

STEFAN CIEŚLA

OBLICZANIE OSIOWO SYMETRYCZNYCH RAM KOPUŁOWYCH

Streszczenie. W pracy wykorzystano niektóre wyniki pracy doktorskiej autora do obliczania pewnego typu rusztu przestrzennego. Uzyskano wzory na wielkości wewnętrzne w elementach rusztu.

1. Wstęp

W pracach [2] i [3] została przedstawiona metoda obliczania ram przestrzennych o prętach dowolnie zakrzywionych, stanowiąca uogólnienie metody Crossa na tego rodzaju ustroje prętowe. Niniejsze opracowanie stanowi ilustrację zastosowania tej metody do obliczania osiowo symetrycznych ram kopułowych.

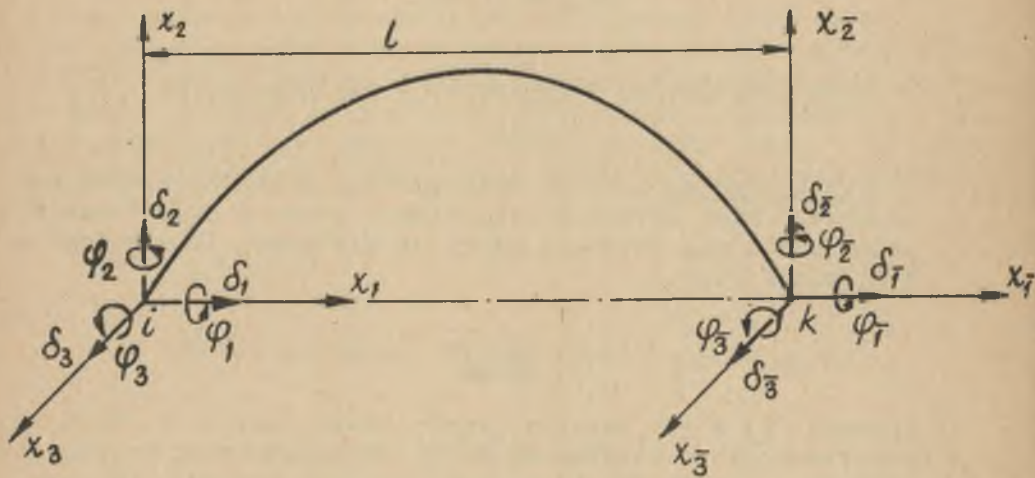
2. Wzory przejścia

Rama kopułowa stanowi szczególny przypadek ramy przestrzennej, złożonej z dowolnie zakrzywionych prętów. Rozpatrując wyodrębniony w myśli dowolny pręt i -k (rys. 1) takiej ramy, za uważymy, że jego przekroje końcowe mogą doznawać dwunastu składowych przemieszczeń (pod nazwą "przemieszczenie" rozumie się zarówno przesunięcie, jak też obrót):

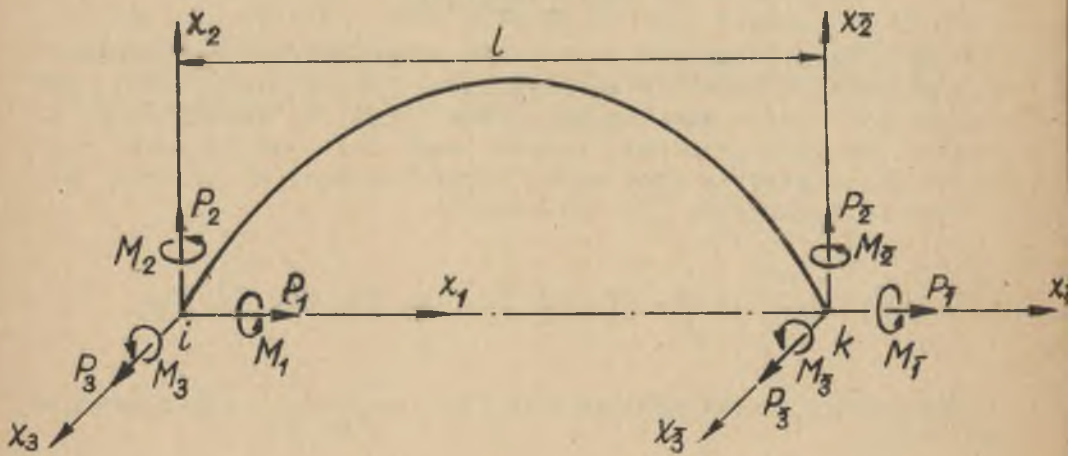
$$(2.1) \quad \delta_1, \delta_2, \delta_3, \varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \delta_{\bar{1}}, \delta_{\bar{2}}, \delta_{\bar{3}}, \varphi_{\bar{1}}, \varphi_{\bar{2}}, \varphi_{\bar{3}}.$$

