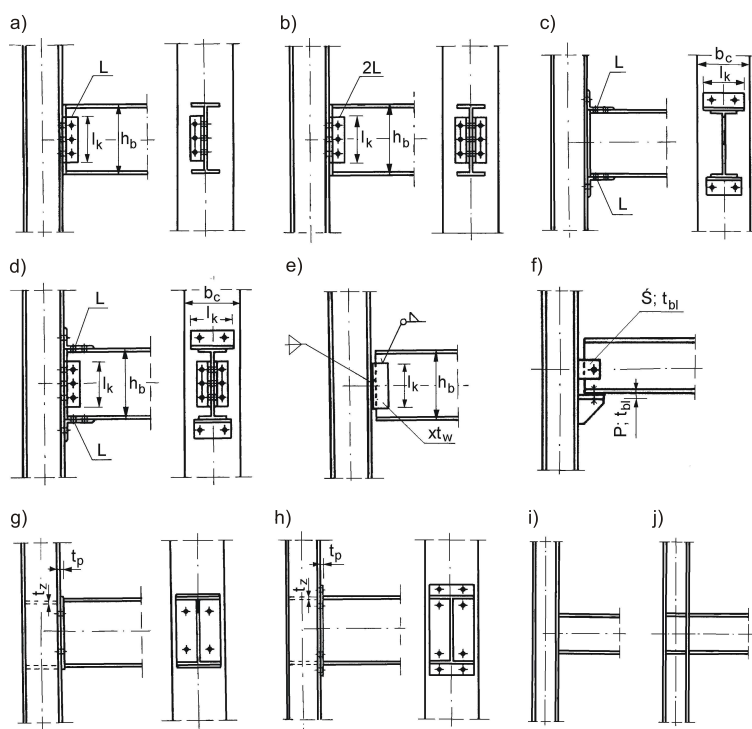


- **przyjąć typ węzła**, wg rys. 1 (zalecenie: w ramach niestężonych należy przyjmować węzły raczej "mocne", tzn. z rys. 1 g-j),



Rys. 1. Podatne węzły stalowe

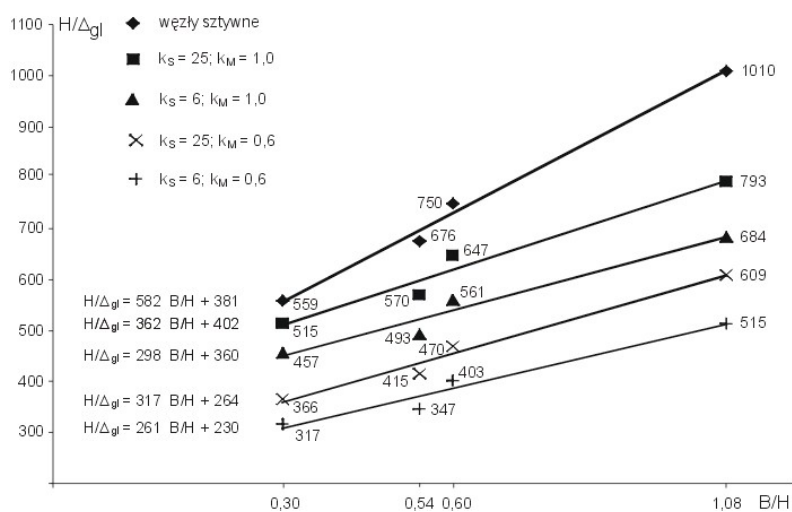
- korzystając z tabl. 1 **określić parametry węzła**, tzn. wybrać D, S lub G (zalecenie: im wyższa rama tym wyższe parametry węzła), odczytać z tabl. 1 geometryczne cechy węzła: t_p , liczba śrub itp.

Tabl. 1. Parametry stalowych węzłów podatnych

Lp.	węzły według rys.	Parametry		k _M	k _S
1	2a	D	L 60 x 6, l _k = 0,5 h _b , 3M16	0,03	0,3
		S	L 90 x 9, l _k = 0,65 h _b , 4M16	0,1	0,6
		G	L 120 x 12, l _k = 0,8 h _b , 5M20	0,16	1,1
2	2b	D	2 L 60 x 6, l _k = 0,5 h _b , 3M16	0,06	0,6
		S	2 L 90 x 9, l _k = 0,65 h _b , 4M16	0,16	1,2
		G	2 L 120 x 12, l _k = 0,8 h _b , 5M20	0,32	2,2
3	2c	D	L 80 x 8, l _k = 0,7 b _c , 2M16	0,18	2,3
		S	L 120 x 12, l _k = 0,85 b _c , 3M20	0,41	3,8
		G	L 150 x 15, l _k = b _c , 4M20	0,57	6,3
4	2d	D	P; L 80 x 8, l _k = 0,7 b _c , 2M16 Ś; 2L60 x 6, l _k = 0,5 h _b , 3M16	0,26	3,3

		S	P; L120 x 12, l _k = 0,8b _c , 3M20 Ś; 2L90 x 9, l _k = 0,6h _b , 4M20	0,45	5,7
		G	P; L150 x 15, l _k = b _c , 4M20 Ś; 2L120 x 12, l _k = 0,8h _b , 5M20	0,65	8,7
5	2e	D	t _w = 8 mm, h _w = 0,5 h _b	0,05	0,7
		S	t _w = 12 mm, h _w = 0,65 h _b	0,12	1,38
		G	t _w = 16 mm, h _w = 0,8 h _b	0,25	2,75
6	2f	D	P; t _{bl} = 8 mm, 2M16 Ś; t _{bl} = 6 mm, 2M16	0,11	1,0
		S	P; t _{bl} = 10 mm, 4M16 Ś; t _{bl} = 9 mm, 3M16	0,28	1,9
		G	P; t _{bl} = 12 mm, 4M20 Ś; t _{bl} = 12 mm, 4M20	0,37	2,75
7	2g nieuźebrowane	D	t _p = 15 mm, 4M16	0,43	6,3
		S	t _p = 20 mm, 6M20	0,55	9,9
		G	t _p = 24 mm, 6M4	0,67	12,8
8	2g uźebrowane	D	t _p =15 mm, 4M16, t _z = 15mm	0,51	7,8
		S	t _p =20 mm, 6M20, t _z = 15mm	0,65	15,5
		G	t _p = 24 mm, 6M24, t _z = 15mm	0,76	22,2
9	2 h nieuźebrowane	D	t _p = 15 mm, 6M16	0,6	10,5
		S	t _p = 20 mm, 8M20	0,83	17,9
		G	t _p = 24 mm, 8M24	0,95	21,4
10	2 h uźebrowane	D	t _p = 15 mm, 6M16, t _z =15mm	0,73	20,0
		S	t _p = 20 mm, 8M20, t _z =15mm	1,23	33,5
		G	t _p = 24 mm, 8M24, t _z =15mm	1,5	49,2
11	2 i	D	h _c < 300 mm	0,75	21,5
		G	h _c ≥ 300 mm	0,9	22,3
12	2j		t _z = 20 mm	1,23	∞

- sprawdzić wstępnie przechył ramy, według rys. 2



Rys. 2

- z tabl.2; dla liczby kondygnacji n_s stosunku B/H i wybranego typu węzła odczytać wartości sił wewnętrznych do wstępnego zwymiarowania belek i słupów,

