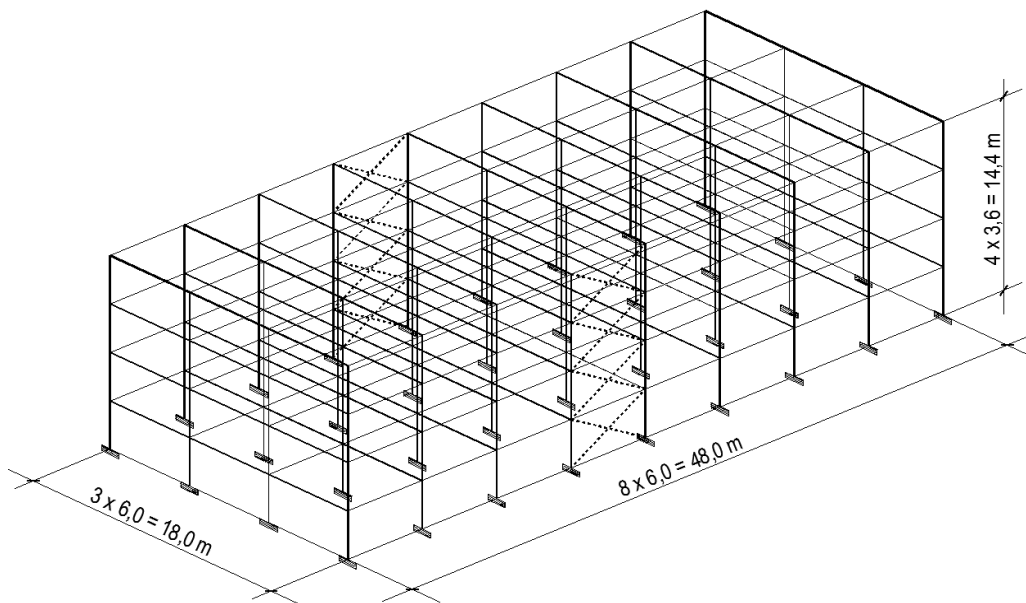
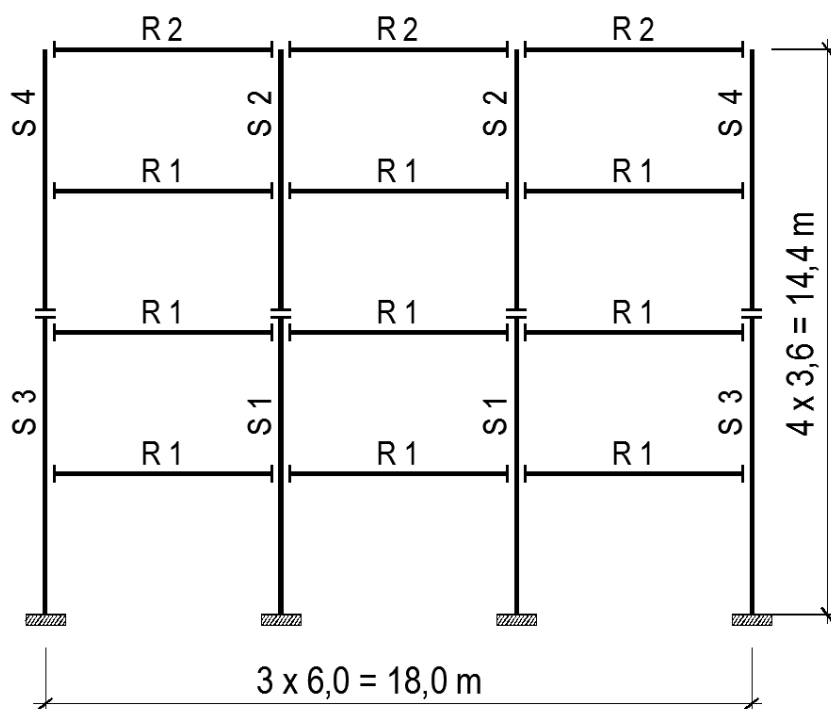


1. Konstrukcja analizowanego budynku szkieletowego



Rys. 1. Konstrukcja nośna wielokondygnacyjnego budynku szkieletowego o przeznaczeniu mieszkalnym



Rys. 2. Schemat statyczny głównego układu poprzecznego wraz z jego podziałem na elementy wysyłkowe

2. Zestawienie obciążeń na stropy i ściany zewnętrzne

2.1. Obciążenia stałe:

→ Obciążenie stałe na 1 m^2 stropu pośredniego

$$g_{s,k1} = 5,27 \text{ kN/m}^2$$

→ Obciążenie stałe na 1 m^2 stropodachu

$$g_{s,k2} = 4,34 \text{ kN/m}^2$$

2.2. Oddziaływania zmienne użytkowe

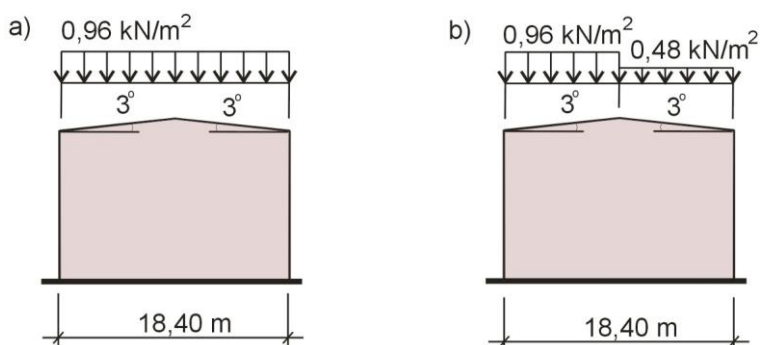
→ Obciążenie zmienne użytkowe stropu

$$q_{s,k} = 2,8 \text{ kN/m}^2$$

2.3. Oddziaływania zmienne atmosferyczne

2.3.1. Obciążenie śniegiem

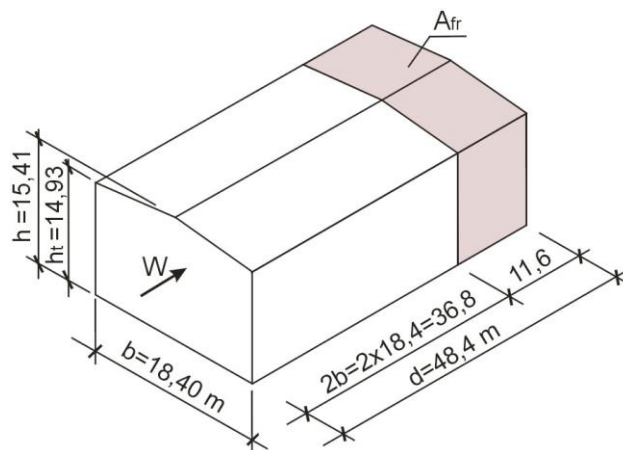
Rozpatrywane układy obciążenia dachu śniegiem pokazano na rys. 4.



