

GS 1. — 17. lipnja 2024.

Zadatak 3.

Općom metodom pomakā izračunajte orijentiranu duljinu pomaka točke 2 i kut zaokreta osi u njoj! Nacrtajte dijagrame unutarnjih sila!

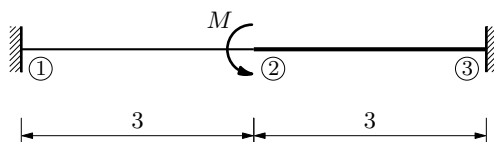
$$M = 100 \text{ kNm}$$

$$E = 3 \cdot 10^7 \text{ kN/m}^2$$

$$b = 30 \text{ cm}$$

$$h_{\{1,2\}} = 30 \text{ cm}$$

$$h_{\{2,3\}} = 45 \text{ cm}$$

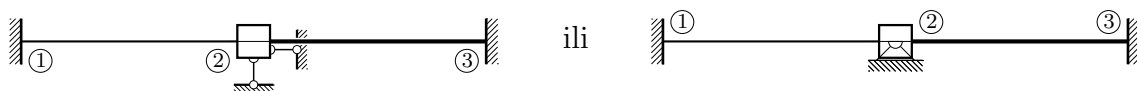


Korak prvi. Nepoznanice $\mathcal{E}$ osnovni sistem za opću metodu pomakā.

Budući da su izrazi za sile na krajevima štapa kao funkcije pomakā krajeva izvedeni za štap konstantne aksijalne i fleksijske krutosti i da se krutosti zadane grede mijenjaju u točki 2, ta točka mora biti čvor koji gredu dijeli u dva štapa, $\{1,2\}$ i $\{2,3\}$. Čvorovi su i ležajevi 1 i 3. Čvor 2 nazivamo slobodnim čvorom.

Nepoznanice opće metode pomakā orijentirane su duljine horizontalnih i vertikalnih komponenata (translacijskih) pomakā slobodnih čvorova i kutovi njihovih zaokreta. U našem su primjeru, sistemu samo s jednim slobodnim čvorom, čvorom 2, nepoznanice u_2, w_2, φ_2 . (Pomaci su ležajnih čvorova spriječeni, pa su duljine komponenata njihovih pomaka i kutovi njihovih zaokreta poznati: $u_1 = w_1 = \varphi_1 = 0$ i $u_3 = w_3 = \varphi_3 = 0$.)

Osnovni sistem za opću metodu pomakā oblikujemo dodavanjem spojeva s podlogom koji sprečavaju sve pomake i zaokrete slobodnih čvorova:



Korak drugi. Sile na krajevima štapova.

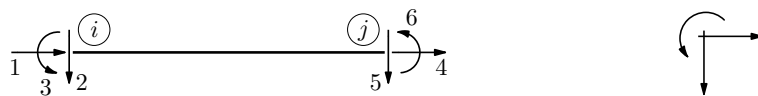
Vrijednosti sila na krajevima štapova zbrojevi su vrijednosti sila u stanju spriječenih pomaka čvorova (ili sila upetosti) i vrijednosti sila u stanju prisilnih pomaka čvorova:

$$N_{i,j} = \bar{N}_{i,j} + n_{i,j}, \quad T_{i,j} = \bar{T}_{i,j} + t_{i,j} \quad \mathcal{E} \quad M_{i,j} = \bar{M}_{i,j} + m_{i,j}.$$

Budući da zadani moment vrijednosti M djeluje u čvoru 2, preko zamišljenoga se momentnoga spoja prenosi u podlogu, te su vrijednosti svih sila upetosti nula, $\bar{N}_{i,j} = 0, \bar{T}_{i,j} = 0 \quad \mathcal{E} \quad \bar{M}_{i,j} = 0$, tako da su

$$N_{i,j} = n_{i,j}, \quad T_{i,j} = t_{i,j} \quad \mathcal{E} \quad M_{i,j} = m_{i,j}.$$

