

O WYMIAROWANIU ŻELBETOWYCH PRZEKROJÓW MIMOŚRODOWO ŚCISKANYCH ZBROJONYCH STAŁĄ O WYSOKIEJ WYTRZYMAŁOŚCI

Streszczenie

W artykule omówiono wybrane aspekty nośności żelbetowych przekrojów mimośrodowo ściskanych, symetrycznie zbrojonych przy zastosowaniu typowej stali zbrojeniowej (B500SP) oraz stali o wysokiej wytrzymałości (SAS 670/800). Zastosowanie stali o wysokiej wytrzymałości dotyczy głównie sytuacji projektowych, w których występują bardzo duże obciążenia osiowe lub poprzeczne. Niniejsza praca zawiera analizę predyspozycji przekrojów żelbetowych do przenoszenia obciążeń, w których zastosowano stal SAS 670/800. Uzyskane wyniki odniesiono do nośności przekrojów zbrojonych stalą zwykłą (B500SP) i wskazano na potencjalne korzyści płynące z zastosowania stali o wysokiej wytrzymałości (SAS 670/800).

WSTĘP

Są sytuacje projektowe, w których istnieje uzasadniona potrzeba zmniejszenia wymiarów przekroju poprzecznego ściskanych elementów nośnych konstrukcji. Wynika to zarówno ze względu na zużycie materiałów (betonu i stali) jak i uzyskania większej powierzchni użytkowej. Problem ten dotyczy głównie konstrukcji poddanych działaniu dużych obciążeń np.: słupy dolnych kondygnacji budynków wysokich, filary mostowe. W związku z tym zaczęto poszukiwać rozwiązania konstrukcyjne inne niż żelbetowe słupy zbrojone prętami wykonanymi ze stali zwykłej. I tak wśród sposobów kształtowania elementów konstrukcji poddanych ścisaniu pojawiły się słupy zespolone stalowo-betonowe, betonowe słupy uzwojone a w ostatnich latach słupy zbrojone stalą o wysokiej wytrzymałości (SAS).

Stalowo-betonowe słupy zespolone otrzymywane są w wyniku obetonowania lub wypełnienia betonem stalowego kształtownika. W tego rodzaju konstrukcjach ważnym elementem jest uzyskanie współpracy obu materiałów składowych w przenoszeniu naprężeń ściskających oraz lepsze wykorzystanie cech mechanicznych betonu i stali [1]. W tego typu rozwiązaniach beton stanowi usztywnienie elementu stalowego i umożliwia uzyskanie dużej nośności przy małych wymiarach przekroju poprzecznego słupa [2]. Natomiast w przypadku słupów uzwojonych wykorzystuje się fakt, że wytrzymałość betonu w stanie trójosiowego ściskania jest znacznie większa niż w stanie jednoosiowego ściskania [3]. W słupach efekt podobny do trójosiowego ściskania uzyskujemy stosując na całej wysokości zbrojenie poprzeczne w postaci spirali otaczającej pręty zbrojenia podłużnego [4, 5], co przekłada się na wzrost nośności ściskanego słupa.

Następująca w ostatnich latach zmiana trendów w budownictwie objęła również ulepszenie właściwości mechanicznych betonu i stali. Pojawiły się betony wysokowartościowe, których wytrzymałość na ścisanie przekracza 60 MPa [6]. A wraz z rozwojem technologii produkcji stali zbrojeniowej poprawie uległy także jej właściwości, takie jak wytrzymałość czy ciągliwość. W związku z tym dopuszczona została do stosowania jako zbrojenie, stal dla której charakterystyczna granica plastyczności jest w przedziale 400 ÷ 600 MPa [7], dalej określana jako stal zwykła. Oprócz tej stali na rynku pojawiła się także stal zbrojeniowa o wysokiej wytrzymałości, dla której charakterystyczna granica plastyczności wynosi 800 MPa [8, 9]. Stosowanie jej jako zbrojenie w elementach ściskanych daje w efekcie możliwość zmniejszenia wymiarów przekroju

poprzecznego elementu przy jednoczesnym zachowaniu jego nośności.

Niniejsze opracowanie zawiera analizę predyspozycji przekrojów żelbetowych do przenoszenia obciążeń, w których zastosowano stal o wysokiej wytrzymałości SAS 670/800. Uzyskane wyniki odniesiono do przekrojów zbrojonych stalą zwykłą (B500SP) i wskazano na potencjalne korzyści z zastosowania stali o wysokiej wytrzymałości.

