

Lidia SZOPA*
Politechnika Krakowska

WPLYW WŁAŚCIWOŚCI BETONU NA PRACĘ STATYCZNO - WYTRZYMAŁOŚCIOWĄ SŁUPÓW TYPU CFST

Streszczenie. W artykule przedstawiono wyniki badań nad nośnością słupów zespolonych typu CFST (Concrete Filled Steel Tube), ze szczególnym uwzględnieniem współpracy betonu i stali na styku pomiędzy materiałami. Badaniami objęte były słupy osiowo ściskane wykonane z rur długości 1,5 m o przekroju okrągłym (zróżnicowana grubość ścianki i wytrzymałość stali), wypełnione betonem różnych klas. W artykule porównano nośność elementów CFST wypełnionych dwoma różnymi betonami.

INFLUENCE OF CONCRETE CHARACTERISTICS ON BEHAVIOR OF CONCRETE FILLED STEEL TUBE COLUMNS

Summary. The paper shows experiments on CFST (Concrete Filled Steel Tube) axially loaded columns with special regard on concrete and steel composite cooperation. Elements are filled with different grade of concrete. Circle steel pipes are 1,5 m long, different thickness and yield capacity. This study compares ultimate load of columns filled with two various kind of concrete.

1. Wstęp

Słupy zespolone typu CFST (Concrete Filled Steel Tube) cieszą się dużym zainteresowaniem konstruktorów na całym świecie. Podstawowe zalety tych słupów wymienione w [1] wiążą się z dobrą współpracą zespoloną pomiędzy stalą i betonem. Beton pracujący w takiej konstrukcji zyskuje na wytrzymałości, gdyż dzięki ograniczeniu jego odkształceń poprzecznych przez rurę stalową (tzw. „confinement effect”) znajduje się on, w fazie poprzedzającej zniszczenie, w stanie trójosiowego ściskania. Stal jest natomiast

* Opiekun naukowy: Prof. zw. dr hab. inż. Kazimierz Flaga

zabezpieczona przed wyboczeniem, ale nawet po utracie stateczności miejscowej utrata wytrzymałości stali jest spowolniona poprzez jej współpracę z betonem. Dzięki dużej nośności słupy te są szeroko stosowane na świecie w budowie wysokich budynków, zwłaszcza tam gdzie zależy nam na uzyskaniu dużych otwartych przestrzeni (powierzchnia podłogi podparta przez jeden słup może wynosić ponad 90 m^2), a także do budowy mostów. Zwłaszcza w Chinach i Japonii buduje się dużo obiektów mostowych, w których główne elementy konstrukcyjne mają przekrój CFST. Szczególnie cenioną zaletą tych elementów jest ich dobre funkcjonowanie w warunkach obciążeń sejsmicznych, ze względu na ich dużą ciągliwość. Mimo wielu zalet takich słupów, ich częstego stosowania w budownictwie światowym, w Polsce są stosowane dość rzadko. Wiąże się to być może i z tym, że mimo wielu zastosowań w praktyce pozostaje jeszcze wiele niewyjaśnionych problemów badawczych i nie do końca opracowanych teorii obliczeniowych.

Jednym z niewyjaśnionych zagadnień w pracy elementów zespolonych typu CFST jest jakość współpracy zróżnicowanego pod względem wytrzymałości i składu betonu z obejmującym go płaszczem stalowym. Wiąże się to z pytaniem, na ile nośność elementu zespolonego przewyższa sumę nośności elementów składowych. Odpowiedź na to pytanie zawarta jest w obowiązujących normach i opracowaniach [2], gdzie oprócz wymiarów przekroju, wytrzymałości materiałów składowych, decydującym warunkiem jest smukłość względna elementu $\bar{\lambda} \leq 0,5$ (dla słupów osiowo ściskanych). W przedstawionym niżej opracowaniu pokazano, jakie cechy betonu wpływają na zwiększenie nośności konstrukcji typu CFST.

