

Analiza przyczepności stali i betonu SCC w ściskanych elementach zespolonych typu CFST

ANALYSIS OF BOND BETWEEN STEEL AND SCC CONCRETE IN
COMPRESSED CFST COMPOSITE ELEMENTS.

Streszczenie

W referacie przedstawiono analizę przyczepności stali i betonu samozagęszczalnego (SCC) w ściskanych elementach zespolonych, złożonych z rur wypełnionych betonem (*Concrete Filled Steel Tube* – CFST). Jak wynika z przeprowadzonych badań na wartość naprężeń ścinających w płaszczyźnie zespolenia, wpływ ma nie tylko geometria przekroju, ale również, grubość płaszcza stalowego, klasa wytrzymałości na ściskanie oraz wiek betonu. Wyniki badań porównano z zaleceniami dotyczącymi projektowania zespolonych konstrukcji stalowo – betonowych, wykonanych z betonu zwykłego zawartymi w normie PN-EN 1994-1-1:2008. Wydaje się, że zalecenia normowe w zbyt ogólny sposób traktują kwestię określania granicznych wartości naprężeń ścinających w płaszczyźnie zespolenia.

Abstract

The report presents the analysis of bond between steel and self – compacting concrete (SCC) in compressed CFST composite elements. As it follows from the research on resistance to the vertical shear in the contact surface influences not only the geometry of the cross section but also thickness of steel profile wall, age and the grade of the concrete. The results of the study were compared with the standard recommendations concerning the designing of the composite steel and concrete structures, which are made from the normal concrete, included in PN-EN 1994-1-1:2008. It seems that the standard recommendations generally deal with the issue of setting limit values of the resistance to the vertical shear in the contact surface.

1. Wstęp

Ocena przydatności betonu samozagęszczalnego (SCC) do wykonywania zespolonych elementów ściskanych stalowo-betonowych jest przedmiotem badań autorów referatu od wielu lat. Zastosowanie betonu SCC wydaje się szczególnie uzasadnione w tego typu elementach z uwagi na małą powierzchnię przekroju poprzecznego, która pozostaje po umieszczeniu w deskowaniu profilu stalowego i zbrojenia. Stwarza to bardzo trudne warunki do właściwego ułożenia mieszanki betonowej oraz odpowiedniego jej zagęszczenia w wykonywanym elemencie. Istotnym zagadnieniem rozpatrywanym w pracy zespolonych elementów ściskanych jest przyczepność stalowego profilu i betonu. Warunki określone w normie PN-EN 1994-1-1-2008, omawiającej sposoby projektowania konstrukcji zespolonych stalowo-betonowych, dotyczą elementów wykonanych z betonu zwykłego i lekkiego. W dokumencie tym nie określono możliwości stosowania betonu SCC w konstrukcjach zespolonych. Z uwagi na niewątpliwy atut betonu SCC jakim jest brak konieczności zagęszczania mieszanki betonowej, autorzy uważają za zasadne stosowanie jej w zespolonych słupach stalowo-betonowych. Słupy złożone z rur wypełnionych betonem (CFST) są szeroko stosowane ze względu na krótki czas realizacji. Rura stalowa stanowi jednocześnie deskowanie i może także przenosić obciążenia w fazie montażu. W referacie przedstawiono wyniki analizy przyczepności stali i betonu SCC w tego typu elementach.

Badania nad przyczepnością w konstrukcjach zespolonych zostały opisane, między innymi, przez K.S. Virdi'ego i P.J. Dowling'a w [9, 10]. W pracach przedstawiono wyniki badań nośności na ścinanie w stalowych rurach wypełnionych betonem. Przedmiotem analiz był wpływ wytrzymałości betonu na ściskanie, wielkości powierzchni zespolenia oraz wieku betonu na przyczepność między stalą i betonem. Z opisanych badań wynika, że długość powierzchni zespolenia, a także średnica rury oraz grubość ścianki nie wpływają znacząco na przyczepność obydwu materiałów. Co więcej, zdaniem autorów wiek betonu również nie ma znaczenia przy określaniu warunków przyczepności. Należy jednak zaznaczyć, że badania były przeprowadzone po 7, 21 i 28 dniach od momentu zabetonowania, a więc nie uwzględniały pełnego przebiegu zjawisk reologicznych w betonie takich jak skurcz i pęcznienie. W elementach wykonanych z betonów o wyższej klasie wytrzymałości na ściskanie, charakteryzujących się większym skurczem betonu, autorzy odnotowali zmniejszenie korzystnego wpływu zazębienia się materiałów w stalowej rurze.

Y.M. Hunaiti w pracach [2, 3] przedstawił wyniki badań dwugałęziowych elementów stalowo-betonowych, złożonych z dwóch rozsuniętych ceowników wypełnionych betonem. Przekroje słupów zmieniały się w zależności od zastosowanego typu ceownika oraz od rozstawu między kształtownikami. W pracach skoncentrowano się na określeniu wpływu wieku oraz wytrzymałości betonu na ściskanie na przyczepność w płaszczynie zespolenia. Z badań przeprowadzonych przez Hunaiti'ego wynika, że rodzaj przekroju elementu zespolonego oraz wiek betonu wypełniającego słupy ma znaczący wpływ na nośność na ścinanie między betonem i stalą.

W pracy [4] Cameron, Roeder i Brown, przedstawili wyniki badań stalowych rur wypełnionych betonem zwykłym. Przedmiotem analiz był, między innymi, wpływ średnicy rury stalowej na przyczepność między stalą i betonem. Autorzy zaobserwowali, że wartość sił przyczepności maleje wraz ze wzrostem średnicy rury stalowej oraz ze wzrostem stosunku średnicy rury do grubości jej ścianki.