Rys. 4. Obciążenie śniegiem dachu: a) układ równomierny, b) układ nierównomierny

2.3.2 Oddziaływanie wiatru na powierzchnie zewnętrzne

2.3.3. Obciążenie siłami tarcia



Rys. 5. Powierzchnia odniesienia do obliczenia sił tarcia

3. Zestawienie obciążeń ram pośrednich (rama przedszkrajna)

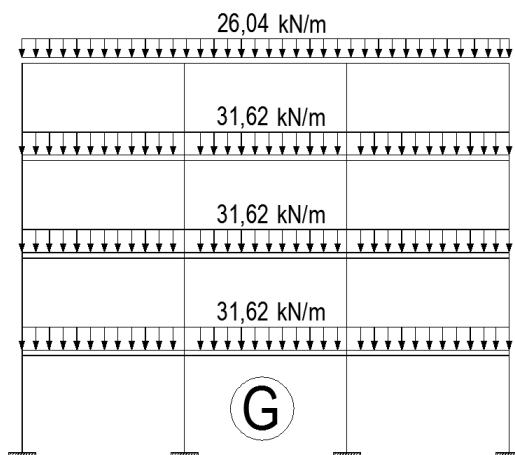
Obciążenia stałe:

Obciążenie ciągłe równomiernie rozłożone, przypadające na rygiel pośredni R1:

$$g_{r,k1} = g_{s,k1} \cdot a = 5,27 \cdot 6,0 = 31,62 \text{ kN/m}.$$

Obciążenie ciągłe równomiernie rozłożone, przypadające na rygiel dachowy R2:

$$g_{r,k2} = g_{s,k2} \cdot a = 4,34 \cdot 6,0 = 26,04 \text{ kN/m}.$$

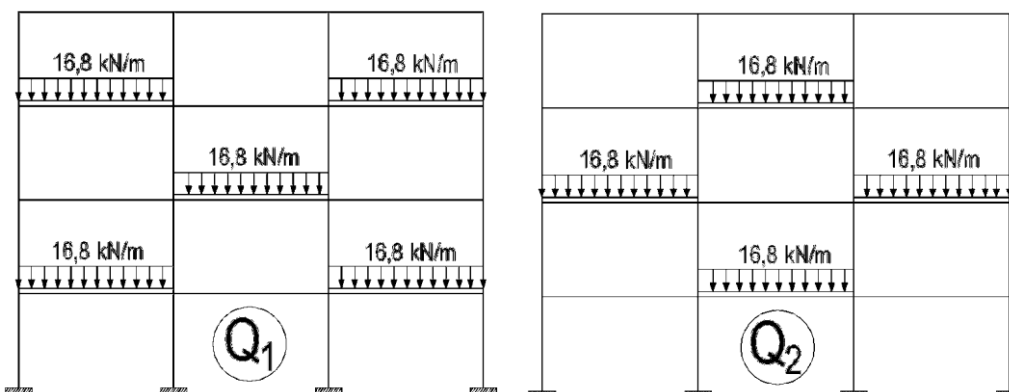


Rys. 6. Obciążenia stałe G

Oddziaływania zmienne użytkowe:

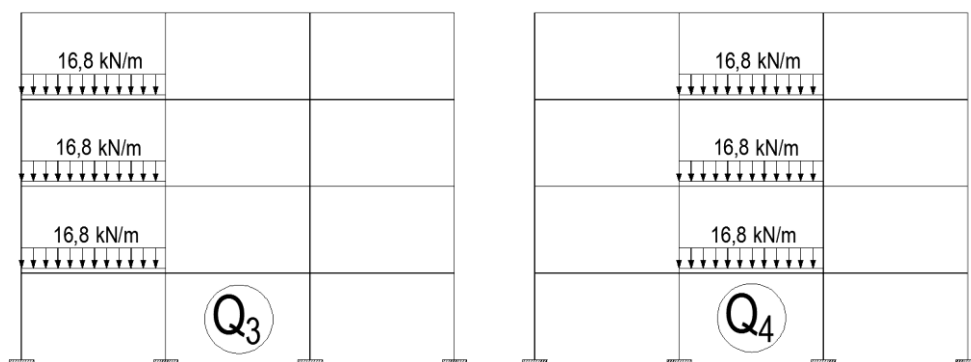
Obciążenie ciągłe, przypadające na rygiel pośredni R1:

$$q_{r,k} = q_{s,k} \cdot a = 2,8 \cdot 6,0 = 16,8 \text{ kN/m}.$$



Rys. 7. Obciążenia zmienne użytkowe Q1 i Q2

Przykład P2 – rama z węzłami sztywnymi



Rys. 8. Obciążenia zmienne użytkowe Q₃ i Q₄

Oddziaływania zmienne atmosferyczne:

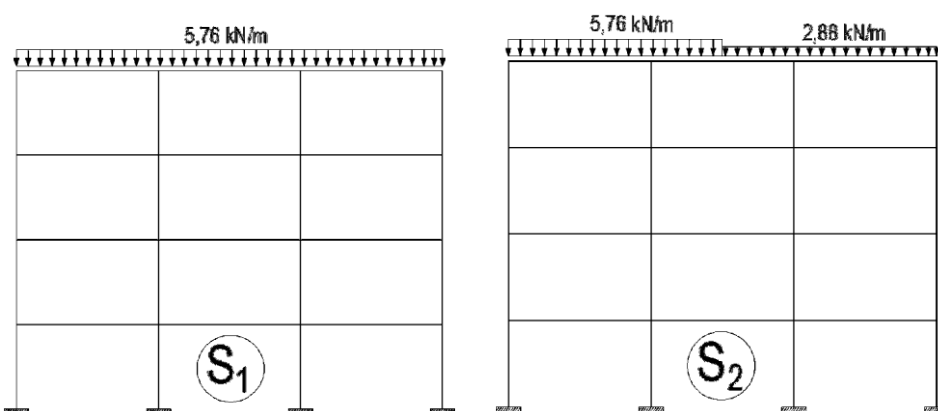
→ **Obciążenie śniegiem**

Obciążenie ciągle równomiernie rozłożone, przypadające na rygiel dachowy R2:

$$s_k = s \cdot a = 0,96 \cdot 6,0 = 5,76 \text{ kN/m}.$$

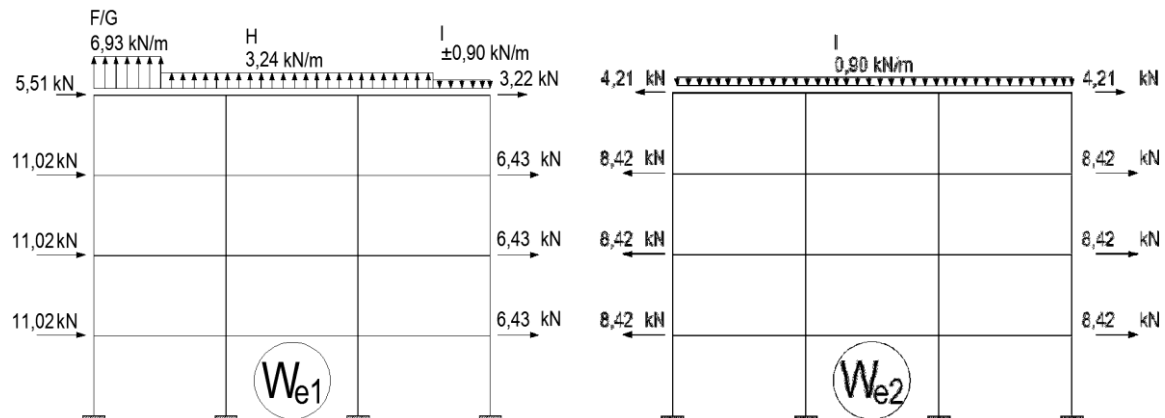
Obciążenie w przypadku obciążenia nierównomiernego połaci:

$$s_k = 0,5 \cdot s \cdot a = 0,5 \cdot 0,96 \cdot 6,0 = 2,88 \text{ kN/m}.$$



Rys. 9. Obciążenia śniegiem równomierne S₁ i nierównomierne S₂

→ Oddziaływanie wiatru



Rys. 10. Oddziaływanie wiatru na powierzchnie zewnętrzne: W_{e1} w przypadku działania na ścianę podłużną, W_{e2} w przypadku działania na ścianę szczytową i parcia na połaci

3. Obliczenia statyczne. Kombinacje oddziaływań

Stan graniczny nośności STR

Kombinacje podstawowe stanu granicznego nośności STR

Zgodnie z zaleceniami z załącznika krajowego przyjęto jako miarodajne kombinacje oddziaływań mniej korzystne spośród podanych poniżej:

Poniżej przedstawiono przykładowe kombinacje obciążeń, które rozpatrzono w analizie:

→ Wiodące obciążenie użytkowe

KOMB 1: $1,35 \cdot 0,85 \cdot G + 1,5 \cdot (Q1) + 1,5 \cdot 0,5 \cdot S1 + 1,5 \cdot 0,6 \cdot (W_{e1})$,

KOMB 2: $1,35 \cdot 0,85 \cdot G + 1,5 \cdot (Q2) + 1,5 \cdot 0,5 \cdot S1 + 1,5 \cdot 0,6 \cdot (W_{e1})$,

KOMB 3: $1,35 \cdot 0,85 \cdot G + 1,5 \cdot (Q1+Q2) + 1,5 \cdot 0,5 \cdot S1 + 1,5 \cdot 0,6 \cdot (W_{e1})$, KOMB4: $1,35 \cdot 0,85 \cdot G + 1,5 \cdot (Q3+Q4) + 1,5 \cdot 0,5 \cdot S1 + 1,5 \cdot 0,6 \cdot (W_{e2})$, [...]

→ Wiodące obciążenie wiatrem

KOMB 5: $1,35 \cdot 0,85 \cdot G + 1,5 \cdot (W_{e1}) + 1,5 \cdot 0,7 \cdot (Q1) + 1,5 \cdot 0,5 \cdot S1$, KOMB 6: $1,35 \cdot 0,85 \cdot G + 1,5 \cdot (W_{e1}) + 1,5 \cdot 0,7 \cdot (Q2) + 1,5 \cdot 0,5 \cdot S1$, [...]

Kombinacje wyjątkowe

Nie uwzględniano oddziaływań wyjątkowych.

Stan graniczny użytkowalności

Kombinacje charakterystyczne:

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \psi_{0,i} Q_{k,i}$$

KOMB 6: $G + Q_1 + Q_2 + 0,5 \cdot S_1 + 0,6 \cdot W_{e1}$,

KOMB 7: $G + Q_1 + 0,5 \cdot S_1 + 0,6 \cdot W_{e1}$,

KOMB 8: $G + Q_2 + 0,5 \cdot S_1 + 0,6 \cdot W_{e1}$,

KOMB 9: $G + W_{e1}$,

[...]