Tablica 2. Wartości sił wewnętrznych do wstępnego wymiarowania przekrojów prętów ram **niestężonych**

Rama	Węzły według tabl. 1	Rygle		Słupy	
		$M_p = \alpha_p \cdot M_0$	$M_w = \alpha_w \cdot M_0$	M_s	N
		α_p	α_w	$[\cdot M_0]$	
$n_s = 2$ $\frac{B}{H} = 1,5 - 3,0$		0,77	0,3	0,1	$n_k q L_b$
		0,76	0,39	0,1	$n_k q L_b$
		0,71	0,46	0,1	$n_k q L_b$
	4G	0,69	0,52	0,1	$n_k q L_b$
	7G 8S 9D	0,65	0,57	0,1	$n_k q L_b$
	10D	0,61	0,66	0,1	$n_k q L_b$
	8G 9S 11D	0,57	0,71	0,1	$n_k q L_b$
	9G 11G	0,56	0,72	0,1	$n_k q L_b$
	10S 10G 12	0,48	0,82	0,1	$n_k q L_b$
$n_s = 6$ $\frac{B}{H} = 0,5$	9S	0,53	0,84	górne: 0,16 dolne: 0,4	$n_k q L_b$
	9G 11G	0,5	0,92		$n_k q L_b$
	10S 10G 12	0,41	1,1		$n_k q L_b$
$n_s = 6$ $\frac{B}{H} = 1,1$	4G	0,62	0,44	górne: 0,12 dolne 0,29	$n_k q L_b$
	7G 9D	0,52	0,67		$n_k q L_b$
	8S	0,51	0,71		$n_k q L_b$
	8G	0,5	0,72		$n_k q L_b$
	9S 10D	0,49	0,74		$n_k q L_b$
	11G	0,48	0,77		$n_k q L_b$
	9G	0,46	0,8		$n_k q L_b$
	10S 10G 12	0,44	0,92		$n_k q L_b$
$n_s = 11$ $\frac{B}{H} = 0,3$	10S 10G 12	0,32	1,75	**	$n_k q L_b$
$n_s = 11$ $\frac{B}{H} = 0,6$	10D	0,55	0,89	górne: 0,12 śr. górne: 0,29 śr. dolne: 0,42 dolne: 0,6	$n_k q L_b$
	9S	0,53	0,95		$n_k q L_b$
	11G	0,5	1,05		$n_k q L_b$
	9G	0,48	1,1		$n_k q L_b$
	10S 10G 12	0,34	1,22		$n_k q L_b$

$M_0 = 0,125 p L^2$ moment w rygla obliczony jak dla belki wolnopodpartej

M_p – moment przęsłowy,

M_w – moment przywęzłowy,

M_s – moment w słupie,

E – moduł Younga stali,

I_b – moment bezwładności belki stalowej,

L – rozpiętość belki stalowej,

n_k – liczba kondygnacji obciążających słup,

p – łączne obciążenie rygla,

* $a = 1,1$ dla górnych kondygnacji,

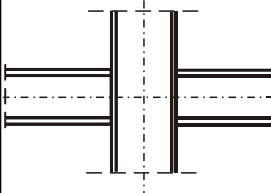
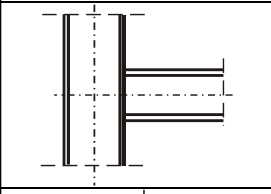
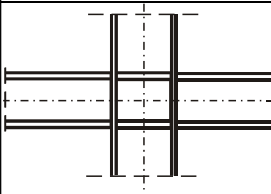
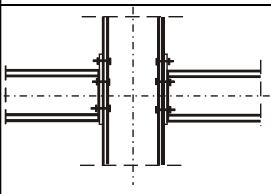
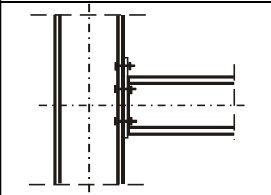
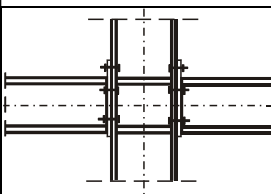
= 1,2 dla dolnych kondygnacji,

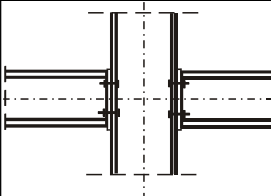
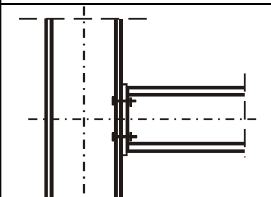
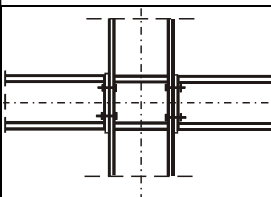
** słupy górne: 0,16, słupy środkowe górne: 0,37, słupy środkowe dolne:

0,67, słupy dolne: 1,1.

- określić nośność i sztywność węzłów; dla węzłów doczołowych wg tabl. 3

Tablica 3. Wzory do obliczania nośności i sztywności początkowej węzłów stalowych

Rysunek	Rodzaj węzła	Wzory do obliczania:	
		$M_{j,Rd}$ [kN·m]	$S_{j,ini}$ [kN·m/rad]
	Połączenie spawane dwustronne nieuzębrowane	$M_{Rd} = 8,2 \cdot 10^{-7} h_c^{0,9} h_b^{2,3} + 20$	$S_{j,ini} = 0,39 h_c^{-0,06} h_b^{2,2} + 2293$
	Połączenie spawane jednostronne nieuzębrowane	$M_{Rd} = 6,5 \cdot 10^{-7} h_c^{1,2} h_b^{2,04} + 18$	$S_{j,ini} = 0,0251 h_c^{0,82} h_b^{1,7} + 2765$
	Połączenie spawane uzebrowane	$M_{Rd} = 2,5 \cdot 10^{-4} h_b^{2,3} - 12$	$S_{j,ini} = \infty$
	Połączenie śrubowe z blachą wystającą dwustronne nieuzębrowane	$M_{Rd} = 4,8 \cdot 10^{-4} h_c^{0,24} h_b^{1,31} t_p^{0,32} d^{0,9} - 21$	$S_{j,ini} = 0,44 h_c^{-0,22} h_b^{2,10} t_p^{0,5} d^{-0,1} - 4896$
	Połączenie śrubowe z blachą wystającą jednostronne nieuzębrowane	$M_{Rd} = 7,4 \cdot 10^{-5} h_c^{0,62} h_b^{1,2} t_p^{0,4} d^{0,85}$	$S_{j,ini} = 1,5 h_c^{0,44} h_b^{1,2} t_p^{0,35} d^{0,005} - 19211$
	Połączenie śrubowe z blachą wystającą uzebrowane	$M_{Rd} = 5 \cdot 10^{-5} h_c^{0,16} h_b^{1,6} t_p^{0,36} d^{1,1}$	$S_{j,ini} = 0,0563 h_c^{-0,54} h_b^{2,49} t_p^{0,99} d^{0,09} + 12714$