Badania dwugałęziowych słupów zespolonych stalowo-betonowych wypełnionych betonem SCC o różnej klasie wytrzymałości na ściskanie oraz betonem wibrowanym zostały zaprezentowane przez E. Szmigierę oraz P. Woyciechowskiego na Konferencji Dni

Betonu w 2010 r. [5] oraz w 2012 r. [6]. Wyniki prowadzonych badań nad przyczepnością zostały także przedstawione w pracy [7, 8]. Przedmiotem badań była przyczepność między stalą i betonem w elementach złożonych z dwóch dwuteowników HEA 160 wypełnionych betonem. Badano dwa typy przekrojów zespolonych słupów: w pierwszym dwuteowniki połączone były stalowymi przewiązkami, natomiast w drugim profile stalowe połączone, na całej wysokości elementu stalową blachą, tworząc w ten sposób przekrój prostokątny. Z przedstawionych w pracach [5, 6] badań wynika, że wytrzymałość betonu na ściskanie, a także skład i struktura betonu wpływają na warunki przyczepności. Jednocześnie stwierdzono, że zastosowanie betonu SCC zamiast zwykłego, nie wpływa na przyczepność w płaszczynie zespolenia obydwu materiałów.

W niniejszym referacie przedstawiono wyniki badań kolejnych typów słupów zespolonych wypełnionych betonem SCC, które zostały również zawarte w pracy [1]. Celem prowadzonych badań, było określenie wpływu wybranych parametrów na przyczepność między stalą i betonem SCC w zespolonych ściskanych elementach typu CFST (*Concrete Filled Steel Tube*).

2. Opis badań

Badania przeprowadzono w Laboratorium Instytutu Inżynierii Budowlanej Wydziału Inżynierii Łądowej Politechniki Warszawskiej, które podzielono na dwa etapy: w pierwszym – elementy badane były po 28 dniach od momentu zabetonowania, natomiast w drugim – po skończonym badaniu przebiegu skurczu betonu. W pierwszym etapie zbadano 13 elementów, wśród których można wyróżnić cztery charakterystyczne typy przekrojów różniące się: geometrią, wytrzymałością betonu na ściskanie oraz grubością profilu stalowego. Trzy lata później, po zakończeniu badań przebiegu skurczu w betonie, przeprowadzono drugi etap doświadczeń. W testach zbadano 9 elementów, różniących się jedynie geometrią oraz grubością profilu stalowego. W trakcie doświadczeń, zostały wykonane również badania mające na celu określenie charakterystyk wytrzymałościowych betonu, takich jak: średnia wytrzymałość betonu na ściskanie, średnia wytrzymałość betonu na rozciąganie oraz moduł sprężystości betonu. Recepturę betonu użytego do wykonania elementów badawczych opracowano z wykorzystaniem popiołu lotnego krzemionkowego o gęstości objętościowej 2200 kg/m^3 , zgodnie z normą PN-EN 450-1:2012. Na potrzeby prowadzonych badań zaprojektowano dwie receptury mieszanek, różniących się składem z uwagi na zróżnicowaną wytrzymałość betonu na ściskanie. Skład mieszanki betonu „słabszego” ($w/c = 0,68$) zaprezentowano w tabeli 1., a „mocniejszego” ($w/c = 0,54$) w tabeli 2.

Tabela 1. Skład mieszanki betonowej niższej wytrzymałości na ściskanie

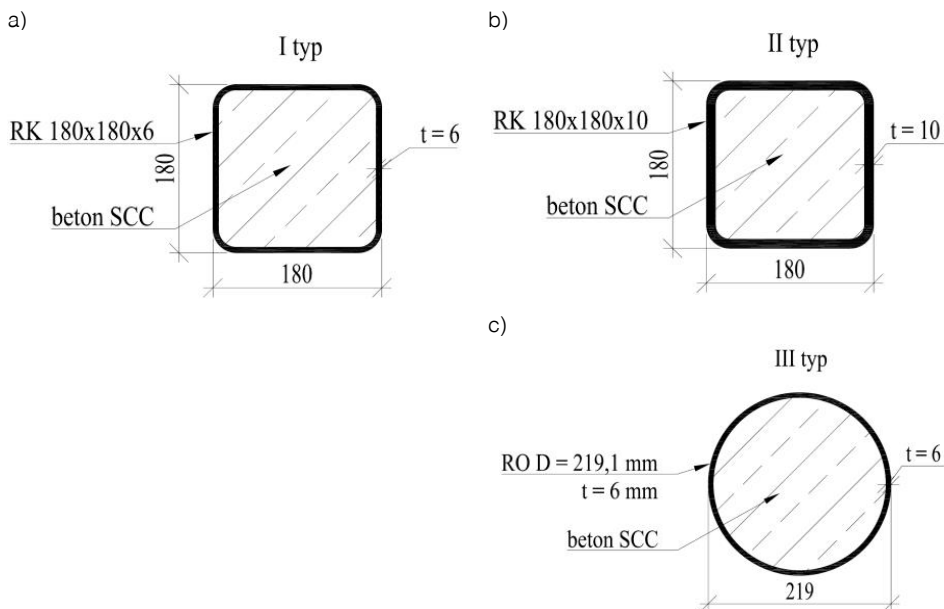
Material	Nazwa	Ilość (kg)
Woda	Woda zarobowa	244
Cement	CEM I 42,5 R	360
Kruszywo	Piasek rzeczny	828
	Żwir płukany	764
Mikrowypełniacz	Popiół lotny	85
Domieszka	Superplastyfikator	7,2

Tabela 2. Skład mieszanki betonowej wyższej wytrzymałości na ściskanie

Material	Nazwa	Ilość (kg)
Woda	Woda zarobowa	225
Cement	CEM I 42,5 R	414
Kruszywo	Piasek rzeczny	832
	Żwir płukany	768
Mikrowypełniacz	Popiół lotny	85
Domieszka	Superplastyfikator	8,28

2.1. Metodyka badań

Badania przeprowadzono na elementach złożonych z rur stalowych gatunku S235JR o przekroju kwadratowym i okrągłym wypełnionych betonem SCC. Wymiary stalowych rur zostały dobrane w taki sposób, aby powierzchnia styku betonu i stali dla wszystkich słupów była podobna i nie stanowiła parametru zmiennego. W doświadczeniu badano wpływ wybranych czynników na przyczepność między stalą i betonem, takich jak: geometria przekroju, grubość ścianki płaszcza stalowego, wytrzymałość betonu na ściskanie oraz wiek betonu. Na rysunku 1. przedstawiono, trzy rodzaje przekrojów badanych elementów, o wysokości $H = 300$ mm.



