

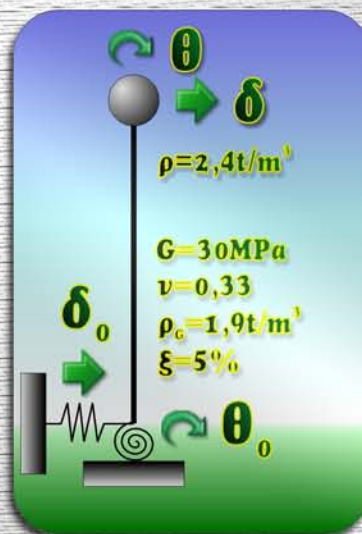
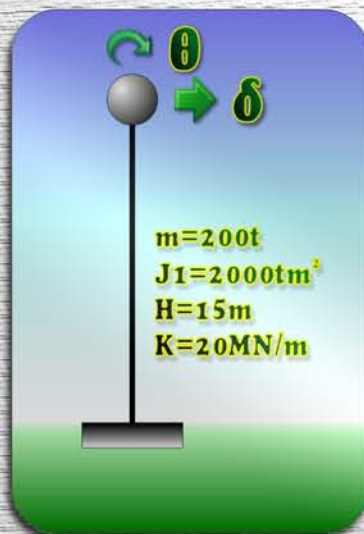
ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ»

A.S.T.E.V

Αντισεισμικός Σχεδιασμός Θεμελιώσεων, Αντιστηρίξεων και Γεωκατασκευών

Υπεύθυνος:
J.G. Sieffert

Θέμα:
Αλληλεπίδραση Εδάφους-Κατασκευής



Όνομα φοιτητών:
Μουρελάτος Ηλίας
Οικονόμου Θεμιστοκλής

Δευτέρα, 9 Ιουνίου 2003



LESSON: SOIL STRUCTURE INTERACTION - FOUNDATION VIBRATIONS

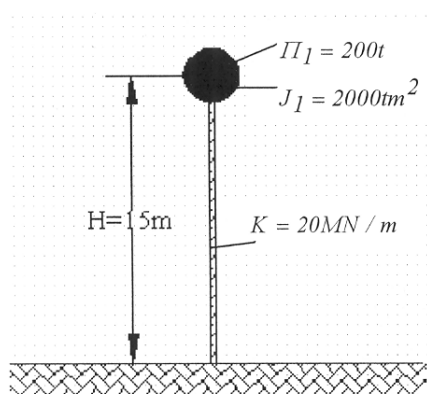
Jean – Georges Sieffert , Prof. INSA, Strassburg

March 2003

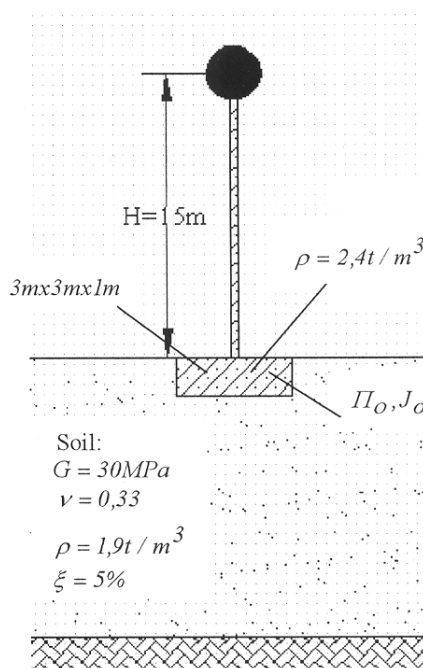
The aim of this analysis is to compare the dynamic behavior of the same structure in two different positions which are depicted in the following figure. The structure is a simplified tower consisting of the following:

- a column without mass, having bending stiffness K
- a concentrated mass at the top of the pier, having a translational component Π_1 and a rotational one J_1 .

In position 1, the structure is directly founded on rock, while in position 2, the structure is founded through a square shallow foundation.



Position 1.



Position 2.

For both positions, calculate the eigenfrequencies and the corresponding modes.

For position 2, the following cases should be studied:

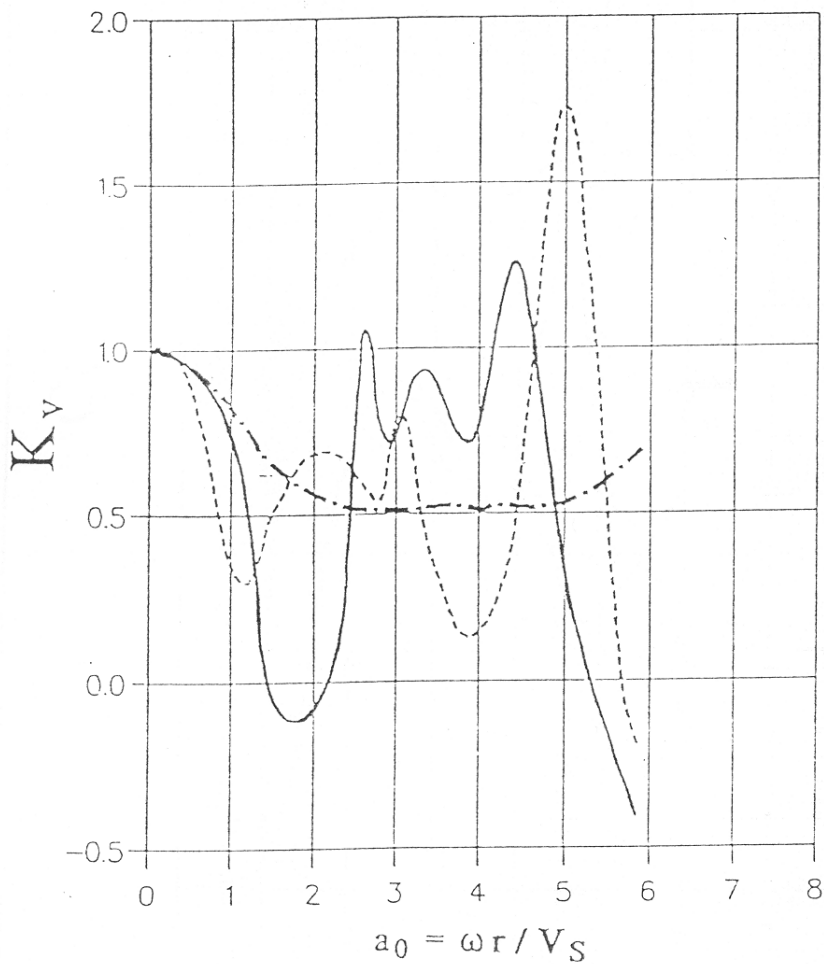
- $H_{layer} / r = 2$
- $H_{layer} / r = 3$
- $H_{layer} / r = \infty$ (halfspace)

In order to simplify the calculations, it can be assumed that:

- the reactions of the soil are applied at the center of gravity of the footing
- the coupling stiffness K_{hxy} can be neglected.

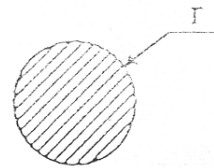
At least in one case present the deformation.

