

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ Εδαφών υπό Κυματική Φόρτιση

1. Γενικά

2. Μη Γραμμική Ιξωδο-ελαστική Συμπεριφορά

- ✚ Πειραματικές Μετρήσεις
- ✚ Απλά Αναλυτικά Προσομοιώματα

3. Ελαστο-πλαστική Συμπεριφορά

- ✚ Δυναμική Συνίζηση (Καθίζηση) Κοκκώδους Εδάφους
- ✚ Ρευστοποίηση Κοκκώδους Εδάφους

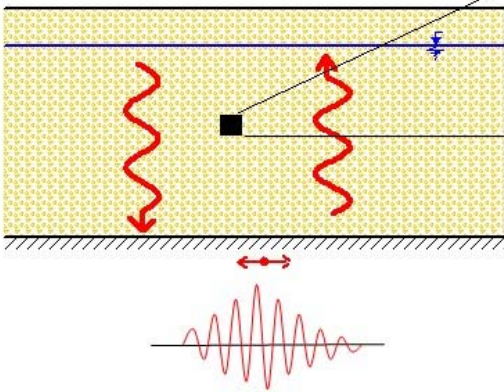
4. Ασκήσεις

Πρόσθετη βιβλιογραφία:

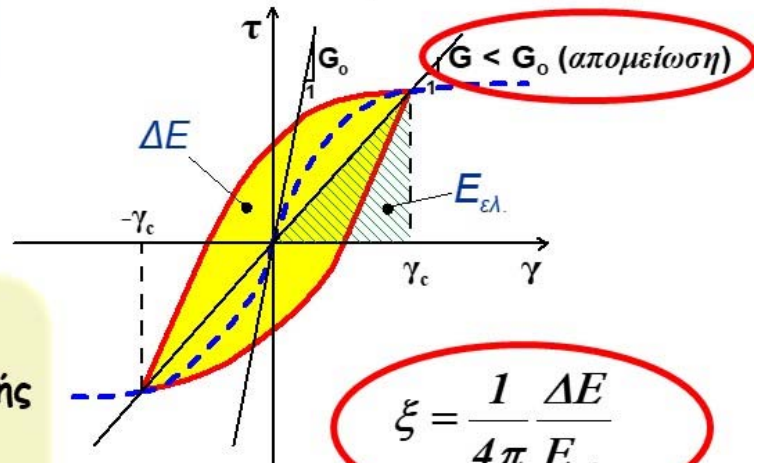
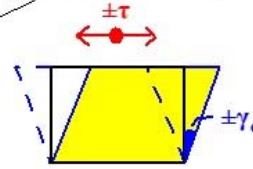
- ✚ Steven Kramer: Κεφάλαιο 6
- ✚ Γιώργος Γκαζέτας: Κεφάλαιο 3

5.1 ΓΕΝΙΚΑ

Δυναμική Φόρτιση
(λόγω κυμάτων)



ανακυκλική & επαναλαμβανόμενη



ανακυκλική φόρτιση

- απομείωση διατμητικής δυστημσίας, $G=G(\gamma)$
- απώλεια ενέργειας, $\xi=\xi(\gamma)$

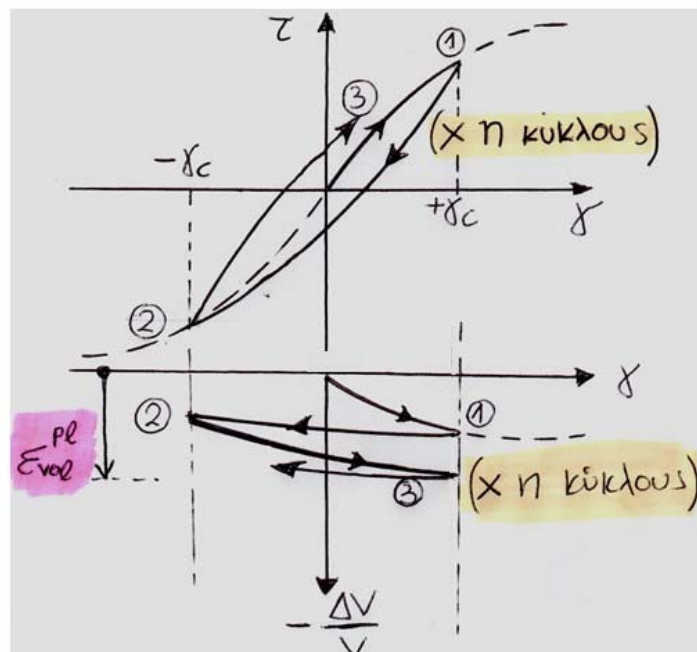
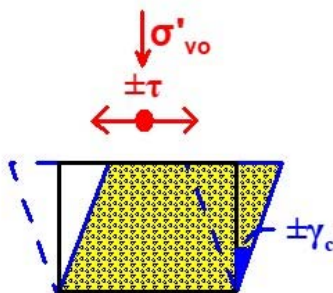
$$\xi = \frac{1}{4\pi} \frac{\Delta E}{E_{ελ}}$$

ανακυκλική
επαναλαμβανόμενη
φόρτιση

συσσώρευση

- ΠΛΑΣΤΙΚΗΣ παραμόρφωσης & καθιζήσεων ("ξηρό" έδαφος)

ΞΗΡΟ έδαφος



Καθίζηση (λόγω σεισμού)

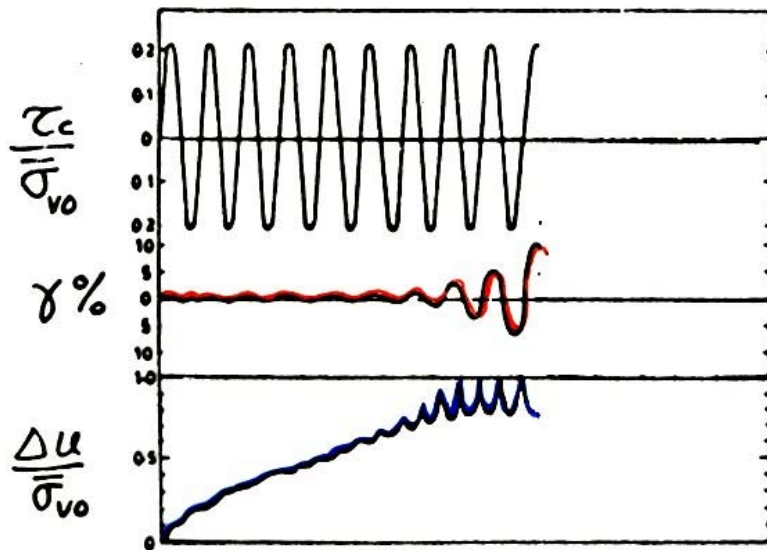
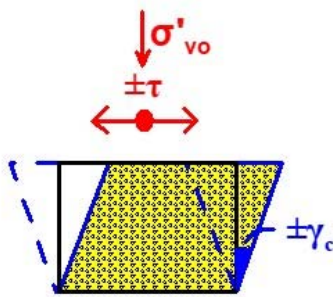
ανακυκλική
επαναλαμβανόμενη
φόρτιση



συσσώρευση

- ΥΠΕΡ-πιέσεων στους πόρους & ρευστοποίηση (κορεσμένο έδαφος)

ΚΟΡΕΣΜΕΝΟ έδαφος



ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΗ (λόγω σεισμού) !

Σύνοψη:

Δυναμική Φόρτιση (λόγω κυμάτων).....

ανακυκλική



- απομείωση διατμητικής δυστημσίας, $G=G(\gamma)$
- απώλεια ενέργειας, $\xi=\xi(\gamma)$

& επαναλαμβανόμενη φόρτιση

συσσώρευση



- ΠΛΑΣΤΙΚΗΣ παραμόρφωσης & καθιζήσεων ("ξηρό" έδαφος)
- ΥΠΕΡ-πιέσεων στους πόρους & ρευστοποίηση (κορεσμένο έδαφος)

Μικρές-πολύ μικρές παραμορφώσεις ($\gamma < \gamma_t$)

$$G = G_{\max}$$

$$\xi = \xi_0 = 2-4\%$$

$$\Delta u \approx 0$$

Μεσαίες παραμορφώσεις ($\gamma_t < \gamma < \gamma_{tv}$)

$$G = G(\gamma) < G_{\max}$$

$$\xi = \xi(\gamma) > \xi_0$$

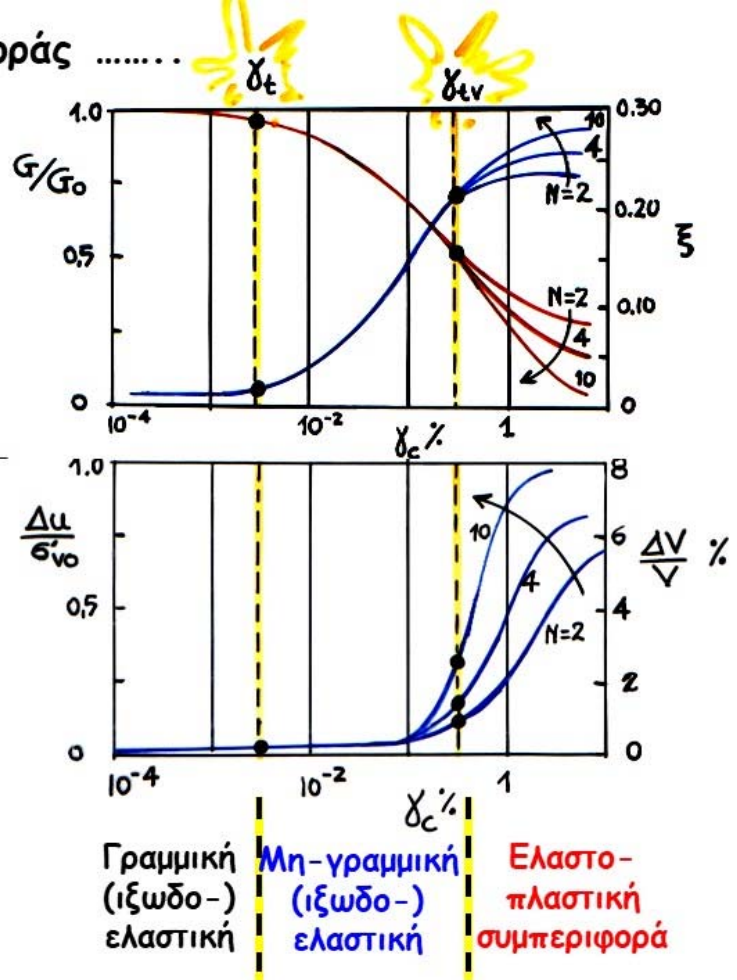
$$\Delta u \approx 0$$

Μεγάλες παραμορφώσεις ($\gamma_{tv} < \gamma$)