Rys. 1. Przekroje poprzeczne badanych słupów: a) rura kwadratowa z cienką ścianką (RKC); b) rura kwadratowa z grubą ścianką (RKG); c) rura o przekroju kołowym (ROC)

Oznaczenia badanych elementów oraz ich charakterystykę przedstawiono w tabeli 3., natomiast w tabeli 4. zestawiono właściwości mechaniczne betonu użytego do wykonania poszczególnych modeli słupów.

Tabela 3. Rodzaje elementów badawczych

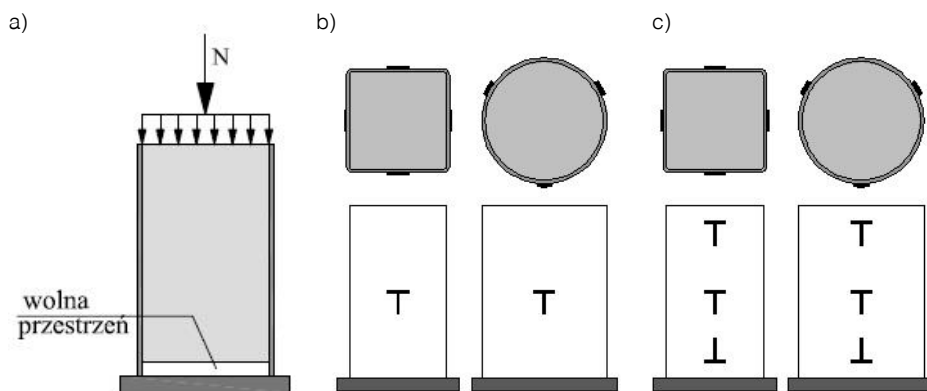
Oznaczenie modelu	Geometria przekroju	Wymiary przekroju poprzecznego [mm]	Wiek betonu podanego badaniom	Rodzaj wypełnienia	Powierzchnia zespolenia [mm ²]		
RKCM_28	rura kwadratowa, ścianka cienka	180x180x6	28 dni	beton SCC mocniejszy	201 600		
RKCM_S			3 lata				
RKGM_28	rura kwadratowa ścianka grubsza	180x180x10	28 dni		beton SCC mocniejszy	192 000	
RKGM_S			3 lata				
ROCM_28	rura okrągła	219.1x6	28 dni			beton SCC słabszy	195 187
ROCM_S			3 lata				
ROCS_28			28 dni				

Tabela 4. Właściwości wytrzymałościowe betonu użytego do wykonania poszczególnych elementów badawczych

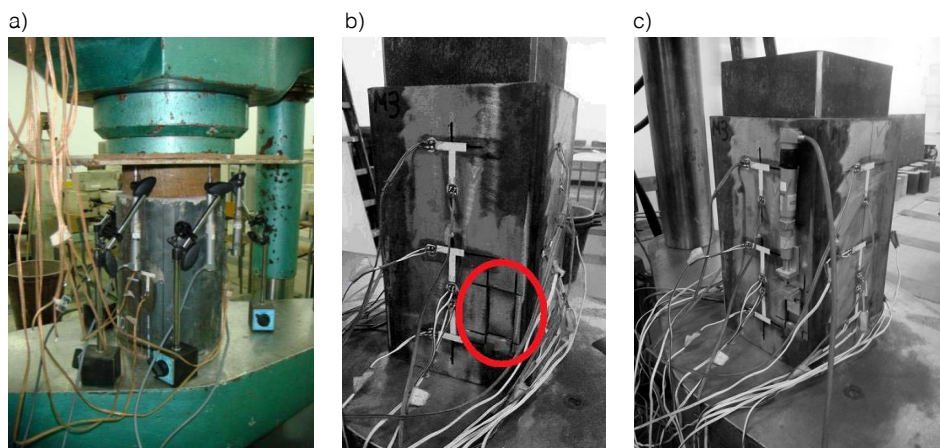
Oznaczenie modelu	Wiek betonu	Rodzaj wypełnienia	Średnia wytrzymałość betonu na ściskanie f_{cm} [MPa]
RKCM_28	28 dni	beton SCC mocniejszy	51.3
RKCM_S	3 lata		50.7
RKGM_28	28 dni		51.3
RKGM_S	3 lata		50.7
ROCM_28	28 dni		51.3
ROCM_S	3 lata		50.7
ROCS_28	28 dni	beton SCC słabszy	44.3

Badania przeprowadzono w prasie hydraulicznej EU1000h. Polegały one na umieszczeniu elementów badawczych w prasie i obciążeniu ich osiową siłą przyłożoną do rdzenia betonowego wystającego powyżej górnej krawędzi płaszcza stalowego. W celu przeniesienia naprężeń ścinających z betonowego rdzenia na profil stalowy, tylko za pomocą sił przyczepności, w dolnej części próbki pozostawiono wolną przestrzeń, aby umożliwić swobodne przemieszczanie się części betonowej próbki. W trakcie badań dokonywano pomiarów osiowej siły wypychającej rdzeń betonowy, przemieszczeń i poślizgu betonu względem stalowego płaszcza oraz odkształceń profilu stalowego. Na rysunku 2. przedstawiono schematy rozmieszczenia tensometrów elektrooporowych w badanych elementach.

