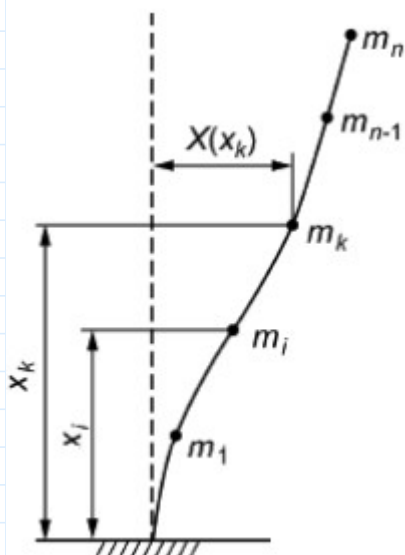


Расчёт на сейсмическое воздействие с применением консольной РДМ по линейно-спектральному методу СП 14.13330.2018 методом деформаций

Расчётная динамическая модель РДМ

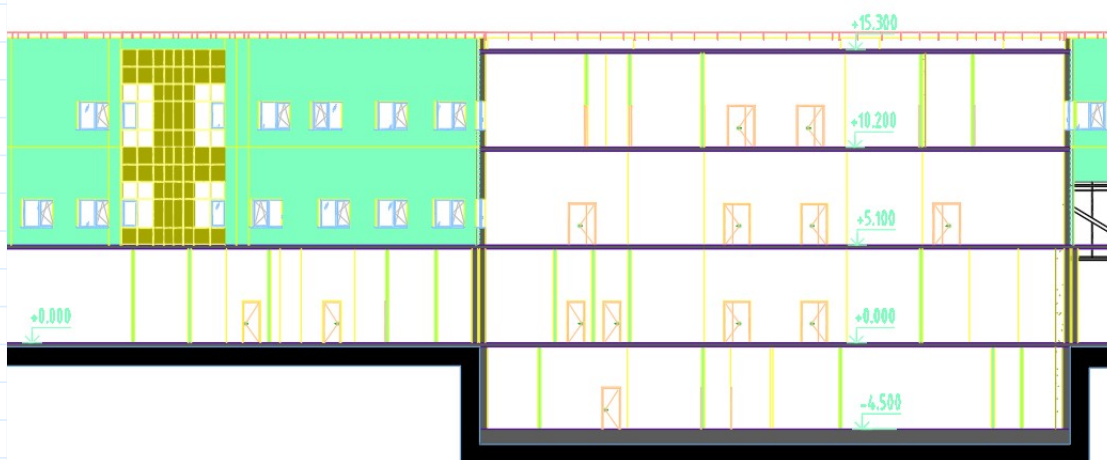


Модуль упругости бетона

$$E_b := 36000 \text{ MPa}$$

Плотность бетона

$$\gamma := 2750 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$



Толщина диафрагм

$$td := \begin{bmatrix} 300 \\ 300 \\ 300 \end{bmatrix} \text{ mm}$$

Длина диафрагм

$$ld := \begin{bmatrix} 7.2 \\ 7.2 \\ 7.2 \end{bmatrix} \text{ m}$$

Количество диафрагм

$$n_d := 8$$

Толщина перекрытий

$$tp := \begin{bmatrix} 200 \\ 200 \\ 200 \end{bmatrix} \text{ } m$$

Отметки этажей

$$x_i := \begin{bmatrix} 5.1 \\ 10.2 \\ 15.3 \end{bmatrix} \text{ } m$$

Площади этажей

$$la := \begin{bmatrix} 1650 \\ 1650 \\ 1650 \end{bmatrix} \text{ } m^2$$

Постоянные нагрузки

$$dlv := \begin{bmatrix} 2 \\ 2 \\ 3 \end{bmatrix} \cdot kPa$$

Временные нагрузки

$$llv := \begin{bmatrix} 4 \\ 4 \\ 2 \end{bmatrix} \cdot kPa$$

Моменты инерции и площади диафрагм

$$I_s := \frac{\overrightarrow{td \cdot ld^3}}{12} \cdot n_d$$

$$A_s := \overrightarrow{td \cdot ld} \cdot n_d$$

$$n := \text{rows}(x_i) = 3$$

Общая длина

$$L := x_{i_{n-1}} = 15.3 \text{ } m$$

коэффициент учёта
других конструкций

$$k_w := 1.1$$

Матрица масс

$$M_{-s} := \left\| \begin{array}{l} \text{for } i \in 0 \dots n-1 \\ \left\| \begin{array}{l} M_{i,i} \leftarrow \left(tp_i \cdot \gamma + \frac{dlv_i}{g} + \frac{llv_i}{g} \right) \cdot la_i \cdot k_w \\ M \end{array} \right. \end{array} \right\|$$

$$M_{-s} = \begin{bmatrix} 2.108721 \cdot 10^3 & 0 & 0 \\ 0 & 2.108721 \cdot 10^3 & 0 \\ 0 & 0 & 1.923642 \cdot 10^3 \end{bmatrix} \text{ } \text{tonne}$$