2. Charakterystyka elementów badawczych

Prowadzone badania dotyczą osiowo ściskanych słupów zespolonych wykonanych z rur stalowych o przekroju okrągłym wypełnionych betonem. Obejmują one 24 elementy badawcze o parametrach zróżnicowanych, tak jak przedstawia tabela 1.

Tabela 1

Parametry badanych elementów

średnica zewnętrzna D [mm]	długość l [m]	grubość ścianki t [mm]	gatunek stali f_y [MPa]	beton wypełniający
168,3	1,50	5	R35 $f_y=360$	5 klas
		10	R45 $f_y=385$	

f_y – granica plastyczności stali

Dotychczas wykonano dwie serie badań: A i B, w których wypełniono elementy rurowe dwoma różnymi betonami. Tabela 2 przedstawia charakterystyki poszczególnych elementów w seriach wraz z ich opisami oraz uzyskaną nośność. Elementy były obciążane w maszynie wytrzymałościowej DB600 ze sterowaniem obciążeniem (w przybliżeniu 50 kN/min). Obydwa końce słupa były zamocowane przegubowo. W celu uzyskania nieskrępowanych odkształceń poprzecznych ściskanych elementów pomiędzy górną i dolną powierzchnią słupa a stalowymi podkładkami centrującymi umieszczono 5 mm warstwę teflonu, która spełniała również rolę warstwy wyrównującej, zapewniającej równomierne przekazywanie obciążeń ściskających na cały przekrój poprzeczny.

Tabela 2

Charakterystyki, opisy i nośności elementów w seriach

beton	$f_{cm\ cyl}$ [MPa]	$f_{cm\ cube}$ [MPa]	stal	t [mm]	opisy elementów	nośność N_n [kN]
seria A C30/37 na kruszywie otoczkowym	37,16	47,11	R35	5	1A5, 2A5	2040, 2040
			R45	5	3A5, 4A5	2040, 2100
			R35	10	5A10, 6A10	2720, 2760
			R45	10	7A10, 8A10	3020, 2960
seria B C30/37 na kruszywie bazaltowym	37,92	52,59	R35	5	1B5	1760
			R45	5	2B5	1910
			R35	10	3B10	2340
			R45	10	4B10	2680

$f_{cm\ cyl}$ – średnia, 28-dniowa, wytrzymałość betonu na ściskanie, na 3 próbkach walcowych $\phi 15 \times 30$ cm,
 $f_{cm\ cube}$ – średnia, 28-dniowa, wytrzymałość betonu na ściskanie, na 3 próbkach kostkowych $15 \times 15 \times 15$.

W serii A wykonano po dwa powtarzające się elementy, w serii B elementy są pojedyncze. Beton wypełniający był betonem samozagęszczalnym i nie wymagał wibrowania zarówno w odniesieniu do elementów ruro-betonowych, jak i próbek wykonanych w celu badania cech wytrzymałościowych betonu.

Jednym z celów badań było ustalenie, czy podczas ściskania elementów CFST dochodzi do odspojenia między betonem i stalą związanego z różnicą we współczynnikach odkształcenia poprzecznego stali i betonu ($v_s=0,3$; $v_b=0,2$). W tym celu mierzono odkształcenia poprzeczne płaszcza stalowego tensometrami elektrooporowymi nawiniętymi na trzech poziomach wysokości słupa, oraz odpowiednio na tych samych wysokościach (w połowie wysokości i w odległości 30 cm od górnej i dolnej powierzchni) mierzono odkształcenia poprzeczne betonu zamkniętego wewnątrz rury. Do pomiaru odkształceń poprzecznych betonu użyto prototypowych, wykonanych specjalnie do tych badań, tensometrów w kształcie uzwojenia o średnicy 150 mm (dla rury o grubości ścianki 5 mm) i 140 mm (dla rury o grubości ścianki 10mm), zatopionych w czasie betonowania elementów.