Pomiary przemieszczeń betonowego rdzenia były wykonywane przy użyciu czujników indukcyjnych przyłożonych do blachy stalowej, przez którą przekazywane były obciążenia na rdzeń. W celu pomiaru poślizgu między stalą i betonem, w płaszczu stalowym wykonano otwór, przez który przymocowano płytkę do rdzenia betonowego. Na płytce ustawiono czujnik indukcyjny, który przytwierdzony był jednocześnie do profilu stalowego. Na rysunku 3. przedstawiono stanowisko badawcze oraz sposób prowadzenia pomiarów odkształceń i przemieszczeń dla każdego typu elementu.



Rys. 2. a) Schemat elementu poddanego testowi push-out; schematy rozmieszczenia tensometrów elektrooporowych: b) w słupach badanych po 28 dniach od zabetonowania, c) w słupach badanych po trzech latach od zabetonowania



Rys. 3. a) Stanowisko badawcze elementu badanego po 28 dniach od zabetonowania, b) stanowisko badawcze elementu badanego po trzech latach od momentu zabetonowania z zaznaczonym otworem w płaszczu stalowym, c) stanowisko badawcze elementu badanego po trzech latach od zabetonowania z przymocowanym czujnikiem indukcyjnym

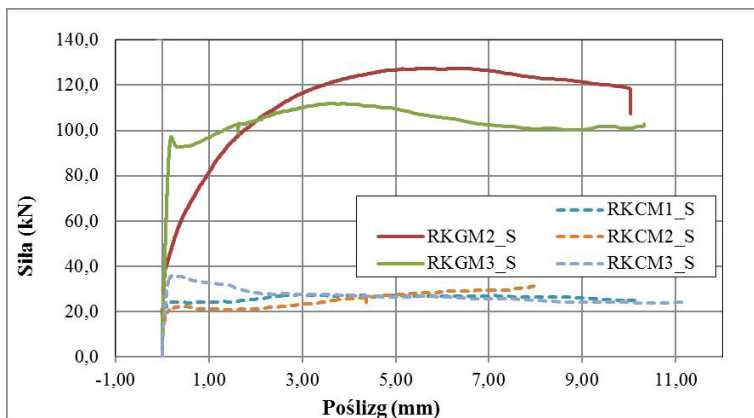
3. Analiza wyników badań

Na podstawie uzyskanych wyników badań przeprowadzono analizę wpływu wybranych parametrów takich jak: grubość ścianki profilu stalowego, geometria przekroju, wiek i wytrzymałość betonu na przyczepność stali i betonu SCC w słupach typu CFST.

3.1. Wpływ grubości ścianki profilu stalowego

Wpływ grubości ścianki profilu stalowego na przyczepność stali i betonu SCC w słupach typu CFST, wypełnionych betonem tej samej wytrzymałości na ściskanie, określono na

podstawie wykresu siła – przemieszczenie (rys. 4.) wykonanego dla elementów o przekroju kwadratowym z cienką ($t = 6$ mm) i grubą ($t = 10$ mm) ścianką płaszczu stalowego.



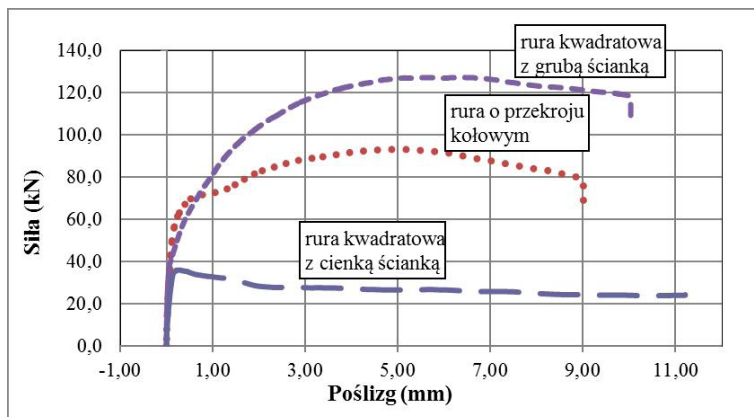
Rys. 4. Wykresy zależności siła – poślizg dla elementów o przekroju kwadratowym o różnych grubościach ścianki, badanych po trzech latach

Na wykresie zamieszczonym na rysunku 4. można zauważyć, że w przypadku rur z grubszą ścianką (RKGM_S) uzyskano większą wartość siły maksymalnej niż w przypadku rur z cienką ścianką (RKCM_S), w których jednocześnie zarejestrowano większe wartości poślizgu. Takie różnice w charakterze wykresów, można wytłumaczyć tym, że elementy z grubszą ścianką są mniej podatne na jej wyobcowanie, a co za tym idzie odspojenie od betonu. Zatem w większym stopniu występuje w nich zjawisko skrzepowania powodujące zwiększenie wytrzymałości betonu.

3.2. Wpływ geometrii przekroju

W celu określenia wpływu geometrii przekroju na przyczepność obydwu materiałów porównano reprezentatywne wykresy zależności siła – poślizg dla każdego z trzech badanych typów przekrojów (rys. 5.): kwadratowego o dwóch grubościach stalowego płaszczu oraz kołowego, wypełnionych betonem o tej samej wytrzymałości na ściskanie.