Zakładamy, że przemieszczenia (2.1) są małe. Wprowadzając oznaczenia

$$(2.2) \quad \vartheta_2 \stackrel{\text{df}}{=} -\frac{1}{1}(\delta_{\bar{3}} - \delta_3), \quad \vartheta_3 \stackrel{\text{df}}{=} \frac{1}{1}(\delta_{\bar{2}} - \delta_2),$$



Rys. 1



Rys. 2

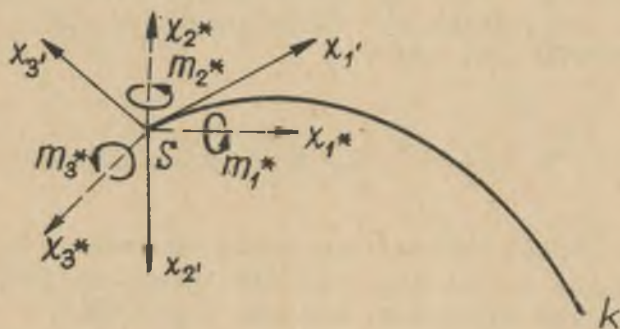
można utworzyć z dwunastu przemieszczeń (2.1) sześć wielkości bezwymiarowych (por. [2]):

$$(2.3) \quad \left. \begin{aligned} q_1 &= \varphi_1 - \varphi_1, & q_2 &= \varphi_2 - \vartheta_2 = \varphi_2 + \frac{1}{I}(\delta_3 - \delta_3), & q_3 &= \varphi_3 - \vartheta_3 = \varphi_3 - \frac{1}{I}(\delta_2 - \delta_2), \\ q_4 &= \frac{1}{I}(\delta_1 - \delta_1), & q_5 &= \varphi_2 - \vartheta_2 = \varphi_2 + \frac{1}{I}(\delta_3 - \delta_3), & q_6 &= \varphi_3 - \vartheta_3 = \varphi_3 - \frac{1}{I}(\delta_2 - \delta_2), \end{aligned} \right\}$$

określających przemieszczenia końców pręta spowodowane wyłącznie jego odkształceniem, a nie przemieszczeniem jako ciała sztywnego.

Przyjmijmy, że na pręt działają następujące obciążenia "przesłkowe" (rys. 2):

- 1) obciążenie rozłożone p o składowych p_1, p_2, p_3 na przedziale $a-b$,
- 2) siła skupiona F o składowych F_1, F_2, F_3 w punkcie c ,
- 3) obciążenie rozłożonym momentem n o składowych n_1, n_2, n_3 na przedziale $e-f$,
- 4) moment N o składowych N_1, N_2, N_3 w punkcie g ¹⁾.



Rys. 3

Na przekroje końcowe działa dwanaście wielkości statycznych:

$$(2.4) \quad P_1, P_2, P_3, M_1, M_2, M_3, P_1^-, P_2^-, P_3^-, M_1^-, M_2^-, M_3^-$$

¹⁾ Na rys. 2 przedstawiono wektor momentu.

spośród których wyróżnimy sześć wielkości, działających w miejscu i kierunku przemieszczeń q_j :

$$(2.5) \quad Q_1 = M_1, \quad Q_2 = M_2, \quad Q_3 = M_3, \quad Q_4 = P_1 l, \quad Q_5 = M_2^-, \quad Q_6 = M_3^-.$$

Dla określenia zależności między przemieszczeniami q_j a wielkościami Q_j przyjmujemy układ podstawowy statycznie wyznaczalny, w którym koniec i pręta ma możliwość przesuwu wzdłuż osi x_1 i obrotu dokoła osi x_2, x_3 a koniec k może obracać się dokoła osi x_2^- i x_3^- . W charakterze wzajemnie niezależnych sił czynnych działają wymienione obciążenia "przesłowe" i wielkości Q_j , pozostałe spośród wielkości (2.4) wynikają z warunków równowagi. Pominiemy wpływ sił normalnych i poprzecznych na odkształcenia. Oznaczając przez $S(x_1, x_2, x_3)$ bieżący punkt na osi pręta, przyjmijmy go za początek dwóch układów współrzędnych: układu x_1^*, x_2^*, x_3^* i układu x_1', x_2', x_3' (rys. 3). Osie x_1^* są równoległe do osi x_1 oraz x_1^- . Oś x_1' jest styczna do osi pręta zaś osie x_2', x_3' pokrywają się z głównymi centralnymi osiami bezwładności przekroju w punkcie S. Oznaczmy przez m_1^*, m_2^*, m_3^* składowe ogólnego momentu względem punktu S wszystkich sił działających na część i-S pręta. Można łatwo wykazać, że jeśli