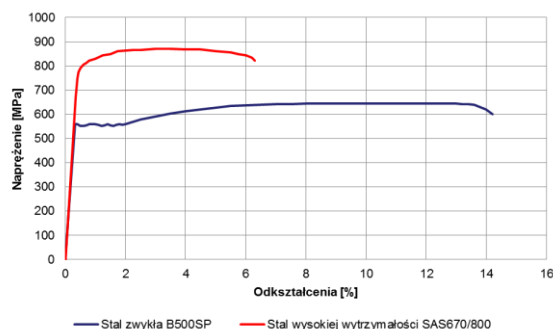
1. WŁAŚCIWOŚCI STALI O WYSOKIEJ WYTRZYMAŁOŚCI

Stal o wysokiej wytrzymałości ze względu na swoje właściwości sklasyfikowana jest jako stal zbrojeniowa, jednak w porównaniu ze stalą zwykłą charakteryzuje się lepszymi parametrami wytrzymałościowymi. W tab. 1 zostały przedstawione charakterystyki i dostępne średnice prętów zbrojeniowych dla stali zwykłej (B500SP) i o wysokiej wytrzymałości (SAS 670/800).

Tab. 1. Właściwości stali zwykłej i o wysokiej wytrzymałości [7, 8, 9]

	Stal B500SP	Stal SAS 670/800
Granica plastyczności f_{ck} [MPa]	$\geq 500 \div 625$	670
Ciągliwość f_{td}/f_{yk}	$1,15 \div 1,35$	$\geq 1,10$
Odształcenie graniczne ϵ_{uk}	$\geq 8\%$	$\geq 5\%$
Klasa stali	klasa C	klasa B
Dostępne średnice zbrojenia ϕ [mm]	6; 8; 10; 12; 14; 16; 20; 25; 28; 32; 40	18; 22; 25; 28; 30; 35; 43; 50; 57,5; 63,5

Na rys. 1 pokazano wykresy zależności naprężenie-odkształcenie dla stali zwykłej i o wysokiej wytrzymałości.



Rys. 1. Wykresy zależności naprężenie-odkształcenie dla stali zwykłej i o wysokiej wytrzymałości [10]

Porównując obydwa wykresy (rys. 1) można zaobserwować, że graniczne odkształcenie (ε_{uk}) dla stali B500SP wynosi około 14 %, a dla stali SAS 670/800 - $\varepsilon_{uk} \approx 6\%$.

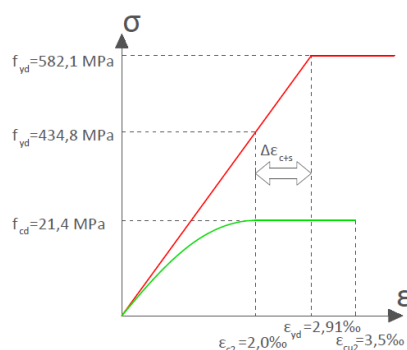
Stal o wysokiej wytrzymałości charakteryzuje się takimi samymi właściwościami jak konwencjonalna stal zbrojeniowa [10], tj.:

- wyraźną granicą plastyczności,
- spawalnością i zdolnością do gięcia (przy średnicy pręta poniżej 43 mm),
- identycznymi charakterystykami dla ściskania i rozciągania,
- wysoką ciągliwością (klasa ciągliwości B z godnie z [7]),
- wysoką odpornością na korozję zmęczeniową.

