

Słup o przekroju kołowym zespolony a betonowy, żelbetowy i stalowy – obliczeniowa analiza porównawcza

Analytical comparison of composite steel-concrete column of circular cross-section and concrete, reinforced concrete and steel ones

prof. dr hab. inż. Anna Halicka (ORCID: 0000-0001-5526-8862), dr inż. Małgorzata Snela (ORCID: 0000-0003-0210-4965), Politechnika Lubelska

DOI 10.5604/01.3001.0053.6986

Streszczenie: Artykuł zawiera inżynierski przykład obliczeniowy, w którym porównano nośności obciążonych osiowo i mimośrodkowo słupów o przekroju kołowym i średnicy 320 mm i różnych długościach 3,0, 4,5 i 6,0 m. Słupy obliczano wariantowo jako betonowe, żelbetowe, stalowe rurowe oraz zespolone w postaci: rury stalowej wypełnionej betonem zbrojonym oraz rury stalowej wypełnionej betonem ze zbrojeniem sztywnym z dwuteownika. Obliczając słup zespolony obciążony mimośrodkowo, wyprowadzono wyrażenie pozwalające ustalić parametry krzywych interakcji moment – siła osiowa, bowiem w literaturze dostępne są odnośne wzory jedynie dla słupów o przekroju prostokątnym.

Słowa kluczowe: słup, słup zespolony, nośność.

Abstract: In the paper the computational example of the bearing capacity of circular columns is presented. The columns of 320 mm in diameter and different length 3,0 m, 4,5 m and 6,0 m are considered. Concrete and reinforced concrete columns, steel tubes and composite columns (steel tube with reinforced concrete inside and steel tube filled with concrete and double-T-bar inside) were calculated and compared. Leading calculations of composite column loaded with eccentricity, the expression was derived allowing the calculation of the parameters of the moment – axial force interaction curves, because in the literature the relevant expressions are available only for rectangular cross-section.

Keywords: column, composite column, bearing capacity.

1. Wprowadzenie

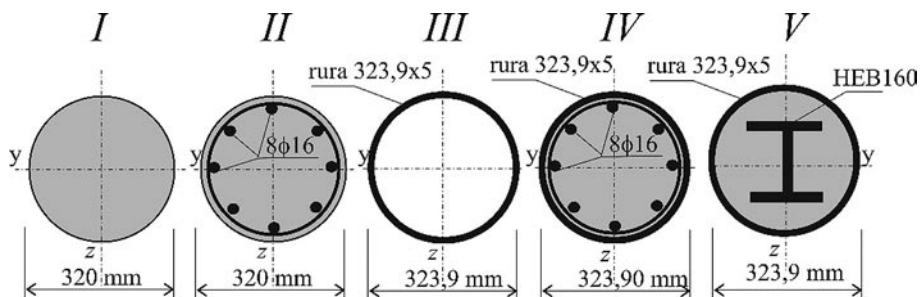
Projektant często staje przed dylematem zaprojektowania słupa o dużej nośności. Autorki postawiły za cel artykułu wykazanie, jak wybór materiału, z którego zaprojektowany zostanie słup, wpływa na jego nośność. W tym celu wykonano dość prosty przykład obliczeniowy, rozważając obciążone osiowo i mimośrodkowo słupy o przekroju kołowym: słup żelbetowy, stalową rurę oraz słupy zespolone – stalową rurę wypełnioną betonem zbrojonym oraz stalową rurę wypełnioną betonem ze sztywnym zbrojeniem z dwuteownika, wszystkie o jednakowej średnicy zewnętrznej i wariantowych długościach. Obliczając słupy zespolone, autorki stwierdziły, że w literaturze przedmiotu wzory pozwalające na obliczenie wysokości h_n niezbędnej przy określaniu parametrów krzywych interakcji „moment-siła osiowa” dostępne są jedynie dla przekrojów prostokątnych bez zbrojenia. Stąd wyprowadzono wyrażenia, które mogą służyć obliczaniu nośności słupów zespolonych zbrojonych o przekrojach kołowych.