5. Projektowanie wstępne

5.1. Przyjęcie przekroju rygli pośrednich R_1

Obciążenie obliczeniowe rygli:

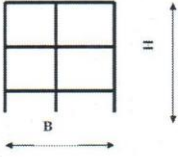
$$p_1 = 1,35 \cdot 31,62 + 1,5 \cdot 0,7 \cdot 16,8 = 60,33 \text{ kN/m.}$$

$$p_2 = 0,85 \cdot 1,35 \cdot 31,62 + 1,5 \cdot 16,8 = 61,48 \text{ kN/m.}$$

Jako bardziej niekorzystne przyjmuje się obciążenie p_2 .

$$M_{Ed} = \alpha \cdot M_{Ed}^0, \text{ gdzie współczynnik } \alpha \text{ zależy od stosunku } B/H.$$

Zależność współczynnika α od smukłości ramy

	$\frac{B}{H}$	α	$\frac{L}{h_b}$
	0,6	1,2	13,5
	1,0	1,0	15
	1,5	0,8	16,5

$$\frac{B}{H} = \frac{18,0}{14,4} = 1,25 \rightarrow \alpha = 0,9,$$

$$M_{Ed} = \alpha \cdot M_{Ed}^0 = 0,9 \cdot \frac{61,48 \cdot 6,0^2}{8} = 248,99 \text{ kNm, zatem:}$$

$$W_y \geq \frac{M_{Ed}}{f_y} = \frac{248,99 \cdot 10^6}{235} = 1060 \text{ cm}^3,$$

ewentualnie skorzystać z poniższej zależności na wyznaczenie wysokości przekroju:

$$h_b \geq \frac{L}{16} = \frac{6000}{16} = 375 \text{ mm.}$$

$$\text{Przyjęto dwuteownik IPE 400: } W_y = 1160 \text{ cm}^3, I_y = 23130 \text{ cm}^4.$$

Wytyczenie przekroju:

$$\frac{M_{Ed}}{W_y \cdot f_y} = \frac{248,99 \cdot 10^6}{235 \cdot 1160 \cdot 10^3} = 0,91 \leq 1,0.$$

5.2. Przyjęcie przekroju rygli dachowych R_2

Obciążenie obliczeniowe rygli:

$$p_1 = 1,35 \cdot 26,04 + 1,5 \cdot 0,5 \cdot 5,76 + 1,5 \cdot 0,6 \cdot 0,90 = 40,28 \text{ kN/m.}$$

$$p_2 = 0,85 \cdot 1,35 \cdot 26,04 + 1,5 \cdot 5,76 + 1,5 \cdot 0,6 \cdot 0,90 = 39,33 \text{ kN/m.}$$

Jako bardziej niekorzystne przyjmuje się obciążenie p_1 .

$$M_{Ed} = \alpha \cdot M_{Ed}^0, \text{ gdzie współczynnik } \alpha \text{ zależy od stosunku } B/H.$$

$$\frac{B}{H} = \frac{18,0}{14,4} = 1,25 \rightarrow \alpha = 0,9,$$

$$M_{Ed} = \alpha \cdot M_{Ed}^0 = 0,9 \cdot \frac{40,28 \cdot 6,0^2}{8} = 163,13 \text{ kNm, zatem:}$$

$$W_y \geq \frac{M_{Ed}}{f_y} = \frac{163,13 \cdot 10^6}{235} = 694 \text{ cm}^3,$$

Przyjęto dwuteownik IPE 330: $W_y = 713 \text{ cm}^3$, $I_y = 11770 \text{ cm}^4$.

Wyteżenie przekroju:

$$\frac{M_{Ed}}{W_y \cdot f_y} = \frac{163,13 \cdot 10^6}{235 \cdot 713 \cdot 10^3} = 0,974 \leq 1,0.$$

5.3. Przyjęcie przekroju słupa wewnętrznego najniższej kondygnacji S₁

Założono zmianę przekrojów słupów co dwie kondygnacje.

Obciążenie przypadające na słup wewnętrzny najniższej kondygnacji

$$\rightarrow \text{stałe } G = (3 \cdot g_{r,k1} + g_{r,k2}) \cdot L = (3 \cdot 31,62 + 26,04) \cdot 6,0 = 725,4 \text{ kN},$$

$$\rightarrow \text{zmienne użytkowe } Q = 3 \cdot q_{r,k} \cdot L = 3 \cdot 16,8 \cdot 6,0 = 302,4 \text{ kN},$$

$$\rightarrow \text{obciążenie śniegiem } S = s_k \cdot L = 5,76 \cdot 6,0 = 34,56 \text{ kN},$$

$$\rightarrow \text{parcie wiatru } W = w_{lk} \cdot L = 0,90 \cdot 6,0 = 5,4 \text{ kN}.$$

* * *

Obciążenie obliczeniowe słupa S₁:

$$P_1 = 1,35 \cdot 725,4 + 1,5 \cdot 0,7 \cdot 302,4 + 1,5 \cdot 0,5 \cdot 34,56 + 1,5 \cdot 0,6 \cdot 5,4 = 1327,59 \text{ kN},$$

$$P_2 = 0,85 \cdot 1,35 \cdot 725,4 + 1,5 \cdot 302,4 + 1,5 \cdot 0,5 \cdot 34,56 + 1,5 \cdot 0,6 \cdot 5,4 = 1316,78 \text{ kN},$$

Jako bardziej niekorzystne przyjmuje się obciążenie P₁.

Komentarz:

Analiza współczynnika wyboczeniowego słupów ram przechyłowych niestężonych prowadzi do wniosku, że jego wartość waha się w przedziale $\chi = (0,5 \div 0,8)$. Przyjęto $\chi = 0,65$.

Wstępne przyjęcie przekroju słupa z zależności:

$$A_{s1} \geq \frac{N_{c,Ed}}{\chi \cdot f_y} = \frac{1327,59 \cdot 10^3}{0,65 \cdot 235} = 86,91 \cdot 10^2 \text{ mm}^2 = 86,91 \text{ cm}^2, \text{ stąd przyjęto}$$

dwuteownik HEB 220: $A = 91 \text{ cm}^2$, $I_y = 8090 \text{ cm}^4$, $i_y = 9,43 \text{ cm}$, $i_z = 5,59 \text{ cm}$.

5.4. Przyjęcie przekroju słupa wewnętrznego na trzeciej kondygnacji S₂

Obciążenie przypadające na słup wewnętrzny trzeciej kondygnacji

$$\rightarrow \text{stałe } G = (g_{k1} + g_{k2}) \cdot L = (31,62 + 26,04) \cdot 6,0 = 345,96 \text{ kN},$$

$$\rightarrow \text{zmienne użytkowe } Q = q_k \cdot L = 16,8 \cdot 6,0 = 100,8 \text{ kN},$$

$$\rightarrow \text{obciążenie śniegiem } S = s_k \cdot L = 5,76 \cdot 6,0 = 34,56 \text{ kN},$$

$$\rightarrow \text{parcie wiatru } W = w_{lk} \cdot L = 0,90 \cdot 6,0 = 5,4 \text{ kN}.$$

* * *

Obciążenie obliczeniowe słupa S₂:

$$P_1 = 1,35 \cdot 345,96 + 1,5 \cdot 0,7 \cdot 100,8 + 1,5 \cdot 0,5 \cdot 34,56 + 1,5 \cdot 0,6 \cdot 5,4 = 603,67 \text{ kN},$$

$$P_2 = 0,85 \cdot 1,35 \cdot 345,96 + 1,5 \cdot 100,8 + 1,5 \cdot 0,5 \cdot 34,56 + 1,5 \cdot 0,6 \cdot 5,4 = 578,97 \text{ kN}.$$

Jako bardziej niekorzystne przyjmuje się obciążenie P₁.

Założono współczynnik wyboczeniowy $\chi = 0,65$.

Wstępne przyjęcie przekroju słupa z zależności:

$$A_{s2} \geq \frac{N_{c,Ed}}{\chi \cdot f_y} = \frac{603,67 \cdot 10^3}{0,65 \cdot 235} = 39,52 \cdot 10^2 \text{ mm}^2 = 39,52 \text{ cm}^2, \text{ stąd przyjęto}$$

dwuteownik HEB 160: $A = 54,3 \text{ cm}^2$, $I_y = 2492 \text{ cm}^4$, $i_y = 6,8 \text{ cm}$, $i_z = 4,05 \text{ cm}$.

5.5. Wstępne przyjęcie przekroju słupów skrajnych

5.5.1. Słup skrajny najniższej kondygnacji S₃

Wartości sił przekrojowych, które muszą być przeniesione:

$$N_{c,Ed} = \frac{1}{2} \cdot 1327,59 = 663,80 \text{ kN} + \text{ciężar ścian osłonowych},$$

$$M_{y,Ed} = 0,3 \cdot M_{Ed}^0 = 0,3 \cdot \frac{61,48 \cdot 6,0^2}{8} = 83,00 \text{ kNm}.$$

Element ściskany mimośrodowo powinien spełnić wymagania dane wzorami (6.61) i (6.62) normy PN-EN 1993-1-1.

5.5.2. Słup skrajny kondygnacji górnych S₄

Wartości sił przekrojowych, które muszą być przeniesione:

$$N_{c,Ed} = \frac{1}{2} \cdot 603,67 = 301,84 \text{ kN} + \text{ciężar ścian osłonowych},$$

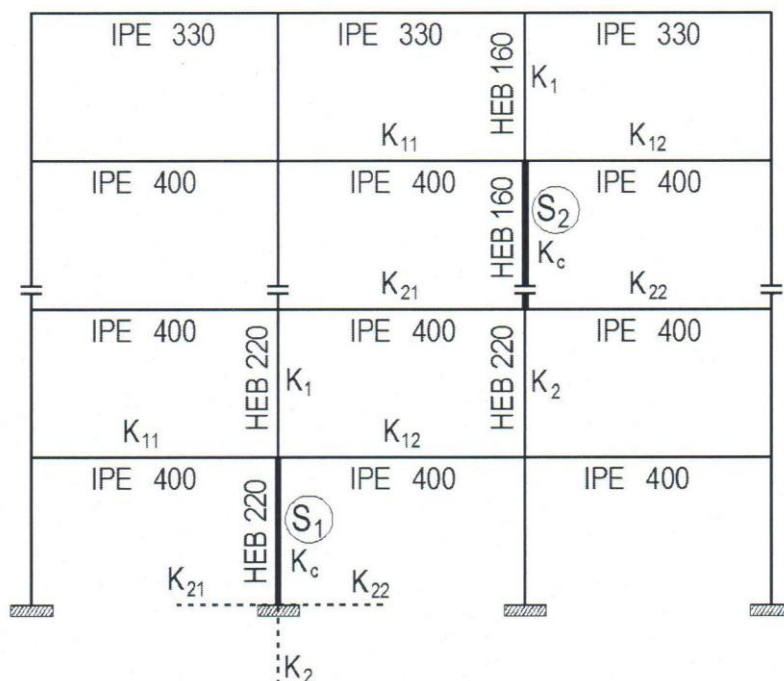
$$M_{y,Ed} = 0,15 \cdot M_{Ed}^0 = 0,15 \cdot \frac{61,48 \cdot 6,0^2}{8} = 41,50 \text{ kNm}.$$

Element ściskany mimośrodowo powinien spełnić wymagania dane wzorami (6.61) i (6.62) normy PN-EN 1993-1-1.

Komentarz:

Na tym etapie należy podać czy przekroje słupów zewnętrznych (skrajnych) mają być takie same jak słupów wewnętrznych. Dodatkowo należy zauważyć, że o podziale słupów na wysokości budynku decyduje głównie długość przesyłowa elementów wysyłkowych (za zwyczaj $L_{max} \leq 15,0 \text{ m}$).

6. Obliczenie długości wyboczeniowej słupów wg nomogramów



Rys. 13. Schemat statyczny układu poprzecznego wraz z przyjętymi kształtownikami na słupy oraz rygle; dodatkowo oznaczono współczynniki K_{ij} niezbędne do wyznaczenia długości wyboczeniowej słupów

6.1. Obliczenie długości wyboczeniowej słupa S_1

Sztywność analizowanego słupa z kształtownika HEB 220:

$$K_C = \frac{I_C}{h} = \frac{8090}{360} = 22,47 \text{ cm}^3, \text{ stąd } K_1 = K_C = 22,47 \text{ cm}^3,$$

ponadto słup jest utwierdzony w stopie fundamentowej, więc:

$K_{21} + K_{22} = K_C = 22,47 \text{ cm}^3$ oraz $K_2 = 0$, gdzie sztywność dochodzących do węzła rygli wynosi :

$$K_{11} = K_{12} = \frac{I_b}{L} = \frac{23130}{600} = 38,55 \text{ cm}^3.$$

Obliczenie współczynników rozdziału:

$$\eta_1 = \frac{K_C + K_1}{K_C + K_1 + K_{11} + K_{12}} = \frac{22,47 + 22,47}{22,47 + 22,47 + 38,55 + 38,55} = 0,368,$$

$$\eta_2 = \frac{K_C + K_2}{K_C + K_2 + K_{21} + K_{22}} = \frac{22,47 + 0}{22,47 + 0 + 22,47} = 0,5.$$

Wartość współczynnika wyboczenia, odczytana z nomogramu dla ram przechyłowych wynosi:

$\mu = f(\eta_1, \eta_2) = f(0,368, 0,5) = 1,38$. Ewentualnie skorzystać ze wzoru:

$$\mu_y = \sqrt{\frac{1 - 0,2 \cdot (\eta_1 + \eta_2) - 0,12 \cdot \eta_1 \cdot \eta_2}{1 - 0,8 \cdot (\eta_1 + \eta_2) + 0,6 \cdot \eta_1 \cdot \eta_2}} = \sqrt{\frac{1 - 0,2 \cdot (0,368 + 0,5) - 0,12 \cdot 0,368 \cdot 0,5}{1 - 0,8 \cdot (0,368 + 0,5) + 0,6 \cdot 0,368 \cdot 0,5}} = 1,391.$$

$$L_{cr,y} = \mu_y \cdot h = 1,391 \cdot 3,6 = 5,006 \text{ m},$$

$$\lambda_y = \frac{L_{cr,y}}{i_y} = \frac{5006}{103} = 53,09,$$

$$\bar{\lambda}_y = \frac{\lambda_y}{93,9} = \frac{50,45}{93,9} = 0,57,$$

$$\frac{h}{b} = 1,0 \rightarrow \text{krzywa wyboczenia "b", parametr imperfekcji } \alpha = 0,34,$$

$$\phi_y = 0,5 \cdot (1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda}_y - 0,2) + \bar{\lambda}_y^2) = 0,5 \cdot (1 + 0,34 \cdot (0,57 - 0,2) + 0,57^2) = 0,722,$$

$$\chi_y = \frac{1}{\phi_y + \sqrt{\phi_y^2 - \bar{\lambda}_y^2}} = \frac{1}{0,722 + \sqrt{0,722^2 - 0,57^2}} = 0,854.$$

* * *

Komentarz:

W kierunku podłużnym zakłada się przegubowe połączenie słupa z fundamentem oraz ryglami.

Wyboczenie względem osi z:

$$L_{cr,z} = h = 3,6m,$$

$$\lambda_z = \frac{L_{cr,z}}{i_z} = \frac{3600}{55,9} = 64,40,$$

$$\bar{\lambda}_z = \frac{\lambda_z}{93,9} = \frac{64,40}{93,9} = 0,69,$$

$$\frac{h}{b} = 1,0 \rightarrow \text{krzywa wyboczenia "c", parametr imperfekcji } \alpha = 0,49,$$

$$\phi_z = 0,5 \cdot (1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda}_z - 0,2) + \bar{\lambda}_z^2) = 0,5 \cdot (1 + 0,49 \cdot (0,69 - 0,2) + 0,69^2) = 0,854,$$

$$\chi_z = \frac{1}{\phi_z + \sqrt{\phi_z^2 - \bar{\lambda}_z^2}} = \frac{1}{0,854 + \sqrt{0,854^2 - 0,69^2}} = 0,733.$$

* * *

Sprawdzenie warunku nośności na wyboczenie

$$\frac{1,1 \cdot N_{c,Ed}}{\chi_{\min} \cdot A_{s1} \cdot f_y} = \frac{1,1 \cdot 1327,59 \cdot 10^3}{0,733 \cdot 91 \cdot 10^2 \cdot 235} = 0,932 \leq 1,0,$$

gdzie poprzez współczynnik 1,1 uwzględniono w sposób przybliżony wartość momentu zginającego w słupie.

6.2. Obliczenie długości wyboczeniowej słupa S₂

Sztywność analizowanego słupa z kształtownika HEB 160:

$$K_C = \frac{I_C}{h} = \frac{2492}{360} = 6,92 \text{ cm}^3, \text{ stąd } K_1 = K_C = 6,92 \text{ cm}^3 \text{ oraz}$$

$$K_2 = \frac{I_{yHEB220}}{h} = 22,47 \text{ cm}^3.$$

Sztywność dochodzących do węzła rygli wynosi:

Przykład P2 – rama z węzłami sztywnymi

$$K_{11} = K_{12} = K_{21} = K_{22} = \frac{I_b}{L} = \frac{23130}{600} = 38,55 \text{ cm}^3.$$

Obliczenie współczynników rozdziału:

$$\eta_1 = \frac{K_C + K_1}{K_C + K_1 + K_{11} + K_{12}} = \frac{6,92 + 6,92}{6,92 + 6,92 + 38,55 + 38,55} = 0,152,$$

$$\eta_2 = \frac{K_C + K_2}{K_C + K_2 + K_{21} + K_{22}} = \frac{6,92 + 22,47}{6,92 + 22,47 + 38,55 + 38,55} = 0,276.$$

Wartość współczynnika wyboczenia, odczytana z nomogramu dla ram przechyłowych wynosi:

$$\mu_y = f(\eta_1, \eta_2) = f(0,152, 0,276) = 1,14.$$

Ewentualnie skorzystać ze wzoru:

$$\begin{aligned} \mu_y &= \sqrt{\frac{1 - 0,2 \cdot (\eta_1 + \eta_2) - 0,12 \cdot \eta_1 \cdot \eta_2}{1 - 0,8 \cdot (\eta_1 + \eta_2) + 0,6 \cdot \eta_1 \cdot \eta_2}} = \\ &= \sqrt{\frac{1 - 0,2 \cdot (0,152 + 0,276) - 0,12 \cdot 0,152 \cdot 0,276}{1 - 0,8 \cdot (0,152 + 0,276) + 0,6 \cdot 0,152 \cdot 0,276}} = 1,154, \text{ zatem:} \end{aligned}$$

$$L_{cr,y} = \mu_y \cdot h = 1,154 \cdot 3,6 = 4,155 \text{ m},$$

$$\lambda_y = \frac{L_{cr,y}}{i_y} = \frac{4155}{68} = 61,1,$$

$$\bar{\lambda}_y = \frac{\lambda_y}{93,9} = \frac{61,1}{93,9} = 0,65,$$

$$\frac{h}{b} = 1,0 \rightarrow \text{krzywa wyboczenia "b", parametr imperfekcji } \alpha = 0,34,$$

$$\phi_y = 0,5 \cdot (1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda}_y - 0,2) + \bar{\lambda}_y^2) = 0,5 \cdot (1 + 0,34 \cdot (0,65 - 0,2) + 0,65^2) = 0,79,$$

$$\chi_y = \frac{1}{\phi_y + \sqrt{\phi_y^2 - \bar{\lambda}_y^2}} = \frac{1}{0,79 + \sqrt{0,79^2 - 0,65^2}} = 0,811.$$

* * *

Komentarz:

W kierunku podłużnym zakłada się przegubowe połączenie słupa z fundamentem oraz ryglami.

Wyboczenie względem osi z:

$$L_{cr,z} = h = 3,6 \text{ m},$$

$$\lambda_z = \frac{L_{cr,z}}{i_z} = \frac{3600}{40,5} = 88,89,$$

$$\bar{\lambda}_z = \frac{\lambda_z}{93,9} = \frac{88,89}{93,9} = 0,95,$$

$$\frac{h}{b} = 1,0 \rightarrow \text{krzywa wyboczenia "c", parametr imperfekcji } \alpha = 0,49,$$

$$\phi_z = 0,5 \cdot (1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda}_z - 0,2) + \bar{\lambda}_z^2) = 0,5 \cdot (1 + 0,49 \cdot (0,95 - 0,2) + 0,95^2) = 1,13,$$

$$\chi_z = \frac{1}{\phi_z + \sqrt{\phi_z^2 - \bar{\lambda}_z^2}} = \frac{1}{1,13 + \sqrt{1,13^2 - 0,95^2}} = 0,571.$$

* * *

Sprawdzenie warunku nośności na wyboczenie

$$\frac{1,1 \cdot N_{c,Ed}}{\chi_{\min} \cdot A_{s1} \cdot f_y} = \frac{1,1 \cdot 603,67 \cdot 10^3}{0,57 \cdot 54,3 \cdot 10^2 \cdot 235} = 0,913 \leq 1,0,$$

gdzie poprzez współczynnik 1,1 uwzględniono w sposób przybliżony wartość momentu zginającego w słupie.

7. Sprawdzenie SGU

Sprawdzenie SGU polega na weryfikacji czy przemieszczenie wierzchołka ramy, wskutek działania sił poziomych od wiatru, spełni warunek:

$$\Delta = \sum \Delta_{k,i} \leq \frac{H}{500}, \text{ gdzie } \Delta_{k,i} \text{ jest przemieszczeniem i-tego stropu.}$$

Wychylenie kondygnacji najniższej, przy słupach utwierdzonych w stopach fundamentowych oblicza się następująco:

$$\Delta_{k,i} = \frac{\sum V_{k,i} \cdot h_k^2}{12 \cdot E} \cdot \left(\frac{2}{3S_b} + \frac{1}{S_c} \right).$$

Dla kondygnacji pośredniej wychylenie wynosi:

$$\Delta_{k,i} = \frac{\sum V_{k,i} \cdot h_k^2}{12 \cdot E} \cdot \left(\frac{1}{S_c} + \frac{1}{S_b} \right), \text{ gdzie:}$$

$\sum V_{k,i}$ - suma charakterystycznych obciążeń poziomych,

h_k - wysokość kondygnacji,

S_b - sztywność rygli,

S_c - sztywność słupów.

Przyjęto, że słupy skrajne każdej kondygnacji są wykonane z takiego samego kształownika jak słupy pośrednie.

* * *

Wychylenie kondygnacji najniższej:

$$\sum V_{k,1} = 3,5 \cdot (W_{Dk} + W_{Ek}) = 3,5 \cdot (11,02 + 6,43) = 61,08 kN.$$

$$\text{Sztywność słupów HEB 220: } S_c = 4 \cdot \frac{I_c}{h} = 4 \cdot \frac{8090}{360} = 89,89 cm^3,$$

$$\text{Sztywność rygli IPE 400: } S_b = 3 \cdot \frac{I_b}{L} = 3 \cdot \frac{23130}{600} = 115,65 cm^3, \text{ zatem:}$$

$$\Delta_{k,1} = \frac{\sum V_{k,1} \cdot h_k^2}{12 \cdot E} \cdot \left(\frac{\frac{2}{3S_b} + \frac{1}{S_c}}{1 + \frac{S_c}{6S_b}} \right) =$$

$$= \frac{61,08 \cdot 10^3 \cdot 3600^2}{12 \cdot 210 \cdot 10^3} \cdot \left(\frac{\frac{2}{3 \cdot 115,65 \cdot 10^3} + \frac{1}{89,89 \cdot 10^3}}{1 + \frac{89,89 \cdot 10^3}{6 \cdot 115,65 \cdot 10^3}} \right) = 4,7 mm.$$

* * *

Wychylenie kondygnacji drugiej:

$$\sum V_{k,2} = 2,5 \cdot (W_{Dk} + W_{Ek}) = 2,5 \cdot (11,02 + 6,43) = 43,63 kN.$$

$$\text{Sztywność słupów HEB 220: } S_c = 4 \cdot \frac{I_c}{h} = 4 \cdot \frac{8090}{360} = 89,89 cm^3,$$

$$\text{Sztywność rygli IPE 400: } S_b = 3 \cdot \frac{I_b}{L} = 3 \cdot \frac{23130}{600} = 115,65^3, \text{ zatem:}$$

$$\Delta_{k,2} = \frac{\sum V_{k,2} \cdot h_k^2}{12 \cdot E} \cdot \left(\frac{1}{S_c} + \frac{1}{S_b} \right) =$$

$$= \frac{43,63 \cdot 10^3 \cdot 3600^2}{12 \cdot 210 \cdot 10^3} \cdot \left(\frac{1}{89,89 \cdot 10^3} + \frac{1}{111,65 \cdot 10^3} \right) = 4,4 mm.$$

* * *

Wychylenie kondygnacji trzeciej:

$$\sum V_{k,3} = 1,5 \cdot (W_{Dk} + W_{Ek}) = 1,5 \cdot (11,02 + 6,43) = 26,18 kN.$$

$$\text{Sztywność słupów HEB 160: } S_c = 4 \cdot \frac{I_c}{h} = 4 \cdot \frac{2492}{360} = 27,69 cm^3,$$

$$\text{Sztywność rygli IPE 400: } S_b = 3 \cdot \frac{I_b}{L} = 3 \cdot \frac{23130}{600} = 115,65 cm^3, \text{ zatem:}$$

$$\Delta_{k,3} = \frac{\sum V_{k,3} \cdot h_k^2}{12 \cdot E} \cdot \left(\frac{1}{S_c} + \frac{1}{S_b} \right) =$$

$$= \frac{26,18 \cdot 10^3 \cdot 3600^2}{12 \cdot 210 \cdot 10^3} \cdot \left(\frac{1}{27,69 \cdot 10^3} + \frac{1}{111,65 \cdot 10^3} \right) = 6,0 mm.$$

* * *

Wychylenie kondygnacji czwartej:

$$\sum V_{k,4} = 0,5 \cdot (W_{Dk} + W_{Ek}) = 0,5 \cdot (11,02 + 6,43) = 8,73 kN.$$

$$\text{Sztywność słupów HEB 160: } S_c = 4 \cdot \frac{I_c}{h} = 4 \cdot \frac{2492}{360} = 27,69 cm^3,$$

$$\text{Sztywność rygli IPE 330: } S_b = 3 \cdot \frac{I_b}{L} = 3 \cdot \frac{11770}{600} = 58,85 cm^3, \text{ zatem:}$$

Przykład P2 – rama z węzłami sztywnymi

$$\Delta_{k,4} = \frac{\sum V_{k,4} \cdot h_k^2}{12 \cdot E} \cdot \left(\frac{1}{S_c} + \frac{1}{S_b} \right) =$$

$$= \frac{8,73 \cdot 10^3 \cdot 3600^2}{12 \cdot 210 \cdot 10^3} \cdot \left(\frac{1}{27,69 \cdot 10^3} + \frac{1}{58,85 \cdot 10^3} \right) = 2,4 \text{ mm}.$$

* * *

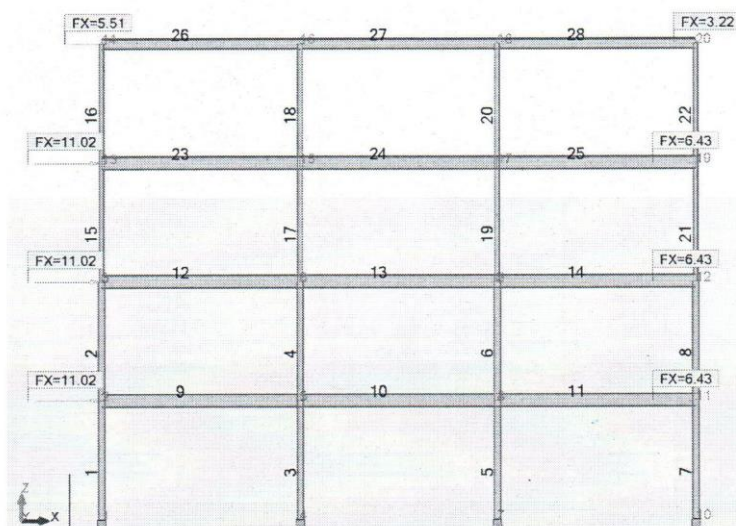
Globalny przesuw górnego wierzchołka ramy:

$$\Delta = \sum \Delta_{k,i} = 4,7 + 4,4 + 6,0 + 2,4 = 17,5 \text{ mm} \leq \frac{H}{500} = \frac{14400}{500} = 28,8 \text{ mm}.$$

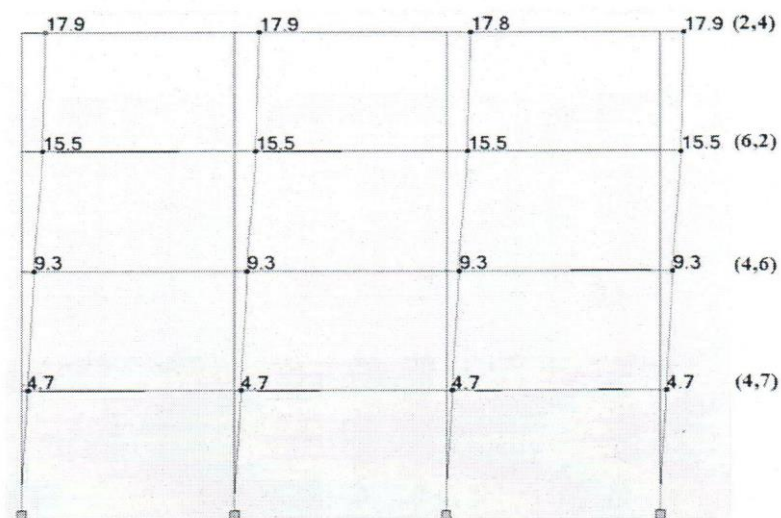
Stan graniczny użytkowości uważa się za zachowany.

* * *

Przemieszczenie konstrukcji wywołane parciem wiatru na ścianę podłużną wyznaczone programem komputerowym ROBOT



Rys. 14. Model ramy wraz z numeracją węzłów, prętów oraz przyłożonym obciążeniem poziomym



Rys. 15. Deformacja konstrukcji wskutek oddziaływania wiatru na ścianę podłużną, przemieszczenie węzłów podano w [mm] (w nawiasach podano wartości przesuwu względnego poszczególnych kondygnacji)