2. PRZEKROJE MIMOŚRODOWO ŚCISKANE ZBROJONE STAŁĄ O WYSOKIEJ WYTRZYMAŁOŚCI

Wymiarowanie mimośrodowo ściskanych elementów zbrojonych stalą o wysokiej wytrzymałości wykonujemy zgodnie z zaleceniami PN-EN 1992-1-1 (EC2) [7] przyjmując dla betonu zależność pomiędzy odkształceniem a naprężeniem paraboliczno-prostokątną. Należy jednak pamiętać, że stosując stal o wysokiej wytrzymałości przy obliczaniu niezbędnej ilości zbrojenia biorącej udział w przeniesieniu naprężeń w stosunku do wytycznych normy [7] istnieje kilka rozbieżności, które należy uwzględnić. Po pierwsze dozwolone skrócenie osiowe betonu można podnieść do wartości skrócenia plastycznego stali poprzez rozważenie efektów skurczu i pęcznienia [9], co daje, w stanie granicznym nośności, możliwość pełnego wykorzystania wysokiej granicy plastyczności stali przy ściskaniu. Ponadto możliwe jest zwiększenie maksymalnego stopnia zbrojenia do 20% i zmniejszenie minimalnej średnicy strzemion z $1/4$ do $1/6$ średnicy prętów zbrojenia głównego. Minimalny odstęp między prętami należy przyjąć jako maksymalny wymiar kruszywa lecz nie mniej niż 30 mm [10].

Na rysunku 2 zobrazowane zostały zależności naprężenie-odkształcenie dla betonu i stali o wysokiej wytrzymałości.



Rys. 2. Wykresy zależności naprężenie-odkształcenie dla betonu i stali SAS 670/800 (opracowanie własne na podstawie [10])

Wartości liczbowe widoczne na wykresie odnoszą się do betonu klasy C30/37, stali B500SP i stali SAS 670/800, czyli materiałów dla których wykonana została analiza nośności przedstawiona w niniejszym artykule. Odkształcenie w betonie przy osiowym ściskaniu wynosi $\varepsilon_2 = 2 \text{ ‰}$ i graniczne odkształcenie $\varepsilon_{cu} = 3,5 \text{ ‰}$ przy zginaniu lub przy mimośrodowym ściskaniu. Dla przyjętej w tym przypadku stali SAS 670/800 o $f_{yd} = 582,1 \text{ MPa}$ odkształcenie wynosi $\varepsilon_{yd} = 2,91 \text{ ‰}$. Z wykresu można odczytać, że przyrost odkształceń wywołanych skurczem i pęcznieniem betonu wynosi $\Delta\varepsilon_{c+s} = 0,91 \text{ ‰}$.

3. NOŚNOŚĆ PRZEKROJÓW MIMOŚRODOWO ŚCISKANYCH

Przyjęta w EC2 [7] zasada projektowania konstrukcji żelbetonowych opiera się na metodzie stanów granicznych nośności. Istotą tej metody jest ściśle określenie stanów granicznych, po osiągnięciu których konstrukcja ulega zniszczeniu lub uniemożliwione jest jej użytkowanie zgodnie z pierwotnym przeznaczeniem. Analiza konstrukcji sprowadza się do bezpośredniego porównywania wartości sił wewnętrznych, wywołanych działaniem oddziaływań zewnętrznych, z nośnością konstrukcji.

Zagadnienie sprawdzania nośności polega na ustaleniu, jaka może być maksymalna wartość obciążenia danego przekroju o znanej geometrii, zbrojeniu i charakterystykach materiałów. W przypadku przekrojów mimośrodowo ściskanych rozwiązanie tego zagadnienia polega na sporządzeniu krzywych interakcji $N-M$ (siła-moment) ograniczających obszar bezpiecznych kombinacji sił przekrojowych [11].

Krzywa interakcji jest to wykres o współrzędnych tworzących zbiór par sił uogólnionych w przekroju $\{M_{Rd}, N_{Rd}\}$ wszystkich możliwych realizacji stanu granicznego nośności, których współrzędne opisane są zależnością (1). Dla przekroju o wymiarach b i h mającej postać:

$$\begin{cases} N_{Rd} = A_{cc}\sigma_c + \sum_{i=1}^{n=2} A_{si}\sigma_{si} \\ M_{Rd} = A_{cc}\sigma_c z_c + \sum_{i=1}^{n=2} A_{si}\sigma_{si} (0,5h - d_i) \end{cases}, \quad (1)$$

w której N_{Rd} jest siłą podłużną, M_{Rd} jest momentem zginającym, A_{cc} jest polem powierzchni strefy ściskanej przekroju, σ_c jest naprężeniem w betonie odpowiadającym nośności betonu na ściskanie ηf_{cd} (gdzie η i f_{cd} należy przyjąć zgodnie z [7]), z_c jest ramieniem sił wewnętrznych, σ_{si} jest naprężeniem w zbrojeniu ściskanym lub rozciągającym odpowiadającym w stanie granicznym nośności obliczeniowej granicy plastyczności stali f_{yd} , d_i jest odległością środka ciężkości zbrojenia ściskanego lub rozciąganego odpowiednio od skrajnych włókien ściskanych lub rozciąganych przekroju.

