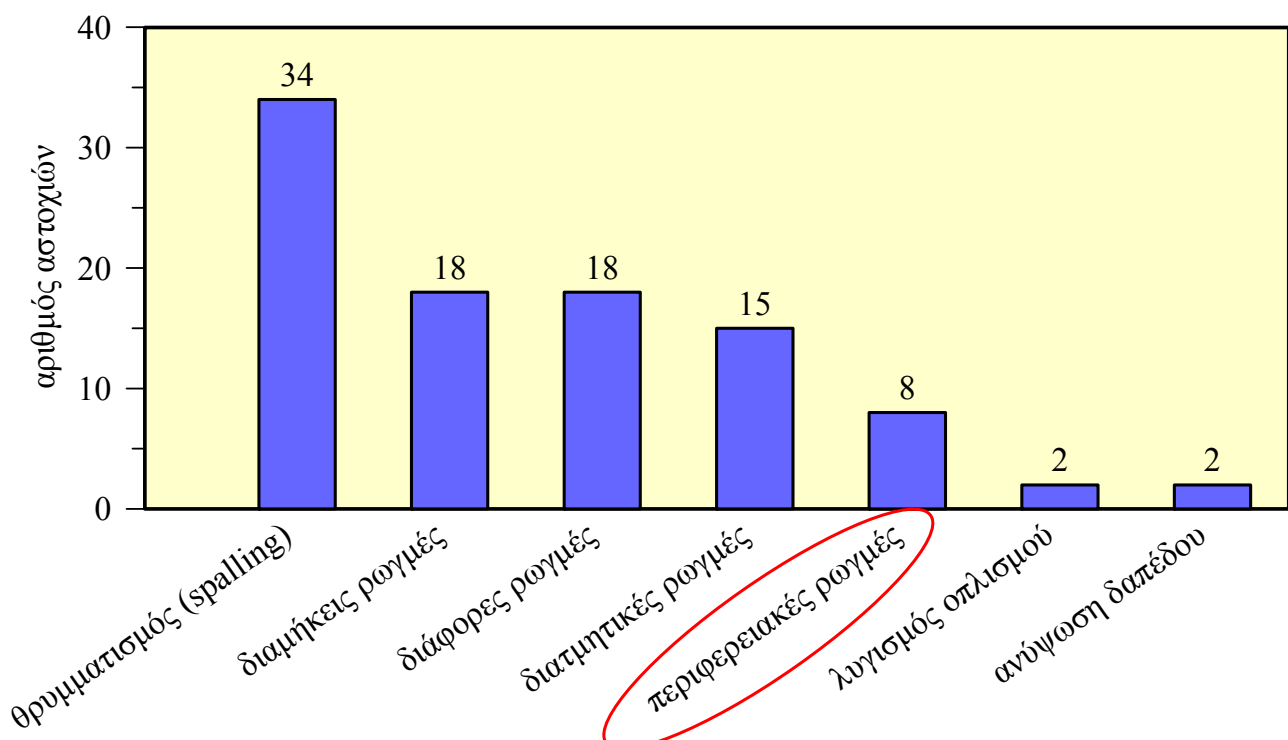
Κατηγοριοποίηση εδαφών

NEHRP (1997)	C_s (m/sec)
A σκληρός βράχος	$C_s > 1500$
B βράχος	$760 < C_s < 1500$
C πολύ στιφρά εδάφη και μαλακοί βράχοι	$360 < C_s < 760$
D στιφρά εδάφη	$180 < C_s < 360$
E μαλακά εδάφη	$C_s < 180$

Παρούσα Έρευνα	C_s (m/sec)
A βραχώδεις γρανιτικό υπόβαθρο	2000
B1 βράχοι κρητιδικού (πυριγενή και μεταμορφικά πετρώματα, ασβεστόλιθοι, σκληρές ηφαιστιογενείς αποθέσεις)	1200
B2 στιφρό έδαφος και μαλακοί βράχοι (πλειστοκαινικοί-πλειστοκαινικοί ψαμμίτες, κροκαλοπαγή, σχιστόλιθοι, μάργες)	850
C πλειστοκαινικές αποθέσεις αργίλου, άμμου και χαλίκων	550
D ολοκαινικά αλλούβια (άμμος, χάλικες, άργιλος) και τεχνητές αποθέσεις	250