$$(2.6) \quad \tilde{q}_1 = q_{1,p} + q_{1,F} + q_{1,n} + q_{1,N}$$

przedstawia tę część całkowitego przemieszczenia q_1 , która została spowodowana działaniem obciążeń "przesłowych": p, F, n, N, to mają miejsce zależności liniowe (por. [3]):

$$(2.7) \quad q_1 - \tilde{q}_1 = \sum_{\varepsilon=1}^6 Q_{\varepsilon} A_{1\varepsilon}', \quad i = 1 \dots 6.$$

Występujące tu wielkości $\tilde{q}_1, A_{1\varepsilon}'$ obliczamy w następujący sposób.

Wprowadźmy oznaczenia:

$$\xi_1 = \frac{x_1}{l}, \quad \xi_{\bar{1}} = \xi_1 - 1,$$

$$k_{i',j} = \cos(x_{i'}, x_j) \cong \cos(x_{i'}, x_j^*),$$

GC - sztywność przekroju w punkcie S na skręcanie,

EJ₂' - sztywność przekroju w punkcie S na zginanie w płaszczyźnie x₁', x₃'

EJ₃' - sztywność przekroju w punkcie S na zginanie w płaszczyźnie x₁', x₂'

$$D_{m'n'} - \text{element macierzy } \|D\| = \begin{vmatrix} \frac{1}{GC} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{EJ_2'} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{EJ_3'} \end{vmatrix},$$

$$D_{\gamma\eta} = \sum_{\alpha'=1}^3 \sum_{\beta'=1}^3 D_{\alpha'\beta'} \cdot K_{\alpha'\gamma} K_{\beta'\eta},$$

$$W_{pq} - \text{element macierzy } \|W\| = \begin{vmatrix} 1 & \xi_2 & \xi_3 & 0 & \xi_2 & \xi_3 \\ 0 & -\xi_{\bar{1}} & 0 & -\xi_3 - \xi_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\xi_{\bar{1}} & \xi_2 & 0 & -\xi_1 \end{vmatrix},$$

ia, ab, bk
 $m_{\gamma}^*, p, m_{\gamma}^*, p, m_{\gamma}^*, p$ - moment m_{γ}^* ($\gamma = 1, 2, 3$) spowodowany obciążeniem p gdy punkt S znajduje się w przedziale ia, ab, bk, analogiczne znaczenie mają symbole $\frac{ic}{m_{\gamma}^*, F}, \frac{ck}{m_{\gamma}^*, F}$
 ie, ef, fk, ig, gk
 $m_{\gamma}^*, n, m_{\gamma}^*, n, m_{\gamma}^*, n, m_{\gamma}^*, n, m_{\gamma}^*, n$

W wyrażeniach elementów macierzy np. $D_{m'n'}$, W_{pq} - pierwszy wskaźnik odnosi się do wiersza, drugi do kolumny.

Przy tych oznaczeniach można przemieszczenia (2.6) oraz liczby wpływowe Λ_{pq} ($p, q = 1 \dots 6$) obliczyć z następujących wzorów (por. [3]):

$$(2.8) \quad \left\{ \begin{array}{l} q_{\alpha, p} = \sum_j \sum_{\gamma=1}^3 \sum_{\eta=1}^3 \int_j^D \gamma \eta^j m_{\gamma, p}^* W_{\eta \alpha} ds, \\ j = ia, ab, bk, \quad \alpha = 1 \dots 6, \\ q_{\alpha, F} = \sum_k \sum_{\gamma=1}^3 \sum_{\eta=1}^3 \int_k^D \gamma \eta^k m_{\gamma, F}^* W_{\eta \alpha} ds, \\ k = ic, ck, \quad \alpha = 1 \dots 6, \\ q_{\alpha, n} = \sum_1 \sum_{\gamma=1}^3 \sum_{\eta=1}^3 \int_1^D \gamma \eta^1 m_{\gamma, n}^* W_{\eta \alpha} ds, \\ 1 = ie, ef, fk, \quad \alpha = 1 \dots 6, \\ q_{\alpha, N} = \sum_{\gamma=1}^3 \sum_{\eta=1}^3 \int_r^D \gamma \eta^r m_{\gamma, N}^* W_{\eta \alpha} ds, \\ r = ig, gk, \quad \alpha = 1 \dots 6, \end{array} \right.$$