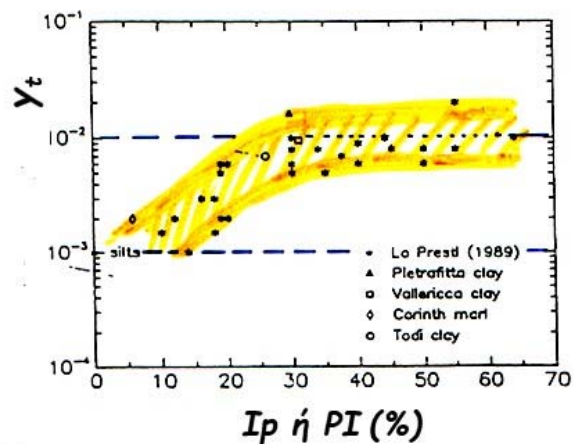
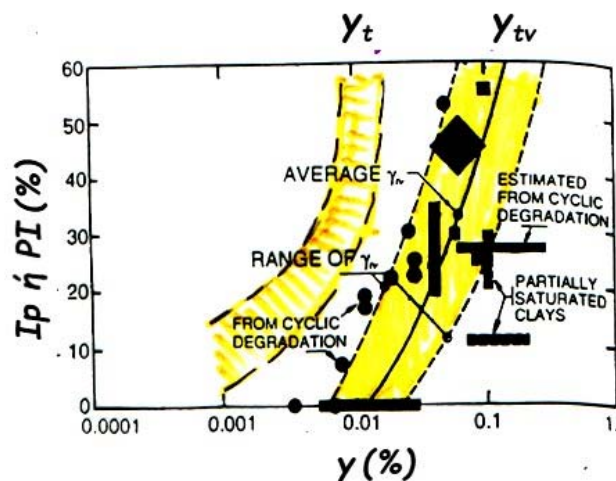
$$G = G(\gamma) \ll G_{\max}$$

$$\xi = \xi(\gamma) \gg \xi_0$$

$$\Delta u > 0$$



όρια αλλαγής της συμπεριφοράς
(για σεισμό με $N=10-15$ κύκλους)



$\gamma = \gamma_t$ $\gamma = \gamma_{tv}$

Γραμμική (ιξωδο-) ελαστική Μη-γραμμική (ιξωδο-) ελαστική Ελαστο-πλαστική συμπεριφορά

Οι ιδιότητες που απαιτούνται είναι ...

$$G_o \text{ ή } C_s = \sqrt{G_o / \rho}$$

$$D_o \text{ ή } C_p = \sqrt{D_o / \rho}$$

$$v_o$$

$$\xi_o = 2 - 4\%$$

(βλ. Κεφάλαιο 3)

ΕΠΙΠΛΕΟΝ...

$$G/G_o - \gamma$$

&

$$\xi - \gamma$$

$$\left(\text{γιατί όχι και } D/D_o - \varepsilon_{axial} ?? \right)$$

ΕΠΙΠΛΕΟΝ...

συσσώρευση $\varepsilon_v - N$
(με στράγγιση)

&

ανάπτυξη $\Delta u - N$
(χωρίς στράγγιση)

Γραμμική
(ιξωδο-)
ελαστική

$$\gamma = \gamma_t$$

Μη-γραμμική
(ιξωδο-)
ελαστική

$$\gamma = \gamma_{tv}$$

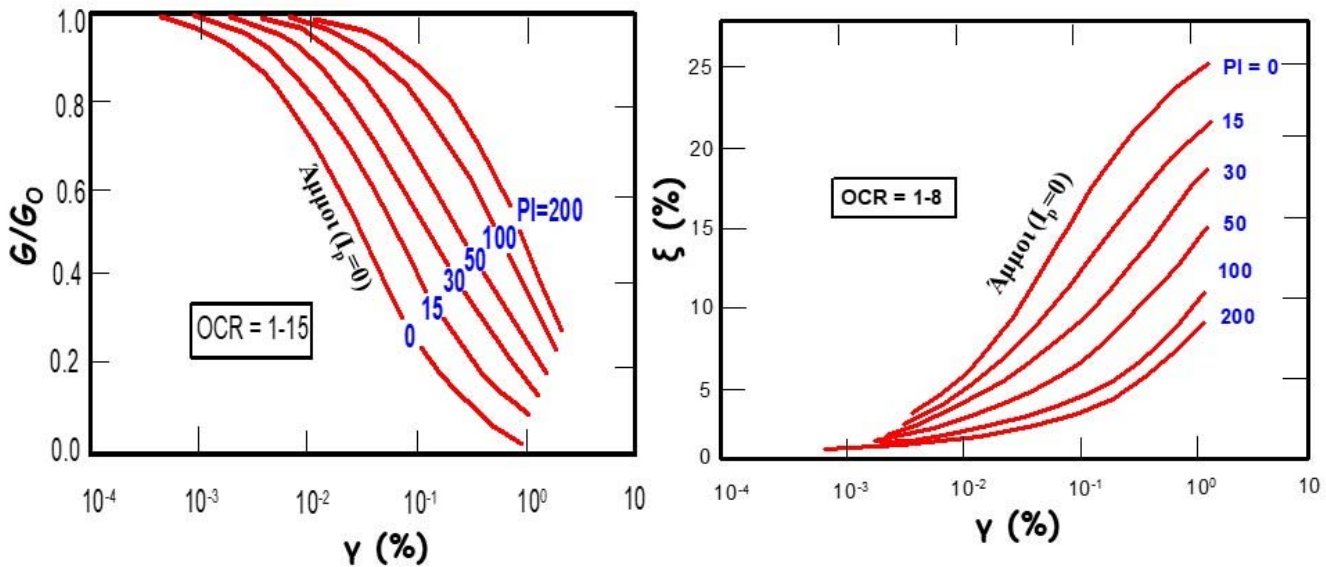
Ελαστο-
πλαστική
συμπεριφορά

5.2 ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΙΞΩΔΟ-ΕΛΑΣΤΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ

5.2.1 Πειραματικές Μετρήσεις.....

G/G_0 - γ & ξ - γ

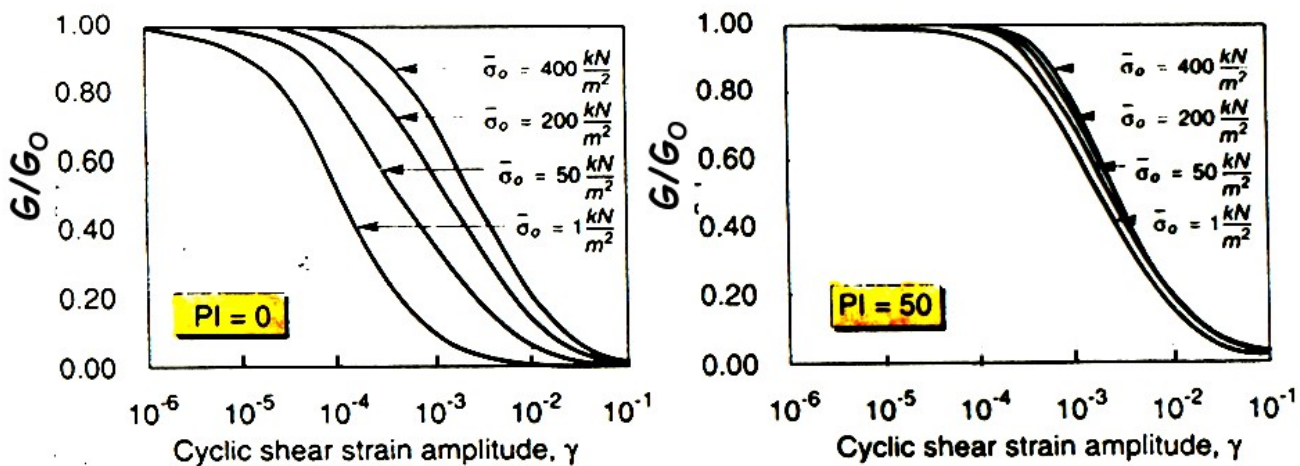
Επίδραση τύπου εδάφους
(δια του Δείκτη Πλασιμότητας I_p ή PI)



(Vucetic & Dobry, 1991)

Επιπλέον,

επίδραση της τάσης στερεοποίησης (κυρίως για άμμους)



$$\frac{G}{G_0} = K(\gamma, PI) (\sigma'_m)^{n(\gamma, PI) - m_0}$$

(Ishibashi 1992)

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

$$m(\gamma, PI) - m_0 = 0.272 \left\{ 1 - \tanh \left[\ln \left(\frac{0.000556}{\gamma} \right)^{0.4} \right] \right\} \exp(-0.0145 PI^{1.3}) \quad n(PI) = \begin{cases} 0.0 & \text{για } PI = 0 \\ 3.37 \times 10^{-6} PI^{1.404} & \text{για } 0 < PI \leq 15 \\ 7.0 \times 10^{-7} PI^{1.976} & \text{για } 15 < PI \leq 70 \\ 2.7 \times 10^{-5} PI^{1.115} & \text{για } PI > 70 \end{cases}$$

Ερώτηση 5.1

Ποια είναι άραγε η συμπεριφορά του εδαφικού στοιχείου κατά την κατακόρυφη μετάδοση κυμάτων Ρ; Ποιες είναι οι καμπύλες $D/D_{\max} - \varepsilon_a$ και $\xi - \varepsilon_a$ στην περίπτωση αυτή;

Για να απαντήσετε, μπορείτε να ανατρέξετε στην βιβλιογραφία ή/και να χρησιμοποιήσετε τις έως τώρα γνώσεις και την κρίση σας.

(D είναι το Μέτρο 1-Δ συμπίεσης)

5.2.2 Απλά Αναλυτικά Προσομοιώματα

Για την αριθμητική ανάλυση πρακτικών προβλημάτων, η μη-γραμμική ιξωδο-ελαστική συμπεριφορά του εδάφους θα πρέπει να προσομοιωθεί με την βοήθεια κατάλληλων αναλυτικών σχέσεων (ή "καταστατικών προσομοιωμάτων" όπως συνήθως αποκαλούνται).