2. Założenia do obliczeń

Analizowane przekroje pokazano na rysunku 1. Przyjęto następujące założenia obliczeniowe:

- średnica zewnętrzna 320 mm w przypadku słupa betonowego (słup I) i żelbetowego (słup II) oraz 323,9 mm w przypadku słupa stalowego (słup III) i słupów zespolonych (słupy IV i V), grubość rury słupów III, IV i V przyjęto jako równą 5 mm;
 - zbrojenie słupa żelbetowego (słup II) oraz zespolonego zbrojonego (słup IV) – 8Ø16, zbrojenie sztywne słupa zespolonego (słup V) – HEB 160;
 - wysokość osiowa słupów wariantowo: 3,0; 4,5 oraz 6,0 m; słupy podparte na obydwu końcach, a więc współczynnik długości wybocheniowej równy jest 1,0, a wysokości obliczeniowe są równe wysokościami osiowym;
 - beton we wszystkich przypadkach klasy C20/25 ($f_{ck} = 20,0$ MPa, $f_{cd} = 14,280$ MPa), stal profilowa S235 ($f_y = 235$ MPa), a stal zbrojeniowa o granicy plastyczności $f_{yk} = 500$ MPa i $f_{yd} = 434,78$ MPa;
 - efektywny współczynnik pełzania betonu w słupach I, II, IV i V $\varphi_{ef} = 1,4$;
 - obciążenie osiowe słupów 1000 kN, obciążenie momentem wariantowo 0; 40 i 80 kNm (moment liniowo zmienny wzdłuż długości słupa, momenty ekstremalne o równych wartościach i przeciwnych znakach występują na podporach).
- W przypadku słupa betonowego, zgodnie z PN-EN 1992-1-1, uwzględniono mimośród dodatkowy $e_i = l_0/400$, a także

Rys. 1. Przekroje analizowanych słupów



przyjęto, że mimośród pierwszego rzędu $e_0 = M_{Ed}/N_{Ed}$ nie może być mniejszy niż $\max\{h/30, 20 \text{ mm}\}$, a więc jest równy co najmniej 20 mm. Wpływ smukłości uwzględniono przez współczynnik Φ :

$$\Phi = 1,14 (1 - 2 e_0/h) - 0,02 \frac{l_0}{h}$$

i nie więcej niż $(1 - 2 e_0/h)$, opisujący wpływ smukłości słupa, obciążenia momentem oraz pełzania.

W przypadku słupa żelbetowego, zgodnie z PN-EN 1992-1-1, uwzględniono mimośród dodatkowy $e_i = l_0/400$, a także przyjęto, że mimośród pierwszego rzędu $e_0 = M_{Ed}/N_{Ed}$ nie może być mniejszy niż $\max\{h/30, 20 \text{ mm}\}$, a więc jest równy co najmniej 20 mm. Wpływ smukłości uwzględniono, stosując uproszczoną metodę nominalnej sztywności, mnożąc moment pierwszego rzędu M_{Ed0} przez współczynnik równy

$$\left(1 + \frac{\beta}{N_B/N_{Ed} - 1}\right)$$

(N_B – siła krytyczna). Dla wyznaczenia nośności skorzystano z krzywych interakcji „moment-siła osiowa” zamieszczonych w pracy [3].

Obliczając słup stalowy, zgodnie z PN-EN 1993-1-1, wpływ smukłości oraz imperfekcje uwzględniono przez zastosowanie współczynnika niestateczności ogólnej: współczynnika wyboczenia χ , natomiast współczynnik zwichrzenia w przypadku przekroju rurowego $\chi_{LT} = 1$.

Obliczając słupy zespolone ściskane osiowo, zgodnie z EC4-1-1, wpływ smukłości uwzględniono poprzez współczynnik χ , a w przypadku ściskania mimośrodowego zastosowano metodę uproszczoną określając współczynnik μ_d na podstawie indywidualnie sporządzonych krzywych interakcji „moment-siła osiowa”. Imperfekcje geometryczne elementów uwzględniono poprzez mimośród dodatkowy,

równy $e_i = l_0/300$ w przypadku słupa zbrojonego IV (stopień zbrojenia mniejszy niż 3%) oraz $e_i = l_0/200$ w przypadku słupa V ze zbrojeniem sztywne (zbrojenie sztywne). Efekty II rzędu uwzględniono, mnożąc moment pierwszego rzędu M_{Ed0} przez współczynnik

$$k = \left(1 + \frac{\beta}{N_{cr,eff}/N_{Ed} - 1}\right)$$

($N_{cr,eff}$ – siła krytyczna). Nie uwzględniono wpływu stateczności miejscowej ścianki, bowiem $d/t = 323,9/5 = 65$ jest mniejsze niż $90 \cdot (235/f_y) = 90 \cdot (235/235) = 90$. Wpływ skrępowania betonu może być uwzględniony jedynie, gdy $\bar{\lambda} \leq 0,5$, co eliminuje uwzględnienie skrępowania w słupach o wysokości 4,5 m oraz 6,0 m. Z kolei warunek $e < 0,1d = 0,1 \cdot 323,9 = 32 \text{ mm}$ eliminuje słupy pod analizowanym obciążeniem mimośrodowym ($e_0 = 40; 80 \text{ mm}$). Po wstępnym obliczeniu nośności osiowo ściskanych słupów IV i V stwierdzono, że przyrost ich nośności wskutek skrępowania wynosi jedynie około 1% (tak dzieje się, bowiem ścianka rury jest stosunkowo cienka). Ostatecznie więc w żadnym z przypadków obliczeniowych nie uwzględniano skrępowania betonu.