$$(2.9) \quad \Lambda_{pq} = \sum_{\gamma=1}^3 \sum_{\eta=1}^3 \int_{ik}^D \gamma \eta W_{\gamma q} W_{\eta p} ds,$$

$$\Lambda_{pq} = \Lambda_{qp}; \quad p, q = 1 \dots 6.$$

W przypadku bardziej skomplikowanego obciążenia "przesłowego" niż przedstawiono na rys. 2, to znaczy gdy działa kilka sił skupionych, obciążenie rozłożone na kilku przedziałach itd. należy oczywiście przy obliczaniu wyrażeń typu (2.8) stosować zasadę superpozycji.

Z zależności (2.7) dochodzimy do relacji

$$(2.10) \quad Q_i = \sum_{\varepsilon=1}^6 (q_{\varepsilon} - \tilde{q}_{\varepsilon}) B_{i\varepsilon}, \quad i = 1 \dots 6,$$

w której $B_{i\varepsilon}$ są wyrazami macierzy odwrotnej względem macierzy o wyrazach A_{pq} . Zależności (2.10) nazwiemy wzorami przejścia. Stanowią one punkt wyjścia przy obliczaniu dowolnych ram przestrzennych sposobem opisanym w pracach [2], [3].

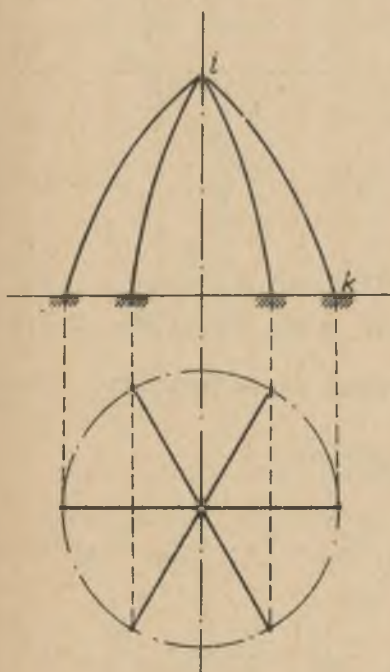
3. Uproszczenia wzorów przejścia w przypadku osiowo-symetrycznych ram kopułowych.
Wyznaczanie sił brzegowych

Będziemy rozpatrywali ustrój złożony z jednakowych prętów rozmieszczonych osiowo-symetrycznie (rys. 4). Każdy pręt jest w identyczny sposób obciążony przy czym płaszczyzna obciążeń przechodzi przez oś symetrii ustroju. W takim przypadku każdy pręt pracuje jak łuk płaski obciążony w swojej płaszczyźnie. Pozwoli to na uproszczenie i częściowe zredukowanie współczynników, występujących we wzorach (2.7) i (2.10).

Weźmy pod uwagę dowolny pręt i-k, płaski i obciążony w swojej płaszczyźnie (rys. 5). Zakładamy symetrię przekroju pręta względem płaszczyzny obciążeń. W tej płaszczyźnie przyjmujemy osie $x_1, x_2, x_1^*, x_2^*, x_1', x_2'$, osie x_3, x_3^* i x_3' są prostopadłe do tej płaszczyzny, przy czym oś x_3^* pokrywa się z osią x_3' . Otrzymujemy:

$$\|W\| = \begin{vmatrix} 1 & \xi_2 & 0 & 0 & \xi_2 & \xi_3 \\ 0 & -\xi_1 & 0 & 0 & -\xi_1 & 0 \\ 0 & 0 & -\xi_1 & \xi_2 & 0 & -\xi_1 \end{vmatrix},$$

$$k_{1'1} = \cos\alpha, \quad k_{1'2} = \sin\alpha, \quad k_{1'3} = 0, \quad k_{2'1} = -\sin\alpha, \quad k_{2'2} = \cos\alpha, \\ k_{2'3} = 0, \quad k_{3'1} = 0, \quad k_{3'2} = 0, \quad k_{3'3} = 1,$$