	Połączenie śrubowe z blachą wpuszczoną dwustronne nieuzębrowane	$M_{Rd} = 1,4 \cdot 10^{-5} h_c^{0,09} h_b^{1,7} t_p^{0,63} d^{1,1} + 7$	$S_{j,ini} = 0,13 h_c^{-0,32} h_b^{2,3} t_p^{0,51} d^{-0,13} - 6261$
	Połączenie śrubowe z blachą wpuszczoną jednostronne nieuzębrowane	$M_{Rd} = 4,6 \cdot 10^{-5} h_c^{0,35} h_b^{1,5} t_p^{0,49} d^{0,81}$	$S_{j,ini} = 0,012 h_c^{-0,38} h_b^{2,6} t_p^{0,6} d^{-0,03} + 1074$
	Połączenie śrubowe z blachą wpuszczoną uzębrowane	$M_{Rd} = 3,4 \cdot 10^{-5} h_c^{-0,05} h_b^{1,77} t_p^{0,63} d^{0,63}$	$S_{j,ini} = 0,0355 h_c^{-0,4} h_b^{2,5} t_p^{0,75} d^{0,4} - 5377$

Lub według tablicy 4

Tablica 4. Zestawienie wzorów do szacowania nośności przy zginaniu i sztywności węzłów

Typ węzła	Gatunek stali	Nośność $M_{j,Rd}$	Sztywność początkowa $S_{j,ini}$
Skrajny (zewnątrzny), z blachą wpuszczoną	S235	$(4,3h_2 + 1,2h_3)t^2 f_y$	$\frac{h_b^2 t}{68}$
	S355	$(3,4h_2 + 2,1h_3)t^2 f_y$	
Dwustronny (wewnętrzny) z blachą wpuszczoną	S235	$(4,3h_2 + 3,7h_3)t^2 f_y$	$\frac{h_b^2 t}{39}$
	S355	$(3,4h_2 + 3,2h_3)t^2 f_y$	
Skrajny (zewnątrzny) z blachą wystającą	S235	$(2,6h_1 + 2,9h_2)t^2 f_y$	$\frac{h_b^2 t_{fc}}{40}$
	S355		
Dwustronny (wewnętrzny) z blachą wystającą	S235	$(2,6h_1 + 4,3h_2 + 1,1h_3)t^2 f_y$	$\frac{h_b^2 t}{18}$
	S355	$(2,6h_1 + 3,4h_2 + 2,0h_3)t^2 f_y$	
Styk belek, z blachą wpuszczoną	S235	$(4,3h_2 + 3,7h_3)t^2 f_y$	$\frac{h_b^2 t}{23}$
	S355	$(3,4h_2 + 3,2h_3)t^2 f_y$	

Styk belek, z blachą wystającą	S235	$(2,6h_1 + 4,3h_2 + 1,1h_3)t^2 f_y$	$\frac{h_b^2 t}{11}$
	S355	$(2,6h_1 + 3,4h_2 + 2,0h_3)t^2 f_y$	

Uwagi: h_1, h_2, h_3 – odpowiednio odległości od śrub szeregu zewnętrznego (nad pasem), pod pasem i kolejnego do środka ściskania.
 $t = \min(t_g, t_p)$.
 Nośność przy zginaniu obliczana jest w jednostkach stosownych do jednostek podstawianych do wzoru wielkości, zaś sztywność węzłów obliczana jest w [kN·m/rad], pod warunkiem wstawienia wartości wejściowych do wzoru w [mm].

- **sprawdzić**, czy przy założonych sztywnościach węzłów **spełniony jest SGU**:

Przesuw ramy jest zależny od sztywności słupów, rygli oraz podatności węzłów. Łączny przesuw kondygnacji ramy o węzłach półsztywnych wynosi:

$$\Delta_k = \frac{V h_k^2}{12E} \left(\frac{1}{S_c} + \frac{1}{S_b} + \frac{12E}{\sum S_{j,s}} \right),$$

gdzie:

$$S_c = \sum \frac{I_c}{h_k}; \quad S_b = \sum \frac{I_a}{l_b}; \quad ,$$

- **modelowanie węzłów**:

- model liniowy: $S_{j,s} = S_{j,ini} / 2$ (PN-EN 1993-1-8), lub
- model nieliniowy:

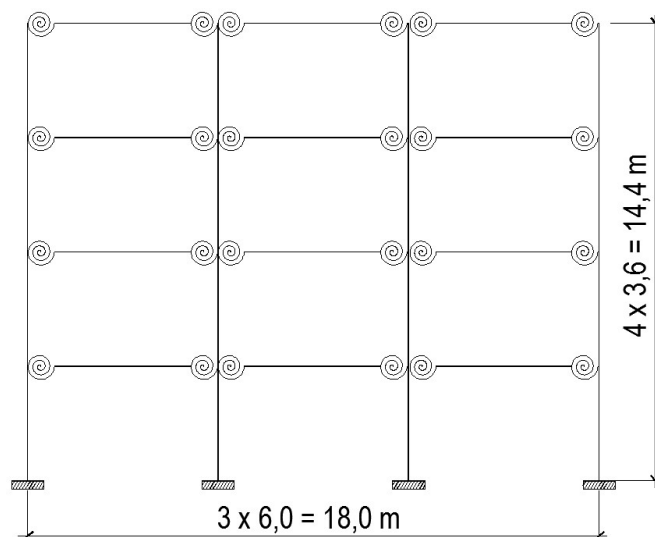
wzór Chena:

$$M = \frac{S_{j,ini} \phi}{\left\{ 1 + \left(\frac{S_{j,ini} \phi}{M_{j,Rd}} \right)^n \right\}^{\frac{1}{n}}}$$

należy obliczyć wartości M dla założonych Φ .

- **obliczenia statyczne z uwzględnieniem węzłów podatnych**

1. Schemat analizowanej ramy



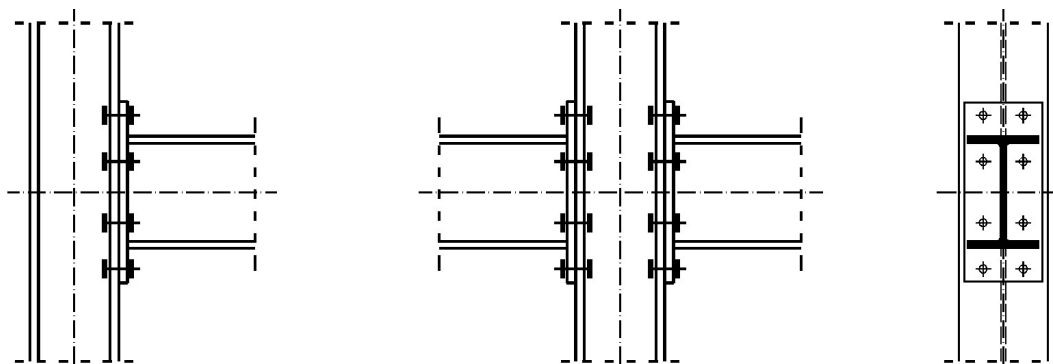
Rys. 3. Schemat statyczny poprzecznego układu nośnego z węzłami podatnymi

Rozpiętość rygla: $L = 6,0\text{ m}$,

Wysokość kondygnacji: $h_k = 3,6\text{ m}$,

Rozstaw układów nośnych: $a = 6,0\text{ m}$.

Wstępne przyjęcie węzłów



Rys. 4. Połączenia śrubowe z blachą wystającą, z czterema rzędami śrub M 20

Zastosowano połączenia śrubowe z blachą wystającą, nieuźebrowane, wg tab. 1, wiersz 9 S:

→ grubość blachy czołowej: $t_p = 20\text{ mm}$,

→ średnica i liczba śrub: 8 M 20.