H/r {
 ————— 2
 - - - - - 3
 - - - - - ∞

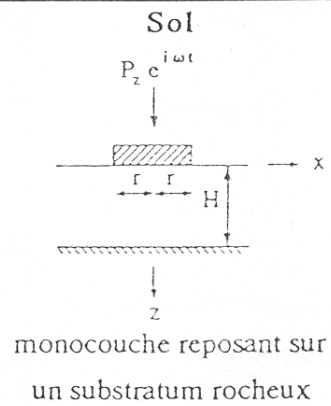


TRANSLATION VERTICALE

Fondation



rigide - circulaire superficielle



Paramètres

$\nu = 1/3$
 $\xi = 5\%$
 $H/r = \text{variable}$

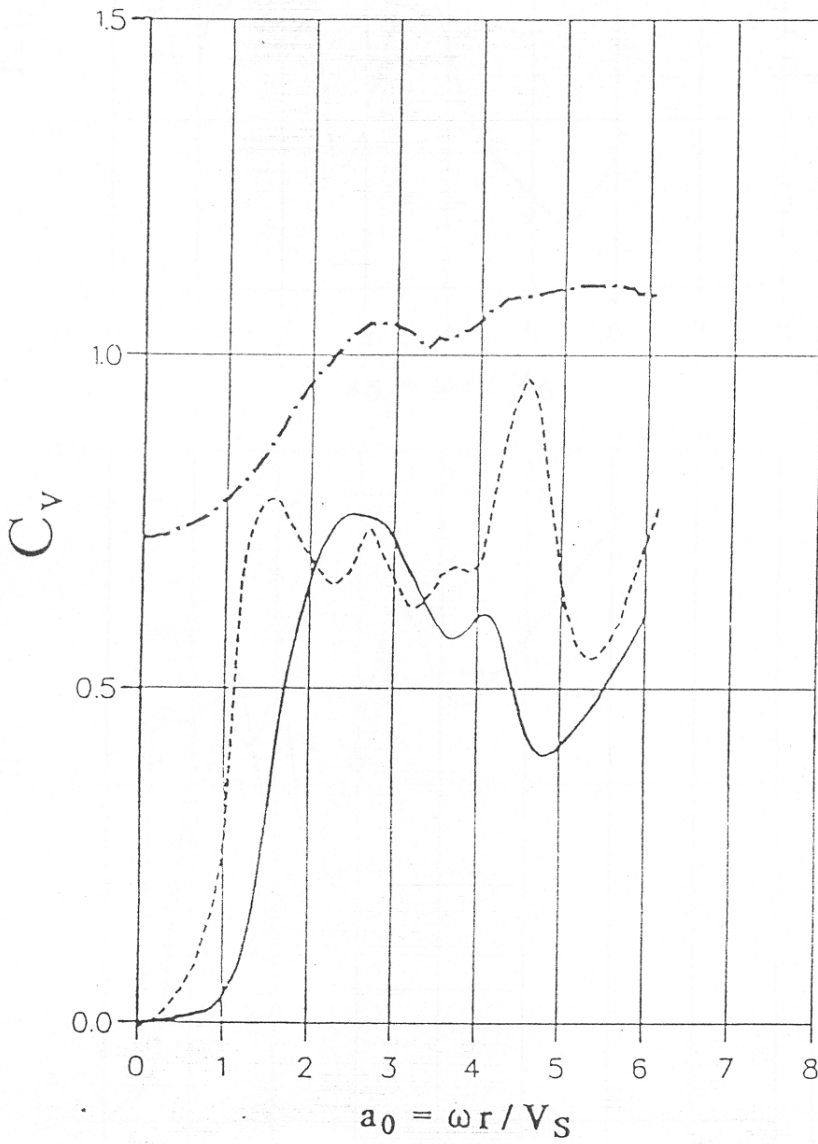
Sources

KAUSEL E. et al [8]
 LUCO J.E. et al [10]

Fiche 2.13

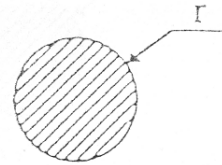
H/r

 ——— 2
 - - - 3
 - · - ∞

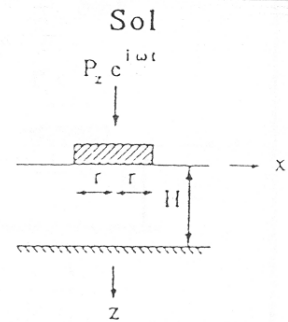


TRANSLATION VERTICALE

Fondation



rigide - circulaire superficielle



monocouche reposant sur un substratum rocheux

Paramètres

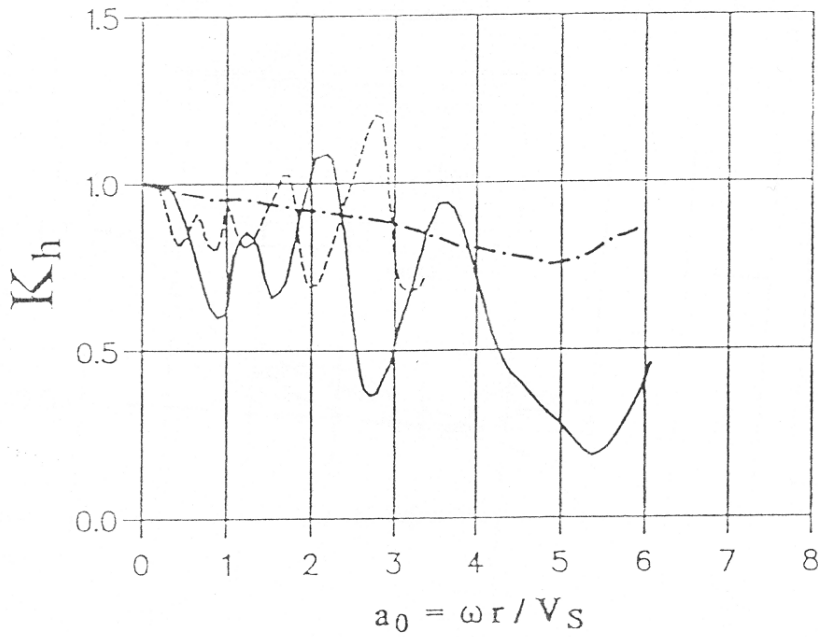
$\nu = 1/3$
 $\xi = 5\%$
 $H/r = \text{variable}$

Sources

KAUSEL E. et al [8]
 LUCO J.E. et al [10]