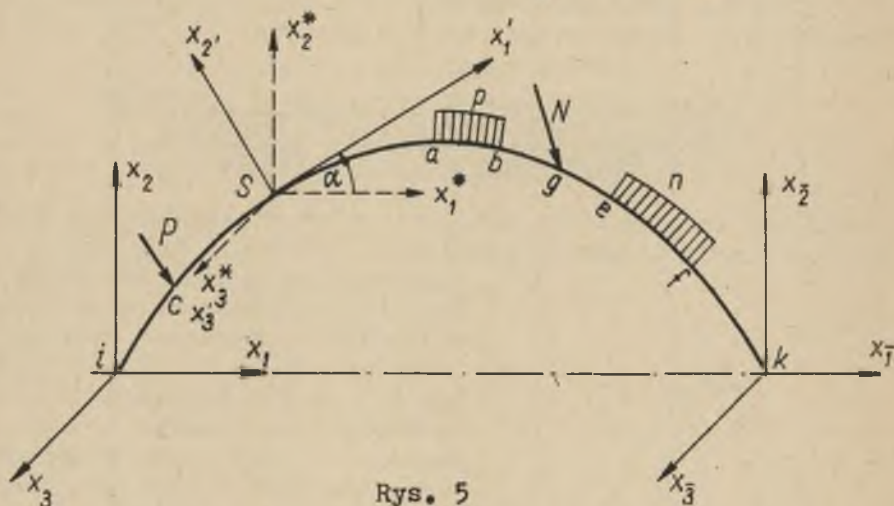


Rys. 4

wobec czego, jak łatwo sprawdzić:

$$D_{11} = \frac{1}{GC} \cos^2 \alpha + \frac{1}{EJ_2} \sin^2 \alpha, \quad D_{12} = \frac{\sin 2\alpha}{2} \left(\frac{1}{GC} - \frac{1}{EJ_2} \right),$$

$$D_{13} = D_{23} = 0, \quad D_{33} = \frac{1}{EJ_3}, \quad D_{\alpha\beta} = D_{\beta\alpha}.$$



Rys. 5

Zauważmy ponadto, że spośród momentów m_1^*, α , m_2^*, α , m_3^*, α (j - oznaczenie przedziału obciążenia, $\alpha = p, F, n, N$) jedynie $m_3^*, \alpha = 0$, co wynika z przyjętych założeń co do kształtu pręta i sposobu obciążenia.
Wyrażenia (2.8) przyjmą następującą postać:

$$\begin{aligned} q_{\alpha, p} &= \sum_j \int_j [D_{11} m_{1, p}^* W_{1\alpha} + D_{12} m_{1, p}^* W_{2\alpha} + D_{13} m_{1, p}^* W_{3\alpha} + \\ &+ D_{21} m_{2, p}^* W_{1\alpha} + D_{22} m_{2, p}^* W_{2\alpha} + D_{23} m_{2, p}^* W_{3\alpha} + \\ &+ D_{31} m_{3, p}^* W_{1\alpha} + D_{32} m_{3, p}^* W_{2\alpha} + D_{33} m_{3, p}^* W_{3\alpha}] ds = \\ &= \sum_j \int_j D_{33} m_{3, p}^* W_{3\alpha} ds = \sum_j \frac{1}{EJ_3} m_{3, p}^* W_{3, p} W_{3\alpha} ds, \end{aligned}$$

czyli

$$(3.1) \quad q_{1,p} = q_{2,p} = q_{5,p} = 0, \quad q_{4,p} = \sum_j \int_j \frac{1}{EJ_3} m_{3,p}^* \xi_2 ds,$$

$$q_{3,p} = -\sum_j \int_j \frac{1}{EJ_3} m_{3,p}^* \xi_1 ds, \quad q_{6,p} = -\sum_j \int_j \frac{1}{EJ_3} m_{3,p}^* \xi_1 ds.$$

Analogicznie można przedstawić wyrażenia na $q_{\alpha,p}$, $q_{\alpha,n}$, $q_{\alpha,n}$. Jeżeli chodzi o liczby wpływowe A_{pq} , to dla pręta o osi płaskiej (niekoniecznie obciążonego płaskim układem sił) można na podst. (2.9) pokazać, że $A_{13} = A_{14} = A_{16} = A_{23} = A_{24} = A_{35} = A_{45} = A_{56} = 0$. Jeśli siły obciążające leżą w płaszczyźnie osi pręta, to równania (2.7) przyjmują postać¹⁾

$$\begin{vmatrix} q_1 - \bar{q}_1 \\ q_2 - \bar{q}_2 \\ q_3 - \bar{q}_3 \\ q_4 - \bar{q}_4 \\ q_5 - \bar{q}_5 \\ q_6 - \bar{q}_6 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} & A_{14} & A_{15} & A_{16} \\ \cdot & A_{22} & A_{23} & A_{24} & A_{25} & A_{26} \\ \cdot & \cdot & A_{33} & A_{34} & A_{35} & A_{36} \\ \cdot & \cdot & \cdot & A_{44} & A_{45} & A_{46} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & A_{55} & A_{56} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & A_{66} \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} 0 \\ 0 \\ Q_3 \\ Q_4 \\ 0 \\ Q_6 \end{vmatrix}$$

skąd wobec (3.1) otrzymujemy $q_1 = q_2 = q_5 = 0$ i dla wyznaczenia pozostałych składowych przemieszczeń pozostaje układ trzech równań:

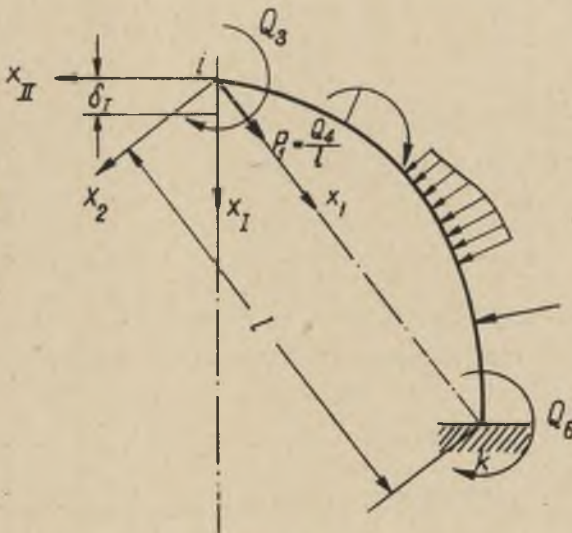
$$(3.2) \quad \begin{vmatrix} q_3 - \bar{q}_3 \\ q_4 - \bar{q}_4 \\ q_6 - \bar{q}_6 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} A_{33} & A_{34} & A_{36} \\ \cdot & A_{44} & A_{46} \\ \cdot & \cdot & A_{66} \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} Q_3 \\ Q_4 \\ Q_6 \end{vmatrix},$$

¹⁾ Wyrazy oznaczone kropkami są równe wyrazom położonym symetrycznie względem głównej przekątnej macierzy.

w których współczynniki A_{pq} obliczone z (2.9) wynoszą:

$$(3.3) \quad \left. \begin{aligned} A_{33} &= \int_{ik} \xi_1 \xi_1 \frac{ds}{EJ_3}, & A_{34} &= - \int_{ik} \xi_1 \xi_2 \frac{ds}{EJ_3}, \\ A_{36} &= \int_{ik} \xi_1 \xi_1 \frac{ds}{EJ_3}, & A_{44} &= \int_{ik} \xi_2 \xi_2 \frac{ds}{EJ_3}, \\ A_{46} &= - \int_{ik} \xi_1 \xi_2 \frac{ds}{EJ_3}, & A_{66} &= \int_{ik} \xi_1 \xi_1 \frac{ds}{EJ_3}, \end{aligned} \right\} ik$$

W przypadku opisanej na wstępie tego rozdziału ramy kopułowej każdy pręt $i-k$ znajduje się w identycznych warunkach. Węzeł i doznaje przesunięcia pionowego, nie doznaje natomiast przesunięć poziomych ani obrotów. Rozpatrując jeden dowolny pręt $i-k$, przyjmijmy osie jak na rys. 6 (oś x_I jest osią symetrii ramy). Spośród sześciu wielkości statycznych,



Rys. 6

działających na końcowe przekroje pręta, na rys. 6 zaznaczono tylko wielkości Q_j^1). Rozwiązując układ równań (3.2) otrzymujemy zależności

$$(3.4) \quad \begin{vmatrix} Q_3 \\ Q_4 \\ Q_6 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} B_{33} & B_{34} & B_{36} \\ \cdot & B_{44} & B_{46} \\ \cdot & \cdot & B_{66} \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} q_3 - \bar{q}_3 \\ q_4 - \bar{q}_4 \\ q_6 - \bar{q}_6 \end{vmatrix},$$

w których macierz współczynników B_{pq} jest odwrotna²⁾ względem macierzy współczynników A_{pq} , występującej we wzorze (3.2). Wzrost i doznaje przesunięcia δ_I wzdłuż osi x_I . Oznaczając

$$k_{ij} = \cos(x_i, x_j), \quad i = 1, 2, \quad j = I, II,$$

korzystając z (2.2) i uwzględniając, że

$$\delta_{\bar{1}} = \delta_{\bar{2}} = \varphi_3 = \varphi_{\bar{3}} = 0, \quad \delta_1 = \delta_I k_{1I}, \quad \delta_2 = \delta_I k_{2I},$$

otrzymujemy na mocy (3.4) równania

$$(3.5) \quad \begin{vmatrix} Q_3 \\ Q_4 \\ Q_6 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} B_{33} & B_{34} & B_{36} \\ \cdot & B_{44} & B_{46} \\ \cdot & \cdot & B_{66} \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} \frac{1}{I} \delta_I k_{2I} - \bar{q}_3 \\ \frac{1}{I} \delta_I k_{1I} - \bar{q}_4 \\ \frac{1}{I} \delta_I k_{2I} - \bar{q}_6 \end{vmatrix},$$