3. Wyniki obliczeń

3.1. Słup betonowy I

Procedurę i wyniki obliczeń słupa betonowego zestawiono w tabeli 1. Wynika z niej, że nośność słupa betonowego o średnicy 0,32 m i wysokości zarówno 6,0; 4,5, jak i 3,0 m jest niewystarczająca dla przeniesienia zadanych obciążeń.

Tabela 1. Procedura i wyniki obliczeń słupa betonowego

Słup betonowy I									
l_0 , m	3,0 m			4,5 m			6,0 m		
N_{Ed} , kN	1000,0			1000,0			1000,00		
$M_{Ed,sr}$ kNm	0,0	40,0	80,0	0,0	40,0	80,0	0,0	40,0	80,0
$e_0 = M_{Ed}/N_{Ed} \geq h/30$, m	0,02	0,04	0,08	0,02	0,04	0,08	0,02	0,04	0,08
e_r , m	0,0075			0,01125			0,015		
$e_{tot} = e_0 + e_r$, m	0,0275	0,0475	0,0875	0,03125	0,05125	0,09125	0,035	0,055	0,095
$(1 - 2 e_0/h)$	0,828	0,703	0,453	0,805	0,680	0,430	0,781	0,656	0,406
$\Phi = 1,14 (1 - 2 e_0/h) - 0,02 \frac{l_0}{h} \leq (1 - 2 e_0/h)$	0,756	0,614	0,329	0,636	0,494	0,209	0,516	0,373	0,088
$N_{Rd} = A_c f_{cd,pl} \Phi$, kN	695	564	302	584	453	191	473	342	80
Sprawdzenie SG: $N_{Ed} \leq N_{Rd}$	NIE	NIE	NIE	NIE	NIE	NIE	NIE	NIE	NIE

3.2. Słup żelbetowy II

Procedurę i wyniki obliczeń słupa żelbetowego zestawiono w tabeli 2. Wynika z niej, że nośność słupa żelbetowego o średnicy 0,32 m zbrojonego 8Ø16 jest wystarczająca do przeniesienia zadanego obciążenia jedynie w przypadku słupa o wysokości 3,0 m obciążonego osiowo. Dla słupów wyższych wymagane jest zwiększenie zbrojenia lub średnicy słupa, a w przypadku obciążeń momentem – zastosowanie zbrojenia niesymetrycznego.

3.3. Słup stalowy III

Procedurę i wyniki obliczeń słupa stalowego w postaci rury 323,9x5 mm (klasa 2 przekroju) przedstawiono w tabeli 3. Wynika z niej, że nośność słupów o wysokości zarówno 3,0; 4,5, jak i 6,0 m jest wystarczająca do przeniesienia założonego obciążenia osiowego, natomiast niezależnie od wysokości słupa nie jest wystarczająca do przeniesienia

złożonych momentów zginających w interakcji z tym obciążeniem osiowym.

3.4. Słupy zespolone IV i V

Warunki obliczeniowe

Warunki stanu granicznego nośności słupów zespolonych stalowo-betonowych są następujące:

- w przypadku ściskania osiowego stosunek siły osiowej N_{Ed} do nośności plastycznej słupa na ściskanie osiowe z uwzględnieniem wybočenja $\chi N_{Rd,pl}$ ma być nie większy niż 1,0 (współczynnik χ ustalany na podstawie krzywych jak dla konstrukcji stalowych):

$$\frac{N_{Ed}}{\chi N_{pl,Rd}} \leq 1,0 \tag{1}$$

- w przypadku ściskania ze zginaniem stosunek momentu zginającego działającego na słup M_{Ed} do nośności plastycznej