Pozitivne su orijentacije sila i momenata na krajevima štapa te komponenata pomakā i zaokretā krajeva prikazane na lijevoj skici na sljedećoj stranici, a pozitivne su orijentacije sila i momenta koji djeluju na čvor te komponenata pomakā i zaokreta čvora prikazane na desnoj skici:



Duljine su komponenta pomakā i kutovi zaokretā krajeva štapova priključenih u čvor 2

$$u_{2,1} = u_2, \quad w_{2,1} = w_2, \quad \varphi_{2,1} = \varphi_2$$

$$u_{2,3} = u_2, \quad w_{2,3} = w_2, \quad \varphi_{2,3} = \varphi_2,$$

pa su, uz pogled na matricu krutosti navedenu na stranici 285 bilježaka s predavanja (<http://master.grad.hr/nastava/ga/ga1/ga1.pdf>) i na stranici 18 primjera *Dualitet metode sila i opće metode pomakā — usporedni proračun* (<http://master.grad.hr/nastava/ga/ga1/pdn/dual.pdf>), izrazi za vrijednosti sila u stanju prisilnih pomaka

$$n_{1,2} = -k_{\{1,2\}}^a u_2,$$

$$n_{2,1} = k_{\{1,2\}}^a u_2,$$

$$t_{1,2} = -\frac{12 k_{\{1,2\}}^f}{\ell_{\{1,2\}}^2} w_2 - \frac{6 k_{\{1,2\}}^f}{\ell_{\{1,2\}}} \varphi_2,$$

$$t_{2,1} = \frac{12 k_{\{1,2\}}^f}{\ell_{\{1,2\}}^2} w_2 + \frac{6 k_{\{1,2\}}^f}{\ell_{\{1,2\}}} \varphi_2,$$

$$m_{1,2} = \frac{6 k_{\{1,2\}}^f}{\ell_{\{1,2\}}} w_2 + 2 k_{\{1,2\}}^f \varphi_2,$$

$$m_{2,1} = \frac{6 k_{\{1,2\}}^f}{\ell_{\{1,2\}}} w_2 + 4 k_{\{1,2\}}^f \varphi_2,$$

$$n_{2,3} = k_{\{2,3\}}^a u_2,$$

$$n_{3,2} = -k_{\{2,3\}}^a u_2,$$

$$t_{2,3} = \frac{12 k_{\{2,3\}}^f}{\ell_{\{2,3\}}^2} w_2 - \frac{6 k_{\{2,3\}}^f}{\ell_{\{2,3\}}} \varphi_2,$$

$$t_{3,2} = -\frac{12 k_{\{2,3\}}^f}{\ell_{\{2,3\}}^2} w_2 + \frac{6 k_{\{2,3\}}^f}{\ell_{\{2,3\}}} \varphi_2,$$

$$m_{2,3} = -\frac{6 k_{\{2,3\}}^f}{\ell_{\{2,3\}}} w_2 + 4 k_{\{2,3\}}^f \varphi_2,$$

$$m_{3,2} = -\frac{6 k_{\{2,3\}}^f}{\ell_{\{2,3\}}} w_2 + 2 k_{\{2,3\}}^f \varphi_2,$$

Za zadane su duljine stranica poprečnih presjeka

$$A_{\{1,2\}} = b h_{\{1,2\}} = 0,3 \cdot 0,3 = 0,09 \text{ m}^2,$$

$$A_{\{2,3\}} = b h_{\{2,3\}} = 0,3 \cdot 0,45 = 0,135 \text{ m}^2,$$

$$I_{\{1,2\}} = \frac{b h_{\{1,2\}}^3}{12} = \frac{0,3^4}{12} = 0,000675 \text{ m}^4,$$

$$I_{\{2,3\}} = \frac{b h_{\{2,3\}}^3}{12} = \frac{0,3 \cdot 0,45^3}{12} = 0,00227813 \text{ m}^4,$$