Na rysunku 5. można zauważyć, że najgorsze warunki przyczepności występują w słupach o przekroju kwadratowym z cienką ścianką, a najlepsze w słupach kwadratowych z grubszą ścianką. Jednocześnie, w przypadku elementów o przekroju kołowym można zaobserwować podobny charakter wykresu, co w słupach kwadratowych z grubszą ścianką. Należy podkreślić, iż pomimo tego, że w rurach o przekroju kołowym zastosowano tę samą grubość profilu stalowego, co w rurach o przekroju kwadratowym z cienką ścianką, to w rurach o przekroju kołowym osiągnięto lepsze warunki przyczepności oraz wyższą maksymalną siłę w testach push-out. Można w związku z tym wysnuć wniosek, że w rurach o przekroju kołowym panuje klasyczny trójosiowy stan naprężeń. Skrzepowanie betonu po obwodzie takich rur jest równomierne, natomiast w elementach o przekroju kwadratowym największe skrzepowanie występuje w narożach, a najmniejsze w środkach boków rur.



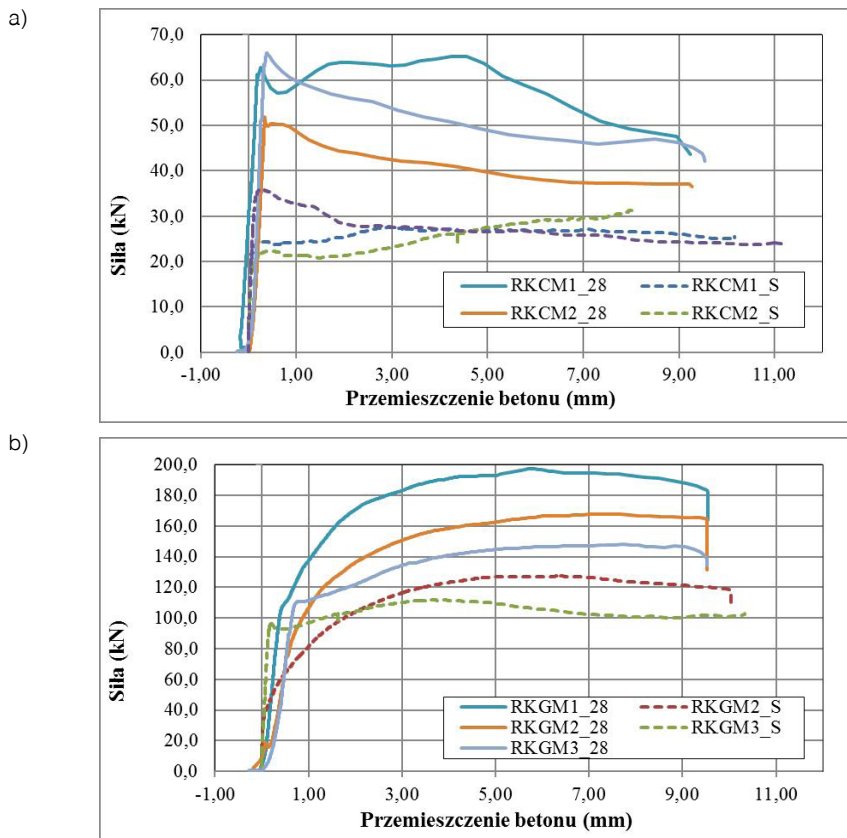
Rys. 5. Reprezentatywne wykresy zależności siła–poślizg, dla każdego z trzech badanych typów przekroju

3.3. Wpływ wieku betonu

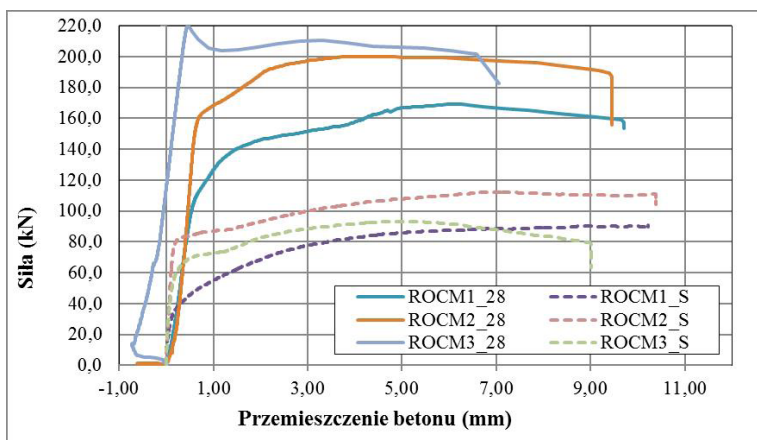
W niniejszym referacie wpływ wieku betonu na warunki przyczepności w słupach typu CFST przedstawiono na przykładzie przebiegu zależności siła – przemieszczenie betonu względem płaszcza stalowego (rys. 6. i 7.) oraz wartości maksymalnych sił powodujących zerwanie przyczepności (tabela 5.).

Tabela 5. Maksymalne wartości sił uzyskanych z testów push-out

Oznaczenie elementu	Siła maksymalna N_u w elementach badanych po 28 dniach [kN]	Siła maksymalna N_u w badanych elementach z uwzględnieniem skurczu betonu [kN]	Spadek wartości po trzech latach [%]
1	2	3	4
RKCM1	65,3	27,6	57,7
RKCM2	51,8	31,2	39,8
RKCM3	65,9	35,9	45,5
RKGM1	197,4	-	-
RKGM2	167,7	127,4	24,0
RKGM3	147,9	112,1	24,2
ROCM1	169,4	90,7	46,5
ROCM2	200,2	112,3	43,9
ROCM3	219,7	93,2	57,6



Rys. 6. Wykresy zależności siła – przemieszczenie betonu uzyskane w elementach w różnym wieku betonu: a) rury o przekroju kwadratowym z cieńszą ścianką płaszczu stalowego, b) rury o przekroju kwadratowym z grubszą ścianką płaszczu stalowego