Узлы

x	z	U_x	U_z	R_y	m_x
(m)	(m)				$(tonne)$
0	0	1	1	1	0
0	5.1	0	0	0	2108.721
0	10.2	0	0	0	2108.721
0	15.3	0	0	0	1923.642

1 - закрепление

количество узлов

$$n_j := \text{rows}(x) = 4$$

Элементы

j_s	j_e	R_s	R_e	A	J	E
				(m^2)	(m^4)	(MPa)
0	1	0	0	17.28	74.6496	36000
1	2	0	0	17.28	74.6496	36000
2	3	0	0	1.44	74.6496	36000

1 - шарнир

количество элементов

$$n_f := \text{rows}(j_s) = 3$$

Длины элементов

$$l := \left\| \begin{array}{l} \text{for } i \in 0..n_f-1 \\ \left\| l_i \leftarrow \sqrt{\left(x_{j_{e_i}} - x_{j_{s_i}}\right)^2 + \left(z_{j_{e_i}} - z_{j_{s_i}}\right)^2} \right\| \\ l \end{array} \right\|$$

Косинусы α

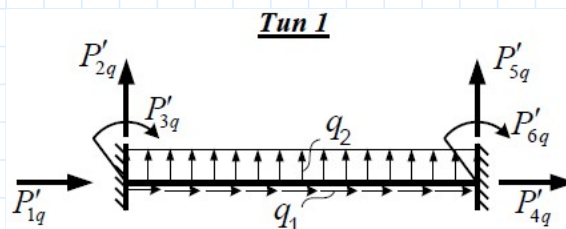
$$cos := \left\| \begin{array}{l} \text{for } i \in 0 \dots n_f - 1 \\ \left\| \begin{array}{l} x_{j_{e_i}} - x_{j_{s_i}} \\ c_i \leftarrow \frac{\quad}{l_i} \end{array} \right\| \\ c \end{array} \right\|$$

Синусы α

$$sin := \left\| \begin{array}{l} \text{for } i \in 0 \dots n_f - 1 \\ \left\| \begin{array}{l} z_{j_{e_i}} - z_{j_{s_i}} \\ s_i \leftarrow \frac{\quad}{l_i} \end{array} \right\| \\ s \end{array} \right\|$$

Матрица преобразования координат

$$T_{\alpha}(i) := \begin{bmatrix} \cos_i & \sin_i & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\sin_i & \cos_i & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos_i & \sin_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\sin_i & \cos_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$



Матрица приведения размерностей

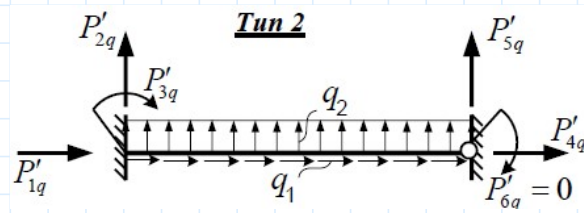
$$u_1 := \begin{bmatrix} m & m & m & m & m & m \\ m & m & 1 & m & m & 1 \\ m & 1 & \frac{1}{m} & m & 1 & \frac{1}{m} \\ m & m & m & m & m & m \\ m & m & 1 & m & m & 1 \\ m & 1 & \frac{1}{m} & m & 1 & \frac{1}{m} \end{bmatrix} \cdot \frac{1}{kN}$$

Матрица КЭ в локальной системе координат

$$K'_1(i) := \begin{bmatrix} \frac{E_i \cdot A_i}{l_i} & 0 & 0 & -\frac{E_i \cdot A_i}{l_i} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12 \cdot E_i \cdot J_i}{l_i^3} & -\frac{6 \cdot E_i \cdot J_i}{l_i^2} & 0 & -\frac{12 \cdot E_i \cdot J_i}{l_i^3} & \frac{6 \cdot E_i \cdot J_i}{l_i^2} \\ 0 & \frac{6 \cdot E_i \cdot J_i}{l_i^2} & \frac{4 \cdot E_i \cdot J_i}{l_i} & 0 & \frac{6 \cdot E_i \cdot J_i}{l_i^2} & \frac{2 \cdot E_i \cdot J_i}{l_i} \\ -\frac{E_i \cdot A_i}{l_i} & 0 & 0 & \frac{E_i \cdot A_i}{l_i} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{12 \cdot E_i \cdot J_i}{l_i^3} & \frac{6 \cdot E_i \cdot J_i}{l_i^2} & 0 & \frac{12 \cdot E_i \cdot J_i}{l_i^3} & -\frac{6 \cdot E_i \cdot J_i}{l_i^2} \\ 0 & -\frac{6 \cdot E_i \cdot J_i}{l_i^2} & \frac{2 \cdot E_i \cdot J_i}{l_i} & 0 & -\frac{6 \cdot E_i \cdot J_i}{l_i^2} & \frac{4 \cdot E_i \cdot J_i}{l_i} \end{bmatrix}$$

Матрица КЭ в глобальной системе координат

$$K_1(i) := T_\alpha(i)^T \cdot \overrightarrow{K'_1(i)} \cdot u_1 \cdot T_\alpha(i)$$