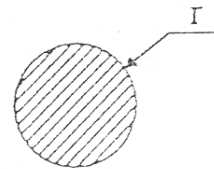
Fiche 2.14

H/r { ——— 2
 - - - 4
 - · - · ∞



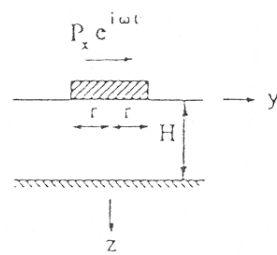
TRANSLATION HORIZONTALE

Fondation



rigide - circulaire superficielle

Sol



monocouche reposant sur un substratum rocheux

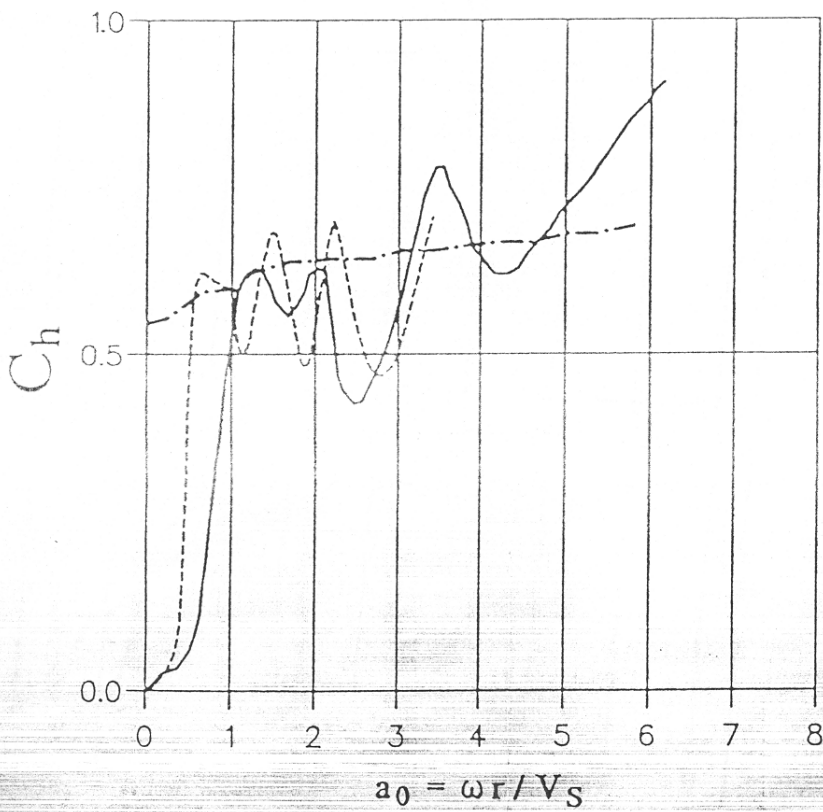
Paramètres

$\nu = 1/3$
 $\xi = 5\%$
 $H/r = \text{variable}$

Sources

KAUSEL E. [6]
 LUCO J.E. et al [10]

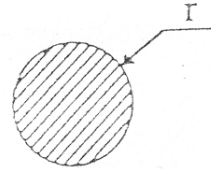
Fiche 2.15



H/r {
 ————— 2
 - - - - - 4
 - . - . - ∞

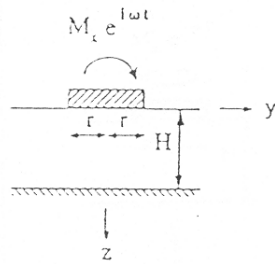
BALANCEMENT

Fondation



rigide - circulaire
superficielle

Sol



monocouche reposant sur
un substratum rocheux

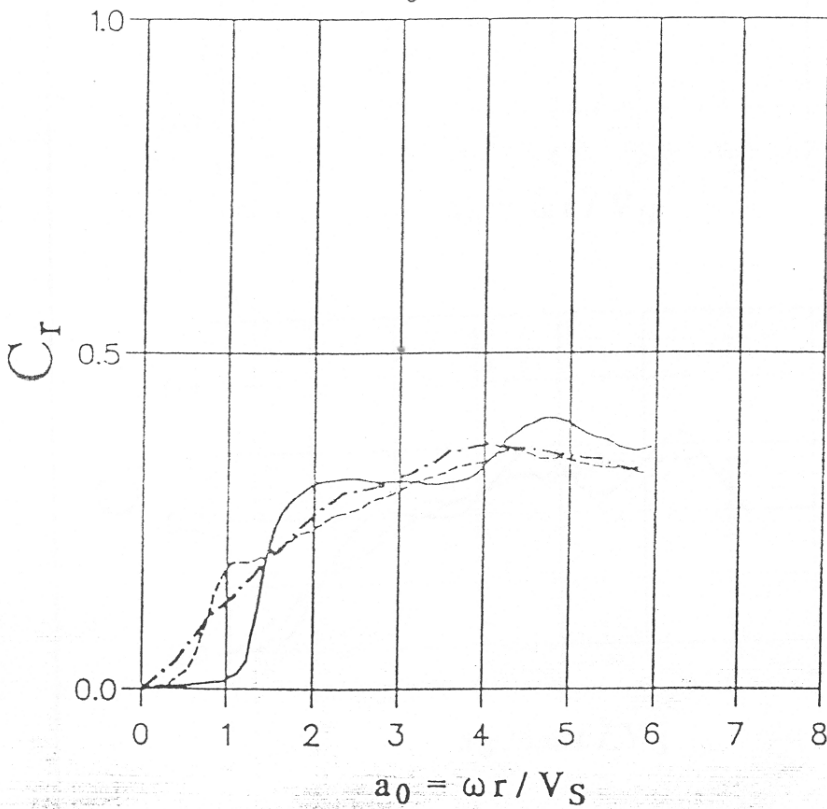
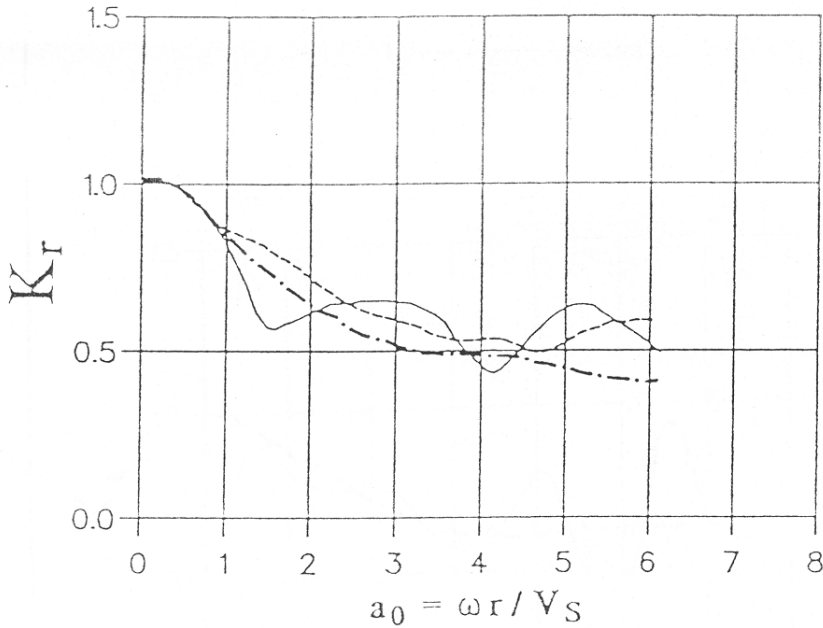
Paramètres

$\nu = 1/3$
 $\xi = 5\%$
 $H/r = \text{variable}$

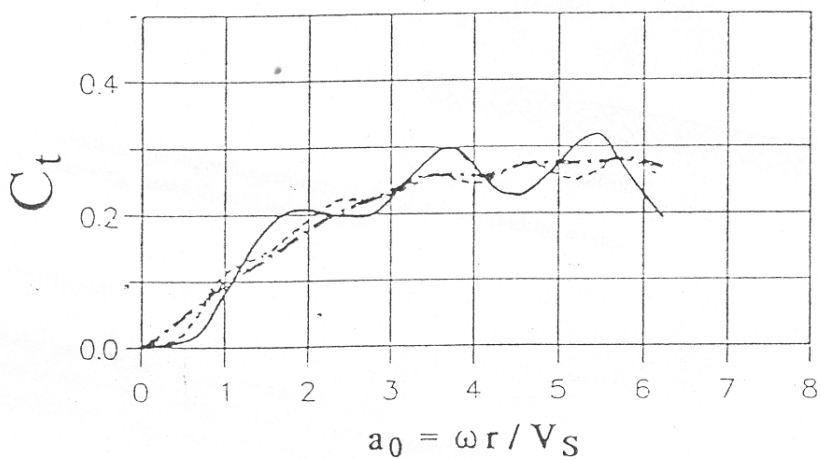
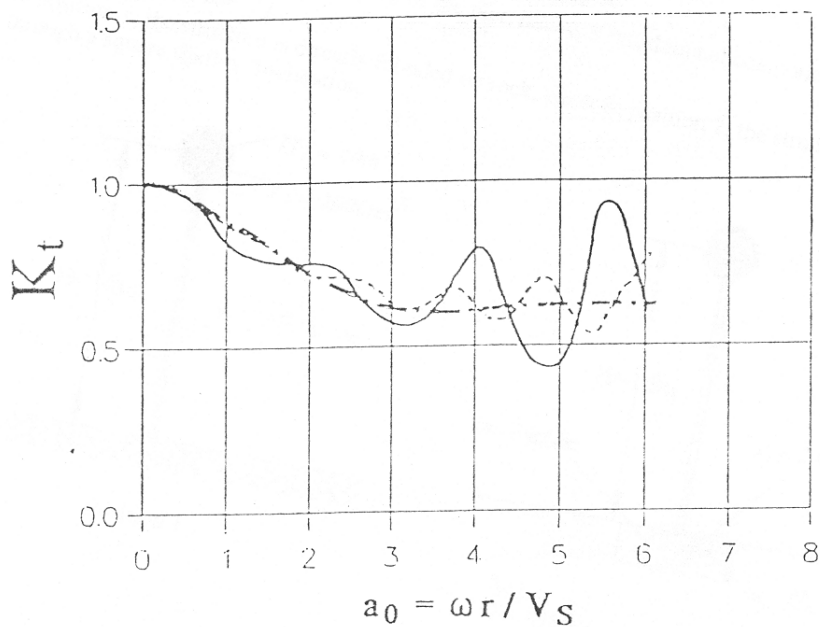
Sources