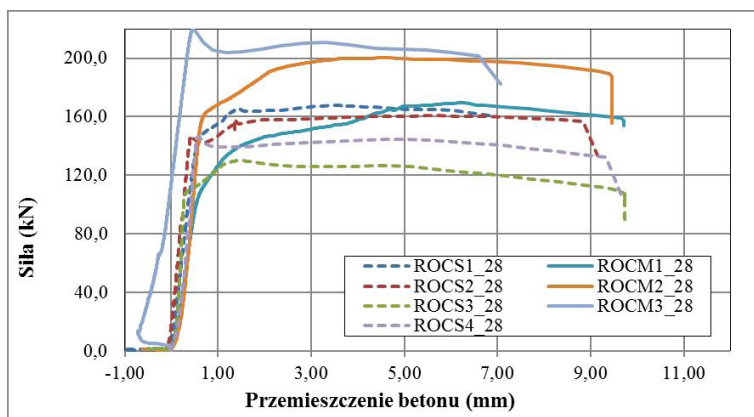


Rys. 7. Wykresy zależności siła – przemieszczenie betonu uzyskane w elementach w różnym wieku betonu o przekroju kołowym

Analizując uzyskane maksymalne wartości sił N_U z testów push – out można zauważyć, że niezależnie od rozpatrywanego typu przekroju, słupy badane po 28 dniach od momentu zabetonowania uzyskały większe wartości siły maksymalnej, niż elementy badane z uwzględnieniem skurczu betonu. Odnotowany spadek siły maksymalnej w próbkach starszych, jest niewątpliwie związany z występowaniem zjawiska skurczu betonu. Najmniejszy spadek siły maksymalnej, został osiągnięty przez próbki o przekroju kwadratowym z grubą ścianką. Stosunek maksymalnych sił próbek 28-dniowej i 3 – letniej wyniósł 1,4.

3.4. Wpływ wytrzymałości betonu

Na rysunku 8. zaprezentowano wykresy zależności siła – przemieszczenie, uzyskane w elementach o przekroju kołowym wypełnionych betonem o niższej (ROCS) oraz wyższej (ROCM) wytrzymałości na ściskanie, które badane były po 28 dniach od zabetonowania.



Rys. 8. Wykresy zależności siła – przemieszczenie betonu uzyskane w elementach o przekroju kołowym wypełnionych betonem „słabszym” i „mocniejszym”, badane po 28 dniach

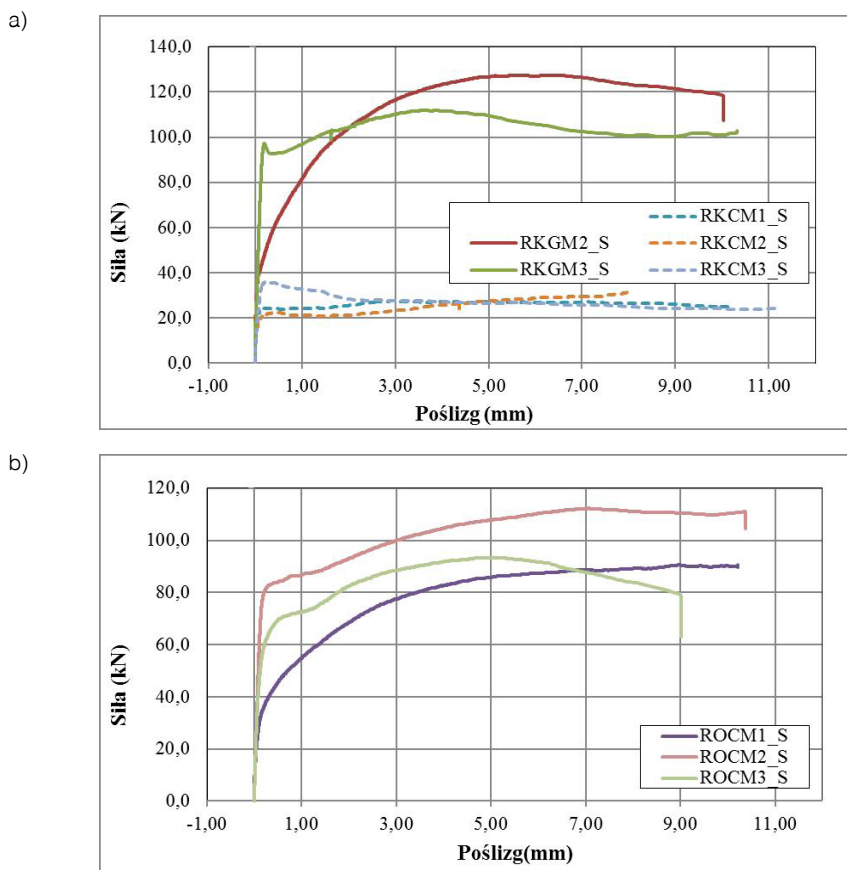
W słupach wypełnionych betonem mocniejszym uzyskano większe wartości sił zrywających przyczepność między stalą i betonem, niż w przypadku elementów wykonanych z betonu słabszego. Oznacza to, że nawet niewielka różnica w wartości wytrzymałości betonu na ściskanie równa 7 MPa, powoduje zmianę wartości siły zrywającej.

3.5. Analiza zależności siła – poślizg

Na rysunku 9. przedstawiono wykresy zależności siła – poślizg uzyskane w elementach o przekroju kwadratowym z cienką ścianką a), grubą ścianką b) oraz słupy o przekroju kołowym c). Przedstawiono wyłącznie wyniki próbek badanych po okresie 3 lat.