Матрица приведения размерностей

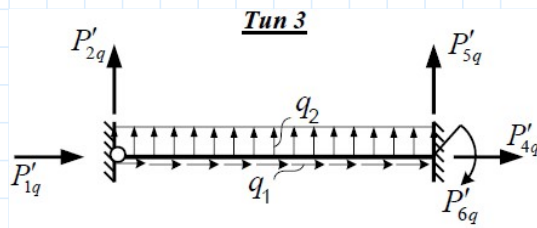
$$u_2 := \begin{bmatrix} m & m & m & m & m & m \\ m & m & 1 & m & m & m \\ m & 1 & \frac{1}{m} & m & 1 & m \\ m & m & m & m & m & m \\ m & m & 1 & m & m & m \\ m & m & m & m & m & m \end{bmatrix} \cdot \frac{1}{kN}$$

Матрица КЭ в локальной системе координат

$$K'_2(i) := \begin{bmatrix} \frac{E_i \cdot A_i}{l_i} & 0 & 0 & -\frac{E_i \cdot A_i}{l_i} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{3 \cdot E_i \cdot J_i}{l_i^3} & -\frac{3 \cdot E_i \cdot J_i}{l_i^2} & 0 & -\frac{3 \cdot E_i \cdot J_i}{l_i^3} & 0 \\ 0 & -\frac{3 \cdot E_i \cdot J_i}{l_i^2} & \frac{3 \cdot E_i \cdot J_i}{l_i} & 0 & \frac{3 \cdot E_i \cdot J_i}{l_i^2} & 0 \\ -\frac{E_i \cdot A_i}{l_i} & 0 & 0 & \frac{E_i \cdot A_i}{l_i} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{3 \cdot E_i \cdot J_i}{l_i^3} & \frac{3 \cdot E_i \cdot J_i}{l_i^2} & 0 & \frac{3 \cdot E_i \cdot J_i}{l_i^3} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Матрица КЭ в глобальной системе координат

$$K_2(i) := T_\alpha(i)^T \cdot \overrightarrow{K'_2(i)} \cdot u_2 \cdot T_\alpha(i)$$



Матрица приведения размерностей

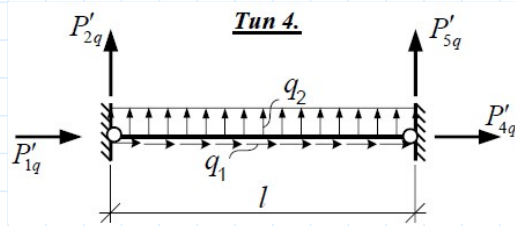
$$u_3 := \begin{bmatrix} m & m & m & m & m & m \\ m & m & m & m & m & 1 \\ m & m & m & m & m & m \\ m & m & m & m & m & m \\ m & m & m & m & m & 1 \\ m & 1 & m & m & 1 & \frac{1}{m} \end{bmatrix} \cdot \frac{1}{kN}$$

Матрица КЭ в локальной системе координат

$$K'_3(i) := \begin{bmatrix} \frac{E_i \cdot A_i}{l_i} & 0 & 0 & -\frac{E_i \cdot A_i}{l_i} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{3 \cdot E_i \cdot J_i}{l_i^3} & 0 & 0 & -\frac{3 \cdot E_i \cdot J_i}{l_i^3} & \frac{3 \cdot E_i \cdot J_i}{l_i^2} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{E_i \cdot A_i}{l_i} & 0 & 0 & \frac{E_i \cdot A_i}{l_i} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{3 \cdot E_i \cdot J_i}{l_i^3} & 0 & 0 & \frac{3 \cdot E_i \cdot J_i}{l_i^3} & \frac{3 \cdot E_i \cdot J_i}{l_i^2} \\ 0 & \frac{3 \cdot E_i \cdot J_i}{l_i^2} & 0 & 0 & \frac{3 \cdot E_i \cdot J_i}{l_i^2} & \frac{3 \cdot E_i \cdot J_i}{l_i} \end{bmatrix}$$

Матрица КЭ в глобальной системе координат

$$K_3(i) := T_\alpha(i)^T \cdot \overrightarrow{K'_3(i)} \cdot u_3 \cdot T_\alpha(i)$$



Матрица приведения размерностей

$$u_4 := \begin{bmatrix} m & m & m & m & m & m \\ m & m & m & m & m & m \\ m & m & m & m & m & m \\ m & m & m & m & m & m \\ m & m & m & m & m & m \\ m & m & m & m & m & m \end{bmatrix} \cdot \frac{1}{kN}$$

Матрица КЭ в локальной системе координат

$$K'_4(i) := \begin{bmatrix} \frac{E_i \cdot A_i}{l_i} & 0 & 0 & -\frac{E_i \cdot A_i}{l_i} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{E_i \cdot A_i}{l_i} & 0 & 0 & -\frac{E_i \cdot A_i}{l_i} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Матрица КЭ в глобальной системе координат

$$K_4(i) := T_\alpha(i)^T \cdot \overrightarrow{K'_4(i)} \cdot u_4 \cdot T_\alpha(i)$$