Współrzędne te na wykresie przedstawiają krzywą zamkniętą, a pole ograniczone tą krzywą charakteryzuje zbiór dopuszczalnych, w danym przekroju, par sił wewnętrznych $\{M_{Rd}, N_{Rd}\}$. Im większa jest powierzchnia ograniczona przez wykres $M_{Rd} - N_{Rd}$, tym przekrój odznacza się większą nośnością. Krzywa interakcji posiada dwie charakterystyczne cechy:

- maksymalną wartość siły N_{Rd} otrzymuje się dla $M_{Ed} = 0$
- maksymalnej wartości M_{Rd} nie odpowiada zerowa wartość siły.

4. ANALIZA NOŚNOŚCI PRZEKROJÓW ZBROJONYCH STAŁĄ B500SP I SAS 670/800

Rozpatrzono przekroje kwadratowe i prostokątne zbrojone symetrycznie obciążone mimośrodowo. Punktem wyjścia było zwymiarowanie, zgodnie z zaleceniami [7], przekrojów zbrojonych stalą zwykłą (B500SP), dla której wartość obliczeniowej granicy plastyczności wynosi $f_{yd} = 434,8 \text{ MPa}$. Przy założonym obciążeniu w postaci momentu zginającego $M_{Ed} = 620 \text{ kNm}$ i siły podłużnej $N_{Ed} = 12000 \text{ kN}$ wyznaczono wymiary przekroju betonowego (b , h) i powierzchnię stali zbrojeniowej (A_s). Następnym krokiem było, bez zmiany wymiarów przekroju betonu, wyznaczenie pola powierzchni zbrojenia w przypadku zastosowania prętów SAS 670/800 o obliczeniowej granicy plastyczności $f_{yd} = 582,1 \text{ MPa}$ oraz procentowego

($\rho = \frac{A_{s1}}{bh} \cdot 100\%$) udziału stali w przeniesieniu obciążeń. Dla wszystkich analizowanych przypadków zastosowano beton klasy C30/37 o $f_{cd} = 21,43$ MPa.

Uzyskane wyniki zestawiono w tab. 2 dla przekroju kwadratowego i w tab. 3 a dla prostokątnego.

Tab. 2. Zestawienie wyników wymiarowania przekrojów kwadratowych symetrycznie zbrojonych

Zbrojenie B500SP		Zbrojenie SAS 670/800	
Przekrój SK1		Przekrój SK2	
Wymiary przekroju	65x65 cm	Wymiary przekroju	65x65 cm
Klasa betonu	C30/37	Klasa betonu	C30/37
Zbrojenie	20 ϕ 32	Zbrojenie	6 ϕ 50
ρ [%]	3,81	ρ [%]	2,79

Tab. 3. Zestawienie wyników wymiarowania przekrojów prostokątnych symetrycznie zbrojonych

Zbrojenie B500SP		Zbrojenie SAS 670/800	
Przekrój SP1		Przekrój SP2	
Wymiary przekroju	55x75 cm	Wymiary przekroju	55x75 cm
Klasa betonu	C30/37	Klasa betonu	C30/37
Zbrojenie	20 ϕ 32	Zbrojenie	6 ϕ 50
ρ [%]	3,90	ρ [%]	2,86

Kolejnym etapem analizy było przeprowadzenie, dla elementów zbrojonych stalą o wysokiej wytrzymałości (SK2 i SP2), minimalizacji wymiarów przekroju betonowego. Uzyskane rezultaty dla przekrojów kwadratowych zestawiono w tab. 4, a dla prostokątnych w tab. 5.