Ακολουθως, παρουσιάζονται και αξιολογούνται τέσσερα απλά τέτοια προσομοιώματα, τα οποία είναι διαθέσιμα στα περισσότερα λογισμικά αριθμητικών αναλύσεων (ABAQUS, PLAXIS, FLAC, κλπ):

✚ **Ελαστικό-απόλυτα πλαστικό**

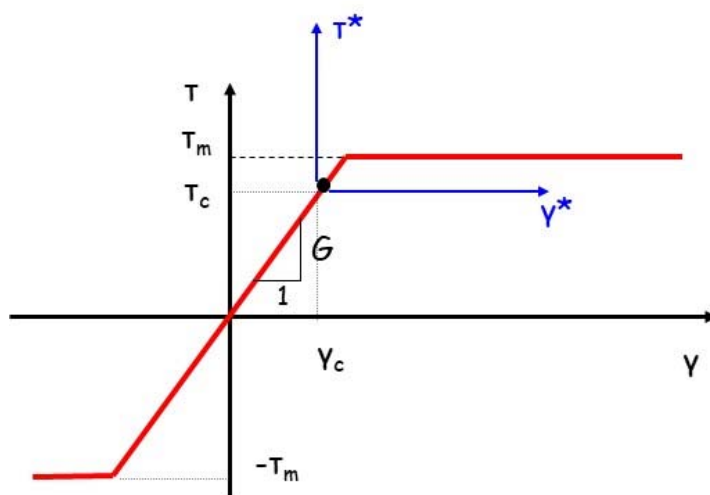
✚ **Δι-γραμμικό**

✚ **Υπερβολικό (Hyperbolic)**

✚ **Ramberg-Osgood**

Υπάρχουν βέβαια και άλλα τέτοιου είδους, περισσότερο σύνθετα προσομοιώματα, τα οποία πριν χρησιμοποιηθούν θα πρέπει να αξιολογούνται σε σύγκριση με αντίστοιχα πειραματικά αποτελέσματα (π.χ. Vucetic & Dobry, 1991), όπως παρουσιάζεται στα επόμενα.

✚ "Ελαστικό-απόλυτα πλαστικό" προσομοίωμα



αρχική φόρτιση:

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

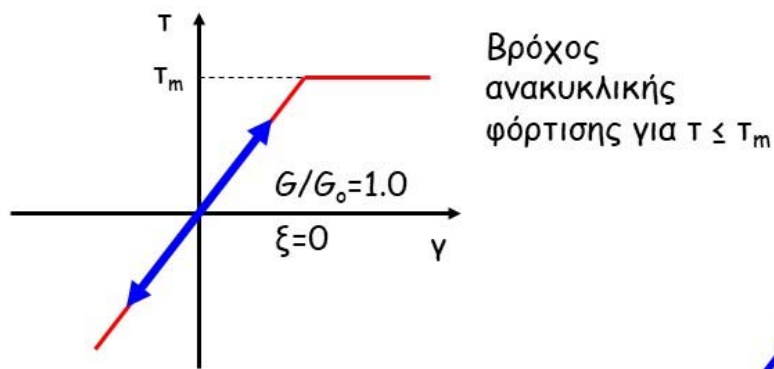
αποφόρτιση από (τ_c, γ_c) :

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

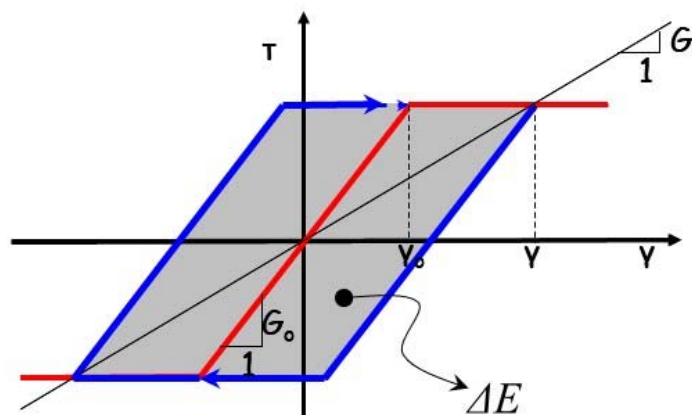
όπου.....

$$\tau^* = \tau - \tau_c, \quad \gamma^* = \gamma - \gamma_c$$

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



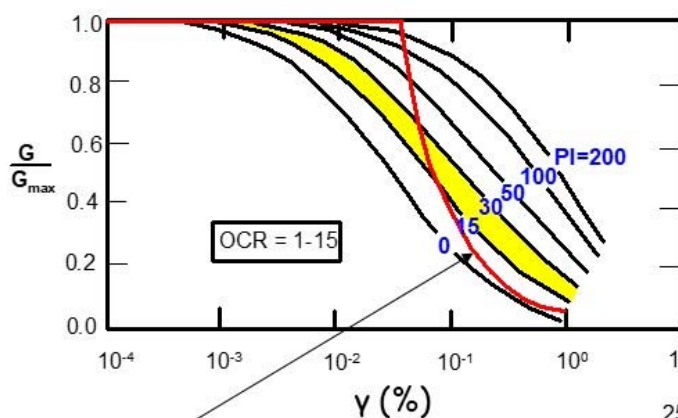
Βρόχος για $\tau \geq \tau_m$



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

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

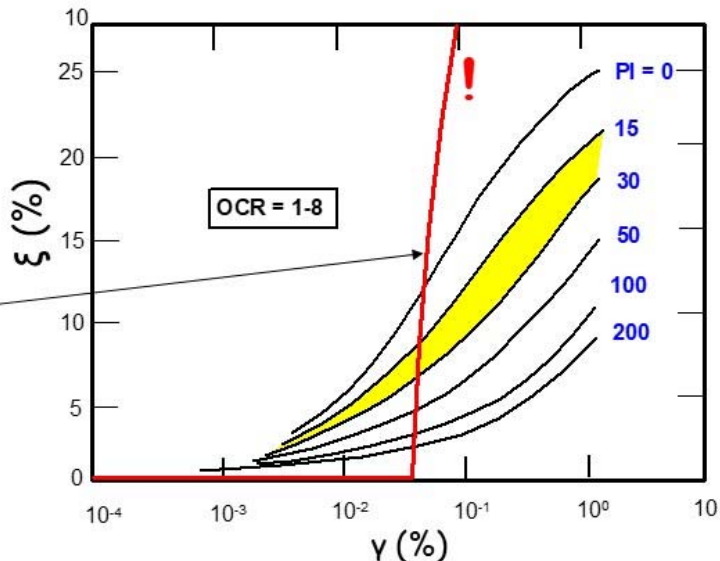
$$\xi = \frac{2}{\pi} \left(1 - \frac{G}{G_o} \right) = 0 \sim 0.65$$



ΡΑΓΔΑΙΑ απομείωση του μέτρου διάτμησης G

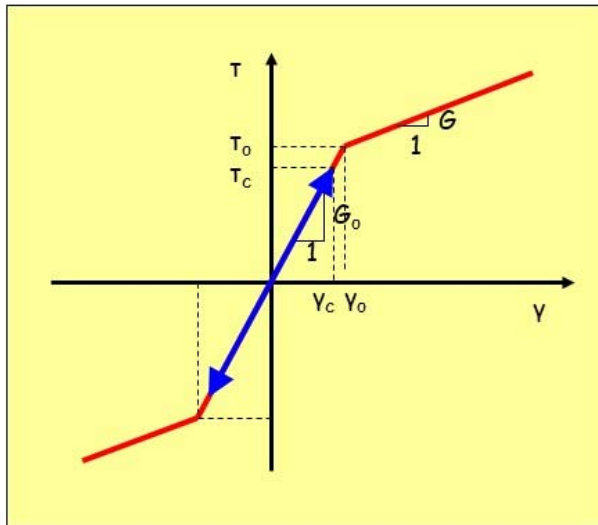
και (ακόμη χειρότερα) ΡΑΓΔΑΙΑ & υπερβολικά ΜΕΓΑΛΗ αύξηση του ξ

σύγκριση με πειραματικά αποτελέσματα



✚ “Δι-γραμμικό” προσομοίωμα

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



(α) $|\tau| \leq |\tau_0|$

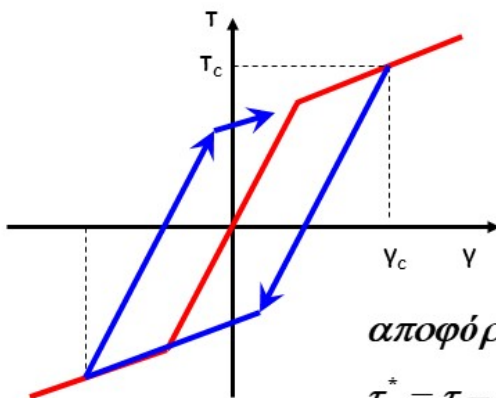
$$\gamma_c = \frac{\tau}{G_o}$$

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

φόρτιση

αποφόρτιση –
επαναφόρτιση

$$\begin{aligned} G/G_o &= 1 \\ \xi &= 0 \end{aligned}$$



(β) $|\tau| \geq |\tau_0|$

$$\text{φόρτιση: } \gamma - \gamma_o = \frac{\tau - \tau_o}{G_1} \Rightarrow \gamma = \gamma_o + \frac{\tau - \tau_o}{G_1}$$

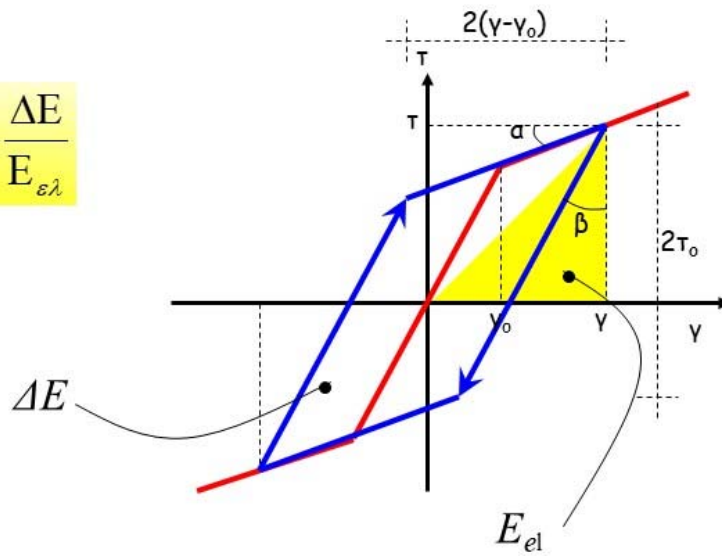
αποφόρτιση από (γ_c, τ_c) :