KAUSEL E. [6]
 LUCO J.E. et al [10]

Fiche 2.16

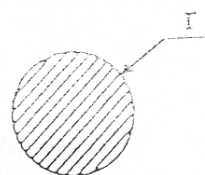


H/r {
 ——— 2
 - - - 3
 ····· ∞



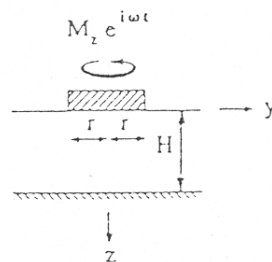
TORSION

Fondation



rigide - circulaire
superficielle

Sol



monocouche reposant sur
un substratum rocheux

Paramètres

$\nu = 1/3$
 $\xi = 5\%$
 $H/r = \text{variable}$

Sources

KAUSEL E. et al [8]
 LUCO J.E. et al [10]

Fiche 2.17

Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης
Πολυτεχνική Σχολή
Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών

Μεταπτυχιακό πρόγραμμα σπουδών
«Αντισεισμικός Σχεδιασμός Τεχνικών Έργων»

**Μάθημα: «Αντισεισμικός Σχεδιασμός Θεμελιώσεων,
Αντιστηρίξεων και Γεωκατασκευών»
(Α.Σ.Τ.Ε. 5)**

ΘΕΜΑ ΕΞΑΜΗΝΟΥ

«Αλληλεπίδραση Εδάφους–Κατασκευής»

Υπεύθυνος Θέματος:
Jean–Georges Sieffert

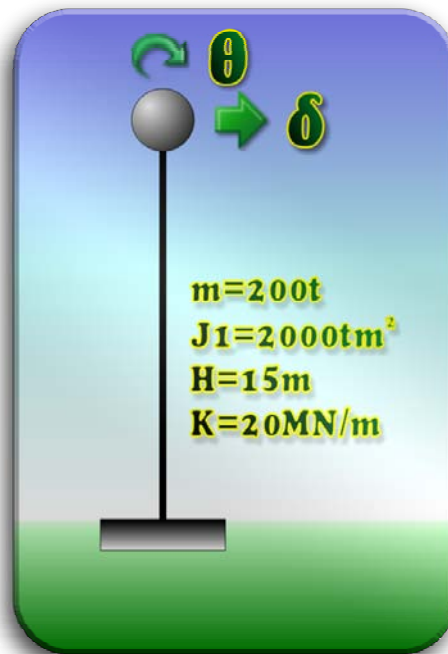
Μεταπτυχιακοί Φοιτητές:
Μουρελάτος Ηλίας
Οικονόμου Θεμιστοκλής

1 Γενικά

Για τη σύγκριση της δυναμικής συμπεριφοράς της κατασκευής στις δυο διαφορετικές θέσεις θα χρησιμοποιηθεί η βοήθεια του προγράμματος SAP 2000.

2 Διβάθμιο σύστημα

Ο υδατόπυργος προσομοιώνεται ως πρόβολος με δύο βαθμούς ελευθερίας (μεταφορά μάζας δ και στροφή μάζας θ).

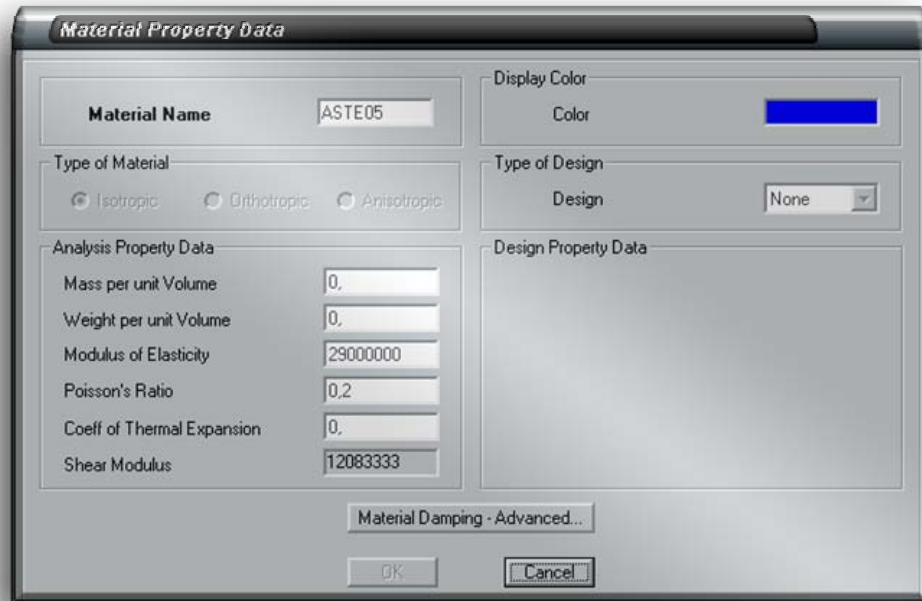


2βάθμιο σύστημα (πλήρης πάκτωση στο έδαφος)

Δεδομένου ότι η δυσκαμψία του υδατόπυργου αντιστοιχεί σε δυσκαμψία προβόλου, προκύπτει:

$$K = \frac{3EI}{L^3} \Rightarrow I = \frac{K \times L^3}{3 \times E}$$

Το υλικό του προβόλου θεωρείται σκυρόδεμα με $E_c = 29 \text{ GPa}$:



Ιδιότητες συροδέματος

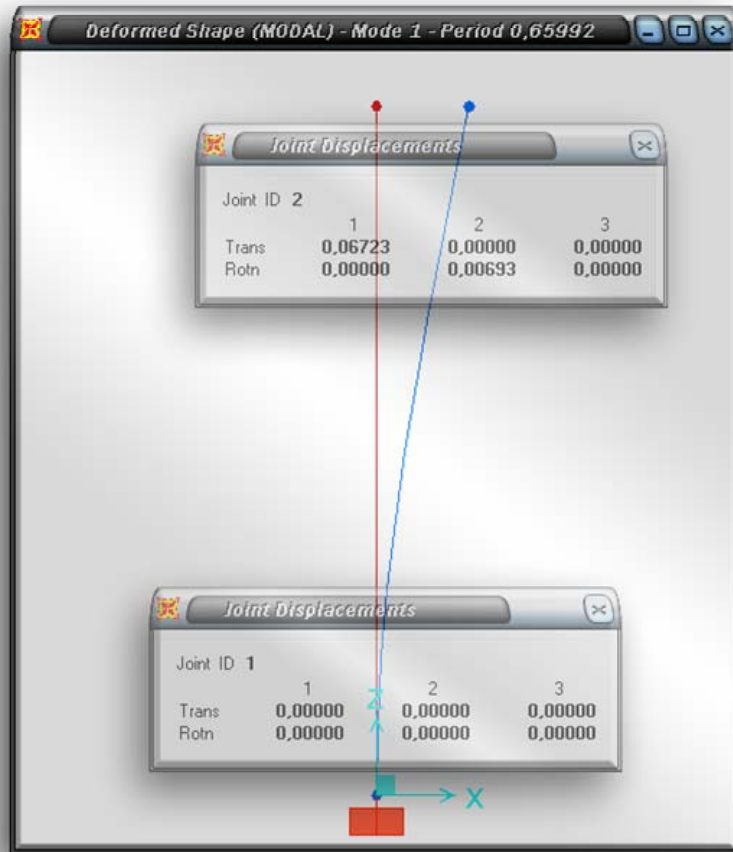
Άρα:
$$I = \frac{20 \times 10^3 \times 15^3}{3 \times 29 \times 10^6} \Rightarrow I = 0,775862 \text{ m}^4$$

Μετά την εισαγωγή των δεδομένων στο πρόγραμμα ακολουθεί ιδιομορφική ανάλυση τα αποτελέσματα της οποίας φαίνονται παρακάτω:

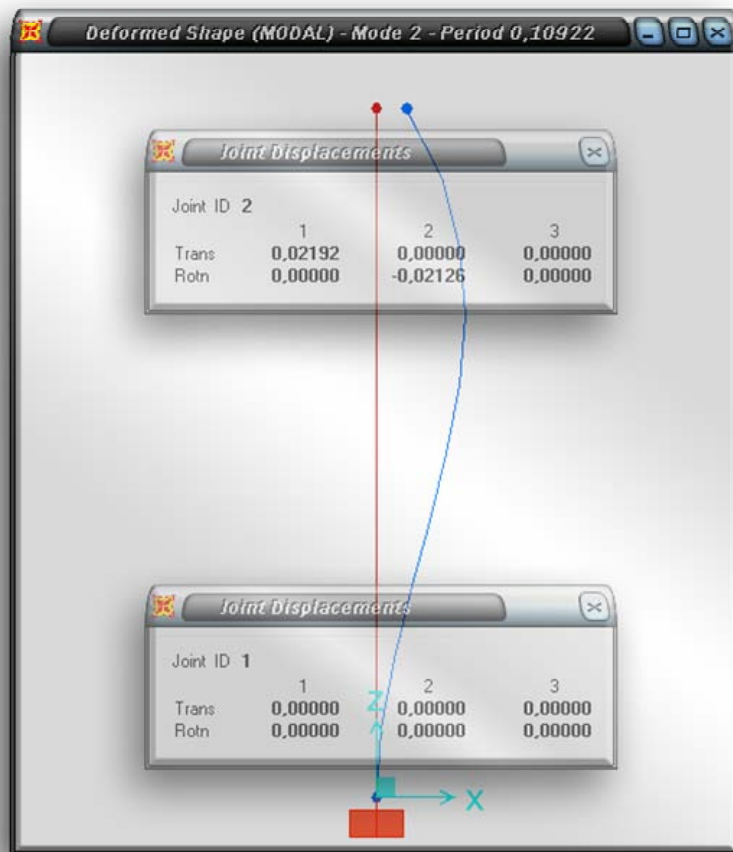
Ιδιομορφή	T	f	ω
1	0,659919	1,5153	9,5212
2	0,109222	9,1557	57,527

Ιδιομορφή	u,r	Κανονικ. u,r
1	0,067227	1
	0,006932	9,698067
2	0,021921	-1,031140
	-0,021259	1

Πίνακας αποτελεσμάτων διβάθμιου συστήματος



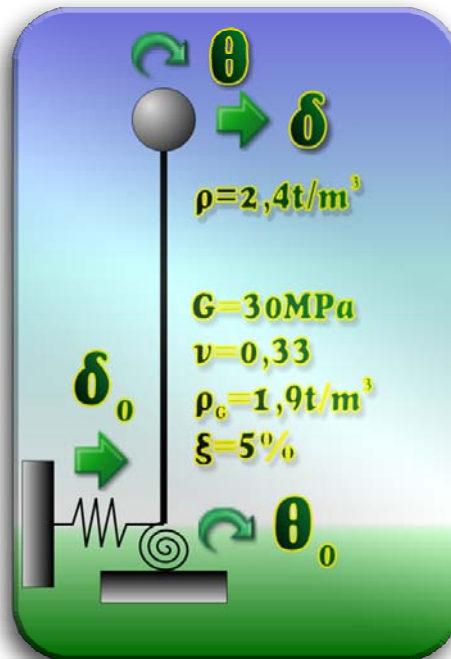
1^η ιδιομορφή διβάθμιου



2^η ιδιομορφή διβάθμιου

3 Τετραβάθμιο σύστημα

Ο υδατόπυργος προσομοιώνεται ως πρόβολος με τέσσερις βαθμούς ελευθερίας (μεταφορά μάζας δ και στροφή μάζας θ , μεταφορά θεμελίωσης δ_0 και στροφή θεμελίωσης θ_0).



4βάθμιο σύστημα (μεταφορικό και στροφικό ελατήριο στο έδαφος)

Εκτός της μάζας $m_1 = 200t$ του υδατόπυργου που θεωρείται συγκεντρωμένη στην κορυφή του με δύο βαθμούς ελευθερίας, μία οριζόντια μεταφορική κίνηση u_1 και μία συνεπίπεδη στροφή θ_1 , λαμβάνεται υπόψη και η μάζα M_2 της θεμελίωσης του υδατόπυργου με δύο βαθμούς ελευθερίας, τις u_0 και θ_0 . Ισχύει:

$$M_2 = 2,4 \times 3,00 \times 3,00 \times 1,00 \Rightarrow M_2 = 21,60 t$$

$$J_2 = 21,60 \times \frac{3,00^2 + 1,00^2}{12} \Rightarrow J_2 = 18,00 \text{ tm}^2$$

Για τον υπολογισμό των ιδιομορφικών χαρακτηριστικών της κατασκευής λαμβάνοντας υπόψη την αλληλεπίδραση εδάφους – ανωδομής απαιτείται ο υπολογισμός των δεικτών εμπέδησης του εδάφους. Οι δείκτες αυτοί μπορούν να υπολογιστούν από τα νομογραφήματα που δόθηκαν κατά την διάρκεια των μαθημάτων.