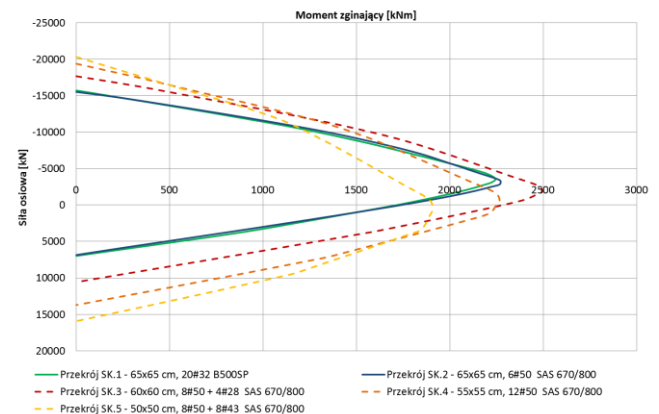
Tab. 4. Zestawienie wyników uzyskanych dla przekrojów kwadratowych symetrycznie zbrojonych przy minimalizacji przekroju poprzecznego elementu

Zbrojenie wysokiej wytrzymałości SAS 670/800					
Minimalizacja wymiarów przekroju					
Przekrój SK3		Przekrój SK4		Przekrój SK5	
Wymiary przekroju	60x60 cm	Wymiary przekroju	55x55 cm	Wymiary przekroju	50x50 cm
Klasa betonu	C30/37	Klasa betonu	C30/37	Klasa betonu	C30/37
Zbrojenie	8 ϕ 50+4 ϕ 28	Zbrojenie	12 ϕ 50	Zbrojenie	8 ϕ 50+8 ϕ 43
ρ [%]	5,05	ρ [%]	7,79	ρ [%]	10,93

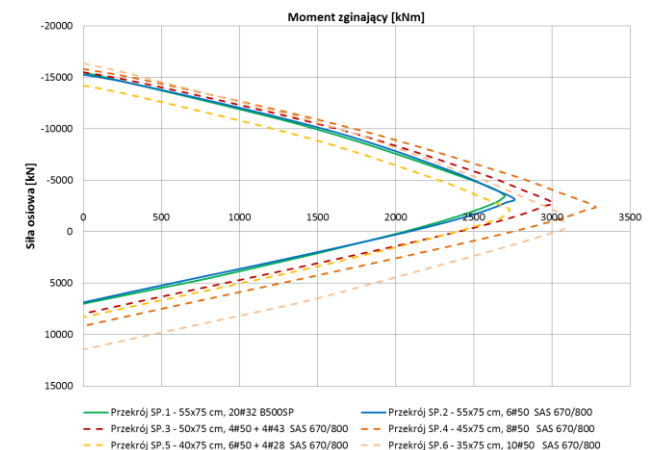
Tab. 5. Zestawienie wyników uzyskanych dla przekrojów prostokątnych symetrycznie zbrojonych przy minimalizacji przekroju poprzecznego elementu

Zbrojenie wysokiej wytrzymałości SAS 670/800					
Minimalizacja wymiarów przekroju					
Przekrój SP3		Przekrój SP4		Przekrój SP5	
Wymiary przekroju	50x75 cm	Wymiary przekroju	45x75 cm	Wymiary przekroju	40x75 cm
Klasa betonu	C30/37	Klasa betonu	C30/37	Klasa betonu	C30/37
Zbrojenie	4 ϕ 50+4 ϕ 43	Zbrojenie	8 ϕ 50	Zbrojenie	6 ϕ 50+4 ϕ 28
ρ [%]	3,64	ρ [%]	4,65	ρ [%]	4,75
					Przekrój SP6
					Wymiary przekroju
					35x75 cm
					Klasa betonu
					C30/37
					Zbrojenie
					10 ϕ 50
					ρ [%]
					7,48

Dla wszystkich analizowanych przekrojów w celu oceny nośności sporządzono wykresy krzywych interakcji siły osiowej i momentu zginającego. Krzywe interakcji $N-M$ zostały stworzone przy wykorzystaniu programu INCA2 [12] przeznaczonym do obliczania przekrojów betonowych poddanych działaniu dwuosowego zginania z udziałem siły podłużnej. Obliczenia zostały wykonane zgodnie z zasadami analizy nieliniowej, gdzie zależność $\sigma_c - \varepsilon_c$ dla betonu jest opisana wykresem paraboliczno-prostokątnym. Na rys. 3 przedstawiono krzywe interakcji dla przekrojów kwadratowych a na rys. 4 dla przekrojów prostokątnych.