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

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

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

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



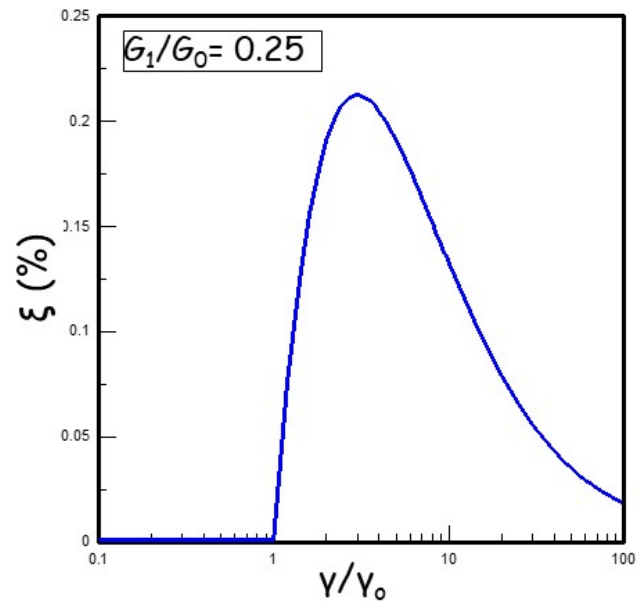
$$\begin{aligned} \Delta E &= \frac{2(\gamma - \gamma_o)}{\cos \alpha} \frac{2\tau_o}{\cos \beta} \cos(\alpha + \beta) = \frac{2(\gamma - \gamma_o)2\tau_o}{\cos \alpha \cos \beta} (\cos \alpha \cos \beta - \sin \alpha \sin \beta) \\ &= 4(\gamma - \gamma_o)\tau_o(1 - \tan \alpha \tan \beta) \end{aligned}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

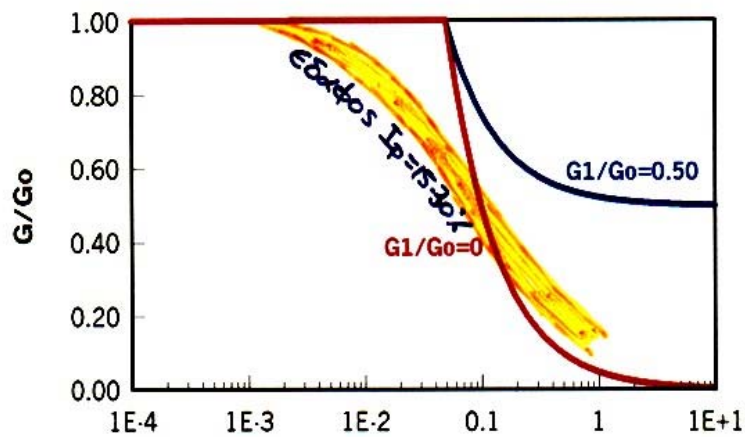
$$\Delta E = 4(\gamma - \gamma_o)\tau_o \left(1 - \frac{G_1}{G_o}\right)$$

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

$$\begin{aligned} \xi &= \frac{1}{4\pi} \frac{4(\gamma - \gamma_o)\tau_o \left(1 - \frac{G_1}{G_o}\right)}{\frac{1}{2} \tau \gamma} = \\ &= \frac{2}{\pi} \left(1 - \frac{\gamma_o}{\gamma}\right) \frac{G_o \gamma_o}{G \gamma} \left(1 - \frac{G_1}{G_o}\right) \Rightarrow \end{aligned}$$

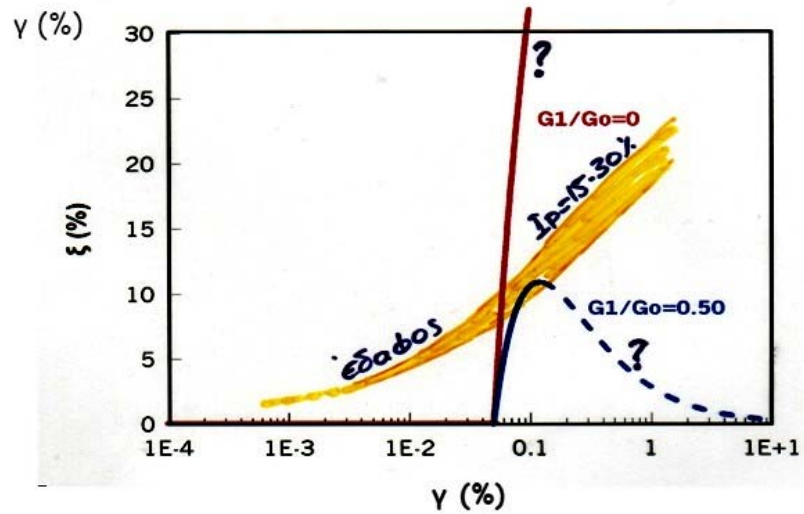
$$\xi = \frac{2}{\pi} \frac{\left(1 - \frac{\gamma_o}{\gamma}\right) \frac{\gamma_o}{\gamma} \left(1 - \frac{G_1}{G_o}\right)}{\frac{G_1}{G_o} + \frac{\gamma_o}{\gamma} \left(1 - \frac{G_1}{G_o}\right)}$$



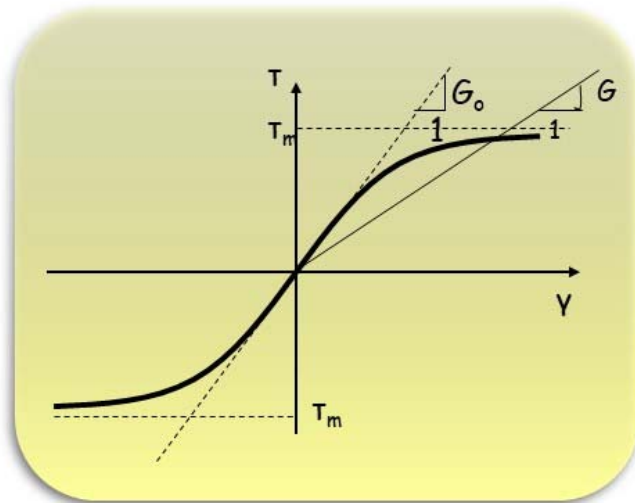


σύγκριση με πειραματικά αποτελέσματα

σχόλια ???



✚ “Υπερβολικό (Hyperbolic)” προσομοίωμα



μονοτονική

φόρτιση - αποφόρτιση

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

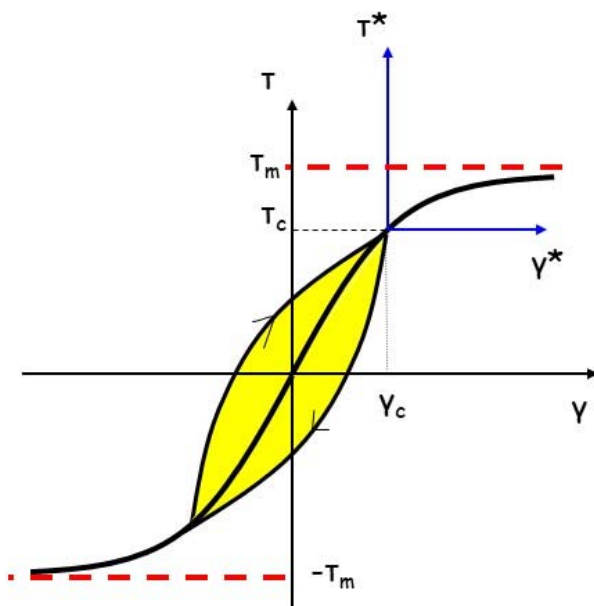
$$\text{ή} \quad \tau = \frac{G_o \gamma}{1 + \frac{G_o}{\tau_m} |\gamma|} \Rightarrow$$

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

Η παραπάνω σχέση για την σχέσης $G/G_o - \gamma$ είναι πρακτικά ανεξάρτητη από το σχήμα αποφόρτισης-επαναφόρτισης που θα υιοθετηθεί για την προσομοίωση της ανακυκλικής φόρτισης (βλ. επόμενα).

Ανακυκλική αποφόρτιση-επαναφόρτιση κατά MASING (1926)

(είναι το πλέον δημοφιλές σχήμα αποφόρτισης-επαναφόρτισης γιατί οδηγεί σε κλειστούς, αντι-συμμετρικούς βρόχους.....)



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

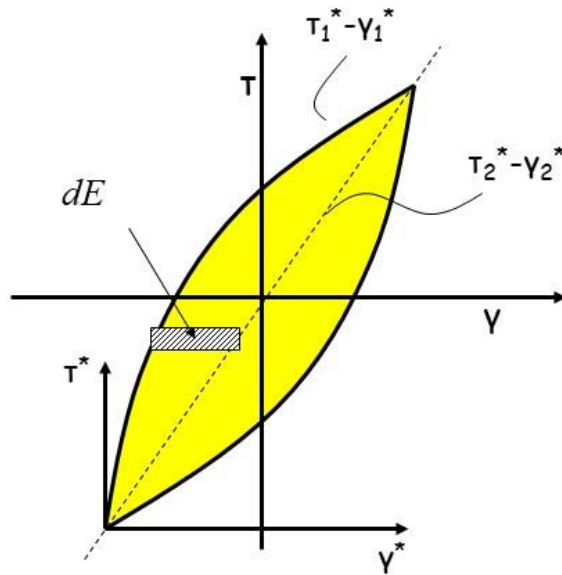
$$G_o^* = G_o$$

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

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

$$\text{άρα} \quad \gamma - \gamma_c = \frac{\tau - \tau_c}{G_o} \cdot \frac{1}{1 - \frac{|\tau - \tau_c|}{2\tau_m}}$$

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



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

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

$$\frac{dE}{d\tau^*} = \gamma_2^* - \gamma_1^* = \frac{\tau^*}{G_o} \left[\frac{1}{1 - \frac{\tau^*}{2\tau_m}} - \frac{1}{1 - \frac{\tau_c}{\tau_m}} \right] =$$

$$= \frac{\tau^*}{G_o} \left[\frac{2\tau_m}{2\tau_m - \tau^*} - \frac{2\tau_m}{2\tau_m - 2\tau^*} \right] =$$

$$= \frac{\tau^*}{G_o} \left[\frac{2\tau_m^2 - 2\tau_m\tau_c - 2\tau_m^2 + \tau^*\tau_m}{(2\tau_m - \tau^*)(\tau_m - \tau_c)} \right]$$