2. Oddziaływania oraz kombinacje obciążeń

Zestawienia obciążeń dokonano w przykładzie P2.

3. Projektowanie wstępne

3.1 Przyjęcie przekroju rygli pośrednich R1

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 .

* * *

Wyznaczenie wartości sił przekrojowych w ryglu, wg tab. 2.

Wyznaczenie wartości współczynników α_p oraz α_w dla węzła 9 S (wartość oszacowano):

$$\frac{B}{H} = \frac{18,0}{14,4} = 1,25 \rightarrow \alpha_p = \frac{0,57 + 0,49}{2} = 0,53, \quad \alpha_w = \frac{0,71 + 0,74}{2} = 0,73.$$

Wartości momentów zginających w przęśle oraz w węźle wynoszą odpowiednio:

$$M_{p,Ed} = \alpha_p \cdot M_{Ed}^0 = 0,53 \cdot \frac{61,48 \cdot 6,0^2}{8} = 146,63 kNm,$$

$$M_{w,Ed} = \alpha_w \cdot M_{Ed}^0 = 0,73 \cdot \frac{61,48 \cdot 6,0^2}{8} = 201,96 kNm, \text{ zatem:}$$

$$W_y \geq \frac{M_{w,Ed}}{f_y} = \frac{201,96 \cdot 10^6}{235} = 859,47 cm^3,$$

Przyjęto dwuteownik IPE 360: $W_y = 904 cm^3$, $I_y = 16270 cm^4$.

Wytężenie przekroju:

$$\frac{M_{Ed}}{W_y \cdot f_y} = \frac{201,96 \cdot 10^6}{235 \cdot 904 \cdot 10^3} = 0,951 \leq 1,0.$$

3.2 Przyjęcie przekroju rygli dachowych R2

Obciążenie obliczeniowe rygli:

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

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

Jako bardziej niekorzystne przyjmuje się obciążenie p_1 .

Wyznaczenie wartości współczynników α_p oraz α_w dla węzła 9 S (wartość oszacowano):

$$\frac{B}{H} = \frac{18,0}{14,4} = 1,25 \rightarrow \alpha_p = \frac{0,57 + 0,49}{2} = 0,53, \quad \alpha_w = \frac{0,71 + 0,74}{2} = 0,73.$$

Wartości momentów zginających w przęśle oraz w węźle wynoszą odpowiednio:

$$M_{p,Ed} = \alpha_p \cdot M_{Ed}^0 = 0,53 \cdot \frac{40,28 \cdot 6,0^2}{8} = 96,08 kNm,$$

$$M_{w,Ed} = \alpha_w \cdot M_{Ed}^0 = 0,73 \cdot \frac{40,28 \cdot 6,0^2}{8} = 132,33 kNm, \text{ zatem:}$$

$$W_y \geq \frac{M_{w,Ed}}{f_y} = \frac{132,33 \cdot 10^6}{235} = 563,12 cm^3,$$

Przyjęto dwuteownik IPE 300: $W_y = 557 cm^3$, $I_y = 8360 cm^4$.

Wytężenie przekroju:

$$\frac{M_{Ed}}{W_y \cdot f_y} = \frac{132,33 \cdot 10^6}{235 \cdot 557 \cdot 10^3} \approx 1,0.$$

3.3 Przyjęcie przekroju słupa wewnętrznego najniższej kondygnacji S1

Założono zmianę przekrojów słupów co dwie kondygnacje.

Obciążenie przypadające na słup wewnętrzny najniższej kondygnacji

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

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

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

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

* * *

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.

* * *

Wartość momentu zginającego panującego w przekroju słupa najniższej kondygnacji, S₁:

→ przyjęto współczynnik jak dla budynku sześciokondygnacyjnego:

$$M_{y,Ed} = 0,29 \cdot M_{Ed}^0 = 0,29 \cdot \frac{61,48 \cdot 6,0^2}{8} = 78,73 \text{ kNm}.$$

* * *

Komentarz:

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

Ponadto słup jest elementem ściskanym mimośrodowo i powinien spełnić wymagania dane wzorami (6.61) i (6.62) normy PN-EN 1993-1-1.

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

3.4 Przyjęcie przekroju słupa wewnętrznego na trzeciej kondygnacji S₂

Obciążenie przypadające na słup wewnętrzny trzeciej kondygnacji

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

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

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

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

* * *

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.

* * *

Wartość momentu zginającego panującego w przekroju słupa na trzeciej kondygnacji, S₂:

→ przyjęto współczynnik jak dla budynku sześciokondygnacyjnego:

$$M_{y,Ed} = 0,12 \cdot M_{Ed}^0 = 0,12 \cdot \frac{61,48 \cdot 6,0^2}{8} = 32,58 \text{ kNm}.$$

* * *

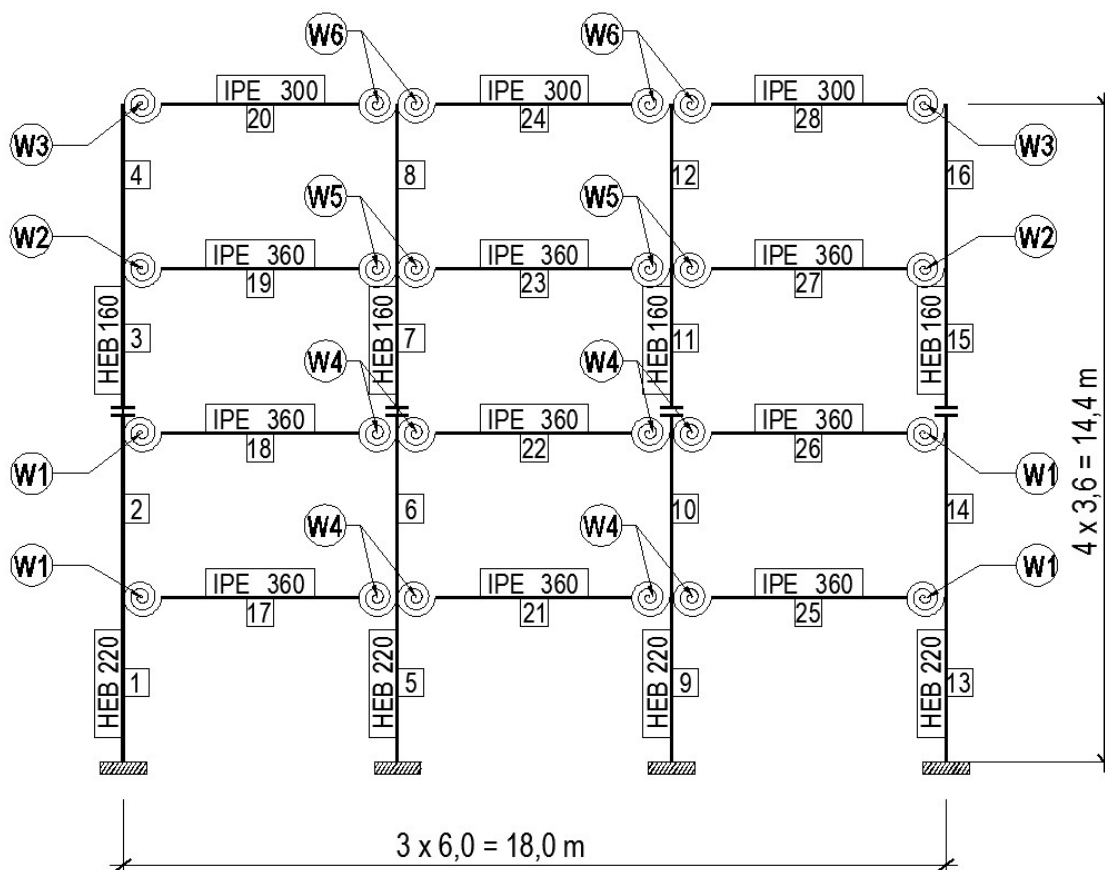
Założono współczynnik wyboczeniowy $\chi=0,65$.