pa su

$$k_{\{1,2\}}^a = \frac{E A_{\{1,2\}}}{\ell_{\{1,2\}}} = \frac{3 \cdot 10^7 \cdot 0,09}{3} = 900000 \text{ kN/m},$$

$$k_{\{1,2\}}^f = \frac{E I_{\{1,2\}}}{\ell_{\{1,2\}}} = \frac{3 \cdot 10^7 \cdot 0,000\,675}{3} = 6\,750 \text{ kNm},$$

$$k_{\{2,3\}}^a = \frac{E A_{\{2,3\}}}{\ell_{\{2,3\}}} = \frac{3 \cdot 10^7 \cdot 0,135}{3} = 1\,350\,000 \text{ kN/m},$$

$$k_{\{2,3\}}^f = \frac{E I_{\{2,3\}}}{\ell_{\{2,3\}}} = \frac{3 \cdot 10^7 \cdot 0,002\,278\,13}{3} = 22\,781,3 \text{ kNm}.$$

Uvrštavanjem u izraze za vrijednosti sila dobivamo

$$\begin{aligned} n_{1,2} &= -900\,000 u_2, & n_{2,1} &= 900\,000 u_2, \\ t_{1,2} &= -9\,000 w_2 - 13\,500 \varphi_2, & t_{2,1} &= 9\,000 w_2 + 13\,500 \varphi_2, \\ m_{1,2} &= 13\,500 w_2 + 13\,500 \varphi_2, & m_{2,1} &= 13\,500 w_2 + 27\,000 \varphi_2, \\ n_{2,3} &= 1\,350\,000 u_2, & n_{3,2} &= -1\,350\,000 u_2, \\ t_{2,3} &= 30\,375,1 w_2 - 45\,562,6 \varphi_2, & t_{3,2} &= -30\,375,1 w_2 + 45\,562,6 \varphi_2, \\ m_{2,3} &= -45\,562,6 w_2 + 91\,125,2 \varphi_2, & m_{3,2} &= -45\,562,6 w_2 + 45\,562,6 \varphi_2. \end{aligned}$$

Korak treći. Sustav jednažbi ravnoteže sila u čvoru 2 i njegovo rješenje.



Prema slici, jednažbe su ravnoteže

$$\begin{aligned} -N_{2,1} - N_{2,3} &= 0, \\ -T_{2,1} - T_{2,3} &= 0, \\ -M_{2,1} - M_{2,3} + M &= 0. \end{aligned}$$

Uvrštavanjem izvedenih izraza za vrijednosti sila na krajevima štapova i vrijednosti zadana momenta dobivamo sustav triju jednažbi s nepoznanicama u_2 , w_2 i φ_2 :

$$\begin{aligned} -2\,250\,000 u_2 &= 0, \\ -39\,375,1 w_2 + 32\,062,6 \varphi_2 &= 0, \\ 32\,062,6 w_2 - 118\,125,5 \varphi_2 + 100 &= 0, \end{aligned}$$

odnosno,

$$\begin{aligned} 2\,250\,000 u_2 &= 0, \\ 39\,375,1 w_2 - 32\,062,6 \varphi_2 &= 0, \\ -32\,062,6 w_2 + 118\,125,5 \varphi_2 &= 100. \end{aligned}$$

Iz prve je jednažbe neposredno $u_2 = 0$. Druga i treća jednažba tvore sustav rješenje kojega je

$$w_2 = 0,000\,884\,927 \quad \text{ℓ} \quad \varphi_2 = 0,001\,086\,75.$$

Korak četvrti. Odgovor na prvo pitanje.