«μαλακό έδαφος»

Συχνότητα εμφάνισης κάθε τύπου βλάβης



«Κριτήριο αστοχίας»

εμφάνιση ρωγμών πλάτους $w > 0.2\text{mm}$

εύρος ρωγμής (w , σε in/1000) συναρτήσει της τάσης στον οπλισμό:
(Gergely and Lutz, 1968, ACI Committee 224, 1995)

$$w = 0.076 \cdot \beta \cdot f_s \cdot \sqrt[3]{d_c A}$$

f_s : η εφελκυστική τάση του χάλυβα οπλισμού (σε ksi)

d_c : το πάχος της επικάλυψης σκυροδέματος (σε in)

A : το εμβαδόν του σκυροδέματος που περιβάλλει κάθε ράβδο οπλισμού
(εμβαδόν εφελκυστικής περιοχής της διατομής/αριθμός ράβδων, σε in²)

β : διορθωτικός συντελεστής

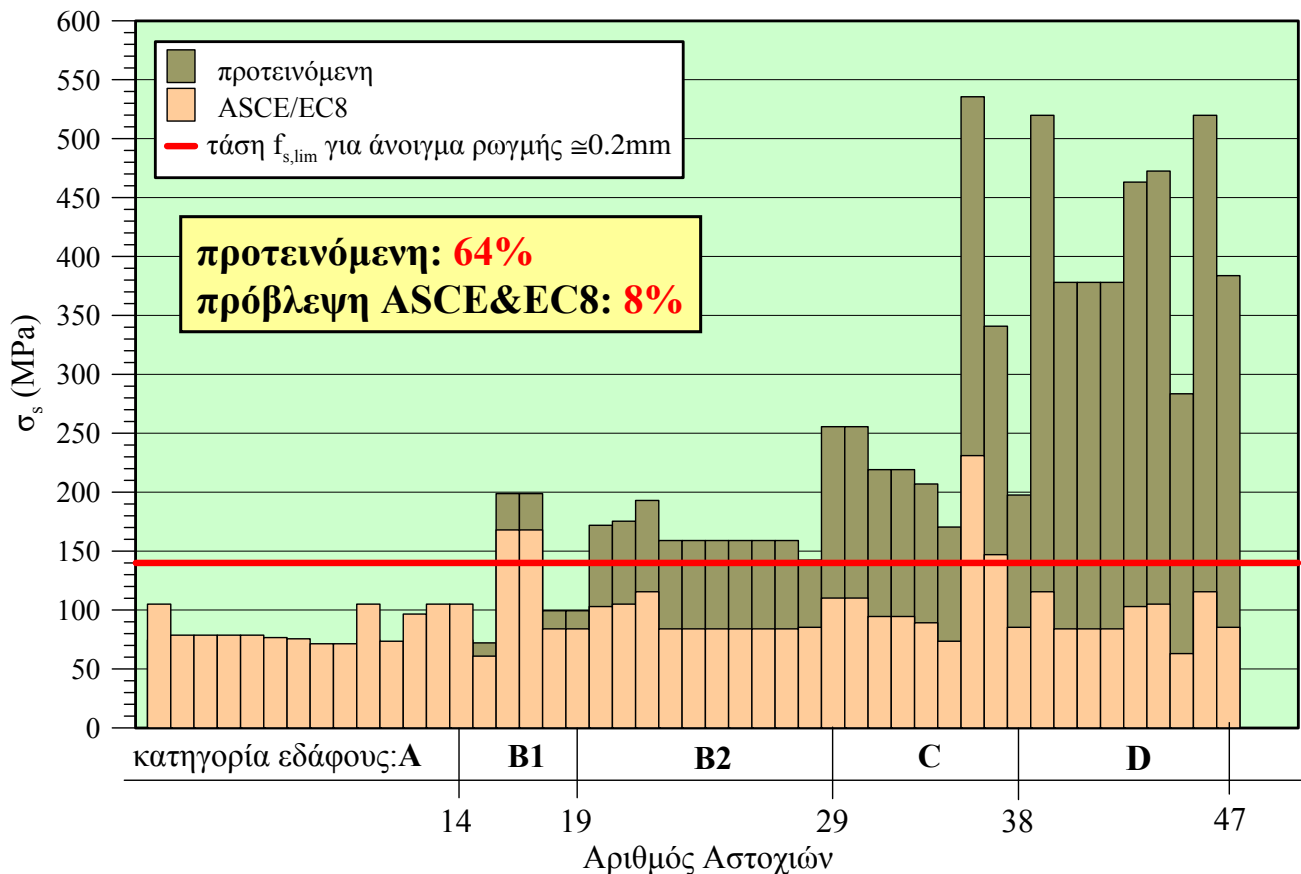
για τυπική σήραγγα $f_{s,lim} = 140\text{MPa}$, $d_c \approx 7\text{cm}$, $A \approx 200\text{cm}^2$, $\beta = 1.2$