Матрица жёсткости конечных элементов

$$K_i(i) := \begin{cases} \text{if } R_{s_i} = 0 \wedge R_{e_i} = 0 \\ \quad \parallel K \leftarrow K_1(i) \\ \text{else if } R_{s_i} = 0 \wedge R_{e_i} = 1 \\ \quad \parallel K \leftarrow K_2(i) \\ \text{else if } R_{s_i} = 1 \wedge R_{e_i} = 0 \\ \quad \parallel K \leftarrow K_3(i) \\ \text{else} \\ \quad \parallel K \leftarrow K_4(i) \end{cases}$$

$$K$$

Степени свободы узлов

$$DoF := \begin{cases} k \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in 0 \dots n_j - 1 \\ \quad \parallel \text{for } j \in 0 \dots 2 \\ \quad \quad \parallel dof_{i,j} \leftarrow i + j + k \\ \quad \quad \parallel k \leftarrow k + 2 \end{cases}$$

$$dof$$

Матрица топологии

$$A_f := \begin{cases} \text{for } i \in 0 \dots n_f - 1 \\ \quad \parallel \text{for } j \in 0 \dots 2 \\ \quad \quad \parallel af_{j,i} \leftarrow DoF_{j_{s_i}, j} \\ \quad \quad \parallel af_{j+3,i} \leftarrow DoF_{j_{e_i}, j} \end{cases}$$

$$af$$

Матрица положения КЭ

$$C_i(f) := \begin{cases} \text{for } i \in 0 \dots 5 \\ \quad \parallel \text{for } j \in n_j \cdot 3 - 1 \\ \quad \quad \parallel c_{i,j} \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in 0 \dots 5 \\ \quad \parallel k \leftarrow A_{f,i,f} \\ \quad \parallel c_{i,k} \leftarrow 1 \end{cases}$$

$$c$$

Матрица жесткости в глобальной системе координат

$$K := \begin{cases} \text{for } i \in 0 \dots n_j \cdot 3 - 1 \\ \quad \parallel \text{for } j \in 0 \dots n_j \cdot 3 - 1 \\ \quad \quad \parallel k_{i,j} \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in 0 \dots n_f - 1 \\ \quad \parallel k \leftarrow k + C_i(i)^T \cdot K_i(i) \cdot C_i(i) \end{cases}$$

$$k$$

Граничные условия K

$$k_r(K) := \begin{array}{|l} K_r \leftarrow K \\ \text{for } i \in 0 \dots n_j - 1 \\ \quad \begin{array}{|l} \begin{array}{|l} U_{x_i} \\ U_{z_i} \\ R_{y_i} \end{array} \\ rstr \leftarrow \end{array} \\ \quad \text{for } j \in 0 \dots 2 \\ \quad \quad \text{if } rstr_j \neq 0 \\ \quad \quad \quad \begin{array}{|l} rs \leftarrow i \cdot 3 + j \\ \text{for } k \in 0 \dots n_j \cdot 3 - 1 \\ \quad \quad \quad \begin{array}{|l} K_{r_{rs}, k} \leftarrow 0 \\ K_{r_k, rs} \leftarrow 0 \\ K_{r_{rs}, rs} \leftarrow 1 \end{array} \end{array} \\ \quad \quad \text{if } K_{r_{i \cdot 3 + 2}, i \cdot 3 + 2} = 0 \\ \quad \quad \quad K_{r_{i \cdot 3 + 2}, i \cdot 3 + 2} \leftarrow 1 \end{array} \\ K_r \end{array}$$

Граничные условия F

$$f_r(F) := \begin{array}{|l} F_r \leftarrow F \\ \text{for } i \in 0 \dots n_j - 1 \\ \quad \begin{array}{|l} \begin{array}{|l} U_{x_i} \\ U_{z_i} \\ R_{y_i} \end{array} \\ rstr \leftarrow \end{array} \\ \quad \text{for } j \in 0 \dots 2 \\ \quad \quad \text{if } rstr_j \neq 0 \\ \quad \quad \quad \begin{array}{|l} rs \leftarrow i \cdot 3 + j \\ F_{r_{rs}} \leftarrow 0 \end{array} \end{array} \\ F_r \end{array}$$

$$K_r := k_r(K)$$

Матрица масс в локальной
системе координат

$$M'(k) := \begin{array}{|l} \text{for } i \in 0 \dots 5 \\ \quad \begin{array}{|l} \text{for } j \in 0 \dots 5 \\ \quad \quad M_{i,j} \leftarrow 0 \end{array} \\ \quad \quad \quad m_{x_{j_{s_k}}} \\ M_{0,0} \leftarrow \text{tonne} \\ \quad \quad \quad m_{x_{j_{e_k}}} \\ M_{3,3} \leftarrow \text{tonne} \\ M \end{array}$$