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

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

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

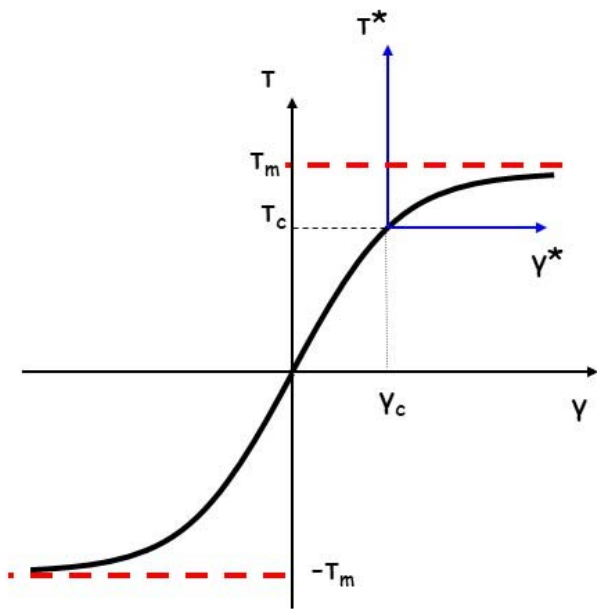
$$\xi = \frac{1}{4\pi} \frac{\Delta E}{E} = \frac{2}{\pi} (1 + 2\alpha) + \frac{4}{\pi} (\alpha^2 + \alpha) \ln \frac{G}{G_o} =$$

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

$$\text{with } a = \frac{\tau_m}{G_o} \frac{1}{\gamma} \quad \text{και} \quad \frac{G}{G_o} = \frac{1}{1 + 1/a}$$

Ανακυκλική αποφόρτιση-επαναφόρτιση κατά ΡΥΚΕ (1979)

(είναι απλούστερο υπολογιστικά από το προηγούμενο, αλλά δεν οδηγεί σε κλειστούς και αντι-συμμετρικούς βρόχους)



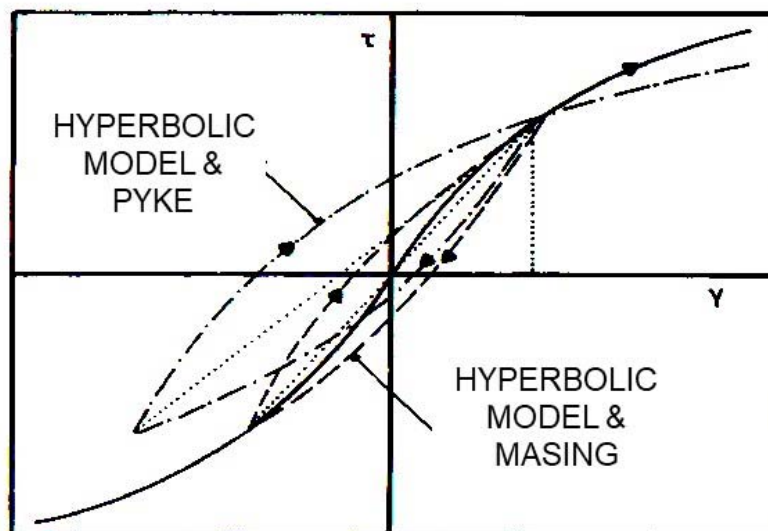
$$\gamma^* = \gamma - \gamma_c$$

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

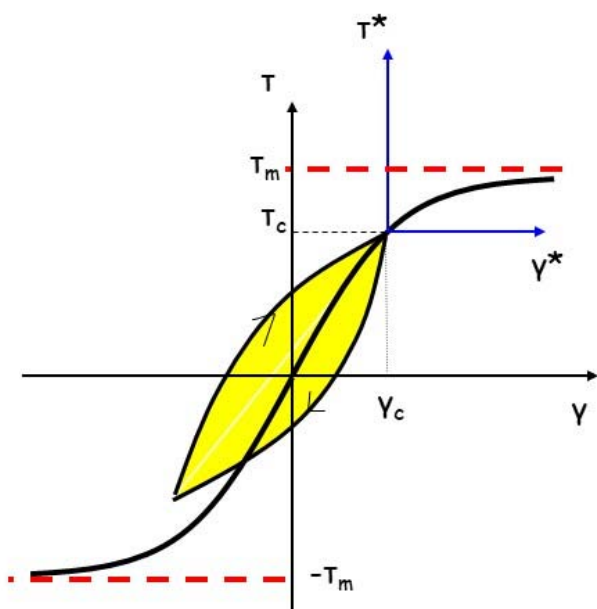
$$G_o^* = G_o$$

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

Τυπικοί βρόχοι αποφόρτισης - επαναφόρτισης κατά Masing και Pyke



Σχέσεις $G/G_o - \gamma$ και $\xi - \gamma$ κατά ΡΥΚΕ (1979)



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

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

$$G_o^* = G_o$$

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

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

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

Όπως και στην περίπτωση *Masing* . . .

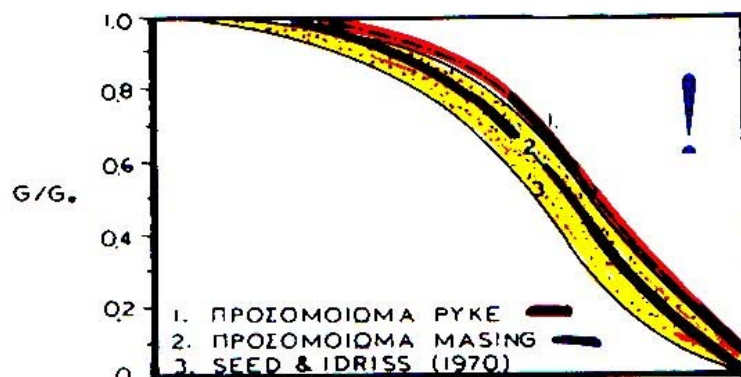
$$\frac{G}{G_o} = \frac{a^2 (a + 2)}{a^2 + 4a + 2}$$

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

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

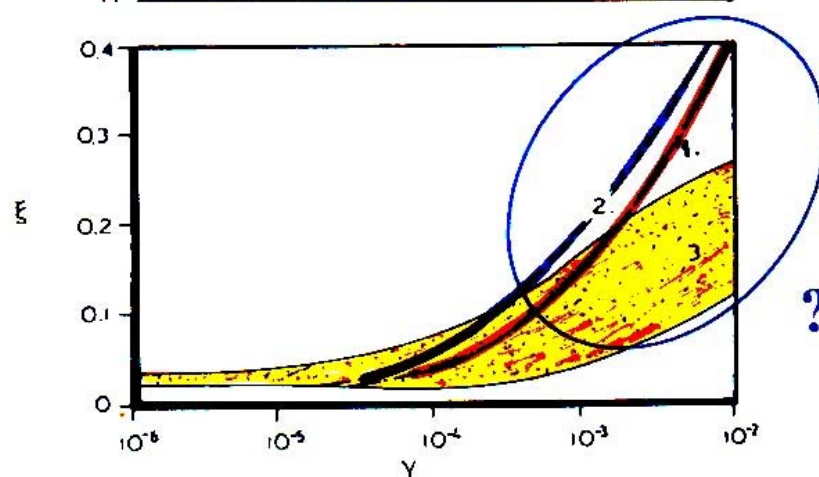
$$C_1 = 1 + \frac{1}{a + 1}$$

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



σύγκριση με πειραματικά
αποτελέσματα

σχόλια ???

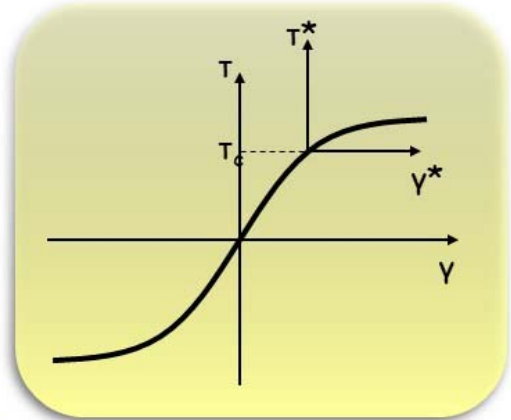


Προσομοίωμα "Ramberg-Osgood (1943)"

Μονοτονική φόρτιση

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

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



Αποφόρτιση-επαναφόρτιση από (T_c, γ_c)

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

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

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

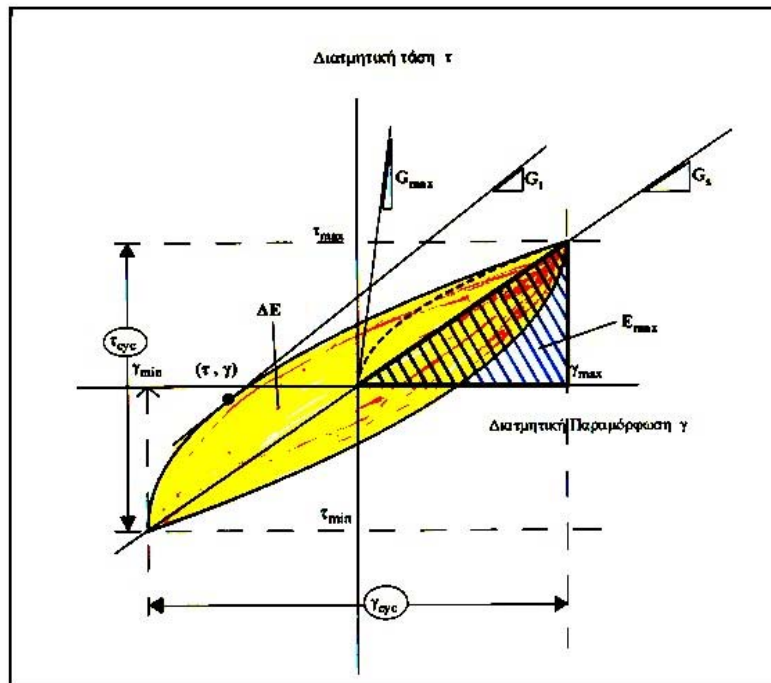
$$\frac{G}{G_{\max}} = \frac{1}{1 + \left(\frac{1}{a_y} - 1 \right) \frac{|\tau_c|^{w-1}}{\tau_1}}$$

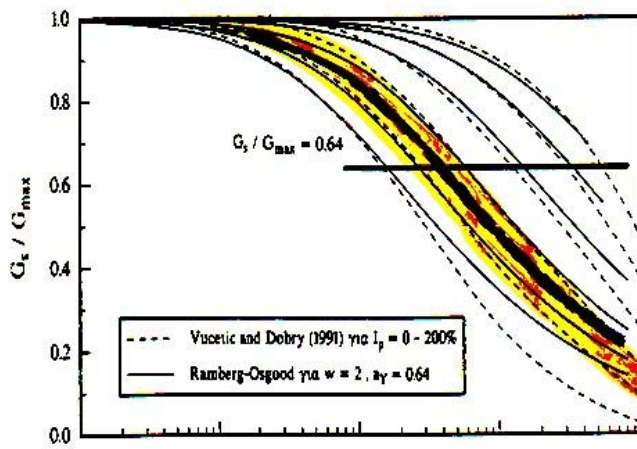
$$\xi = \frac{2}{\pi} \left(\frac{w-1}{w+1} \right) \left(1 - \frac{G}{G_{\max}} \right)$$

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

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

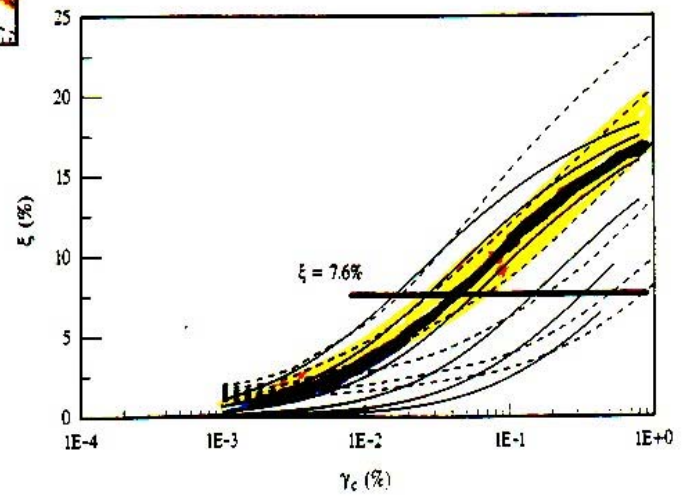
Τυπικός βρόχος ανακυκλικής φόρτισης προσομοιώματος
Ramberg-Osgood





σύγκριση με πειραματικά
αποτελέσματα.....