Tabela 2. Procedura i wyniki obliczeń słupa żelbetowego

Słup żelbetowy II									
l_0, m	3,0			4,5			6,0		
$\lambda = l_0/i$	37,50			56,25			75,00		
N_{Ed}, kN	1000,0			1000,0			1000,0		
$n = N_{Ed}/A_c f_{cd}$	0,871			0,871			0,871		
k_1	1,0			1,0			1,0		
$k_2 = n\lambda/170$	0,192			0,288			0,384		
$K_c = \frac{k_1 k_2}{1 + \phi_{ef}}$	0,08			0,120			0,160		
$EI = K_c E_{cd} I_c + K_s E_s I_s, kNm^2$	2788			3302			3816		
Siła krytyczna $N_B = \frac{\pi^2 EI}{l_0^2}, kN$	3064			1613			1049		
$\left(1 + \frac{\beta}{N_B/N_{Ed} - 1}\right), \beta = 0,82$	1,397			2,338			17,889		
$M_{Ed,s}, kNm$	0,0	40,0	80,0	0,0	40,0	80,0	0,0	40,0	80,0
$e_0 = M_{Ed}/N_{Ed} \geq h/30, m$	0,02	0,04	0,08	0,02	0,04	0,08	0,02	0,04	0,08
$M_{Ed,ost}, kNm$	20,0	40,0	80,0	20,0	40,0	80,0	2,0	40,0	80,0
e_{γ}, m	0,0075			0,01125			0,015		
$M_{Ed,i} = N_{Ed} e_{\gamma}, kNm$	7,5			11,25			15,0		
$M_{Ed0} = M_{Ed,ost} + M_{Ed,i}, kNm$	27,50	47,50	87,50	31,25	51,25	91,25	35,00	55,00	95,00
$M_{Ed} = \left(1 + \frac{\beta}{N_B/N_{Ed} - 1}\right) M_{Ed0}, kNm$	38	66	122	73	120	213	626	984	1699
Nomogram interakcji (Tablica 8.6.6 [3]) $A_c = 1 + \frac{\pi\Phi^2}{4} = 0,0803 m^2, \alpha = \frac{A_s f_{yd}}{A_c f_{cd}} = \frac{0,001608 \cdot 434780}{0,0803 \cdot 14290} = 0,457, a/H = 0,03/320 = 0,094$ dla $n = \frac{N_{Ed}}{A_c f_{cd}} = \frac{1000}{1149} = 0,871$ maksymalne $m = 0,16 \rightarrow M_{Rd} = A_c f_{cd} \Phi = 0,16 \cdot 0,0803 \cdot 14290 \cdot 0,32 = 58 kNm$									
Sprawdzenie SG: $M_{Ed} \leq M_{Rd}$	TAK	NIE	NIE	NIE	NIE	NIE	NIE	NIE	NIE

Tabela 3. Procedura i wyniki obliczeń słupa stalowego

Słup stalowy III									
l_{0r} m	3,0			4,5			6,0		
N_{Ed} kN	1000,0			1000,0			1000,0		
Ściskanie osiowe									
$N_{cr} = \frac{\pi^2}{l_0^2} EI$, kN	14667			6519			3667		
$\lambda = l_0/i_{min}$	27			40			53		
$\bar{\lambda} = \lambda/\lambda_1$	0,28			0,42			0,57		
Krzywa „a” $\rightarrow \chi$	0,98			0,95			0,90		
$N_{b,Rd} = \frac{\chi A f_y}{\gamma_{M1}}$	1154 kN			1119 kN			1060 kN		
$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} \leq 1,0$	0,87			0,89			0,94		
Spełnienie warunku SG	TAK			TAK			TAK		
Ściskanie mimośrodkowe $W_{pl} = 0,000509 \text{ m}^3 \rightarrow M_{Rd} = W_{pl} f_{yd} = 0,000509 \cdot 235000 = 118,21 \text{ kNm}$									
$C_{my} \left[1 + 0,8 \frac{N_{Ed}}{N_{Rd}} \right]$ rozkład momentu liniowo zmienny zgodnie z p. 1 $\rightarrow \Psi = -1 \rightarrow C_{my} = 0,2 < 0,4 \rightarrow C_{my} = 0,4$	0,68			0,69			0,70		
$k_{yy} = C_{my} \left[1 + (\bar{\lambda}_y - 0,2) \frac{N_{Ed}}{N_{Rd}} \right]$	0,43 < 0,78			0,48 < 0,84			0,54 < 0,92		
M_{Ed}, kNm	0,0	40,0	80,0	0,0	40,0	80,0	0,0	40,0	80,0
$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} + k_{yy} \frac{M_{Ed}}{\frac{\chi_{LT} M_{y,Rd}}{\gamma_{M1}}} \leq 1,0, \chi_{LT}=1$	0,87	1,01	1,16	0,89	1,06	1,22	0,94	1,13	1,41
Spełnienie warunku SG	TAK	NIE	NIE	TAK	NIE	NIE	TAK	NIE	NIE

słupa na zginanie $\mu_d M_{pl,Rd}$ ma być nie większy niż α_M , którego wartość zależy od gatunku stali (dla S235 $\alpha_M = 0,9$); a wartość współczynnika μ_d ustalana jest na podstawie indywidualnie sporządzonego wykresu interakcji „moment-siła osiowa”:

$$\frac{M_{Ed}}{\mu_d M_{pl,Rd}} \leq \alpha_M \quad (2)$$

W normie PN-EN 1994-1-1 podano sposób tworzenia krzywej interakcji, charakteryzując ją czterema charakterystycznymi punktami (rys. 2, tab. 4), przy czym rozkłady naprężeń odpowiadające kolejnym punktom pokazano na przykładzie przekroju kwadratowego stanowiącego obetonowany dwuteownik (rys. 2).