Analizując wykresy (rys. 9.) można zauważyć, że w przypadku elementów o przekroju kwadratowym z cienką ścianką w początkowej fazie testu, występuje znikomy przyrost poślizgu między betonem i stalą, aż do momentu osiągnięcia maksymalnej wartości siły osiowej. W późniejszej fazie testu przyrost przemieszczeń jest szybszy, niż w przypadku słupów o przekroju kołowym. Na wykresach sporządzonych dla elementów o przekroju kwadratowym z cienką i grubszą ścianką, można zaobserwować wpływ zjawiska skrzepowania betonu na wielkość siły zrywającej przyczepność między stalą i betonem. W przy-

padku słupów z grubszą ścianką, wartość siły zrywającej jest większa niż w elementach z cienką ścianką. Przyczyną tego niewątpliwie jest większa grubość płaszcza stalowego, która powoduje, że element jest mniej podatny na wyboczenie i jednocześnie wywołuje większe skrzepowanie betonu, niż w elementach z cienką ścianką. Co więcej, można zauważyć, że zarówno w słupach z cienką, jak i grubszą ścianką od momentu przyłożenia siły osiowej do wartości siły odpowiadającej zerwaniu przyczepności w elementach z cieńszą ścianką, przyrost poślizgu jest podobny. Dopiero w późniejszej fazie testu w elementach z grubszą ścianką wartość poślizgu zaczyna szybciej przyrastać.



Rys. 9. Wykresy zależności siła – poślizg dla elementów o przekroju: a) kwadratowym z cieższą i grubszą ścianką płaszcza stalowego, b) kołowym, badane po skurczu betonu

3.6. Analiza naprężeń przyczepności w badanych elementach

Analizę naprężeń przyczepności przeprowadzono w oparciu o zalecenia ujęte w normie PN-EN 1994-1-1:2008. Zgodnie z zapisami normowymi, należy zapewnić przeniesienie podłużnych naprężeń ścinających w płaszczyźnie zespolenia, w obszarach przekazywania obciążeń w postaci sił wewnętrznych i momentów na końcach słupa oraz w miejscach występowania obciążeń na jego długości. W słupach osiowo ściskanych, należy zapewnić przeniesienie sił ścinających jedynie w obszarze przekazywania obciążenia. W strefach,

w których obliczeniowa wytrzymałość na ścinanie τ_{Rd} zostanie przekroczona na powierzchni zespolenia, należy zastosować specjalne łączniki na ścinanie. Wartości obliczeniowej nośności na ścinanie τ_{Rd} według EC4 podano w tabeli 6. Należy zaznaczyć, że opisane w niniejszym referacie badania dotyczą elementów zespolonych stalowo-betonowych wykonanych z betonu SCC, natomiast zalecenia ujęte w [11] dotyczą elementów z betonu zwykłego lub lekkiego.

Tabela 6. Obliczeniowa nośność na ścinanie τ_{Rd} według [11]

Typ przekroju poprzecznego	τ_{Rd} [N/mm ²]
W pełni obetonowany przekrój stalowy	0,30
Wypełniony betonem okrągły przekrój rurowy	0,55
Wypełniony betonem prostokątny przekrój rurowy	0,40
Półki częściowo obetonowanego przekroju	0,20
Środniki częściowo obetonowanego przekroju	0,00

Na podstawie otrzymanych wyników badań wykonano analizę wartości maksymalnych sił i średnich naprężeń przyczepności i porównano je z zaleceniami ujętymi w [11].

Zakładając, że przy maksymalnej sile $N = N_U$ rozkład naprężeń stycznych jest stały na wysokości próbki H , średnie naprężenia przyczepności można wyznaczyć ze wzoru:

$$\tau_U = \frac{N_U}{\rho H} \quad (1)$$

gdzie: N_U – maksymalna siła uzyskana w badaniu, ρ – obwód przekroju poprzecznego stali w kontakcie z betonem, H – wysokość strefy kontaktu betonu i stali.

W tabeli 7. zestawiono wartości maksymalnych naprężeń przyczepności obliczonych według (1) otrzymanych na podstawie badań z odpowiednimi wartościami normowych nośności na ścinanie τ_{Rd} , określonymi w EC4. W celu umożliwienia porównania z obliczeniowymi wartościami podanymi w normie, wartości otrzymane z badań podzielono przez wartość częściowego współczynnika $\gamma_{vs} = 1,25$. Jak wynika z tabeli 6. w normie nie uwzględnia się wpływu grubości ścianek profilu stalowego, natomiast badania pokazały, że zastosowanie profili z cieńszymi ściankami może spowodować, że ich rzeczywista nośność na ścinanie jest mniejsza niż normowa. Z tabeli 7. wynika, że w przypadku rur okrągłych i mocnego betonu, zjawisko skurczu spowodowało, że nośność na ścinanie zmniejszyła się dwukrotnie w stosunku do badanej po 28 dniach i była mniejsza niż wartość podana w tablicy normowej EC4. W tabeli normowej wartość obliczeniowej nośności na ścinanie jest wyższa w elementach o przekroju kołowym niż w rurach kwadratowych. Taka relacja zachowana jest jedynie w przypadku elementów badanych po 28 dniach, podczas gdy w słupach badanych po trzech latach, relacja ta jest odwrotna, wyższa wartość podłużnych naprężeń ścinających została uzyskana przez elementy o przekroju kwadratowym z grubszą ścianką.