¹⁾ Na rys. 6 osie x_3 , XIII są skierowane pod rysunek (układy osi są prawoskrętne). Osie x_1 , x_2 przyjęto w taki sposób, aby rzuty przemieszczenia δ_I na każdą z nich były dodatnie.

²⁾ Technika odwracania macierzy jest wyczerpująco przedstawiona w literaturze (np. [4]) i dlatego nie będzie w tym miejscu objaśniana.

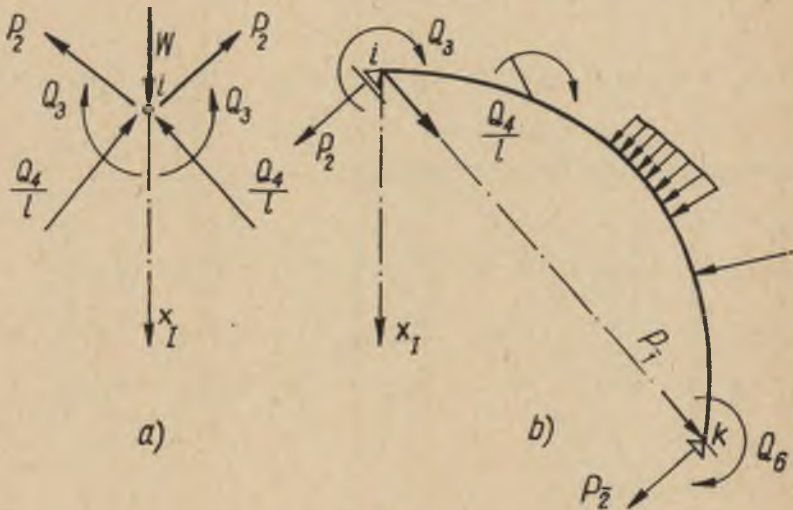
które można przedstawić w postaci

$$(3.5) \quad Q_j = \bar{Q}_j \cdot \delta_I + Q_j^*, \quad j = 3, 4, 6,$$

gdzie

$$(3.6) \quad \begin{cases} \bar{Q}_j = \frac{1}{l} [k_{2I} (B_{j3} + B_{j6}) + k_{1I} B_{j4}], \\ Q_j^* = - (B_{j3} \tilde{q}_3 + B_{j4} \tilde{q}_4 + B_{j6} \tilde{q}_6). \end{cases}$$

Nietrudno zauważyć, że \bar{Q}_j oznacza tę część wielkości statycznej Q_j , która powstaje wskutek wymuszonego przemieszczenia δ_I (rys. 6), zaś Q_j^* jest tą częścią wielkości Q_j , która powstaje przy $\delta_I = 0$ w wyniku działania obciążeń "przęskowych" w pręcie obustronnie sztywnie utwierdzonym.



Rys. 7

Oznaczmy przez W siłę zewnętrzną, działającą na węzeł i wzdłuż osi x_I (w szczególnym przypadku może być $W=0$). Warunek równowagi węzła i (rys. 7) ma postać:

$$(3.7) \quad W = n \sum_{\alpha=1}^2 P_{\alpha} k_{\alpha I},$$

gdzie

n - ilość prętów,

$$(3.8) \quad P_2 = \frac{1}{I} (Q_3 + Q_6) + \tilde{P}_2,$$

\tilde{P}_2 - część oddziaływania P_2 , wywołana w układzie przedstawionym na rys. 7a samym tylko obciążeniem "przesłowym",

Wyrażając w równaniu (3.7) P_{α} za pomocą (3.5) (3.6) oraz (3.8), dochodzimy do następującego wyrażenia na przesunięcie δ_I :

$$(3.9) \quad \delta_I = \frac{IX}{Y},$$

gdzie wprowadzono oznaczenia:

$$(3.10) \quad \begin{cases} X = \frac{W}{n} l + k_{1I} \sum_i B_{4i} \tilde{q}_i + k_{2I} \sum_i (B_{3i} + B_{6i}) \tilde{q}_i - \tilde{P}_2 l, \\ Y = k_{1I} k_{1I} B_{44} + 2k_{1I} k_{2I} (B_{34} + B_{46}) + k_{2I} k_{2I} (B_{33} + 2B_{36} + B_{66}). \end{cases}$$