Rys. 2. Krzywa interakcji „moment-siła osiowa” i schematy do obliczania jej parametrów według PN-EN 1994-1-1

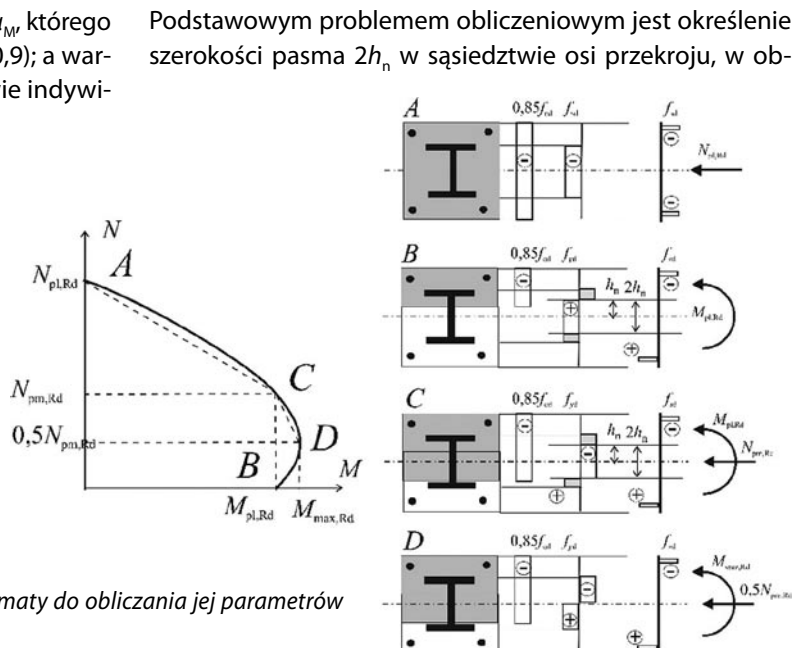


Tabela 4. Parametry charakterystycznych punktów krzywej interakcji moment – siła osiowa w słupach zespolonych według EC4-1-1

	Siła	Moment
Punkt A	$N_{pl,Rd}$ – nośność plastyczna przekroju na ściskanie	0
Punkt B	0	$M_{pl,Rd} = M_{max,Rd} - W_{pan}f_{yd} - W_{psn}f_{sd} + 0,5W_{pcn}(af_{cd})$
Punkt C	$N_{pm,Rd} = A_c(af_{cd})$	$M_{pl,Rd} = M_{max,Rd} - W_{pan}f_{yd} - W_{psn}f_{sd} + 0,5W_{pcn}(af_{cd})$
Punkt D	$0,5 N_{pm,Rd}$	$M_{max,Rd} = W_{pa}f_{yd} - W_{ps}f_{sd} + 0,5W_{pc}(af_{cd})$

W_{pcr}, W_{par}, W_{ps} – wskaźniki plastyczne dotyczące całego przekroju
 $W_{pcnr}, W_{panr}, W_{psnr}$ – wskaźniki plastyczne dotyczące części przekroju – pasma w sąsiedztwie osi o szerokości $2h_n$, obliczane względem jego krawędzi
 indeksy „c” odnoszą się do betonu, „a” do stali profilowej, „s” do stali zbrojeniowej (słup IV) lub dwuteownika (słup V)

rębie którego, w związku ze zmianą wartości siły osiowej od zera do wartości $N_{pm,Rd}$ (równej nośności na ściskanie samego betonu), następuje zmiana naprężeń w stali, zarówno profilowej jak i zbrojeniowej, od maksymalnego rozciągania do maksymalnego ściskania (zmiana o $2f_{yd}$). Zatem odległość h_n obliczyć można z równania:

$$A_c f_{cd} = 2A_{a(h_n)} f_{yd} + 2A_{s(h_n)} f_{sd} + A_{c(h_n)} f_{cd} \quad (3)$$

W literaturze przedmiotu [1, 2, 4] znaleźć można wyrażenie pozwalające obliczyć wartość h_n w przekrojach zespolonych stanowiących obetonowane dwuteowniki. W pracy [2] wykonano wprawdzie przykład słupa o przekroju kołowym, ale dla obliczenia h_n zastosowano uproszczone wyrażenie wyprowadzone dla przekroju prostokątnego, nie uwzględniające ponadto zbrojenia. Ze względu na brak odnośnych wyrażeń dla przekrojów rurowych, wyprowadzono i podano w p. 2.4.2 równania pozwalające obliczyć tę wartość w przypadku słupa w postaci rury wypełnionej zbrojonym betonem oraz rury wypełnionej betonem ze zbrojeniem sztywnym z dwuteownika.