σχόλια ???



5.3 ΕΛΑΣΤΟ-ΠΛΑΣΤΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ

5.3.1 Δυναμική Συνίζηση (καθίζηση) Κοκκώδους Εδάφους.....

Υπό στραγγιζόμενες
συνθήκες φόρτισης

για $n=10$ (σεισμός με $M \approx 6$)

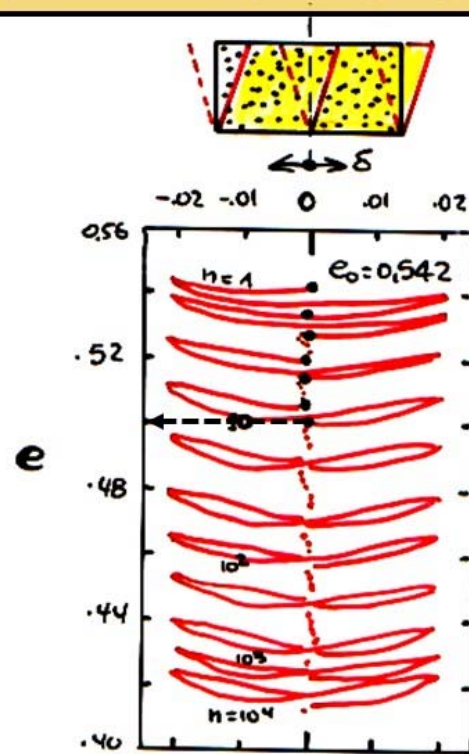
$$\Delta e = 0.542 - 0.50 = 0.042$$

$$\Delta e_v = \Delta e / (1 + e_0) = 0.0272$$

για στρώμα πάχους $H_0 = 4\text{m}$

Δυναμική Συμπύκνωση (καθίζηση):

$$\Delta H = \Delta e_v H_0 = 400 \times 0.0272 \approx 11\text{cm}$$

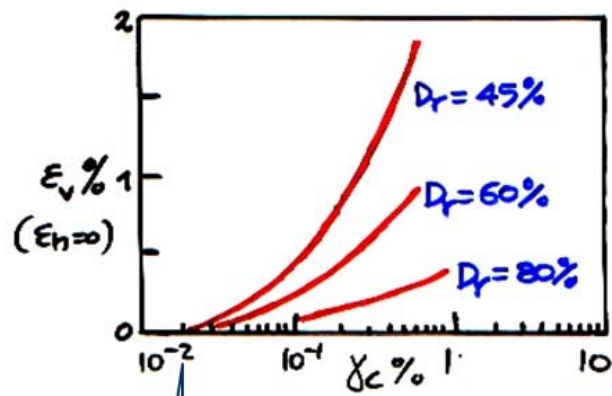


Παράδειγμα: δυναμική συνίζηση μεταβατικού επιχώματος (Niigata 1964)

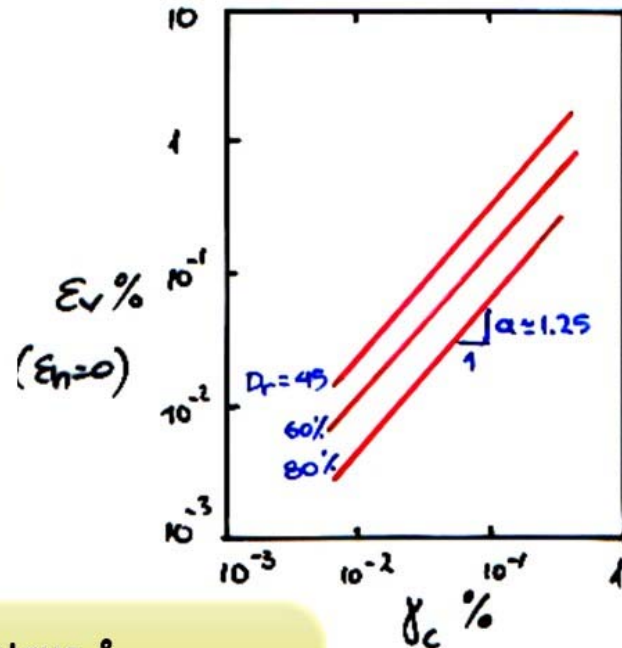




Επίδραση της διατμητικής παραμόρφωσης (γ_c)



για $\gamma < 0,02$
 $\varepsilon_v \approx 0$



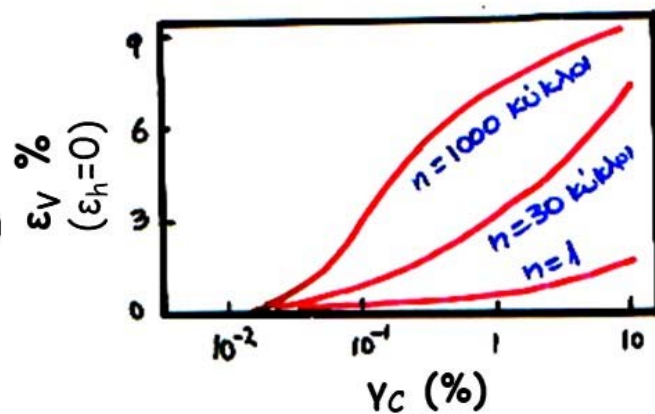
για $N=10$ κύκλους &
 $\sigma'_v = 5$ έως 200 kPa

$$\varepsilon_v = \kappa \gamma_c^\alpha, \quad \alpha = 1.0-1.5$$

Επίδραση αριθμού κύκλων φόρτισης (N)

$$D_r = 78\%$$

$$\sigma'_v = 5 \text{ έως } 200 \text{ kPa}$$

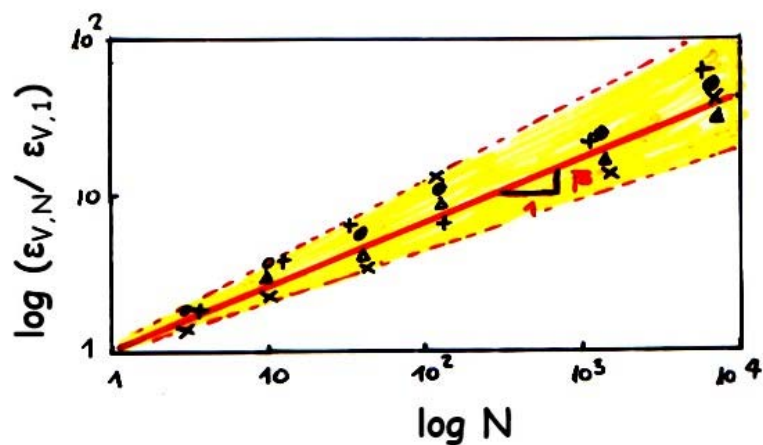


$$D_r = 45-80\%$$

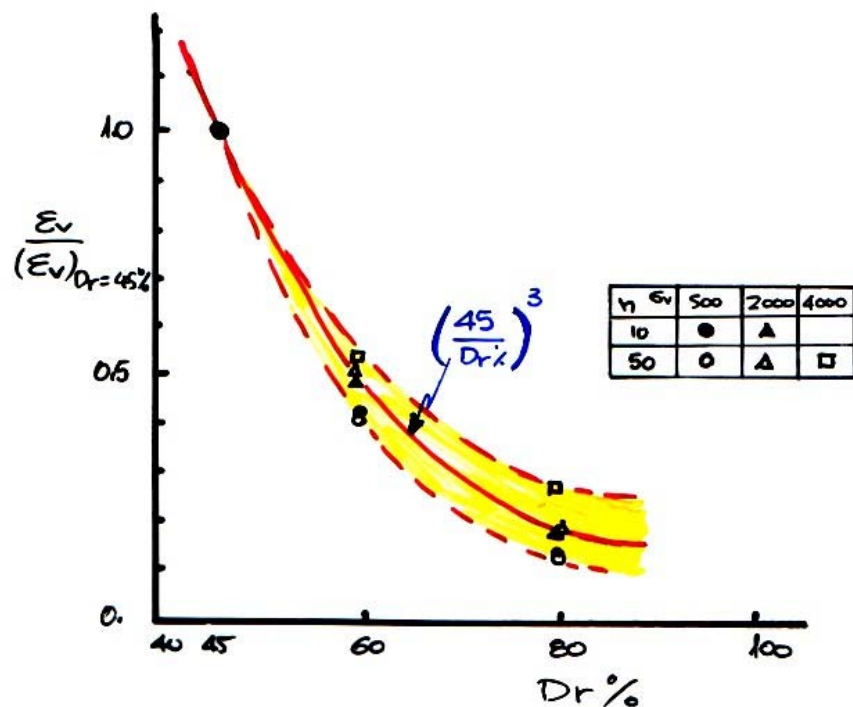
$$\sigma'_v = 5 \text{ έως } 200 \text{ kPa}$$

$$\frac{(\varepsilon_v)_N}{(\varepsilon_v)_{N=1}} \approx N^\beta$$

$$(\beta \approx 0,30 - 0,60)$$



Επίδραση της Σχετικής Πυκνότητας (D_r)



ΤΕΛΙΚΩΣ.....