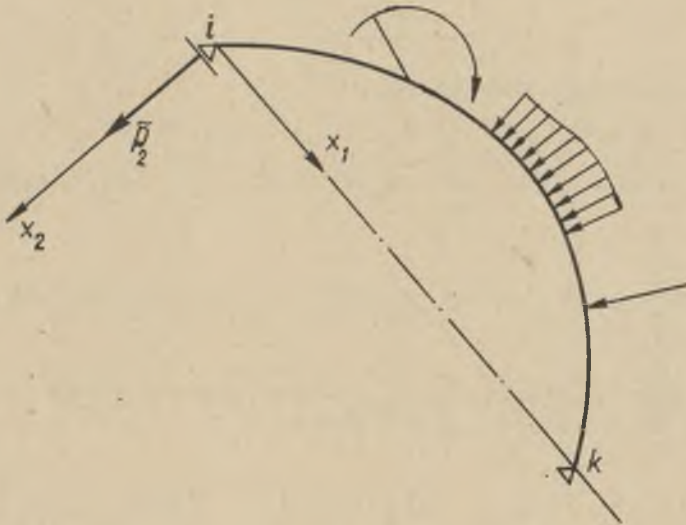
Podstawiając (3.9) do (3.5) otrzymujemy ostatecznie następujące wzory na wielkości nadliczbowe Q_j :

$$(3.11) \quad \begin{vmatrix} Q_3 \\ Q_4 \\ Q_6 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} B_{33} & B_{34} & B_{36} \\ \cdot & B_{44} & B_{46} \\ \cdot & \cdot & B_{66} \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} \frac{X}{Y} k_{2I} - \tilde{q}_3 \\ \frac{X}{Y} k_{1I} - \tilde{q}_4 \\ \frac{X}{Y} k_{2I} - \tilde{q}_6 \end{vmatrix}.$$

Pozostałe siły brzegowe wyznaczamy z warunków równowagi.

Z powyższego wyniku następujący tok postępowania przy obliczaniu osiowo-symetrycznych ram kopułowych (rys. 4):

1. Wyznaczamy przemieszczenia $\tilde{q}_i = q_{i,p} + q_{i,F} + q_{i,n} + q_{i,N}$ z wzorów (3.1).
2. Wyznaczamy liczby wpływowe A_{pq} z wzorów (3.3).
3. Znajdujemy macierz współczynników B_{pq} (macierz sztywności), odwrotną względem macierzy liczb wpływowych.
4. Wyznaczamy oddziaływanie \tilde{P}_2 , wywołane obciążeniami "prześłowymi" w układzie statycznym przedstawionym na rys. 8.
5. Obliczamy wyrażenia X, Y z wzorów (3.10).
6. Wyznaczamy wielkości nadliczbowe Q_i przy pomocy (3.11).
7. Z warunków równowagi wyznaczamy P_2, P_1, P_2 (rys. 7b).
8. Znajomość sił brzegowych pozwala na wyznaczenie wielkości wewnętrznych i wykonanie obliczenia wytrzymałościowego.



Rys. 8

LITERATURA

- [1] BŁASZKOWIAK S., KACZKOWSKI Z.: Metoda Crossa, Warszawa 1959
- [2] CIEŚLA S.: Rozwiązywanie ram przestrzennych o prętach dowolnie zakrzywionych metodą równoważenia momentów, Arch. Inż. Łąd. VIII/4, 1962.
- [3] CIEŚLA S.: Zastosowanie metody kolejnych przybliżeń do wyznaczania wielkości statycznych w przestrzennych układach prętowych, praca doktorska, Gliwice 1962.
- [4] FADDIEJEWA W.N.: Metody numeryczne algebry liniowej, Warszawa 1955.

СТАТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ КУПОЛООБРАЗНЫХ РАМ

С о д е р ж а н и е

В статье представляется способ определения сил и моментов в осесимметричных куполообразных рамах. Основные соотношения предлагаемой статьи взяты из работ [2], [3].

STATICAL DESIGN OF THE AXIALLY SYMMETRICAL
DOME FRAMES

S u m m a r y

The method of determining the couples and forces in the axially symmetrical dome frames has been described. The basic relations of the present paper have been taken from the papers [2], [3].