Матрица масс в глобальной
системе координат

$$M := \begin{array}{|l} \text{for } i \in 0 \dots n_j \cdot 3 - 1 \\ \quad \begin{array}{|l} \text{for } j \in 0 \dots n_j \cdot 3 - 1 \\ \quad \quad m_{i,j} \leftarrow 0 \end{array} \\ \quad \text{for } i \in 0 \dots n_f - 1 \\ \quad \quad m_i \leftarrow C_i(i)^T \cdot M'(i) \cdot C_i(i) \\ \quad \quad \text{for } j \in 0 \dots n_j \cdot 3 - 1 \\ \quad \quad \quad \text{if } m_{j,j} = 0 \\ \quad \quad \quad \quad m_{j,j} \leftarrow m_{i_{j,j}} \end{array} \\ m \end{array}$$

Число степеней
свободы масс

$$n_m := \left\| \begin{array}{l} n \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in 0 \dots n_j - 1 \\ \quad \left\| \begin{array}{l} \text{if } m_{x_i} \neq 0 \\ \quad \left\| n \leftarrow n + 1 \right\| \end{array} \right\| \end{array} \right\|$$

Матрица податливости

$$\delta := K_r^{-1}$$

$$d := \delta \cdot M$$

Собственные значения

$$\lambda := \text{submatrix}(\text{eigenvals}(d), 0, n_m - 1, 0, 0) = \begin{bmatrix} 0.001135 \\ 0.000028 \\ 0.000004 \end{bmatrix}$$

Круговая частота

$$\omega := \sqrt{\frac{1}{\lambda}} = \begin{bmatrix} 29.681545 \\ 189.553551 \\ 505.091096 \end{bmatrix}$$

Период

$$T := \frac{2 \cdot \pi}{\omega} = \begin{bmatrix} 0.211687 \\ 0.033147 \\ 0.01244 \end{bmatrix}$$

Техническая частота

$$f := \frac{\omega}{2 \cdot \pi} = \begin{bmatrix} 4.723965 \\ 30.168385 \\ 80.387745 \end{bmatrix}$$

Собственные векторы

$$u := \text{eigenvecs}(d)$$

$$vx := \text{stack}(0 \text{ } m, x_i) = \begin{bmatrix} 0 \\ 5.1 \\ 10.2 \\ 15.3 \end{bmatrix} m$$

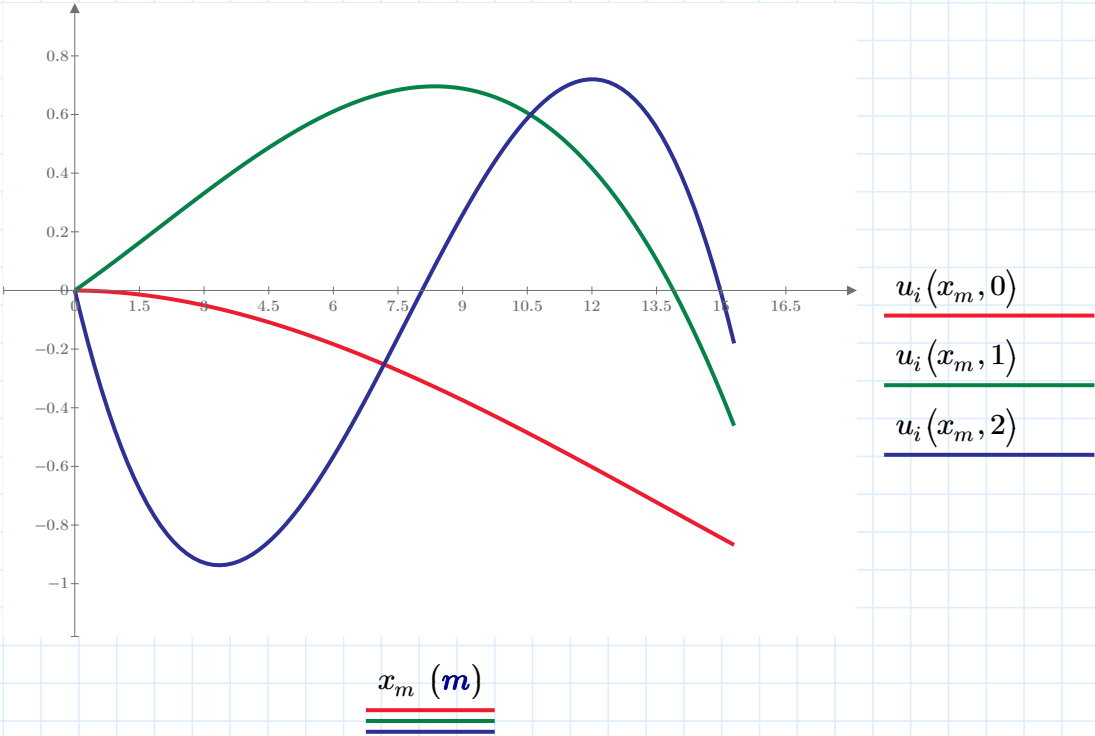
$$U := \left\| \begin{array}{l} k \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in 3, 6 \dots n_j \cdot 3 - 1 \\ \quad \left\| \begin{array}{l} \text{for } j \in 0 \dots 2 \\ \quad \left\| U_{i-k-3, j} \leftarrow u_{i, j} \right\| \end{array} \right\| \\ \quad k \leftarrow k + 2 \end{array} \right\|$$

$$vy := \left\| \begin{array}{l} \text{for } i \in 0..n-1 \\ \left\| \begin{array}{l} vy_i \leftarrow \text{stack}(0, U^{(i)}) \\ vy \end{array} \right\| \end{array} \right\|$$

$$ci(i) := \text{cspline}(vx,vy_i) \qquad u_i(x,i) := \text{interp}(ci(i),vx,vy_i,x)$$