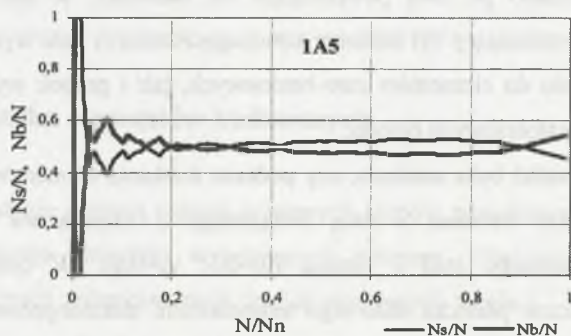
Mierzono również odkształcenia podłużne w połowie wysokości słupa w trzech punktach na obwodzie rury co 120° .

3. Wyniki badań

Jak pokazały wyniki badań przedstawione w tab. 2, nośność elementów ruro-betonowych wykonanych w serii B była niższa o 7-18 % niż elementów wykonanych w serii A, mimo iż wypełnione były betonem, który został zaklasyfikowany w tej samej klasie wytrzymałości. Fakt ten prowadzi do wniosku, iż nośność słupów zespolonych typu CFST jest zależna nie tylko od wytrzymałości na ściskanie betonu wypełniającego, ale i od innych jego cech związanych z odkształcalnością. Porównywane elementy różniły się tylko betonem wypełniającym.

3.1. Rozdział obciążenia między beton i stal

Na podstawie znanej siły i odpowiadających jej odkształceń podłużnych rury przeliczono siłę ściskającą przenoszoną przez stalową N_s i betonową N_b część przekroju poprzecznego (przy założeniu współodkształcalności betonu i stali w kierunku podłużnym). Rysunki 1 i 2 pokazują wykresy przenoszenia siły ściskającej N (N - obciążenie elementu, N_n - siła niszcząca) przez stalową i betonową część przekroju poprzecznego dla elementów cienkościennych w serii A i B.

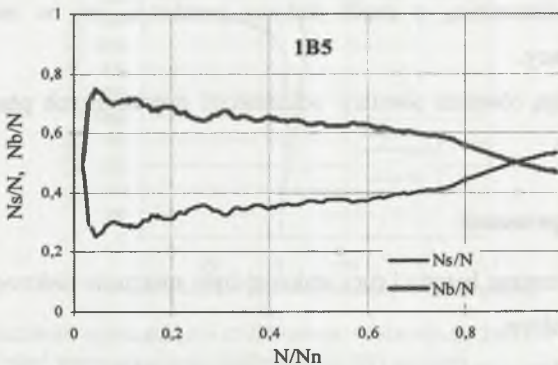


Rys.1. Rozdział obciążenia między stal i beton dla elementu 1A5

Fig. 1. Participation of steel and concrete in 1A5 element load capacity

Jak widać z porównania rys.1 i rys.2, beton z serii A początkowo przenosi większą część siły ściskającej (nie więcej niż 60%), by w całym pozostałym zakresie obciążeń przenosić mniejszą część siły ściskającej niż stal, podczas gdy beton wypełniający w serii B przenosi

większą część siły ściskającej (początkowo nawet 75%) w prawie całym zakresie obciążenia. Ze względu na ograniczoną objętość artykułu nie zamieszczono pozostałych rysunków, lecz ta zasada odnosi się także do pozostałych elementów cienkościennych (rura o grubości 5 mm). W serii A beton elementów 1A5, 2A5, 3A5 i 4A5 przenosi mniej niż 50% siły ściskającej - przekrój, w serii B beton elementów 1B5 i 2B5 przenosi ponad 60% siły ściskającej - przekrój. W elementach grubościennych dużo większa część siły ściskającej jest przenoszona przez stal i wpływ jakości betonu na nośność elementów CFST jest mało widoczny.



Rys. 2. Rozdział obciążenia między stal i beton dla elementu 1B5

Fig. 2. Participation of steel and concrete in 1B5 element load capacity

Ponieważ nośność elementów serii A jest wyższa, wydaje się, że korzystniejsza do uzyskania wysokiej nośności elementu CFST jest sytuacja, gdy to stal bierze na siebie większą część siły ściskającej. Taka sytuacja ma miejsce, gdy beton ma dużą odkształcalność podłużną, a to wiąże się z wartością jego modułu sprężystości podłużnej.