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

4. Określenie sztywności i nośności początkowych węzłów



Rys. 3. Schemat ramy wraz z oznaczeniem prętów, kształtowników oraz węzłów podatnych

Obliczenie nośności i sztywności początkowej węzła W1 (według tablicy 3)

→ połączenie śrubowe z blachą wystającą, jednostronne **nieuźebrowane**,

→ słup HEB 220, rygiel IPE 360, blacha czołowa $t_p = 20 \text{ mm}$, 8 śrub M 20,

$$M_{j,Rd,1} = 7,4 \cdot 10^{-5} \cdot h_c^{0,62} \cdot h_b^{1,2} \cdot t_p^{0,4} \cdot d^{0,85} =$$

$$= 7,4 \cdot 10^{-5} \cdot 220^{0,62} \cdot 360^{1,2} \cdot 20^{0,4} \cdot 20^{0,85} = 114,0 \text{ kNm},$$

$$S_{j,ini,1} = 1,5 \cdot h_c^{0,44} \cdot h_b^{1,2} \cdot t_p^{0,35} \cdot d^{0,005} - 19211 =$$

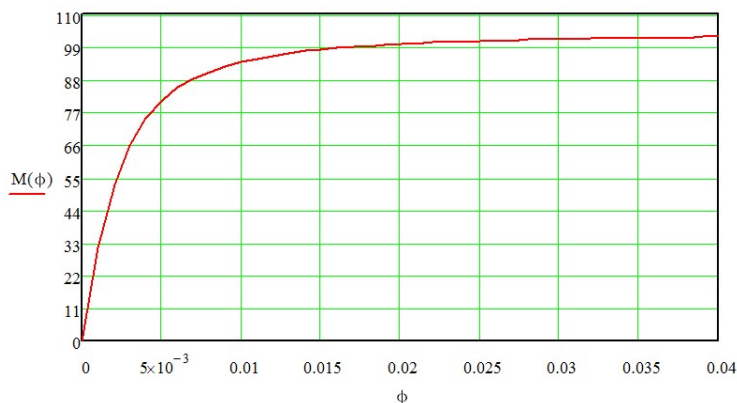
$$= 1,5 \cdot 220^{0,44} \cdot 360^{1,2} \cdot 20^{0,35} \cdot 20^{0,005} - 19211 = 35263 \text{ kNm / rad}.$$

$$k_{M,1} = \frac{M_{j,Rd,1}}{M_{b,Rd}} = \frac{114,0}{212,4} = 0,49, \quad k_{s,1} = \frac{S_{j,ini,1}}{\frac{E \cdot I_b}{L_b}} = \frac{35263 \cdot 10^6}{\frac{210 \cdot 10^3 \cdot 16270 \cdot 10^4}{6000}} = 6,2.$$

Nieliniowa charakterystyka węzła przy założeniu modelu Chena:

$$M_1(\phi) = \frac{S_{j,ini,1} \cdot \phi}{\left\{ 1 + \left(\frac{S_{j,ini,1} \cdot \phi}{M_{j,Rd,1}} \right)^n \right\}^{\frac{1}{n}}}, \text{ gdzie } n = 1,5.$$

Nieliniowa charakterystyka węzła przy założeniu modelu Chena:



Obliczenie nośności i sztywności początkowej węzła W2

→ połączenie śrubowe z blachą wystającą, jednostronne **nieuźebrowane**,

→ słup HEB 160, rygiel IPE 360, blacha czołowa $t_p = 20$ mm, 8 śrub M 20,

$$M_{j,Rd,2} = 7,4 \cdot 10^{-5} \cdot h_c^{0,62} \cdot h_b^{1,2} \cdot t_p^{0,4} \cdot d^{0,85} =$$

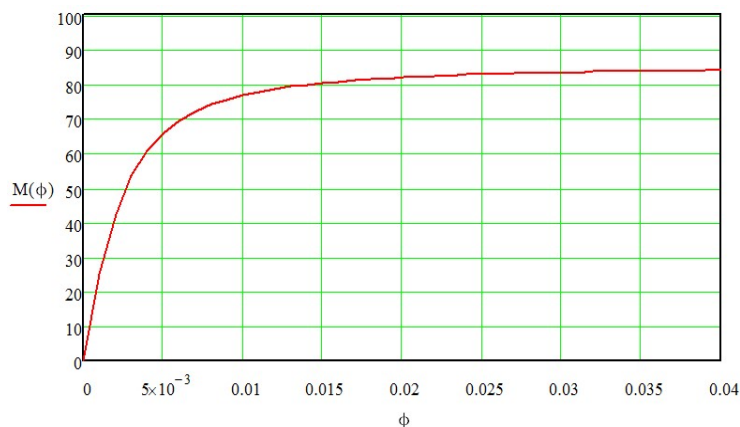
$$= 7,4 \cdot 10^{-5} \cdot 160^{0,62} \cdot 360^{1,2} \cdot 20^{0,4} \cdot 20^{0,85} = 85,0 \text{ kNm},$$

$$S_{j,ini,2} = 1,5 \cdot h_c^{0,44} \cdot h_b^{1,2} \cdot t_p^{0,35} \cdot d^{0,005} - 19211 =$$

$$= 1,5 \cdot 160^{0,44} \cdot 360^{1,2} \cdot 20^{0,35} \cdot 20^{0,005} - 19211 = 28140 \text{ kNm/rad}.$$

$$k_{M,2} = \frac{M_{j,Rd,2}}{M_{b,Rd}} = \frac{85,0}{212,4} = 0,4, \quad k_{s,2} = \frac{S_{j,ini,2}}{\frac{E \cdot I_b}{L_b}} = \frac{28140 \cdot 10^6}{\frac{210 \cdot 10^3 \cdot 16270 \cdot 10^4}{6000}} = 4,9.$$

Nieliniowa charakterystyka węzła przy założeniu modelu Chena:



Obliczenie nośności i sztywności początkowej węzła W3

→ połączenie śrubowe z blachą wystającą, jednostronne **nieuźebrowane**,

→ słup HEB 160, rygiel IPE 300, blacha czołowa $t_p = 20$ mm, 8 śrub M 20,

$$M_{j,Rd,3} = 7,4 \cdot 10^{-5} \cdot h_c^{0,62} \cdot h_b^{1,2} \cdot t_p^{0,4} \cdot d^{0,85} =$$