για γεωστατικές συνθήκες ($\varepsilon_h=0$)

$$\varepsilon_v(\%) = A \left(\frac{45}{D_r(\%)} \right)^a \gamma_c(\%)^\beta N^\delta$$

A, a, β, δ από εργαστηριακές δοκιμές ανακυκλικής φόρτισης

ή

προσεγγιστικά:

$$A = 1.6 \pm 0.4$$

$$a = 3 \pm 1$$

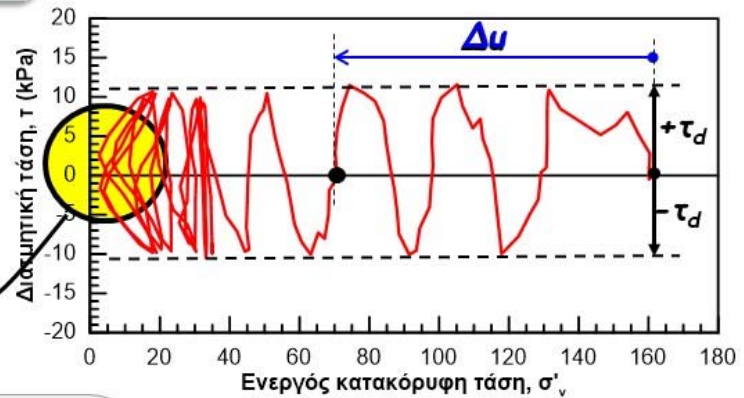
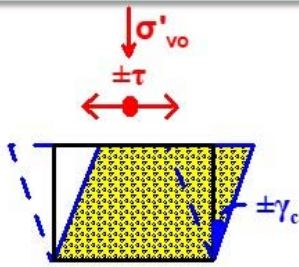
$$\beta = 1.25 \pm 0.25$$

$$\delta = 0.4 \pm 0.15$$

5.3.2 Ανάπτυξη υδατικών υπερπίεσεων

& Ρευστοποίηση Κοκκώδους Εδάφους

Υπό αστράγγιστες συνθήκες φόρτισης



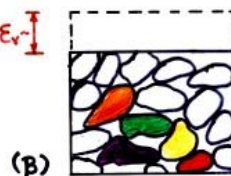
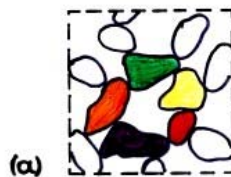
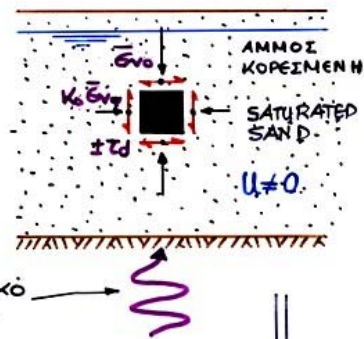
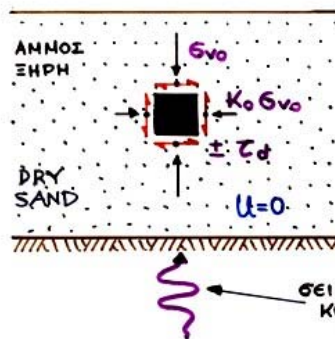
Ρευστοποίηση !

$$\Delta u \approx \sigma'_{vo} \left(\text{ή } r_u = \frac{\Delta u}{\sigma'_{vo}} \approx 1.0 \right)$$

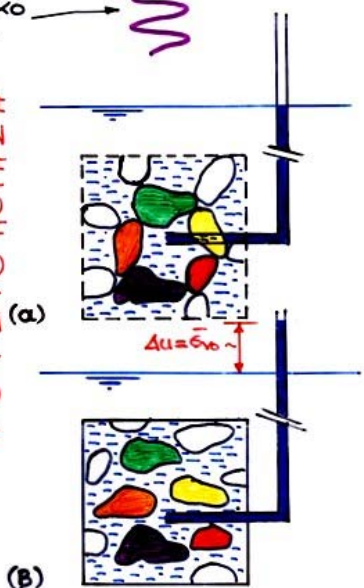
$$\& \tau_a = (\sigma'_{vo} - \Delta u) \rightarrow 0 !$$

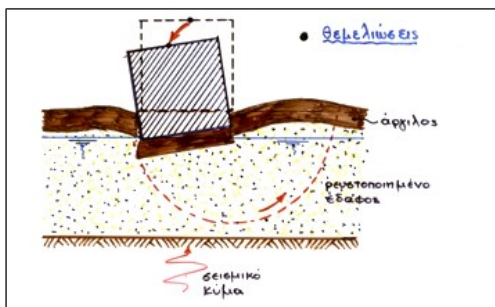
Δυναμική συνίζηση (καθίζηση) & Ρευστοποίηση.....

ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΣΥΝΙΖΗΣΗ



ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΗ

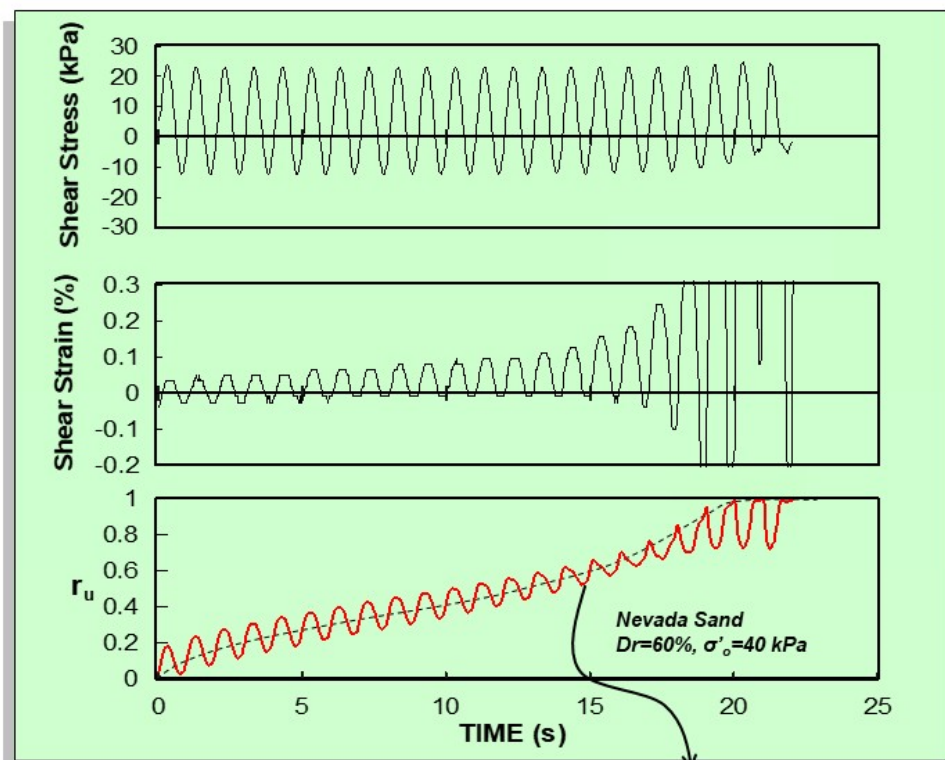
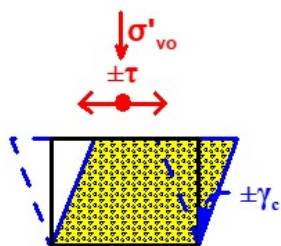




Kocaeli (Izmit), Τουρκία (1999)

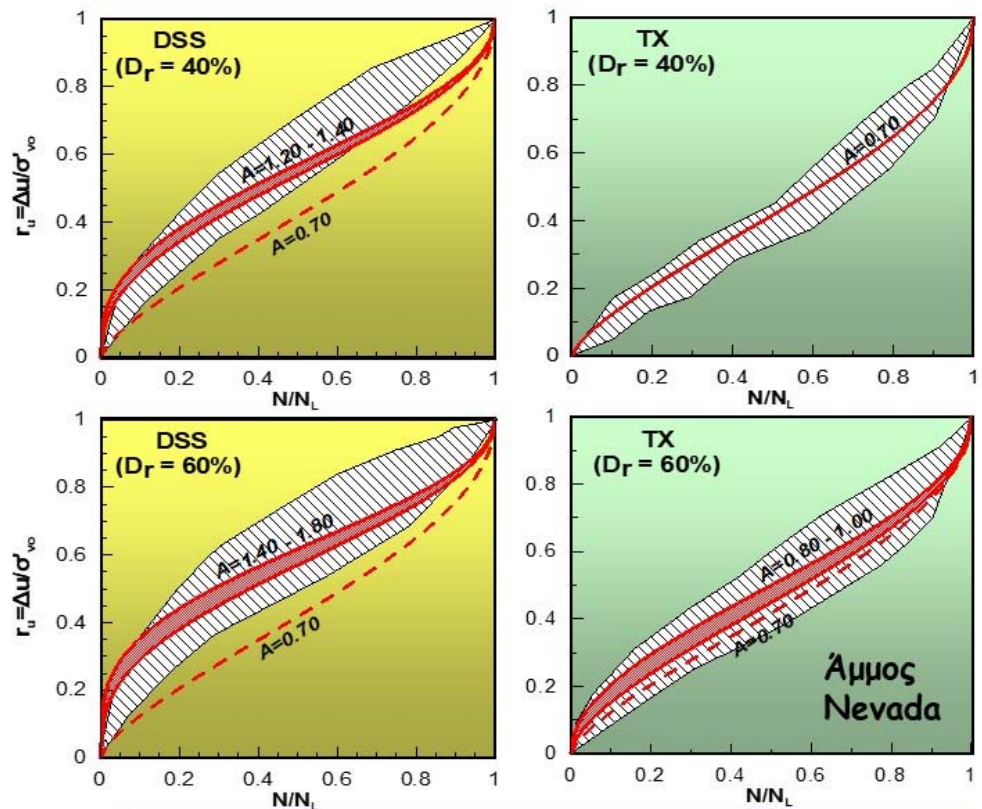


δοκιμές
ρευστοποίησης
(ελεγχόμενης
ΤΑΣΗΣ)



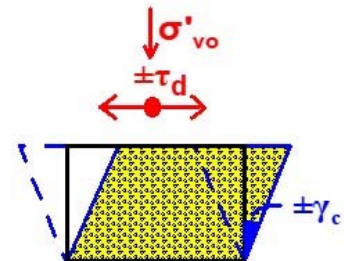
$$r_u = \frac{u_g}{\sigma'_o} = \frac{2}{\pi} \sin^{-1} \left(\frac{N}{N_l} \right)^{1/2 A}$$

Οι τιμές του εκθέτη **A** εξαρτώνται από τον τύπο της φόρτισης και την σχετική πυκνότητα D_r της άμμου...