3.2. Moduł sprężystości betonu wypełniającego

Uzyskany w wyniku badania próbek moduł sprężystości podłużnej betonów wypełniających znacząco się między sobą różnił.

Tabela 3

Moduł sprężystości podłużnej betonu

serie	beton wypełniający	E [GPa]
A	C30/37 na kruszywie otoczkowym	23,6
B	C30/37 na kruszywie bazaltowym	35,4

Przedstawiona w tabeli 3 wartość modułu sprężystości jest średnią wartością uzyskaną przy pomiarach na trzech betonowych walcach $\Phi 15 \times 30$ cm.

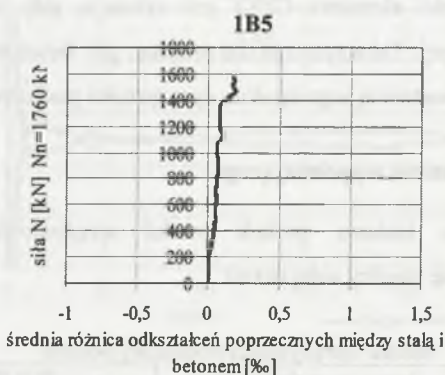
Niska wartość modułu sprężystości betonu w serii A oznacza dużą jego odkształcalność w kierunku podłużnym przy ściskaniu. Większa odkształcalność podłużna betonu C30/37 na kruszywie otoczkowym powoduje, że dużą część obciążenia przenosi stalowa część przekroju, a beton współpracuje w przenoszeniu tego obciążenia. Niska odkształcalność betonu na kruszywie bazaltowym wyrażająca się dużą wartością modułu sprężystości powoduje, że większą część siły ściskającej bierze na siebie betonowa część przekroju, ulegając szybszemu niszczeniu, a część stalowa przekroju jest w niewielkim stopniu wciągnięta do współpracy.

Tezę tę potwierdzają również pomiary odkształceń poprzecznych płaszcza stalowego i wypełniającego betonu.

3.3. Odkształcenia poprzeczne

Odkształcenia poprzeczne betonu i rury stalowej były mierzone elektrooporowo na trzech poziomach wysokości słupa.

Jak wykazały przedstawione na rys. 3 pomiary odkształceń poprzecznych betonu i stali w serii B, w całym zakresie obciążeń występuje różnica pomiędzy odkształceniem poprzecznym rury i odkształceniem poprzecznym betonu (beton odkształca się poprzecznie mniej niż rura stalowa).

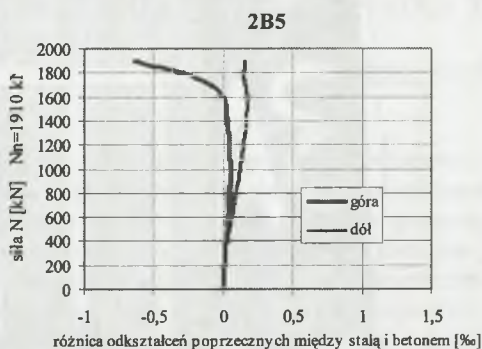


Rys. 3. Różnica odkształceń poprzecznych stali i betonu w elemencie 1B5

Fig. 3. Steel and concrete transverse strain difference in 1B5 element

Rysunek 3 przedstawia różnicę między odkształceniami poprzecznymi stali i betonu w zależności od siły obciążającej element 1B5 jako uśrednioną wartość z odkształceń mierzonych na trzech poziomach wysokości słupa. Analiza tych odkształceń prowadzi do

wniosku, że szczelina między betonem i stalą zwiększa się wraz ze wzrostem obciążenia słupa. Rysunek 4 przedstawia wartości różnicy odkształceń poprzecznych między stalą i betonem na poziomach górnym i dolnym w elemencie 2B5. W elemencie 2B5 na poziomie dolnym w całym zakresie obciążenia pojawia się szczelina między stalą i betonem, podobnie jak to ma miejsce na wszystkich poziomach w słupie 1B5. Przebieg linii wykresu w elemencie 2B5 (góra) prowadzi do wniosku, że do nacisku poprzecznego betonu na rurę może dochodzić dopiero po uzyskaniu około 80% obciążenia niszczącego.