Rys. 3. Krzywe interakcji M-N dla przekrojów kwadratowych symetrycznie zbrojonych



Rys. 4. Krzywe interakcji M-N dla przekrojów prostokątnych symetrycznie zbrojonych

W celu łatwiejszego porównania wszystkie uzyskane wyniki zestawiono w tab. 6 dla przekrojów kwadratowych i w tab. 7 dla przekrojów prostokątnych. W tablicach zostały także podane wskaźniki ilości zużytych materiałów (betonu i stali) potrzebnych do wykonania 1 metra bieżącego słupa o wskazanej geometrii oraz rodzaju i ilości zużytego zbrojenia.

Tab. 6. Zestawienie parametrów dla przekrojów kwadratowych symetrycznie zbrojonych

Rodzaj zbrojenia	Przekrój	Wymiary przekroju $b \times h$ [cm]	Rodzaj zbrojenia	Stopień zbrojenia [%]	Ilość zużytego betonu na 1 mb słupa w [m ³]	Ilość zużytej stali na 1 mb słupa w [kg]	Zmiana ilości zużytego betonu na 1 mb słupa w [%]	Zmiana ilości zużytej stali na 1 mb słupa w [%]
Zbrojenie B500SP	SK1	65×65	20 ϕ 32	3,81	0,42	126,20	-	-
Zbrojenie SAS 670/800	SK2	65×65	6 ϕ 50	2,79	0,42	92,40	0,00	-26,78
	SK3	60×60	8 ϕ 50 + 4 ϕ 28	5,05	0,36	142,52	-14,79	12,93
	SK4	55×55	12 ϕ 50	7,79	0,30	184,80	-28,40	46,43
	SK5	50×50	8 ϕ 50 + 8 ϕ 43	10,93	0,25	214,40	-40,83	69,89

(-) oznacza spadek wartości, (+) oznacza wzrost wartości

Tab. 7. Zestawienie parametrów dla przekrojów prostokątnych symetrycznie zbrojonych

Rodzaj zbrojenia	Przekrój	Wymiary przekroju $b \times h$ [cm]	Rodzaj zbrojenia	Stopień zbrojenia [%]	Ilość zużytego betonu na 1 mb słupa w [m ³]	Ilość zużytej stali na 1 mb słupa w [kg]	Zmiana ilości zużytego betonu na 1 mb słupa w [%]	Zmiana ilości zużytej stali na 1 mb słupa w [%]
Zbrojenie B500SP	SP1	55×75	20 ϕ 32	3,90	0,41	126,20	-	-
Zbrojenie SAS 670/800	SP2	55×75	6 ϕ 50	2,86	0,41	92,40	0,00	-26,78
	SP3	50×75	4 ϕ 50 + 4 ϕ 43	3,64	0,38	107,20	-9,09	-15,06
	SP4	45×75	8 ϕ 50	4,65	0,34	123,20	-18,18	-2,38
	SP5	40×75	6 ϕ 50 + 4 ϕ 28	4,75	0,30	111,72	-27,27	-11,47
	SP6	35×75	10 ϕ 50	7,48	0,26	154,00	-36,36	22,03

(-) oznacza spadek wartości, (+) oznacza wzrost wartości

WNIOSKI

Analizując krzywe interakcji (rys. 3 i rys. 4) można zaobserwować, że przekroje o większych odległościach pomiędzy środkami ciężkości zbrojenia ściskanego i rozciąganego charakteryzują się większą dopuszczalną wartością momentu zginającego przenoszonoego przez przekrój (przekroje SK3, SK4, SP3, SP4, SP6). W tym przypadku wykres interakcji $N-M$ ulega wydłużeniu wzdłuż osi opisującej moment zginający. Na zakres dopuszczalnych wartości sił przekrojowych wpływ ma również ilość i rodzaj stali zbrojeniowej. Zwiększoną nośność osiąga się w przypadku zastosowania większej ilości stali i o wyższej granicy plastyczności.

W przypadku przekrojów kwadratowych po zmniejszeniu pola powierzchni przekroju betonowego o 15% (przekrój SK3, w tab. 4 i w tab. 6) zauważalne jest znaczne zwiększenie obszaru bezpiecznego kombinacji sił przekrojowych. Następuje wydłużenie wykresu wzdłuż osi opisującej moment zginający i jego rozszerzenie wzdłuż osi opisującej siłę podłużną (rys. 3). Kolejna redukcja wymiarów przekroju pociąga za sobą znaczący wzrost pola powierzchni zbrojenia (prawie o 50%), (przekrój SK4 w tab. 4) ale nie wpływa negatywnie na zmianę nośności. W tym przypadku następuje zwiększenie nośności w zakresie działającej siły podłużnej, co jest widoczne na wykresie (rys. 3). Dalsza minimalizacja wymiarów przekroju

(przekrój SK5) nie przynosi spodziewanych korzyści. Następuje znaczny wzrost ilości wymaganego zbrojenia i obserwowany jest spadek nośności w zakresie działającego momentu zginającego. Jedynie zakres dopuszczalnej siły podłużnej ulega zwiększeniu.