Λόγω του ότι τα δεδομένα νομογραφήματα αναφέρονται σε κυκλική θεμελίωση, απαιτείται αναγωγή της τετραγωνικής θεμελίωσης σε ισοδύναμη κυκλική. Οι σχέσεις που ισχύουν κατά περίπτωση και για κάθε βαθμό ελευθερίας δίνονται παρακάτω:

• Μεταφορικός Β.Ε. $r_{eq,u} = \left(\frac{4 \times B \times L}{\pi} \right)^{1/2} = \left(\frac{4 \times 1,50 \times 1,50}{\pi} \right)^{1/2} \Rightarrow r_{eq,u} = 1,693 \text{ m}$

$$a_{o,u} = \frac{\omega \times r_{eq,u}}{V_s} = \frac{\omega \times r_{eq,u}}{\sqrt{G/\rho}} = \frac{\omega \times 1,693}{\sqrt{30 \times 10^3 / 1,9}} = \frac{1,693}{125,66} \times \omega \Rightarrow a_{o,r} = 0,0135 \times \omega$$

• Στροφικός Β.Ε. $r_{eq,r} = \left(\frac{16 \times B^3 \times L}{3 \times \pi} \right)^{1/4} = \left(\frac{16 \times 1,50^3 \times 1,50}{3 \times \pi} \right)^{1/4} \Rightarrow r_{eq,r} = 1,712 \text{ m}$

$$a_{o,r} = \frac{\omega \times r_{eq,r}}{V_s} = \frac{\omega \times r_{eq,r}}{\sqrt{G/\rho}} = \frac{\omega \times 1,712}{\sqrt{30 \times 10^3 / 1,9}} = \frac{1,712}{125,66} \times \omega \Rightarrow a_{o,r} = 0,0136 \times \omega$$

3.1 Υπολογισμός K_{st}

H / r = 2,0

Έχουμε: $H/r=2,0 \rightarrow H_u = 1,693\text{m} \times 2 = 3,385\text{m}$ και $H_r = 1,712 \times 2 = 3,424 \text{ m}$

Υποθέτουμε: $D=0,8$ (σημείο «πλήρους» πάκτωσης), έτσι:

Έλεγχος προϋποθέσεων για τον υπολογισμό του K_{st} :

- Μεταφορική: $D/r < 2$ **OK**
- Μεταφορική: $H/r > 1$ **OK**
- Στροφική: $4 > H/r > 1$ **OK**
- Στροφική: $D/H < 0,5$ **OK**

$$K_{st,u} = \frac{8 \times G \times r}{2 - \nu} \times \left(1 + \frac{r}{2 \times H} \right) \times \left(1 + \frac{2 \times D}{3 \times r} \right) \times \left(1 + \frac{5 \times D}{4 \times H} \right)$$

$$K_{st,u} = \frac{8 \times 30000 \times 1,693}{2 - 0,33} \times \left(1 + \frac{1,693}{2 \times 3,385} \right) \times \left(1 + \frac{2 \times 0,8}{3 \times 1,693} \right) \times \left(1 + \frac{5 \times 0,8}{4 \times 3,385} \right) \Rightarrow K_{st,u} = 517985,7 \text{ kN/m}$$

$$K_{st,r} = \frac{8 \times G \times r^3}{3 \times (1 - \nu)} \times \left(1 + \frac{r}{6 \times H} \right) \times \left(1 + \frac{2 \times D}{r} \right) \times \left(1 + 0,7 \times \frac{D}{H} \right)$$

$$K_{st,r} = \frac{8 \times 30000 \times 1,712^3}{3 \times (1 - 0,33)} \times \left(1 + \frac{1,712}{6 \times 3,424} \right) \times \left(1 + \frac{2 \times 0,8}{1,712} \right) \times \left(1 + 0,7 \times \frac{0,8}{3,424} \right) \Rightarrow K_{st,r} = 1461432,8 \text{ kNm/rad}$$

H / r = 3,0

Έχουμε: $H/r=3,0 \rightarrow H_u = 1,693\text{m} \times 3 = 5,078$ και $H_r = 1,712 \times 3 = 5,137 \text{ m}$

Υποθέτουμε: $D=0,8$ (σημείο «πλήρους» πάκτωσης), έτσι:

Έλεγχος προϋποθέσεων για τον υπολογισμό του K_{st} :

- Μεταφορική: $D/r < 2$ **OK**
- Μεταφορική: $H/r > 1$ **OK**

- Στροφοική: $4 > H/r > 1$ **OK**
- Στροφοική: $D/H < 0,5$ **OK**

$$K_{st,u} = \frac{8 \times G \times r}{2 - \nu} \times \left(1 + \frac{r}{2 \times H}\right) \times \left(1 + \frac{2 \times D}{3 \times r}\right) \times \left(1 + \frac{5 \times D}{4 \times H}\right)$$

$$K_{st,u} = \frac{8 \times 30000 \times 1,693}{2 - 0,33} \times \left(1 + \frac{1,693}{2 \times 5,078}\right) \times \left(1 + \frac{2 \times 0,8}{3 \times 1,693}\right) \times \left(1 + \frac{5 \times 0,8}{4 \times 5,078}\right) \Rightarrow K_{st,u} = 446703,9 \text{ kN/m}$$

$$K_{st,r} = \frac{8 \times G \times r^3}{3 \times (1 - \nu)} \times \left(1 + \frac{r}{6 \times H}\right) \times \left(1 + \frac{2 \times D}{r}\right) \times \left(1 + 0,7 \times \frac{D}{H}\right)$$

$$K_{st,r} = \frac{8 \times 30000 \times 1,712^3}{3 \times (1 - 0,33)} \times \left(1 + \frac{1,712}{6 \times 5,137}\right) \times \left(1 + \frac{2 \times 0,8}{1,712}\right) \times \left(1 + 0,7 \times \frac{0,8}{5,137}\right) \Rightarrow K_{st,r} = 1357248,4 \text{ kNm/rad}$$

H / r = ∞

Έχουμε: $H/r=2,0 \rightarrow H_u = H_r = \infty$

Υποθέτουμε: $D=0,8$ (σημείο «πλήρους» πάκτωσης), έτσι:

Έλεγχος προϋποθέσεων για τον υπολογισμό του K_{st} :

- Μεταφορική: $D/r < 2$ **OK**
- Μεταφορική: $H/r > 1$ **OK**
- Στροφοική: $4 > H/r > 1$ **Δεν Ισχύει**, όμως τα αποτελέσματα είναι δεκτά στην περίπτωση $H \rightarrow \infty$
- Στροφοική: $D/H < 0,5$ **OK**

$$K_{st,u} = \frac{8 \times G \times r}{2 - \nu} \times \left(1 + \frac{r}{2 \times \infty}\right) \times \left(1 + \frac{2 \times D}{3 \times r}\right) \times \left(1 + \frac{5 \times D}{4 \times \infty}\right)$$

$$K_{st,u} = \frac{8 \times 30000 \times 1,693}{2 - 0,33} \times (1+0) \times \left(1 + \frac{2 \times 0,8}{3 \times 1,693}\right) \times (1+0) \Rightarrow K_{st,u} = 319890,1 \text{ kN/m}$$

$$K_{st,r} = \frac{8 \times G \times r^3}{3 \times (1 - \nu)} \times \left(1 + \frac{r}{6 \times \infty}\right) \times \left(1 + \frac{2 \times D}{r}\right) \times \left(1 + 0,7 \times \frac{D}{\infty}\right)$$

$$K_{st,r} = \frac{8 \times 30000 \times 1,712^3}{3 \times (1 - 0,33)} \times (1+0) \times \left(1 + \frac{2 \times 0,8}{1,712}\right) \times (1+0) \Rightarrow K_{st,r} = 1159413,0 \text{ kNm/rad}$$

3.2 Υπολογισμός K_u , K_r .

Θα χρειαστεί να κάνουμε επαναληπτική διαδικασία. Για να αποφύγουμε τους πολλούς κύκλους επανάληψης (iterations) επιλέγουμε αρχική τιμή για την ω ίση με την ω_1 του διβάθμιου συστήματος ($\omega_1 = 9,5212 \text{ rad/sec}$). Έτσι, $\alpha_{o,u,1} = 0,128249$ και $\alpha_{o,r,1} = 0,129736$.