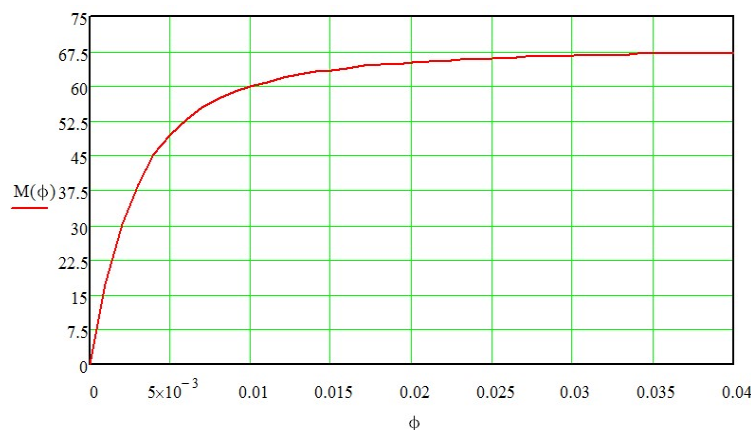
$$= 7,4 \cdot 10^{-5} \cdot 160^{0,62} \cdot 300^{1,2} \cdot 20^{0,4} \cdot 20^{0,85} = 68,3 kNm,$$

$$S_{j,ini,3} = 1,5 \cdot h_c^{0,44} \cdot h_b^{1,2} \cdot t_p^{0,35} \cdot d^{0,005} - 19211 =$$

$$= 1,5 \cdot 160^{0,44} \cdot 300^{1,2} \cdot 20^{0,35} \cdot 20^{0,005} - 19211 = 18836 kNm / rad.$$

$$k_{M,3} = \frac{M_{j,Rd,3}}{M_{b,Rd}} = \frac{68,3}{130,9} = 0,5, \quad k_{s,3} = \frac{S_{j,ini,3}}{\frac{E \cdot I_b}{L_b}} = \frac{18836 \cdot 10^6}{\frac{210 \cdot 10^3 \cdot 8360 \cdot 10^4}{6000}} = 6,4.$$

Nieliniowa charakterystyka węzła przy założeniu modelu Chena:



Obliczenie nośności i sztywności początkowej węzła W4

→ połączenie śrubowe z blachą wystającą, dwustronne **nieuźebrowane**,

→ słup HEB 220, rygiel IPE 360, blacha czołowa $t_p = 20$ mm, 8 śrub M 20,

$$M_{j,Rd,4} = 4,8 \cdot 10^{-4} \cdot h_c^{0,24} \cdot h_b^{1,31} \cdot t_p^{0,32} \cdot d^{0,9} - 21 =$$

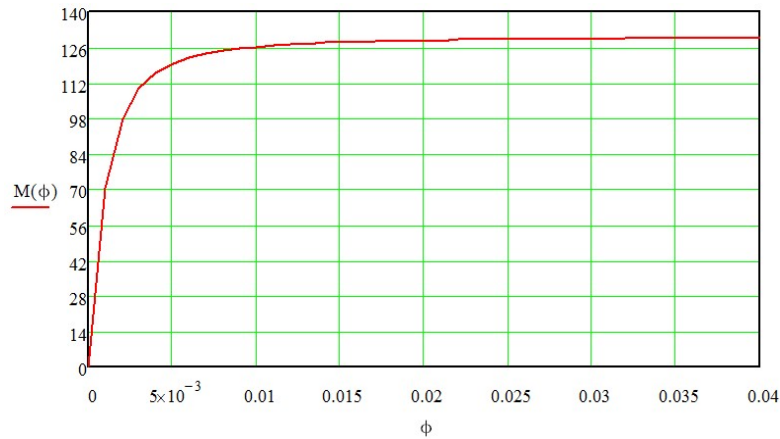
$$= 4,8 \cdot 10^{-4} \cdot 220^{0,24} \cdot 360^{1,31} \cdot 20^{0,32} \cdot 20^{0,9} - 21 = 130,2 kNm,$$

$$S_{j,ini,4} = 0,44 \cdot h_c^{-0,22} \cdot h_b^{2,1} \cdot t_p^{0,5} \cdot d^{-0,1} - 4896 =$$

$$= 0,44 \cdot 220^{-0,22} \cdot 360^{2,1} \cdot 20^{0,5} \cdot 20^{-0,1} - 4896 = 99040 kNm / rad.$$

$$k_{M,4} = \frac{M_{j,Rd,4}}{M_{b,Rd}} = \frac{130,2}{212,4} = 0,61, \quad k_{s,4} = \frac{S_{j,ini,4}}{\frac{E \cdot I_b}{L_b}} = \frac{99040 \cdot 10^6}{\frac{210 \cdot 10^3 \cdot 16270 \cdot 10^4}{6000}} = 17,4.$$

Nieliniowa charakterystyka węzła przy założeniu modelu Chena:



Obliczenie nośności i sztywności początkowej węzła W5

→ połączenie śrubowe z blachą wystającą, dwustronne **nieuźebrowane**,

→ słup HEB 160, rygiel IPE 360, blacha czołowa $t_p = 20$ mm, 8 śrub M 20,

$$M_{j,Rd,5} = 4,8 \cdot 10^{-4} \cdot h_c^{0,24} \cdot h_b^{1,31} \cdot t_p^{0,32} \cdot d^{0,9} - 21 =$$

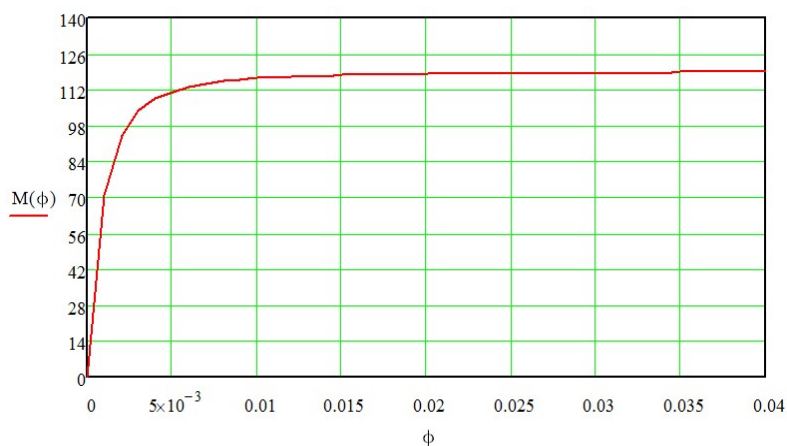
$$= 4,8 \cdot 10^{-4} \cdot 160^{0,24} \cdot 360^{1,31} \cdot 20^{0,32} \cdot 20^{0,9} - 21 = 119,04 \text{ kNm},$$

$$S_{j,ini,5} = 0,44 \cdot h_c^{-0,22} \cdot h_b^{2,1} \cdot t_p^{0,5} \cdot d^{-0,1} - 4896 =$$

$$= 0,44 \cdot 160^{-0,22} \cdot 360^{2,1} \cdot 20^{0,5} \cdot 20^{-0,1} - 4896 = 106583 \text{ kNm/rad}.$$

$$k_{M,5} = \frac{M_{j,Rd,5}}{M_{b,Rd}} = \frac{119,04}{212,4} = 0,56, \quad k_{s,5} = \frac{S_{j,ini,5}}{\frac{E \cdot I_b}{L_b}} = \frac{106583 \cdot 10^6}{\frac{210 \cdot 10^3 \cdot 16270 \cdot 10^4}{6000}} = 18,7.$$

Nieliniowa charakterystyka węzła przy założeniu modelu Chena:



Obliczenie nośności i sztywności początkowej węzła W6

→ połączenie śrubowe z blachą wystającą, dwustronne **nieuźebrowane**,

→ słup HEB 160, rygiel IPE 300, blacha czołowa $t_p = 20$ mm, 8 śrub M 20,

$$M_{j,Rd,6} = 4,8 \cdot 10^{-4} \cdot h_c^{0,24} \cdot h_b^{1,31} \cdot t_p^{0,32} \cdot d^{0,9} - 21 =$$

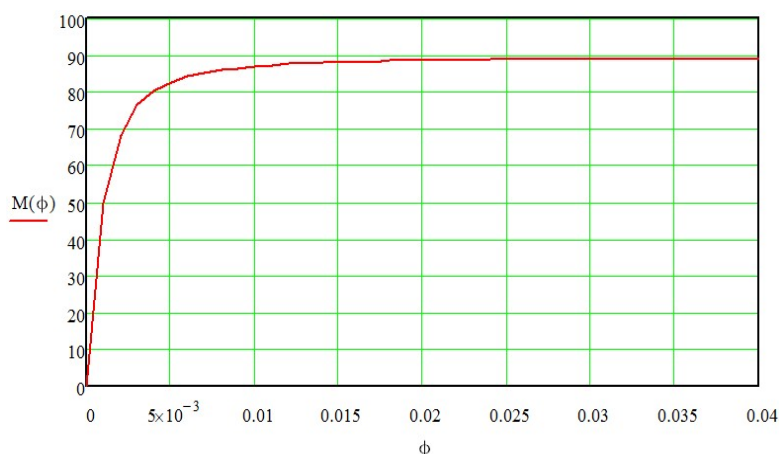
$$= 4,8 \cdot 10^{-4} \cdot 160^{0,24} \cdot 300^{1,31} \cdot 20^{0,32} \cdot 20^{0,9} - 21 = 89,3 \text{ kNm},$$

$$S_{j,ini,6} = 0,44 \cdot h_c^{-0,22} \cdot h_b^{2,1} \cdot t_p^{0,5} \cdot d^{-0,1} - 4896 =$$

$$= 0,44 \cdot 160^{-0,22} \cdot 300^{2,1} \cdot 20^{0,5} \cdot 20^{-0,1} - 4896 = 71121 \text{ kNm/rad}.$$

$$k_{M,6} = \frac{M_{j,Rd,6}}{M_{b,Rd}} = \frac{89,3}{130,9} = 0,68, \quad k_{s,6} = \frac{S_{j,ini,6}}{\frac{E \cdot I_b}{L_b}} = \frac{71121 \cdot 10^6}{\frac{210 \cdot 10^3 \cdot 8360 \cdot 10^4}{6000}} = 12,5.$$

Nieliniowa charakterystyka węzła przy założeniu Chena:



5. Sprawdzenie SGU

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

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

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

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

Dla kondygnacji pośredniej wychylenie wynosi:

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

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

h_k - wysokość kondygnacji,

S_b - sztywność rygli,

S_c - sztywność słupów,

$S_{j,s} = S_{j,ini}$ - sztywność węzłów.

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

* * *

Wychylenie kondygnacji najniższej:

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

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

$$\text{Sztywność rygli IPE 360: } S_b = 3 \cdot \frac{I_b}{L} = 3 \cdot \frac{16270}{600} = 81,35 cm^3, \text{ zatem:}$$

$$\begin{aligned} \Delta_{k,1} &= \frac{\sum V_{k,1} \cdot h_k^2}{12 \cdot E} \cdot \left(\frac{\frac{2}{3S_b} + \frac{1}{S_c}}{1 + \frac{S_c}{6S_b}} \right) = \\ &= \frac{61,08 \cdot 10^3 \cdot 3600^2}{12 \cdot 210 \cdot 10^3} \cdot \left(\frac{\frac{2}{3 \cdot 81,35 \cdot 10^3} + \frac{1}{89,89 \cdot 10^3}}{1 + \frac{89,89 \cdot 10^3}{6 \cdot 81,35 \cdot 10^3}} \right) = 5,1 mm. \end{aligned}$$

* * *

Wychylenie kondygnacji drugiej:

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

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

$$\text{Sztywność rygli IPE 360: } S_b = 3 \cdot \frac{I_b}{L} = 3 \cdot \frac{16270}{600} = 81,35 cm^3,$$

Sztywność węzłów:

$$\sum S_{j,s} = 2 \cdot S_{j,ini,1} + 4 \cdot S_{j,ini,4} = 2 \cdot 35263 + 4 \cdot 99040 = 466686 kNm / rad,$$

zatem:

$$\begin{aligned} \Delta_{k,2} &= \frac{\sum V_{k,2} \cdot h_k^2}{12 \cdot E} \cdot \left(\frac{1}{S_c} + \frac{1}{S_b} + \frac{12 \cdot E}{\sum S_{j,s}} \right) = \\ &= \frac{43,63 \cdot 10^3 \cdot 3600^2}{12 \cdot 210 \cdot 10^3} \cdot \left(\frac{1}{89,89 \cdot 10^3} + \frac{1}{81,35 \cdot 10^3} + \frac{12 \cdot 210 \cdot 10^3}{466686 \cdot 10^6} \right) = 6,5 mm. \end{aligned}$$

* * *

Wychylenie kondygnacji trzeciej:

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

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

Sztywność rygli IPE 360: $S_b = 3 \cdot \frac{I_b}{L} = 3 \cdot \frac{16270}{600} = 81,35 \text{ cm}^3$,

Sztywność węzłów:

$$\sum S_{j,s} = 2 \cdot S_{j,ini,2} + 4 \cdot S_{j,ini,5} = 2 \cdot 28140 + 4 \cdot 106583 = 134724 \text{ kNm/rad},$$

zatem:

$$\begin{aligned} \Delta_{k,3} &= \frac{\sum V_{k,3} \cdot h_k^2}{12 \cdot E} \cdot \left(\frac{1}{S_c} + \frac{1}{S_b} + \frac{12 \cdot E}{\sum S_{j,s}} \right) = \\ &= \frac{26,18 \cdot 10^3 \cdot 3600^2}{12 \cdot 210 \cdot 10^3} \cdot \left(\frac{1}{27,69 \cdot 10^3} + \frac{1}{81,35 \cdot 10^3} + \frac{12 \cdot 210 \cdot 10^3}{134724 \cdot 10^6} \right) = 7,2 \text{ mm}. \end{aligned}$$

* * *

Wychylenie kondygnacji czwartej:

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

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

Sztywność rygli IPE 300: $S_b = 3 \cdot \frac{I_b}{L} = 3 \cdot \frac{8360}{600} = 41,8 \text{ cm}^3$,

Sztywność węzłów:

$$\sum S_{j,s} = 2 \cdot S_{j,ini,3} + 4 \cdot S_{j,ini,6} = 2 \cdot 18836 + 4 \cdot 71121 = 322157 \text{ kNm/rad},$$

zatem:

$$\begin{aligned} \Delta_{k,4} &= \frac{\sum V_{k,4} \cdot h_k^2}{12 \cdot E} \cdot \left(\frac{1}{S_c} + \frac{1}{S_b} + \frac{12 \cdot E}{\sum S_{j,s}} \right) = \\ &= \frac{11,88 \cdot 10^3 \cdot 3600^2}{12 \cdot 210 \cdot 10^3} \cdot \left(\frac{1}{27,69 \cdot 10^3} + \frac{1}{41,8 \cdot 10^3} + \frac{12 \cdot 210 \cdot 10^3}{322157 \cdot 10^6} \right) = 3,0 \text{ mm}. \end{aligned}$$

* * *

Globalny przesuw górnego wierzchołka ramy:

$$\Delta = \sum \Delta_{k,i} = 5,1 + 6,5 + 7,2 + 3,0 = 21,8 \text{ mm} < \frac{H}{500} = \frac{14400}{500} = 28,8 \text{ mm}.$$

Stan graniczny użytkowalności jest spełniony.

* * *

W sposób przybliżony, sprawdzenia stanu granicznego użytkowalności ramy przechyłowej można dokonać na podstawie **rys. 2**.

Parametry węzłów analizowanej ramy o węzłach przesuwnych, wyrażone współczynnikami nośności k_M i sztywności k_S , są następujące:

W1: $k_M = 0,49$, $k_S = 6,2$,

W2: $k_M = 0,40$, $k_S = 4,9$,

W3: $k_M = 0,50$, $k_S = 6,4$,

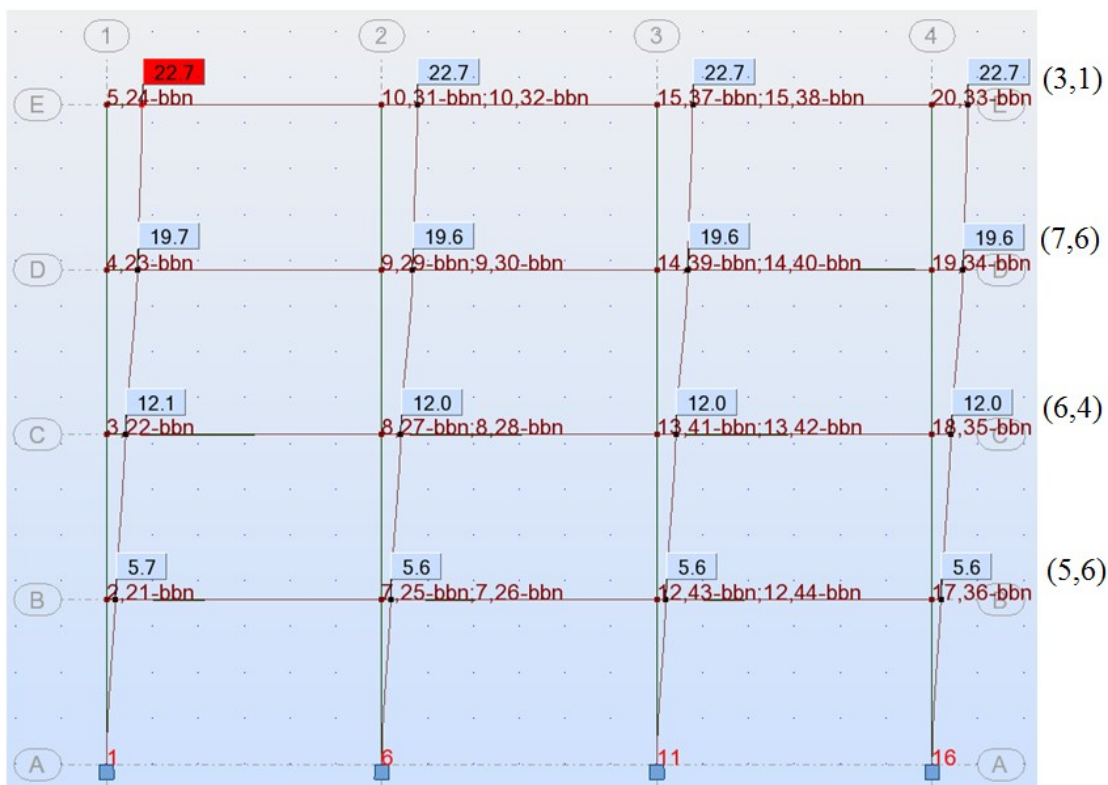
W4: $k_M = 0,61$, $k_S = 17,4$,

W5: $k_M = 0,56$, $k_S = 18,7$,

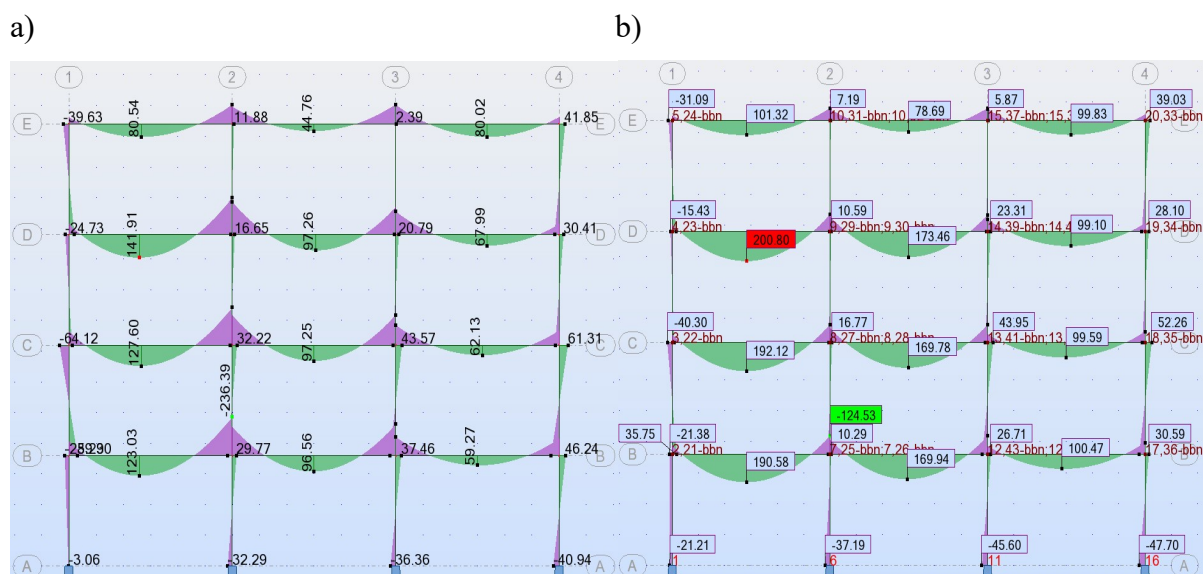
W6: $k_M = 0,68$, $k_S = 12,5$.

W odniesieniu do rys. 4, powyższe węzły można przyporządkować w przybliżeniu do węzłów o parametrach $k_M = 0,6$ i $k_S = 6,0$. W przypadku smukłości ramy $B/H = 18/14,4 = 1,25$ stan graniczny użytkowności jest zachowany.

* * *



Rys. 3. Deformacja konstrukcji wskutek oddziaływania wiatru na ścianę podłużną, przemieszczenie węzłów podano w [mm] (w nawiasach podano wartości przesuwu względnego poszczególnych kondygnacji)



Rys. 4. Porównanie wykresów momentów zginających w przypadku kombinacji obciążeń $1,35 \cdot 0,85 \cdot G + 1,5 \cdot (Q3+Q4) + 1,5 \cdot 0,5 \cdot S1 + 1,5 \cdot 0,6 \cdot (W_{e1})$ i a) węzłów sztywnych, b) węzłów podatnych