Budući da je $u_2 = 0$, horizontalne komponente pomaka čvora 2 nema. Orijentirana je duljina vertikalne komponente

$$w_2 = 0,000\,884\,927\text{ m} \simeq 0,000\,9\text{ m} = 0,9\text{ mm};$$

kako je ta vrijednost pozitivna, pomak je prema dolje. Ili, formalnije (školski), duljina je pomaka čvora 2

$$d_2 = \sqrt{u_2^2 + w_2^2} = \sqrt{0 + 0,000\,9^2} = 0,000\,9\text{ m};$$

pomak je po vertikalnome pravcu, prema dolje, jer je

$$\vec{d}_2 = \vec{u}_2 + \vec{w}_2 = u_2 \vec{i} + w_2 \vec{k} = 0 \vec{i} + 0,000\,9 \vec{k} = 0,000\,9 \vec{k}.$$

Kut zaokreta osi grede u točki 2 kut je zaokreta čvora 2:

$$\varphi_2 = 0,001\,086\,75 \simeq 0,001 \simeq 0,06^\circ.$$

Korak peti. Vrijednosti sila na krajevima štapova:

$$N_{1,2} = n_{1,2} = -900\,000\, u_2 = -900\,000 \cdot 0 = 0,$$

$$\begin{aligned} T_{1,2} &= t_{1,2} = -9\,000\, w_2 - 13\,500\, \varphi_2 \\ &= -9\,000 \cdot 0,000\,885 - 13\,500 \cdot 0,001\,087 = -22,64\text{ kN}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M_{1,2} &= m_{1,2} = 13\,500\, w_2 + 13\,500\, \varphi_2 \\ &= 13\,500 \cdot 0,000\,885 + 13\,500 \cdot 0,001\,087 = 26,62\text{ kNm}, \end{aligned}$$

$$N_{2,1} = n_{2,1} = 900\,000\, u_2 = 900\,000 \cdot 0 = 0,$$

$$\begin{aligned} T_{2,1} &= t_{2,1} = 9\,000\, w_2 + 13\,500\, \varphi_2 \\ &= 9\,000 \cdot 0,000\,885 + 13\,500 \cdot 0,001\,087 = 22,64\text{ kN}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M_{2,1} &= m_{2,1} = 13\,500\, w_2 + 27\,000\, \varphi_2 \\ &= 13\,500 \cdot 0,000\,885 + 27\,000 \cdot 0,001\,087 = 41,29\text{ kNm}, \end{aligned}$$

$$N_{2,3} = n_{2,3} = 1\,350\,000\, u_2 = 1\,350\,000 \cdot 0 = 0,$$

$$\begin{aligned} T_{2,3} &= t_{2,3} = 30\,375,1\, w_2 - 45\,562,6\, \varphi_2 \\ &= 30\,375,1 \cdot 0,000\,885 - 45\,562,6 \cdot 0,001\,087 = -22,64\text{ kN}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M_{2,3} &= m_{2,3} = -45\,562,6\, w_2 + 91\,125,2\, \varphi_2 \\ &= -45\,562,6 \cdot 0,000\,885 + 91\,125,2 \cdot 0,001\,087 = 58,73\text{ kNm}, \end{aligned}$$

$$N_{3,2} = n_{3,2} = -1\,350\,000\, u_2 = -1\,350\,000 \cdot 0 = 0,$$

$$\begin{aligned} T_{3,2} &= t_{3,2} = -30\,375,1\, w_2 + 45\,562,6\, \varphi_2 \\ &= -30\,375,1 \cdot 0,000\,885 + 45\,562,6 \cdot 0,001\,087 = 22,64\text{ kN}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M_{3,2} &= m_{3,2} = -45\,562,6\, w_2 + 45\,562,6\, \varphi_2 \\ &= -45\,562,6 \cdot 0,000\,885 + 45\,562,6 \cdot 0,001\,087 = 9,20\text{ kNm}. \end{aligned}$$

(Zanemariva „neravnoteža” momenata u čvoru 2, $-58,73 - 41,29 + 100 = -0,02$, posljedica je pogrešaka zaokruživanja.)

Korak šesti. Odgovor na drugo pitanje—dijagrami unutarnjih sila.