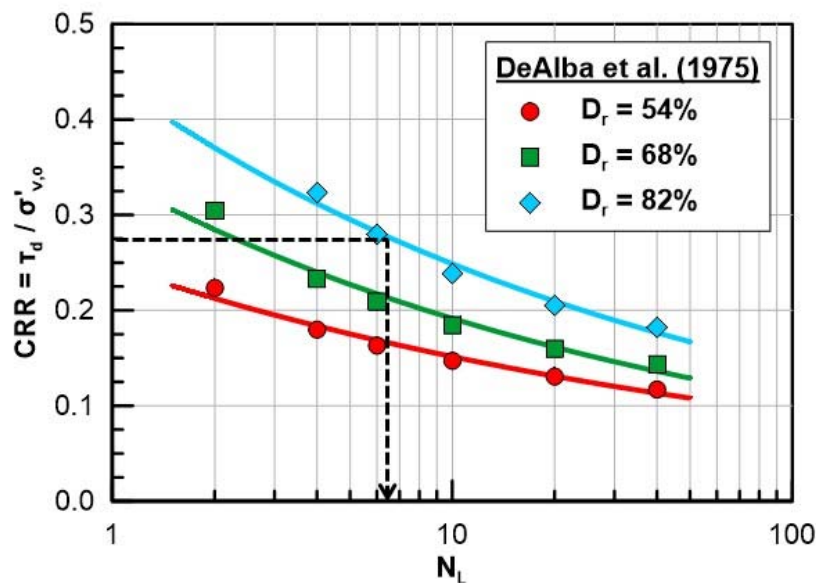


$$\text{για DSS} \dots A = \begin{cases} 1.20 - 1.40 & \text{για } D_r = 40\% \\ 1.40 - 1.80 & \text{για } D_r = 60\% \end{cases}$$

Οι τιμές του αριθμού κύκλων φόρτισης N_L που απαιτούνται για ρευστοποίηση λαμβάνονται από πειραματικές "καμπύλες αντίστασης σε ρευστοποίηση"

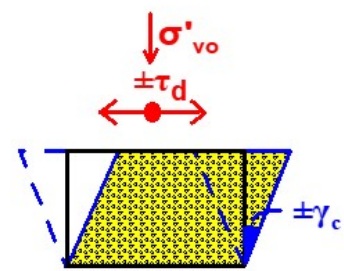


$$\frac{\tau_d}{\sigma'_{vo}} - N/N_L \quad (\text{ή } CRR - N/N_L)$$



ή

από αναλυτικές (εμπειρικές) σχέσεις, της μορφής



$$\frac{\tau_d}{\sigma'_{vo}} = CRR = a \cdot K_\sigma \cdot N_L^{-\beta}$$

όπου....

$$K_\sigma = 1 - 0.266 \cdot \ln \left(\frac{\sigma'_{vo}}{p_a} \right)$$

p_a = ατμοσφ. πίεση

και α , β από 

	Dr	τριαξονική φόρτιση (TX)	Απλή Διάτμηση (DSS)
α	30-50%	0.30±0.10	0.30±0.10
	55-70%	0.50±0.20	0.50±0.20
β	30-50%	0.25±0.10	0.15±0.05
	55-70%	0.35±0.10	0.20±0.10

Άσκηση 5.1

Προς διευκόλυνση των υπολογισμών, οι καμπύλες $G/G_{\max}$ - γ και ξ - γ μπορούν να εκφραστούν από τις ακόλουθες αναλυτικές σχέσεις:

$$\frac{G}{G_{\max}} = \frac{1}{1 + (\gamma / \gamma_r)^a} \quad \text{και} \quad \xi = \xi_o + \beta \left(1 - \frac{G}{G_{\max}} \right)$$

Να εφαρμόσετε τις παραπάνω σχέσεις στις πειραματικές καμπύλες Vucetic & Dobry (1991), και να εκτιμήσετε τις τιμές των παραμέτρων (γ_r , a , ξ_o και β) συναρτήσει του δείκτη πλασιμότητας PI .

PI (%)	0	15	30	50	100	200
γ_r (%)						
a						
ξ_o						
β						

Άσκηση 5.2

(α) Ποια είναι η ελάχιστη και η μέγιστη τιμή του ξ που προβλέπουν τα προηγούμενα προσομοιώματα; Πως συγκρίνονται αυτές οι τιμές με τις αντίστοιχες τιμές των πειραματικών μετρήσεων;

(β) Πόσο σημαντικές είναι οι παρατηρούμενες διαφορές στην πράξη (π.χ. για την ανάλυση της σεισμικής απόκρισης του εδάφους);

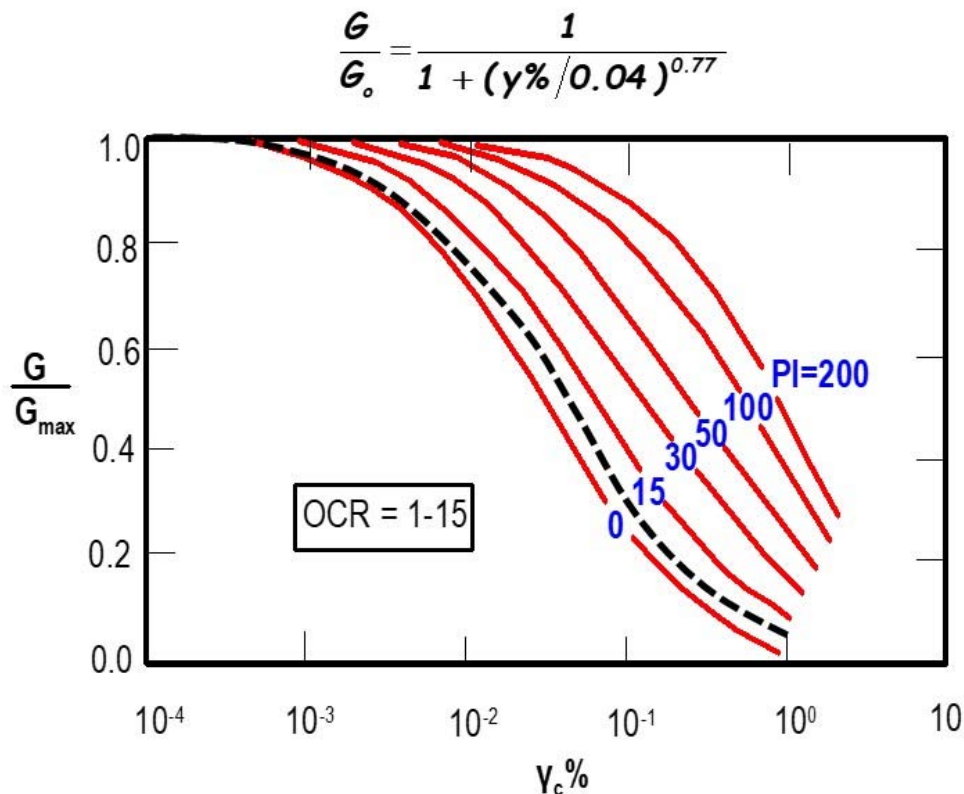
Άσκηση 5.3

Επιφανειακή στρώση ξηρής άμμου, πάχους $H=6\text{m}$, μέσου δείκτη πόρων $e=0.75$ και σχετικής πυκνότητας $Dr=30\%$ υφίσταται σεισμική δόνηση η οποία είναι ισοδύναμη με $N=10$ κύκλους ομοιόμορφης επιτάχυνσης $a=0.35g$ (στην επιφάνεια του εδάφους). Να υπολογισθεί η καθίζηση την οποία θα προκαλέσει η σεισμική δόνηση εάν....

- Η μέγιστη διατμητική τάση λόγω σεισμού σε βάθος z είναι προσεγγιστικά ίση με $\tau_d = a_{\max} \cdot \rho \cdot z \cdot r_d$ [όπου $r_d = 1 - 0.015z(m) \geq 0.50$]
- Η σχέση $G/G_o - \gamma$ δίνεται από την αναλυτική σχέση ...

$$\frac{G}{G_o} = \frac{1}{1 + (\gamma\%/0.04)^{0.77}}$$

Υπόδειξη: Σχέσεις υπολογισμού του G_o δίνονται στο Κεφάλαιο 3



Άσκηση 5.4

Επιφανειακή στρώση κορεσμένης άμμου (η Σ.Υ.Ο. είναι στην επιφάνεια), πάχους $H=10\text{m}$, μέσου δείκτη πόρων $e=0.65$ και αντίστοιχης σχετικής πυκνότητας $D_r=60\%$ υφίσταται σεισμική δόνηση η οποία είναι ισοδύναμη με $N=10$ κύκλους ομοιόμορφης επιτάχυνσης $a_{\max}=0.15g$ (στην επιφάνεια του εδάφους).

Η μέγιστη διατμητική τάση λόγω σεισμού σε βάθος z είναι προσεγγιστικά ίση με $\tau_d = a_{\max} \cdot \rho_{\text{κορ}} \cdot z \cdot r_d$ [όπου $r_d = 1 - 0.015z(m) \geq 0.50$]

(α) Να υπολογισθεί η κατανομή της υπερπίεσης πόρων με το βάθος

(β) Πόση πρέπει να γίνει η επιτάχυνση $a_{\max}$ για να έχω ρευστοποίηση στο μέσον του στρώματος της άμμου;

Άσκηση 5.5

Επιφανειακή στρώση κορεσμένης άμμου (η Σ.Υ.Ο. βρίσκεται στην επιφάνεια του εδάφους), πάχους $H=6\text{m}$, μέσου δείκτη πόρων $e=0.65$ και σχετικής πυκνότητας $D_r=60\%$ υφίσταται σεισμική δόνηση η οποία είναι ισοδύναμη με $N=10$ κύκλους ομοιόμορφης επιτάχυνσης $a=0.20g$ (στην επιφάνεια του εδάφους).

Να υπολογισθεί η υπερπίεση των πόρων και η διατμητική παραμόρφωση την οποία θα προκαλέσει η σεισμική δόνηση στο μέσον του στρώματος, εάν....

- Η μέγιστη διατμητική τάση λόγω σεισμού σε βάθος z είναι προσεγγιστικά ίση με $\tau_d = a_{\max} \cdot \rho \cdot z \cdot r_d$ [όπου $r_d = 1 - 0.015z(m) \geq 0.50$]
- Η σχέση $G/G_o - \gamma$ δίνεται από την αναλυτική σχέση ...

$$\frac{G}{G_o} = \frac{1}{1 + (\gamma\%/0.04)^{0.77}}$$

Υπόδειξη: Σχέσεις υπολογισμού του G_o δίνονται στο Κεφάλαιο 3