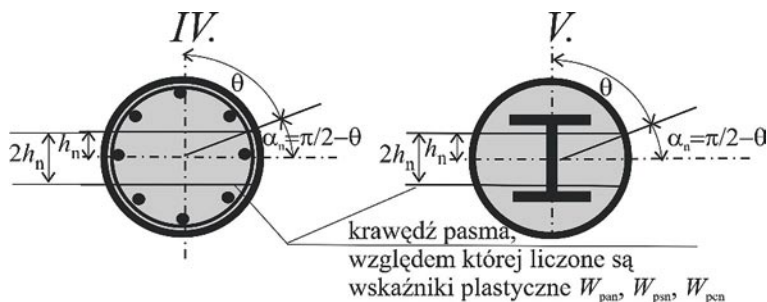
Wyrażenia pozwalające obliczyć h_n

Wartość h_n zostanie zapisana w zależności od kąta środkowego Θ znajdującego się pomiędzy osią przekroju prostopadłą do h_n , a promieniem przechodzącym przez miejsce przecięcia zewnętrznego obwodu rury i prostej znajdującej się w odległości h_n od osi symetrii przekroju (rys. 3):

$$h_n = R \sin\left(\frac{\pi}{2} - \Theta\right) \quad (4)$$

Przyjmując, że zewnętrzny promień rury wynosi R , a wewnętrzny r i zapisując pola przekroju betonu – A_{cnr} rury – A_{anr} oraz zbrojenia (w postaci dwóch

Rys. 3. Schematy geometrii analizowanych przekrojów służące do określenia wartości h_n



prętów o średnicy \varnothing w słupie IV oraz dwuteownika o polu przekroju A_{2T} i grubości środnika t_w w słupie V) – A_{snr} zawarte w paśmie wyznaczonym odległością h_n od osi symetrii, uzyskuje się równania, których niewiadomą jest kąt Θ :

- w przypadku słupa IV:

$$\pi r^2 f_{cd} = 2 \frac{\pi(R^2 - r^2)}{2} \left[1 - \frac{2\Theta}{\pi} + \frac{\sin 2\Theta}{\pi} \right] 2f_{yd} + 2 \frac{\pi \varnothing^2}{4} 2f_{sd} + 2 \frac{\pi r^2}{2} \left[1 - \frac{2\Theta}{\pi} + \frac{\sin 2\Theta}{\pi} \right] 2f_{cdr} \quad (5)$$

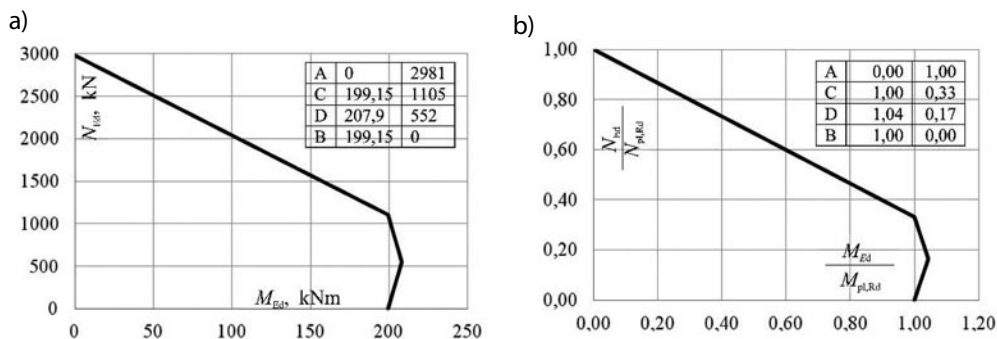
- w przypadku słupa V:

$$(\pi r^2 - A_{2T})f_{cd} = 2 \frac{\pi(R^2 - r^2)}{2} \left[1 - \frac{2\Theta}{\pi} + \frac{\sin 2\Theta}{\pi} \right] 2f_{yd} + 2R \sin\left(\frac{\pi}{2} - \Theta\right) t_w 2f_{sd} + 2 \left\{ \frac{\pi r^2}{2} \left[1 - \frac{2\Theta}{\pi} + \frac{\sin 2\Theta}{\pi} \right] - 2R \sin\left(\frac{\pi}{2} - \Theta\right) t_w \right\} f_{cd} \quad (6)$$

Wyniki obliczeń

Procedurę i wyniki obliczeń słupa zespolonego w postaci rury 323,9x5 mm wypełnionej betonem zbrojonym 8 \varnothing 16 przedstawiono w tabeli 5. Wynika z niej, że nośność słupów zespolonych o wszystkich analizowanych wysokościach jest wystarczająca do przeniesienia założonej siły osiowej. W celu sprawdzenia słupów obciążonych mimośrodowo należy sporządzić krzywe interakcji „moment-siła osiowa”, korzystając z tabeli 4. Dla ustalenia położenia punktów B i C