Tabela 7. Obliczeniowe wartości podłużnych naprężeń stycznych uzyskane z badań oraz obliczeniowe nośności na ścinanie zalecane według EC4

Oznaczenie modelu	Oblicz. średnie maksymalne naprężenie przyczepności z badań		Obliczeniowa wytrzymałość na ścinanie wg EC4
	$\tau_m = \frac{N_u/A_{c-s}}{\gamma_{vs}}$		τ_{Rd}
	[N/mm ²]		[N/mm ²]
	po 28 dniach	po 3 latach	-
1	2	3	6
RKCM	0,24	0,13	0,40
RKGM	0,71	0,50	0,40
ROCM	0,81	0,40	0,55
ROCS	0,62	-	0,55

Według zaleceń normowych nośność na ścinanie w płaszczyźnie zespolenia na styku betonu i stali, zależy jedynie od kształtu przekroju, natomiast z uzyskanych wartości naprężeń ścinających wynika, że na wartość naprężeń przyczepności, wpływ mają takie czynniki jak grubość profilu stalowego, wytrzymałość betonu na ściskanie wypełniającego profil stalowy oraz wiek betonu.

4. Wnioski

W literaturze światowej autorki referatu nie spotkały się dotąd z publikacjami dotyczącymi zagadnienia przyczepności stali i betonu SCC w elementach zespolonych. Na podstawie przeprowadzonej analizy wyników badań własnych można sformułować następujące wnioski:

- Na przyczepność betonu SCC i stali wpływa nie tylko geometria przekroju, ale również grubość ścianek profilu stalowego w przypadku rur o przekroju kwadratowym;
- Wytrzymałość betonu na ściskanie ma wpływ na wartość maksymalnej siły osiowej, przy której następuje utrata przyczepności między obydwojma materiałami. W elementach wypełnionych betonem mocniejszym uzyskano wyższe wartości siły ściskającej, niż w słupach wypełnionych betonem słabszym;
- Wpływ skurczu betonu na przyczepność we wszystkich typach przekrojów nie powinien być pomijany w trakcie określania wartości naprężeń przyczepności w strefie kontaktu betonu SCC z kształtownikiem stalowym. Otrzymane na podstawie badań wartości obliczeniowych naprężeń ścinających po 28 dniach są niemal dwukrotnie wyższe niż wartości otrzymane w elementach badanych po trzech latach;
- Na podstawie wartości maksymalnych sił uzyskanych z testów push-out, można zauważyć wpływ zjawiska skrępowania na warunki przyczepności w płaszczyźnie

zespoleń. Jest on największy w słupach o przekroju kołowym i o przekroju kwadratowym z grubszą ścianką płaszczu stalowego;

W normie określono, że obliczeniowa nośność na ścinanie τ_{Rd} jest wyższa w przypadku rur o przekroju kołowym niż rur o przekroju prostokątnym. Z otrzymanych na podstawie badań doświadczalnych wartości obliczeniowych naprężeń ścinających wynika, że określona w normie relacja potwierdza się jedynie w przypadku elementów badanych po 28 dniach, ponieważ po uwzględnieniu zjawiska skurczu betonu wyższe wartości obliczeniowych naprężeń ścinających uzyskały słupy o przekroju kwadratowym. Zgodnie z zaleceniami określonymi w normie PN-EN 1994-1-1-2008, wartość obliczeniowych naprężeń ścinających zależy jedynie od rodzaju przekroju elementów ściskanych. Jak wynika z przedstawionej w referacie analizy na wartość naprężeń przyczepności w płaszczynie zespoleń elementów typu CFST, mają wpływ takie właściwości jak: grubość ścianki profilu stalowego, geometria przekroju, wiek betonu, a także wytrzymałość betonu na ściskanie, co wykazano również w pracy [5]. Należy podkreślić, że zalecenia normowe dotyczą elementów wykonanych z betonu zwykłego, ale wydaje się, że nawet w tym przypadku warunki klasyfikacji granicznej nośności na ścinanie τ_{Rd} wydają się być niewystarczające.

Literatura

- [1] Dobosz J.M.: Analiza przyczepności stali i betonu w ściskanych elementach zespolonych, Praca dyplomowa magisterska, Wydział Inżynierii Lądowej, Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2018.
- [2] Hunaiti, Y.M., 1991. Bond strength in battened composite columns, *Journal of Structural Engineering*, 117(3): 699-714.
- [3] Hunaiti, Y.M., 1994. Aging effect on bond strength in composite sections. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 6(4): 469-73.
- [4] Roeder, C.W., Cameron, B., Brown, C.B., 1999. Composite action in concrete filled tubes. *Journal of Structural Engineering*, 125(5): 477-484.
- [5] Szmigiera E., Woyciechowski P.: Wpływ zastosowania betonu samozagęszczalnego na przyczepność do stali w słupach zespolonych, Konferencja „Dni betonu”, Wisła 11-13 październik 2010, str.: 797-806.
- [6] Szmigiera E., Woyciechowski P.: Kształtowanie jakości zespoleń w słupach zespolonych wypełnionych betonem samozagęszczalnym, Konferencja „Dni betonu”, Wisła 8-10 październik 2012, str.: 739-748.
- [7] Szmigiera E., Woyciechowski P.: Influence of the compaction method on the bond between steel and concrete in composite columns, w: *Periodica Polytechnica-Civil Engineering*, vol. 57, nr 2, 2013, ss. 129-137.
- [8] Szmigiera Elżbieta: Verbund zwischen Stahl und Selbstverdichtendem Beton in Verbundstützen, w: *Stahlbau*, vol. 81, nr 8, 2012, 616-620.
- [9] Virdi K.S., Dowling P.J.: Bond strength in concrete filled circular steel tubes. CESLIC Report CC11, Department of Civil Engineering, Imperial College, London, 1975, December.
- [10] Virdi K.S., Dowling P.J.: Bond strength in concrete filled steel tubes, IABSE proceedings = Memoires AIPC = IVBH Abhandlungen, 1980.
- [11] PN-EN 1994-1-1-2008 – Projektowanie zespolonych konstrukcji stalowo-betonowych. Część 1-1 Reguły ogólne i reguły dla budynków.
- [12] PN-EN 450-1:2012 – Popiół lotny do betonu – Część 1: Definicje, specyfikacje i kryteria zgodności.