Από τα αντίστοιχα νομογραφήματα παίρνουμε τις τιμές για τα $k_{u,1}$ και $k_{r,1}$:

- $k_{u,1} = 1,0000$
- $k_{r,1} = 1,0056$

$$H / r = 2,0$$

$$k_{st,u} = 517985,7 \rightarrow K_u = 1,0000 \times 517985,7 = 517985,7$$

$$k_{st,r} = 1461432,8 \rightarrow K_r = 1,0056 \times 1461432,8 = 1469689,48$$

Η επίλυση του 4-βάθμιου συστήματος με τα ανωτέρω δύο ελατήρια, δίνει τα εξής αποτελέσματα:

$$T_1 = 1,30734 \text{ sec και } \omega_1 = 4,8061 \text{ rad/sec.}$$

Έχουμε ότι $a_{o,u} = 0,0135\omega$ και $a_{o,r} = 0,0136\omega$, οπότε:

$$a_{o,u}' = 0,064737 \text{ και } a_{o,r}' = 0,065488.$$

Με τη βοήθεια των νομογραφημάτων που μας έχουν δοθεί στα πλαίσια της άσκησης, παίρνουμε:

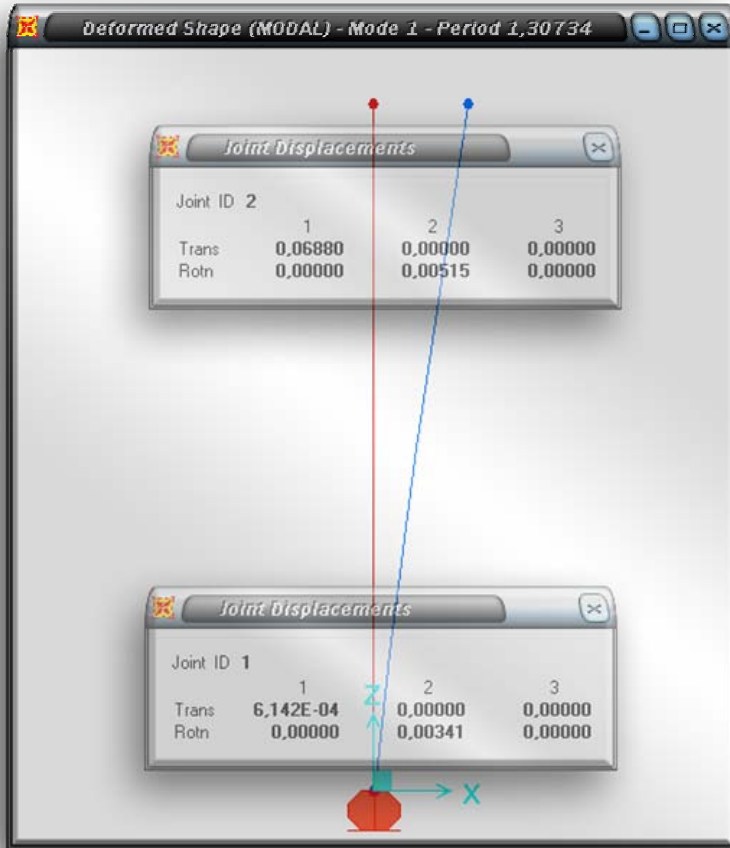
$k_{u,2} = 1,0000$. Η τιμή αυτή διαφέρει κατά 0% από την προηγούμενη (1,000).

$k_{r,2} = 1,0000$. Η τιμή αυτή διαφέρει κατά 0,56% από την προηγούμενη (1,0056).

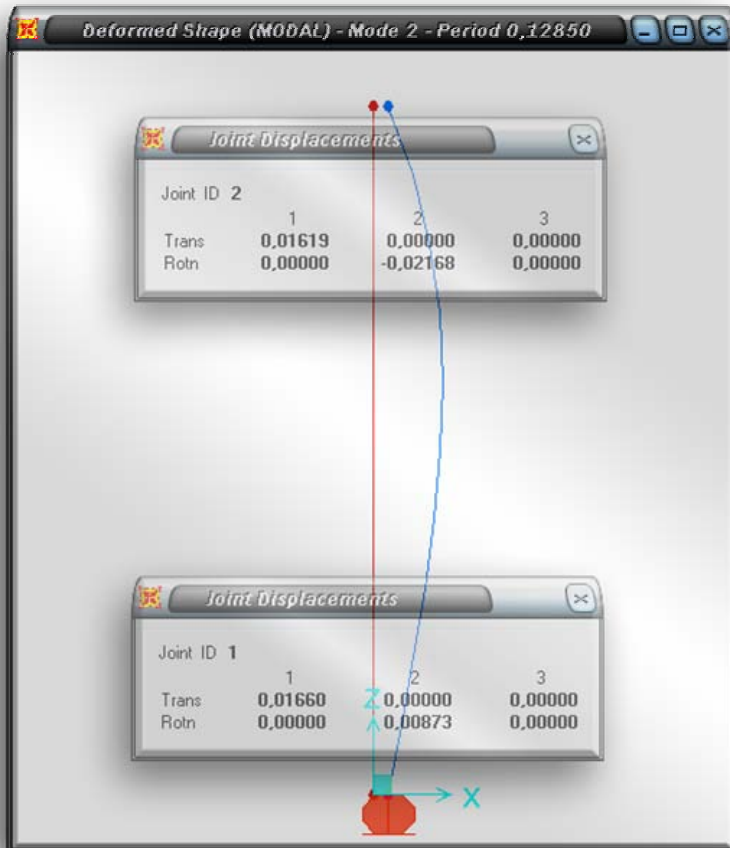
Λόγω των πολύ μικρών διαφορών, δε χρειάζεται να επαν-επιλύσουμε το πρόβλημα για μεγαλύτερη ακρίβεια. Έτσι, λοιπόν, τα αποτελέσματα είναι:

		H / r = 2,0					
		T	ω	φ_1'	φ_2'	φ_3'	φ_4'
Ιδιομορφή	1	1,3073	4,8061	0,000614	0,016600	-0,213867	-0,016774
	2	0,1285	48,8950	0,003407	0,008726	0,019098	-0,234740
	3	0,0394	159,4800	0,068798	-0,016191	0,001320	0,001708
	4	0,0097	646,7000	0,005155	-0,021682	-0,001601	-0,000861