Rys. 4. Krzywe interakcji moment – siła osiowa dla słupa IV: a) krzywa wartości bezwzględnych, b) krzywa wartości względnych



Rys. 5. Krzywe interakcji moment – siła osiowa dla słupa V: a) krzywa wartości bezwzględnych, b) krzywa wartości względnych

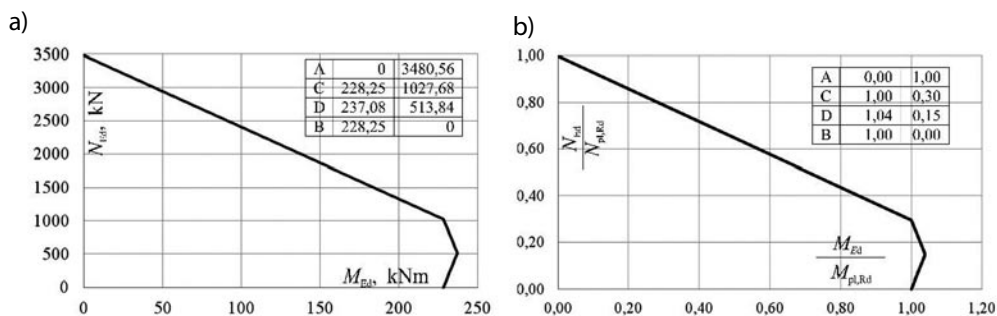


Tabela 5. Wyniki obliczeń słupa zespolonego IV

Słup zespolony IV									
l_{0r} , m	3,0			4,5			6,0		
$N_{Ed,r}$ kN	1000,0			1000,0			1000,0		
Ściskanie osiowe $N_{pl,Rd} = A_c a f_{cd} + A_s f_{yd} + A_a f_{yd} = 2980$ kN, $N_{pl,Rk} = A_c a f_{ck} + A_s f_{sd} + A_a f_{yd} = 3530$ kN									
$EI = 0,6E_{c,effc} + E_s I_s + E_s I_{s,a'}$ kN·m ²	18600			18600			18600		
$N_{cr} = \frac{\pi^2}{l_0^2} EI$	20376			9056			5094		
$\bar{\lambda} = \sqrt{N_{pl,Rk} / N_{cr}}$	0,42			0,56			0,86		
Krzywa „a” → χ	0,94			0,90			0,78		
$\frac{N_{Ed}}{\chi N_{pl,Rd}}$	0,36			0,37			0,43		
Spełnienie warunku SG	TAK			TAK			TAK		
Ściskanie mimośrodkowe $M_{pl,RD} = 199,15$ kN (rys. 4a)									
$k = \frac{\beta}{1 - N_{Ed} / N_{cr,eff}} \geq 1,0$, rozkład momentu liniowo zmienny zgodnie z p. 1 → $\beta = 0,44$	1,0			1,0			1,0		
$M_{Ed,s'}$ kNm	0,0	40,0	80,0	0,0	40,0	80,0	0,0	40,0	80,0
e_r , m	0,01			0,015			0,02		
$M_{Ed,i} = N_{Ed} e_r$ kNm	10,0			15,0			20,0		
$M_{Ed} = M_{Ed,s} + M_{Ed,i}$ kNm	10,0	50,0	90,0	15,0	55,0	95,0	20,0	60,0	100,0
$N_{Ed} / N_{pl,RD} = 1000 / 2980 = 0,34$ → z rys. 4b) $\mu_d = 1,0$	0,05	0,25	0,46	0,08	0,28	0,48	0,10	0,30	0,51
$\frac{M_{Ed}}{\mu_d M_{pl,Rd}} = \frac{M_{Ed}}{1,0 \cdot 199,15} \leq a_m = 0,9$									
Spełnienie warunku SG	TAK	TAK	TAK	TAK	TAK	TAK	TAK	TAK	TAK