Формы колебаний

$x_m := 0$
 m
 $, \frac{L}{100}..L$



Матрица весов масс

$$G_m := M \cdot \frac{g \cdot s^2}{m}$$

$$G := \left\| \begin{array}{l} k \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in 3, 6 \dots n_j \cdot 3 - 1 \\ \quad \left\| \begin{array}{l} l \leftarrow 0 \\ \text{for } j \in 3, 6 \dots n_j \cdot 3 - 1 \\ \quad \left\| \begin{array}{l} g_{i-k-3, j-3-l} \leftarrow G_{m_{i,j}} \\ l \leftarrow l + 2 \end{array} \right. \\ k \leftarrow k + 2 \end{array} \right. \end{array} \right\|$$

$$E1 := \left\| \begin{array}{l} \text{for } i \in 0 \dots n - 1 \\ \quad \left\| \begin{array}{l} E_i \leftarrow 1 \end{array} \right. \end{array} \right\| = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}$$

коэффициент, зависящий от формы деформации здания или сооружения при его собственных колебаниях по i-й форме, от узловой точки приложения рассчитываемой нагрузки и направления сейсмического воздействия

$$\eta := \left\| \begin{array}{l} \text{for } i \in 0 \dots n - 1 \\ \quad \left\| \begin{array}{l} \eta_i \leftarrow \frac{\langle U^{(i)} \rangle^T \cdot G \cdot E1}{\langle U^{(i)} \rangle^T \cdot G \cdot U^{(i)}} \cdot U^{(i)} \end{array} \right. \end{array} \right\| = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} 0.206097 \\ 0.699016 \\ 1.312403 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} 0.459585 \\ 0.535203 \\ -0.391604 \\ 0.334318 \\ -0.234218 \\ 0.079201 \end{bmatrix} \end{bmatrix}$$

Проверка

$$\left(\eta_0\right)_0 + \left(\eta_1\right)_0 + \left(\eta_2\right)_0 = 1$$

$$\left(\eta_0\right)_1 + \left(\eta_1\right)_1 + \left(\eta_2\right)_1 = 1$$

$$\left(\eta_0\right)_2 + \left(\eta_1\right)_2 + \left(\eta_2\right)_2 = 1$$

значение ускорения в уровне основания

$$As := 4 \frac{m}{s^2}$$

коэффициент, учитывающий назначение сооружения и его ответственность

$$K_0 := 1.1$$

коэффициент, учитывающий допускаемые повреждения зданий и сооружений

$$K_{-1} := 0.3$$

коэффициент, учитывающий способность зданий и сооружений к рассеиванию энергии

$$K_{\psi} := 1$$

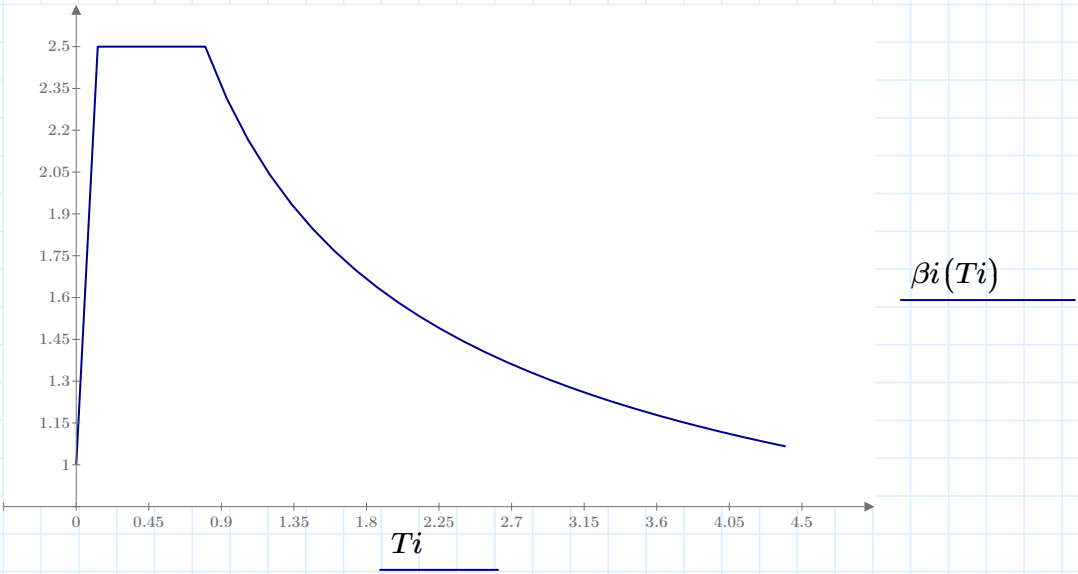
Категории грунтов

$soil := 3$

```
 $\beta_i(T) :=$  if  $soil = 1$ 
  if  $T \leq 0.1$ 
     $\beta_i \leftarrow 1 + 15 \cdot T$ 
  else if  $0.1 < T < 0.4$ 
     $\beta_i \leftarrow 2.5$ 
  else
     $\beta_i \leftarrow 2.5 \cdot \left(\frac{0.4}{T}\right)^{0.5}$ 
else
  if  $T \leq 0.1$ 
     $\beta_i \leftarrow 1 + 15 \cdot T$ 
  else if  $0.1 < T < 0.8$ 
     $\beta_i \leftarrow 2.5$ 
  else
     $\beta_i \leftarrow 2.5 \cdot \left(\frac{0.8}{T}\right)^{0.5}$ 
if  $\beta_i < 0.8$ 
   $\beta_i \leftarrow 0.8$ 
 $\beta_i$ 
```

Значения коэффициента динамичности

$Ti := 0, \frac{2}{15} .. 4.5$



$$\beta := \left\| \begin{array}{l} \text{for } i \in 0 \dots n-1 \\ \left\| \beta_i \leftarrow \beta_i(T_i) \right\| \\ \beta \end{array} \right\| = \begin{bmatrix} 2.5 \\ 1.497209 \\ 1.186596 \end{bmatrix}$$

$$S_0 := \left\| \begin{array}{l} \text{for } i \in 0 \dots n-1 \\ \left\| S_{0_i} \leftarrow \frac{G}{g} \cdot \eta_i \cdot As \cdot \beta_i \cdot K_\psi \cdot kN \right\| \\ S_0 \end{array} \right\|$$

Расчетная сейсмическая нагрузка

$$S := K_0 \cdot K_{-1} \cdot S_0$$

$$F_z := \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} kN$$

$$M_y := \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} kN \cdot m$$

Узловые нагрузки

$$F_p(F_x) := \left\| \begin{array}{l} \text{for } i \in n_j \cdot 3 - 1 \\ \left\| f_i \leftarrow 0 \right\| \\ \text{for } i \in 0 \dots n_f - 1 \\ \left\| \begin{array}{l} F_{x_{j_{s_i}}} \\ f_{i \cdot 3 + 3} \leftarrow \frac{F_{x_{j_{s_i}}}}{kN} \\ F_{z_{j_{s_i}}} \\ f_{i \cdot 3 + 4} \leftarrow \frac{F_{z_{j_{s_i}}}}{kN} \\ M_{y_{j_{s_i}}} \\ f_{i \cdot 3 + 5} \leftarrow \frac{M_{y_{j_{s_i}}}}{kN \cdot m} \end{array} \right\| \\ f \end{array} \right\|$$

Перемещения узлов

$$U_i(U) := \left\| \begin{array}{l} \text{for } i \in 0 \dots n_j - 1 \\ \left\| \begin{array}{l} U_{i \cdot 3} \cdot m \\ u_i \leftarrow \begin{bmatrix} U_{i \cdot 3 + 1} \cdot m \\ U_{i \cdot 3 + 2} \cdot rad \end{bmatrix} \\ u \end{array} \right\| \end{array} \right\|$$

Узловые усилия в КЭ

$$S_i(U) := \left\| \begin{array}{l} \text{for } i \in 0 \dots n_f - 1 \\ \left\| \begin{array}{l} U_- \leftarrow C_i(i) \cdot U \\ s_i \leftarrow (T_\alpha(i) \cdot K_i(i)) \cdot U_- \end{array} \right\| \\ s \end{array} \right\|$$

Поперечные силы в сечениях КЭ

$$Q_i(U) := \left\| \begin{array}{l} S \leftarrow S_i(U) \\ \text{for } i \in 0 \dots n_f - 1 \\ \left\| \begin{array}{l} q_i \leftarrow \begin{bmatrix} -(S_i)_1 \\ (S_i)_4 \end{bmatrix} kN \end{array} \right\| \\ q \end{array} \right\|$$

Изгибающие моменты в сечениях КЭ

$$M_i(U) := \left\| \begin{array}{l} S_i \leftarrow S_i(U) \\ \text{for } i \in 0 \dots n_f - 1 \\ \left\| \begin{array}{l} m_i \leftarrow \begin{bmatrix} (S_i)_2 \\ -(S_i)_5 \end{bmatrix} \cdot kN \cdot m \end{array} \right\| \\ m \end{array} \right\|$$

Решение по форме 0

Перемещения узлов

$$U_0 := \text{lsolve} \left(K_r, f_r \left(F_p \left(S_0 \right) \right) \right)$$

Поперечные силы в сечениях КЭ

$$Q_i(U_0) = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} -1.462964 \cdot 10^7 & -1.462964 \cdot 10^7 \end{bmatrix} N \\ \begin{bmatrix} -1.319546 \cdot 10^7 & -1.319546 \cdot 10^7 \end{bmatrix} N \\ \begin{bmatrix} -8.33116 \cdot 10^6 & -8.33116 \cdot 10^6 \end{bmatrix} N \end{bmatrix} N$$

$$U_i(U_0) = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \text{ m} \\ 0 \text{ m} \\ 0 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} 0.000772 \text{ m} \\ 0 \text{ m} \\ 0.000279 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} 0.002618 \text{ m} \\ 0 \text{ m} \\ 0.000424 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} 0.004916 \text{ m} \\ 0 \text{ m} \\ 0.000464 \end{bmatrix} \end{bmatrix}$$

Изгибающие моменты в сечениях КЭ

$$M_i(U_0) = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} -184396.913 & -109785.74 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} -109785.74 & -42488.914 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} -42488.914 & 0 \end{bmatrix} \end{bmatrix} kN \cdot m$$

Решение по форме 1

Перемещения узлов

$$U_1 := \text{lsolve} \left(K_r, f_r \left(F_p \left(S_1 \right) \right) \right)$$

Поперечные силы в сечениях КЭ

$$Q_i(U_1) = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} -2.657005 \cdot 10^6 & -2.657005 \cdot 10^6 \end{bmatrix} N \\ \begin{bmatrix} -7.416868 \cdot 10^5 & -7.416868 \cdot 10^5 \end{bmatrix} N \\ \begin{bmatrix} 1.48877 \cdot 10^6 & 1.48877 \cdot 10^6 \end{bmatrix} N \end{bmatrix} N$$

$$U_i(U_1) = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \text{ m} \\ 0 \text{ m} \\ 0 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} 0.000025 \text{ m} \\ 0 \text{ m} \\ 0.000006 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} 0.000029 \text{ m} \\ 0 \text{ m} \\ -0.000005 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} -0.000022 \text{ m} \\ 0 \text{ m} \\ -0.000012 \end{bmatrix} \end{bmatrix}$$

Изгибающие моменты в сечениях КЭ

$$M_i(U_1) = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} -9740.601 & 3810.125 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} 3810.125 & 7592.727 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} 7592.727 & 0 \end{bmatrix} \end{bmatrix} kN \cdot m$$

Решение по форме 2

$$U_2 := \text{lsolve} \left(K_r, f_r \left(F_p \left(S_2 \right) \right) \right)$$

Поперечные силы в сечениях КЭ

$$Q_i(U_2) = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} -5.692523 \cdot 10^5 & -5.692523 \cdot 10^5 \end{bmatrix} N \\ \begin{bmatrix} 5.34968 \cdot 10^5 & 5.34968 \cdot 10^5 \end{bmatrix} N \\ \begin{bmatrix} -2.386327 \cdot 10^5 & -2.386327 \cdot 10^5 \end{bmatrix} N \end{bmatrix} N$$

Перемещения узлов

$$U_i(U_2) = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \text{ м} \\ 0 \text{ м} \\ 0 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} 0.000002 \text{ м} \\ 0 \text{ м} \\ 0 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} -0.000001 \text{ м} \\ 0 \text{ м} \\ 0 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} 0 \text{ м} \\ 0 \text{ м} \\ 0.000001 \end{bmatrix} \end{bmatrix}$$

Изгибающие моменты в сечениях КЭ

$$M_i(U_2) = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} -1391.876 & 1511.31 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} 1511.31 & -1217.027 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} -1217.027 & 0 \end{bmatrix} \end{bmatrix} \text{ кН} \cdot \text{м}$$

Перемещения от сейсмического воздействия

$$U_s := U_i \left(\sqrt{U_0^2 + U_1^2 + U_2^2} \right) = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \text{ м} \\ 0 \text{ м} \\ 0 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} 0.000772 \text{ м} \\ 0 \text{ м} \\ 0.000279 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} 0.002619 \text{ м} \\ 0 \text{ м} \\ 0.000424 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} 0.004916 \text{ м} \\ 0 \text{ м} \\ 0.000464 \end{bmatrix} \end{bmatrix}$$

Поперечные силы от сейсмического воздействия

$$Q_s := \left\| \begin{array}{l} \text{for } i \in 0 \dots n_f - 1 \\ \left\| \begin{array}{l} Q_i \leftarrow Q_i \langle U_0 \rangle_i^T + Q_i \langle U_1 \rangle_i^T + Q_i \langle U_2 \rangle_i^T \\ \sqrt{Q} \end{array} \right\| \end{array} \right\| = \left[\begin{array}{c} 14879.857 \\ 14879.857 \\ 13227.107 \\ 13227.107 \\ 8466.499 \\ 8466.499 \end{array} \right] \text{ kN}$$

Моменты от сейсмического воздействия

$$M_s := \left\| \begin{array}{l} \text{for } i \in 0 \dots n_f - 1 \\ \left\| \begin{array}{l} M_i \leftarrow M_i \langle U_0 \rangle_i^T + M_i \langle U_1 \rangle_i^T + M_i \langle U_2 \rangle_i^T \\ \sqrt{M} \end{array} \right\| \end{array} \right\| = \left[\begin{array}{c} 184659.249 \\ 109862.231 \\ 109862.231 \\ 43179.144 \\ 43179.144 \\ 0 \end{array} \right] \text{ kN} \cdot \text{m}$$