πρόβλεψη αστοχίας:

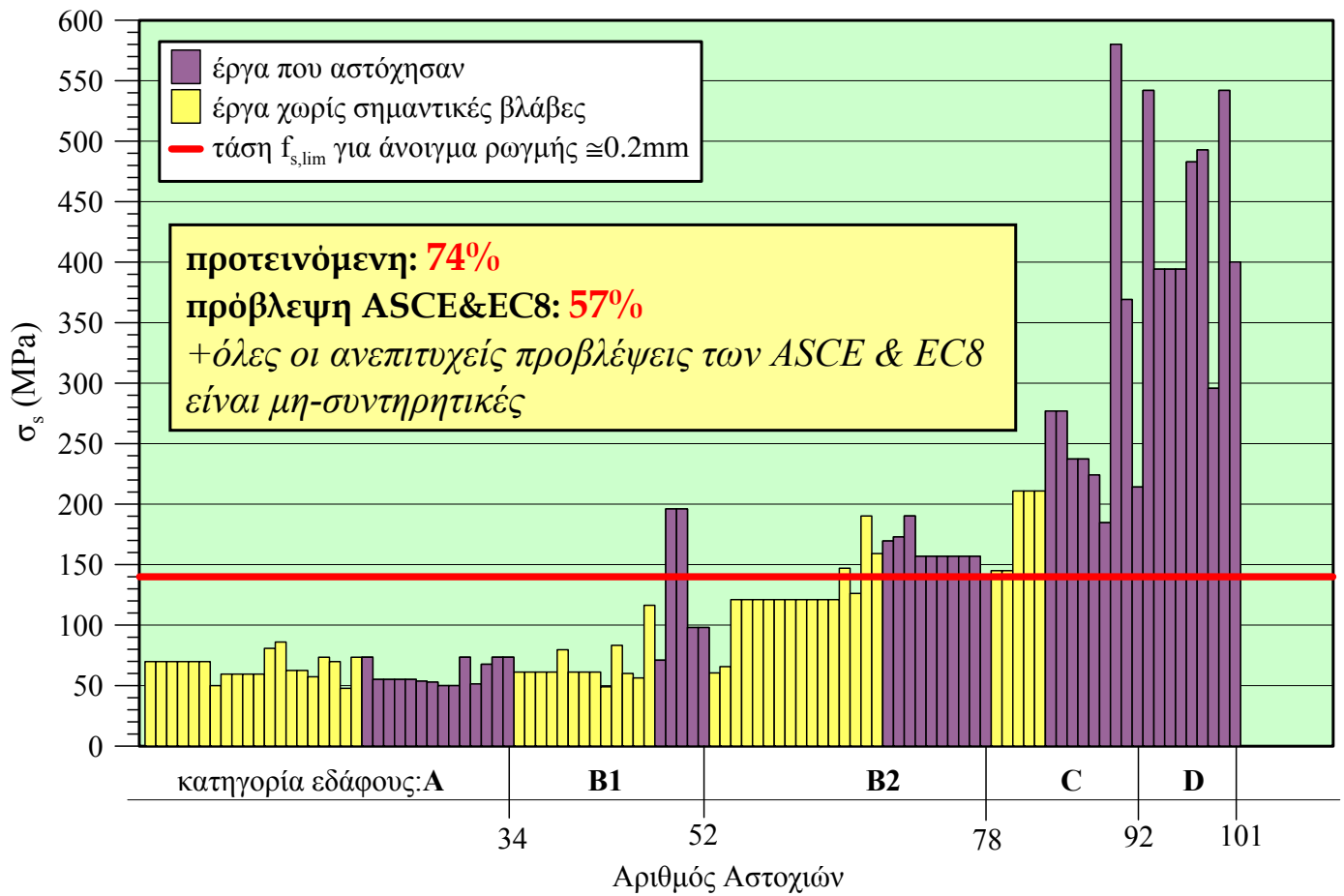
$$\varepsilon_I \cdot E_{steel} > f_{s,lim}$$

τάσεις μεγαλύτερες της $f_{s,lim}$ σημαίνουν ρωγμές μεγαλύτερου εύρους ή/και εμφάνιση θρυμματισμού

Πρόβλεψη εμφάνισης αστοχιών



Πρόβλεψη πραγματικής συμπεριφοράς



(Ε) Τελικά σχόλια.....

Οι αναλυτικές σχέσεις που παρουσιάσθηκαν προηγουμένως αφορούν **εύκαμπτα** ($F > 20$), **ευθύγραμμα** και **συνεχή** υπόγεια έργα. Στην περίπτωση γωνιών (bends) και διακλαδώσεων (T-ees) η εντατική κατάσταση του Υ.Ε. είναι περισσότερο σύνθετη. Και για αυτές τις περιπτώσεις όμως υπάρχουν αναλυτικές σχέσεις οι οποίες παρέχουν ικανοποιητική προσέγγιση. Πρόσθετες επιπλοκές προκύπτουν όταν το Υ.Ε. δεν είναι συνεχές αλλά σπονδυλωτό οπότε η δυσκαμψία των ενώσεων των σπονδύλων θα πρέπει να ληφθεί επίσης υπόψη στους υπολογισμούς.

Γενικότερα, όσο οι συνθήκες του Υ.Ε. αποκλίνουν από τις τρεις ανωτέρω απλοποιητικές παραδοχές, τόσο η ακρίβεια των αναλυτικών λύσεων μειώνεται και γίνεται αναγκαία η χρήση **αριθμητικών μεθόδων**. Σε αυτή την περίπτωση το Υ.Ε. προσομοιώνεται ως δοκός ή ως κέλυφος, το έδαφος αντικαθίσταται από ελαστοπλαστικά ελατήρια και η σεισμική διέγερση επιβάλλεται στην βάση των εδαφικών ελατηρίων.

Η ακριβής παρουσίαση αυτής της μεθοδολογίας εκφεύγει από τα χρονικά όρια και τους στόχους του μαθήματος. Οι βασικές της αρχές όμως θα παρουσιασθούν στα πλαίσια της ακόλουθης **πρακτικής εφαρμογής** η οποία αφορά στην αριθμητική ανάλυση των τάσεων και των παραμορφώσεων του αγωγού μεταφοράς αργού πετρελαίου από την Θεσ-νίκη στα Σκόπια, στην περίπτωση παραμενουσών μετατοπίσεων του εδάφους λόγω τεκτονικών διαρρήξεων (ρηγμάτων).

7.3 Αντισεισμικός Σχεδιασμός Έναντι «Παραμενουσών» Μετατοπίσεων

(βλέπε το σχετικό άρθρο στο Παράρτημα Α)