Lepsze efekty przynoszą natomiast próby minimalizacji wymiarów przekroju prostokątnego. Trzy kolejne zmiany wymiarów przekroju skutkują zmniejszeniem zużycia zarówno betonu jak i stali (tab. 5 i tab. 7). Zaobserwowano wzrost nośności przekrojów SP3, SP4 i SP6 Ponadto nośność tak uzyskanych przekrojów jest większa niż nośność przekroju SP1 zbrojonego stalą B500SP, czy przekroju SP2 zbrojonego stalą SAS 670/800 (rys. 4). Wzrost nośności następuje zarówno w zakresie dopuszczalnych wartości siły podłużnej i momentu zginającego. W przypadku przekrojów: SP3 i SP4 (tab. 5), gdzie ramię działania siły jest takie samo jak dla przekroju SP2 (tab. 3), o wzroście nośności decyduje zwiększone pole powierzchni zbrojenia. Im większa ilość użytego zbrojenia, tym obszar ograniczony krzywą interakcji $N-M$ jest większy (rys. 4). Spadek nośności dla przekroju SP5 (rys. 4) wynika ze zmniejszenia odległości pomiędzy środkiem ciężkości zbrojenia ściskanego i rozciąganego.

Uzyskane wyniki obrazują podstawowe różnice w krzywych interakcji dla różnych typów zbrojenia, dostarczając inżynierowi wiedzy na temat zachowania elementów mimośrodowo ściskanych, i w konsekwencji właściwego użycia stali o wysokiej wytrzymałości w konstrukcji.

Porównując wyniki uzyskane dla ściskanych przekrojów kwadratowych i prostokątnych można zauważyć, że bardziej ekonomicznymi rozwiązaniami stają się przekroje prostokątne, na co ma wpływ większa odległość pomiędzy środkami ciężkości zbrojenia rozciąganego i ściskanego. Poza zwiększoną nośnością charakteryzują się one także mniejszym zapotrzebowaniem na beton i stal niż przekroje kwadratowe (ok. 2-6% dla betonu i ok. 17-28% dla stali) (tab.6 i tab. 7).

PODSUMOWANIE

Zastąpienie zbrojenia zwykłego zbrojeniem o wysokiej wytrzymałości stanowi korzystne rozwiązanie przy projektowaniu żelbetonowych elementów ściskanych. Główną zaletą w porównaniu ze zbrojeniem stalą zwykłą jest zmniejszone zapotrzebowanie na zbrojenia o ok. 27% przy zachowaniu tej samej nośności przekroju. Mniej prętów zbrojeniowych może być rozmieszczone w jednym rzędzie, co wpływa na zwiększenie ramienia działających sił wewnętrznych, a co za tym idzie zwiększenie nośności przekroju.

Korzystny efekt przynosi również zmniejszenie wymiarów przekroju betonowego. Wzrost wartości dopuszczalnego maksymalnego stopnia zbrojenia, w przypadku projektowania z użyciem stali o wysokiej wytrzymałości, do 20% umożliwia zmniejszenie wymiarów przekroju. Minimalizacja ta nie jest możliwa w przypadku zbrojenia zwykłego ze względu na ograniczenie maksymalnej powierzchni zbrojenia do 4%. Odpowiednio przeprowadzona minimalizacja pozwala zaoszczędzić na ilości potrzebnej mieszanki betonowej.

Należy nadmienić, że w przypadku przekrojów o wysokim stopniu zbrojenia należy zmodyfikować formuły wymiarowania (1). W takich sytuacjach musi być uwzględniona redukcja pola przekroju betonowego o pole powierzchni stali.

Zaletą zbrojenia o wysokiej wytrzymałości jest ponadto zmniejszenie kosztów nakładów pracy. Dzięki uzyskanemu mało skomplikowanemu układowi prętów zbrojeniowych w przekroju, możliwe jest łatwe kształtowanie zbrojenia w elementach konstrukcyjnych. Systemy zbrojeniowe wykorzystujące pręty ze stali o wysokiej wytrzymałości zapewniają połączenia prętów przez skręcanie łącznikami mechanicznymi odpowiadającymi pełnej nośności pręta. Takie

rozwiązanie przyspiesza montaż zbrojenia na budowie i ułatwia projektowanie strefy uciążenia zbrojenia.

Stosowanie stali o wysokiej wytrzymałości stanowi innowacyjne rozwiązanie w dziedzinie zbrojenia żelbetonowych elementów ściskanych. Jest ono alternatywą dla innych rozwiązań takich jak słupy zespolone stalowo-betonowe, słupy uzwojone czy zbrojenie kompozytowe. Dobre właściwości wytrzymałościowe tej stali umożliwiają ponadto zrezygnowanie ze stosowania betonów wysokowartościowych.

Możliwe jest wznoszenie wysokich budynków bez konieczności projektowania słupów o znacznych wymiarach przekroju poprzecznego, zwłaszcza na najniższych kondygnacjach budynków wysokich. Zmniejszone wymiary przekroju poprzecznego słupa pozwalają w łatwiejszy sposób kształtować przestrzeń wewnątrz budynku i uzyskać większą powierzchnię użytkową. Natomiast zastosowanie tej stali w przypadku obiektów mostowych da możliwość zmniejszenia gabarytów filarów, czy pylonów.

BIBLIOGRAFIA

1. Szmigiera E., Szadkowska M., Grzeszykowski B., *Kształtowanie rozwiązań dwugązgowych słupów stalowo-betonowych*. Przegląd Budowlany 2015, R86, nr 1, str. 40-45.
2. Szmigiera E., *Dwugązowe słupy stalowo-betonowe*. Prace naukowe PW, zeszyt Budownictwo, nr 155. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2012. *Przegląd Budowlany* 2015, R86, nr 1.
3. Godycki-Ćwirko T., *Mechanika betonu*. Arkady, Warszawa 1982.
4. Suwalski L., *Żelbet*. Arkady, Warszawa 1963.
5. Suwalski L., *Budownictwo betonowe. Teoria betonu i żelbetu*. Arkady, Warszawa 1964.
6. Neville A.M., *Właściwości betonu*. Polski Cement, Kraków 2013.
7. Falkner H., Gerritzan D., Jungwirth D., Sparowitz L., *The new reinforcement system; compression members with SAS 670/800 high-strength reinforcement steel*. Beton-und Stahlbetonbau 05/2008, nr 614, part 1, p. 1-31
8. Hude F., Badawika G., Plewko Z., *Nowy system zbrojenia elementów ściskanych stalą wysokiej wytrzymałości SAS 670/800*. Inżynieria i Budownictwo, nr 3/2011, str. 127-130.
9. PN-EN 1992-1-1 (EC2). *Projektowanie konstrukcji z betonu. Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków*.
10. Advanced Technologies and Materials: SAS 670/800. *Podstawy zbrojenia wysokiej wytrzymałości*. Materiały promocyjne.
11. Kliszczewicz R., *Konstrukcje betonowe. Obliczanie elementów żelbetonowych w stanach granicznych nośności wg PN-B-03264:2002*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2003.
12. <http://www.u-pfeiffer.de>

ON DIMENSIONING OF ECCENTRICALLY LOADED CONCRETE SECTIONS REINFORCED WITH HIGH STRENGTH STEEL

Abstract

Paper concerns limit capacity of eccentrically loaded RC sections with typical reinforcement (B500SP) and high strength steel (SAS 670/800). Application of high strength steel is dedicated to design conditions with high demand of axial or transversle capacity. Predictions of limit capacity for various cross-sections is investigated and compared to capacity at sections reinforced with typical steel.

Autorzy:

dr inż. **Maria Włodarczyk** – Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Łądowej, al. Armii Ludowej 16, 00-637 Warszawa, e-mail: maria.wlodarczyk@il.pw.edu.pl

inż. **Joanna Dobosz** – Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Łądowej, Koło Naukowe ŻELBETNIK, al. Armii Ludowej 16, 00-637 Warszawa, e-mail: j.dobosz@il.pw.edu.pl