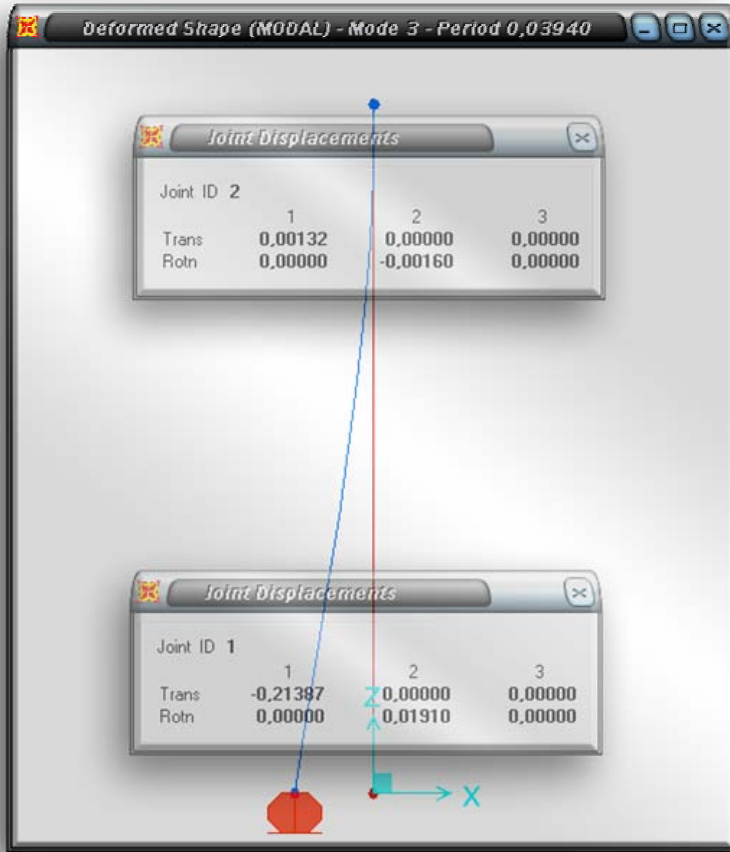
Τελικά αποτελέσματα για H / r = 2,0



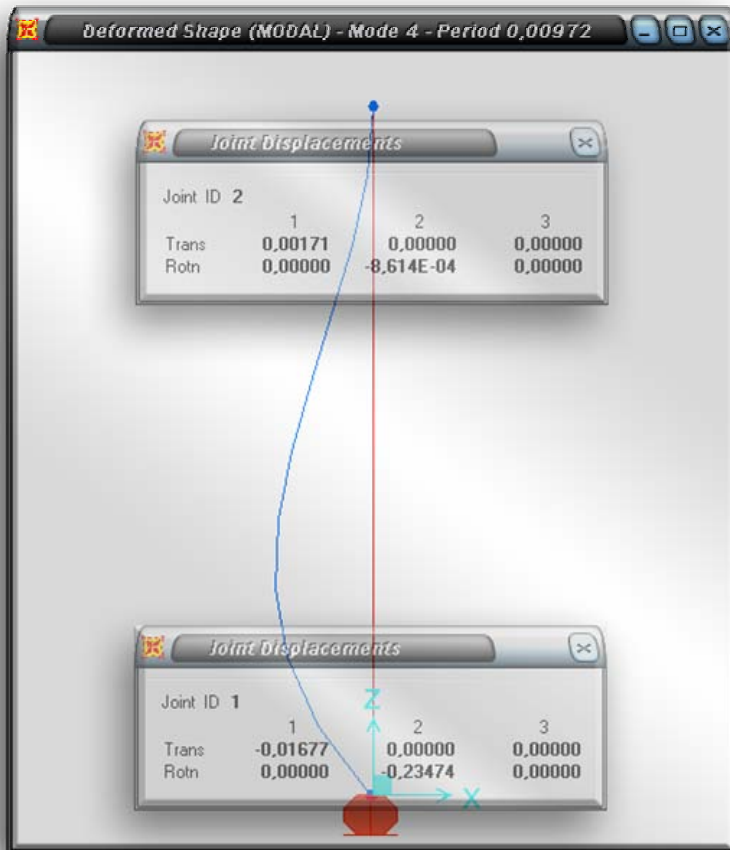
1^η ιδιομορφή τετραβάθμιου



2^η ιδιομορφή τετραβάθμιου



3^η ιδιομορφή τετραβάθμιου



4^η ιδιομορφή τετραβάθμιου

H / r = 3,0

$$k_{st,u} = 446703,9 \rightarrow K_u = 1,0000 \times 446703,9 = 446703,91$$

$$k_{st,r} = 1357248,4 \rightarrow K_r = 1,0056 \times 1357248,4 = 1364916,44$$

Η επίλυση του 4-βάθμιου συστήματος με τα ανωτέρω δύο ελατήρια, δίνει τα εξής αποτελέσματα:

$$T_1 = 1,344743 \text{ sec και } \omega_1 = 4,6724 \text{ rad/sec.}$$

Έχουμε ότι $\alpha_{o,u} = 0,0135\omega$ και $\alpha_{o,r} = 0,0136\omega$, οπότε:

$$\alpha_{o,u}' = 0,062936 \text{ και } \alpha_{o,r}' = 0,063666$$

Με τη βοήθεια των νομογραφημάτων που μας έχουν δοθεί στα πλαίσια της άσκησης, παίρνουμε:

$k_{u,2} = 1,0000$. Η τιμή αυτή διαφέρει κατά 0% από την προηγούμενη (1,000).

$k_{r,2} = 1,0000$. Η τιμή αυτή διαφέρει κατά 0,56% από την προηγούμενη (1,0056).

Λόγω των πολύ μικρών διαφορών, δε χρειάζεται να επαν-επιλύσουμε το πρόβλημα για μεγαλύτερη ακρίβεια. Έτσι, λοιπόν, τα αποτελέσματα είναι:

		H / r = 3,0					
		T	ω	φ_1'	φ_2'	φ_3'	φ_4'
Ιδιομορφή	1	1,3447	4,6724	-0,000673	-0,019154	-0,213645	-0,016882
	2	0,1293	48,5810	-0,003467	-0,008624	0,019331	-0,234724
	3	0,0422	148,7900	-0,068825	-0,016057	0,001520	0,001732
	4	0,0098	642,2000	-0,005119	0,021670	-0,001858	-0,000874

Τελικά αποτελέσματα για H / r = 3,0

Τα ιδιομορφικά διαγράμματα παρουσιάζουν την ίδια μορφή με αυτά της πρώτης περίπτωσης, οπότε μπορούν να παραληφθούν.

H / r = ∞

$$k_{st,u} = 319890,1 \rightarrow K_u = 1,0000 \times 319890,1 = 319890,1$$

$$k_{st,r} = 1159413,0 \rightarrow K_r = 1,0056 \times 1159413,0 = 1165963,33$$

Η επίλυση του 4-βάθμιου συστήματος με τα ανωτέρω δύο ελατήρια, δίνει τα εξής αποτελέσματα:

$$T_1 = 1,43071 \text{ sec και } \omega_1 = 4,3917 \text{ rad/sec.}$$

Έχουμε ότι $\alpha_{o,u} = 0,0135\omega$ και $\alpha_{o,r} = 0,0136\omega$, οπότε:

$$\alpha_{o,u}' = 0,059156 \text{ και } \alpha_{o,r}' = 0,059841$$

Με τη βοήθεια των νομογραφημάτων που μας έχουν δοθεί στα πλαίσια της άσκησης, παίρνουμε $k_{u,2} = 1,0000$. Η τιμή αυτή διαφέρει κατά 0% από την προηγούμενη (1,000).

$k_{r,2} = 1,0000$. Η τιμή αυτή διαφέρει κατά 0,56% από την προηγούμενη (1,0056).

Λόγω των πολύ μικρών διαφορών, δε χρειάζεται να επαν-επιλύσουμε το πρόβλημα για μεγαλύτερη ακρίβεια. Έτσι, λοιπόν, τα αποτελέσματα είναι:

		H / r = ∞					
		T	ω	φ ₁ '	φ ₂ '	φ ₃ '	φ ₄ '
Ιδιομορφή	1	1,4307	4,3917	0,000832	-0,026561	0,212832	0,017107
	2	0,1315	47,7650	0,003586	-0,008189	-0,019900	0,234690
	3	0,0492	127,6400	0,068879	-0,015752	-0,002092	-0,001779
	4	0,0099	633,5800	0,005044	0,021609	0,002605	0,000898

Τα ιδιομορφικά διαγράμματα παρουσιάζουν την ίδια μορφή με αυτά της πρώτης περίπτωσης, οπότε μπορούν να παραληφθούν.