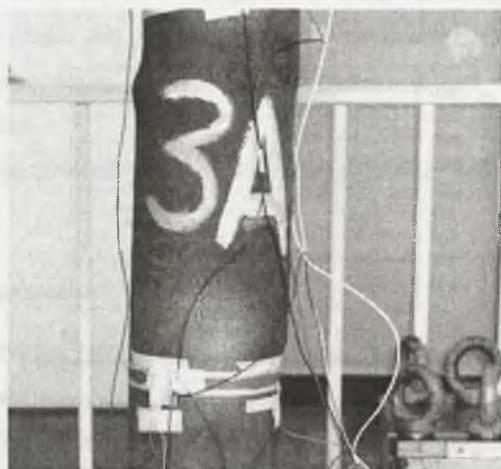
Rys. 4. Różnica odkształceń poprzecznych stali i betonu w elemencie 2B5
Fig. 4. Concrete and steel transverse strain difference in 2B5 element

Z powodu nieszczelności otoczki na tensometrach wewnętrznych (możliwy wpływ prądu) nie wszystkie one dały poprawny wynik pomiaru odkształceń. Tak było w przypadku tensometru mierzącego odkształcenia poprzeczne betonu w elemencie 2B5 na poziomie środkowym i niestety w przypadku całej serii A. W odniesieniu do serii A lepszą współpracę betonu i stali, niż to miało miejsce w serii B, potwierdza rys. 5, gdzie zniszczenie elementu 3A5 nastąpiło poprzez utratę stateczności lokalnej rury stalowej. Widoczne na zdjęciu deformacje stali są wynikiem nacisku betonu na rurę od strony wewnętrznej. Elementy cienkościenne serii B uległy zniszczeniu bez żadnych widocznych deformacji lokalnych.

4. Podsumowanie

Za pomocą zamieszczonych wykresów starano się wykazać wpływ jakości betonu na nośność elementów CFST. Ze względu na ograniczoną ilość miejsca pokazano w formie wykresów najbardziej znaczące przykłady spośród wyników uzyskanych w czasie realizacji badań. Teza dotycząca lepszej współpracy betonu bardziej odkształcalnego (o niższym module sprężystości podłużnej) z rurą stalową została przedstawiona na przykładzie rur, które

nazwano cienkościennymi. Rury o grubszej ściance też mają wyższą nośność przy wypełnieniu betonem wykonanym na kruszywie otoczakowym, lecz analiza obliczeniowa nie pokazuje tego tak wyraźnie. Ważnym wnioskiem z prowadzonych badań jest konkluzja, że większa efektywność współpracy zespolonej pomiędzy rurą stalową i wypełniającym ją betonem jest związana z większą odkształcalnością betonu w kierunku podłużnym, co wyraża się w niższej wartości jego modułu sprężystości.



Rys. 5. Zniszczenie elementu 3A5
Fig. 5. Destruction of 3A5 element

Praca naukowa finansowana ze środków budżetowych na naukę w latach 2005-2006 jako projekt badawczy nr 4 T07E 014 28.

LITERATURA

1. Flaga K., Szopa L.: Słupy zespolone typu CFST jako alternatywa dla słupowych żelbetowych filarów mostowych. Konferencja Nauk.-Techn. "Mosty zespolone", Kraków, 7-9.05.1998, s. 89-99.
2. Flaga K., Szopa L.: Nośność osiowo ściskanych słupów zespolonych typu CFST, Inżynieria i Budownictwo, 01/1999, s. 18-22.
3. Shosuke M., Keigo T.: Design and construction of Concrete-Filled Steel Tube column system in Japan. Architectural Institute of Japan, <http://ctsee.org.tw>
4. Proceedings of the Fourth International Conference held by ASCCS on Steel-Concrete Composite Structures. Koszyce, Słowacja 1994.