niezbędne jest określenie wysokości h_n z wyrażenia (4) po uprzednim rozwiązaniu równań (5) i (6) względem kąta Θ . Kąt ten w przypadku słupa IV wynosi 1,3945 radianów ($80,05^\circ$), co oznacza $h_n = 0,028$ m i w efekcie uzyskuje się krzywe interakcji pokazane na rysunku 4. Odczytaną z rysunku 4b dla $N_{Ed}/N_{pl,Rd} = 1000/2980 = 0,34$ wartość $\mu_d = 1,0$ zastosowano do sprawdzenia warunku SG nośności w tabeli 5. W efekcie stwierdzono, że warunek SG nośności jest spełniony dla słupów zespolonych o wszystkich analizowanych wysokościach przy wszystkich zadanych obciążeniach momentowych, przy znacznych „zapasach” nośności. W przypadku słupa V kąt Θ wynosi 1,3845 radianów ($69,4^\circ$), co oznacza $h_n = 0,03$ m i w efekcie uzyskuje się krzywe interakcji pokazane na rysunku 5. Współczynnik $\mu_d = 1,0$ dla $N_{Ed}/N_{pl,Rd} = 1000/3480 = 0,29$. Obliczenia słupa V nieprzytoczone tu szczegółowo wskazują na znaczne zapasy nośności, na podobnym poziomie jak w przypadku słupa IV:

- słup obciążony osiowo: $N_{Ed}/\chi N_{pl,Rd} = 0,30, 0,32$ oraz $0,36$ odpowiednio dla wysokości 3,0 m, 4,5 m oraz 6,0 m – są to wartości uzyskane względem bardziej niekorzystnej osi „z”;
- słup obciążony momentem 40 kN: $M_{Ed}/\mu_d M_{pl,Rd} = 0,24; 0,27$ oraz $0,31$;
- słup obciążony momentem 80 kN: $M_{Ed}/\mu_d M_{pl,Rd} = 0,42; 0,45$ oraz $0,54$.

4. Podsumowanie

W wyniku obliczeń porównawczych słupów o przekroju kołowym: jednomateriałowych (beton, żelbet, stal) i słupów zespolonych wykazano, że przyrost nośności w wyniku zespolenia jest bardzo znaczny, nie tylko przy obciążeniu osiowym, ale także przy obciążeniu siłą osiową 1000 kN i momentem (alternatywnie 40 i 80 kNm).

Żaden z analizowanych słupów betonowych o średnicy 320 mm, niezależnie od wysokości, nie miał wystarczającej nośności do przeniesienia zadanych obciążeń zarówno osiowych, jak i mimośrodowych. Słup żelbetowy o tej samej średnicy i wysokości 3,0 m wykazał nośność wystarczającą do przeniesienia jedynie obciążenia osiowego

(ale słupy o wysokości 4,5 i 6,0 m przy obciążeniu osiowym mają nośność zbyt małą). Wszystkie słupy w formie rury stalowej o średnicy 323,9 mm (wysokość 3,0, 4,5 oraz 6,0 m) wykazały nośność wystarczającą do przeniesienia obciążeń osiowych, natomiast żaden nie miał nośności wystarczającej do przeniesienia założonego obciążenia mimośrodowego. Natomiast słupy zespolone ukształtowane z rury o średnicy 323,9 mm wypełnionej betonem ze zbrojeniem prętami usytuowanymi koncentrycznie lub dwuteownikiem, o wysokościach 3,0, 4,5 i 6,0 m przenoszą ze znacznymi zapasami zarówno założone obciążenie osiowe jak i mimośrodowe. Nieco większe zapasy bezpieczeństwa przy obciążeniu osiowym miały słupy zbrojone dwuteownikiem. Wykazany znaczny efekt zespolenia winien więc być wykorzystywany w projektowaniu.

Przy sprawdzaniu warunków nośności słupów zespolonych o przekrojach kołowych zgodnie z zasadami PN-EN 1994-1-1 do ustalania parametrów krzywych interakcji „moment-siła osiowa” (tab. 4) można wykorzystywać wyprowadzone przez autorki wyrażenia (4, 5, 6).

Praca dofinansowana w ramach subwencji Politechniki Lubelskiej z Funduszu Dyscypliny FD-22/IL-4/023 i FD-22/IL-4/049.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Biegus A., Projektowanie zespolonych konstrukcji stalowo-betonowych według Eurokodu 4, wykłady, Wrocław, 2012
- [2] Budownictwo ogólne. Tom 5. Stalowe konstrukcje budynków. Projektowanie według eurokodów z przykładami obliczeń, praca zbiorowa pod kierunkiem M. Giżejowskiego i J. Ziółko, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 2010
- [3] Knauff M., Obliczanie konstrukcji żelbetowych według Eurokodu 2, wydanie III, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 2018
- [4] Kucharczuk W., Labocha S., Konstrukcje zespolone stalowo-betonowe budynków, Wydawnictwo Arkady, Warszawa, 2007
- [N1] PN-EN 1992-1-1:2008: Eurokod 2: Projektowanie konstrukcji z betonu, Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków
- [N2] PN-EN 1993-1-1:2006: Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych, Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków
- [N3] PN-EN 1994-1-1:2008: Eurokod 4: Projektowanie zespolonych konstrukcji stalowo-betonowych, Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków

