

dr hab. inż. Marcin Abramski, prof. uczelni<sup>1)\*</sup>

ORCID: 0000-0001-6671-3757

dr hab. inż. Piotr Korzeniowski, prof. uczelni<sup>2)</sup>

ORCID: 0000-0002-6507-1390

mgr inż. Jarosław Kondrat<sup>1)</sup>

# Efektywność skrzepowania betonu w grubościennych słupach typu Concrete-Filled Steel Tube o przekroju kołowym

## *Effectiveness of concrete confinement in thick-walled circular concrete-filled steel tubular columns*

DOI: 10.15199/33.2023.10.01

**Streszczenie.** W słupach typu CFST w stanie granicznym dochodzi do zwiększenia wytrzymałości betonu rdzenia na skutek jego skrzepowania. Zaistnienie tego zjawiska zależy od wielu czynników. Jednym z najważniejszych z nich jest sztywność obwodowa płaszcza stalowego. Jej wpływ na efektywność wzrostu wytrzymałości betonu rdzenia przebadano eksperymentalnie na grupie 48 grubościennych słupów CFST. Wykazano, że nadmierne zwiększanie grubości płaszcza słupa CFST nie przekłada się na wzrost jego nośności sprowadzonej. Jest wręcz przeciwnie: następuje jej spadek. Znacznie lepsze wykorzystanie pozytywnego wpływu skrzepowania betonu rdzenia można osiągnąć z zastosowaniem rur cienkościennych niż grubościennych.

**Słowa kluczowe:** słupy; badania eksperymentalne; beton skrzepowany; CFST; efektywność.

**Abstract.** In the limit state of the CFST columns, the core concrete strength increases due to its confinement. This positive effect depends on many factors. One of the most important is the ring stiffness of the steel tube. Its impact on the effectiveness of increasing the core concrete strength was experimentally tested on a group of 48 thick-walled CFST columns. It has been shown that an excessive increase in the tube thickness does not translate into an increase in its relative load capacity. On the contrary, it is decreasing. A much better use of the core concrete confinement can be achieved by using thin-walled tubes rather than thick-walled ones.

**Keywords:** columns; experimental investigation; confined concrete; CFST; effectiveness.

Konstrukcje typu CFT (ang. *Concrete-Filled Tube*, pol. rura wypełniona betonem), stosowane od wielu lat, są atrakcyjne od strony wykonawczej. Wypełnienie betonem przekroju zamkniętego nie wymaga stosowania szalunków. Ponadto konstrukcje w tym typie uważane są za estetyczne (fotografia). Są one najczęściej stosowane w słupach. Rura, o przekroju kołowym lub prostokątnym (przede wszystkim kwadratowym), może być wykonana ze stali lub z polimerowego kompozytu zbrojonego włóknem (ang. *Fiber-Reinforced Polymer – FRP*). W przypadku użycia stali skrótowiec CFT zmienia się na CFST (litera S pochodzi od słowa steel), a w przypadku FRP – na CFFT. Rdzeń betonowy uwięziony w stalowym lub polimerowym płaszczu może, przy spełnieniu określonych warunków, pracować w stanie trójosiowego ściskania. Stan ten, zwany skrzepowaniem betonu, prowadzi do zwiększenia wytrzymałości betonu rdzenia i ewentualnego wzrostu nośności słupa CFT. Wpływ wytworzonego przestrzennego stanu naprężenia w betonie rdzenia na zwiększenie wytrzymałości betonu zależy od wielu czynników. Do najważniejszych z nich, w przypadku słupów CFST, należą:

1) odpowiednia sztywność obwodowa płaszcza (zbyt cienki płaszcz, w dodatku o małym module sprężystości, nie będzie



**Przykład zastosowania słupów CFST w konstrukcji zespolonego stalowo-betonowego obiektu mostowego nad autostradą A93 między Hof i Ratzboną w Niemczech**

*An example of CFST columns application: composite steel and concrete bridge over the A93 highway between Hof and Regensburg in Germany*

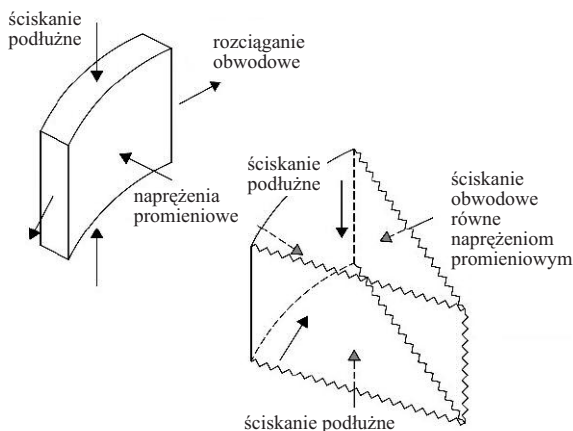
stawiał oporu odkształcającemu się poprzecznie betonowi rdzenia – rysunek 1);

2) położenie wypadkowej siły ściskającej jak najbliżej środka ciężkości przekroju, a w każdym razie wewnątrz rdzenia przekroju (duże mimośrodowość redukuje lub nawet całkowicie eliminują efekt skrzepowania betonu);

<sup>1)</sup> Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska

<sup>2)</sup> Akademia Nauk Stosowanych w Elblągu, Instytut Politechniczny

\*) Adres do korespondencji: marcin.abramski@pg.edu.pl



Rys. 1. Idea pracy słupów typu CFT  
Fig. 1. State of stresses in a CFT column

3) mała smukłość słupa (duża smukłość słupa powoduje efekty II rzędu prowadzące do zwiększenia mimośrodowości);  
4) kształt przekroju poprzecznego rury zbliżony do koła, umożliwiający stworzenie warunków obrotowo symetrycznego trójosiowego ściskania w rdzeniu słupa (najlepszy jest przekrój kołowy).

W artykule omówiono, w jakim stopniu wymienione czynniki wpływają na przyrost nośności betonowego rdzenia słupa CFST. Trudno byłoby sprawdzić wszystkie czynniki na ograniczonej liczbie elementów badawczych, dlatego w opracowanym programie badań eksperymentalnych, obejmującym 48 słupów, czynniki drugi i czwarty nie odgrywały żadnej roli. Wszystkie słupy były ściskane osiowo (pomijając oczywiście mimośrodowość niezamierzoną) i miały kołowy przekrój poprzeczny. Różnice obejmowały natomiast sztywność obwodową płaszcza oraz smukłość słupów.

### Współczynnik skrępowania betonu jako miara efektywności zwiększenia wytrzymałości betonu rdzenia w słupach CFST

Pierwszym spośród dwóch wymienionych czynników decydujących o efektywności skrępowania, które poddaliśmy badaniom, jest **sztywność obwodowa płaszcza**. Termin ten wymaga uściślenia, ponieważ nie jest stosowany w zagadnieniach skrępowania betonu rdzenia słupów CFT. W celu zdefiniowania sztywności obwodowej na rysunkach 1 i 2 pokazano ideę kreowania w słupach CFST przestrzennego stanu naprężeń ściskających w wyniku skrępowania betonu rdzenia przez stalowy płaszcz. Na skutek ograniczenia poprzecznych odkształceń w betonie rdzenia powstają w nim naprężenia poprzeczne (promieniowe)  $\sigma_2$ . Prowadzą one do zwiększenia wytrzymałości betonu rdzenia na ściskanie w kierunku podłużnym. Rysunek 2 ilustruje połowę przekroju poprzecznego słupa CFST, podzieloną na płaszcz zewnętrzny i rdzeń betonowy. Wartość naprężeń  $\sigma_2$  jest jednakowa na obwodzie rdzenia betonowego oraz w przekroju poprowadzonym prostoliniowo przez środek geometryczny słupa, analogicznie jak w sprężonym gazie wypełniającym rurociąg (rysunek 2b). Analizując w fazie sprężystej (tj. przed osiągnięciem naprężeń plastycznych  $f_y$  w stali), zależność między radialnym par-

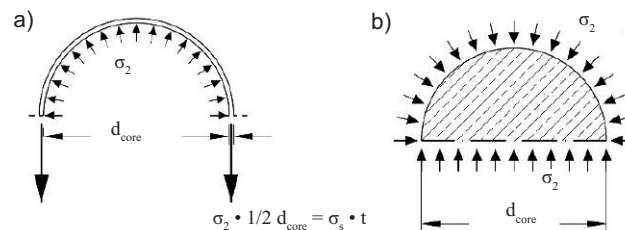
ciem na wewnętrzną powierzchnię płaszcza  $\sigma_2$  a równoważącymi je siłami obwodowymi w płaszczu można zapisać:

$$\sigma_2 \cdot d_{\text{core}}/2 = \sigma_s \cdot t = E_s \cdot \varepsilon_s \cdot t \quad (1)$$

gdzie:

$\varepsilon_s$  i  $\sigma_s \leq f_y$  – odkształcenie i naprężenie obwodowe panujące w ścianie stalowej rury, wywołane działaniem parcia  $\sigma_2$ , a  $E_s$  i  $t$  – odpowiednio moduł sprężystości stali i grubość ścianki rury.

Termin **sztywność obwodowa** jest powszechnie stosowany w teorii i praktyce podziemnych bezciśnieniowych przewodów układanych z rur termoplastycznych [1] czy termoutwardzalnych [2]. Definiowany jest on jako opór rury na zmianę średnicy jej przekroju poprzecznego wskutek obciążenia zewnętrznego, najczęściej nierównomiernego parcia gruntu, powodującego zginanie przekroju rury. W przypadku słupów CFST charakter obciążenia jest inny. Obciążenie rury wynika z obrotowo symetrycznego parcia betonu powodującego jej rozcią-



Rys. 2. Równowaga naprężeń w przekroju poprzecznym słupa CFST: a) płaszcz stalowy b) rdzeń betonowy

Fig. 2. Stress equilibrium in the cross-section of the CFST column: a) steel tube b) concrete core

ganie w kierunku obwodowym. Towarzyszy temu zwiększenie obwodu i średnicy przekroju poprzecznego płaszcza, co powoduje uchylenie się płaszcza od hamowania poprzecznych radialnych wydłużeń betonu rdzenia i tym samym jego skrępowania. Z tego względu postanowiliśmy wprowadzić pojęcie sztywności obwodowej płaszcza jako oporu stawianego przez przekrój rury przeciw wydłużaniu się jego obwodu i średnicy (wielkości te są ściśle powiązane ze sobą) wskutek radialnego parcia  $\sigma_2$ , działającego prostopadle do powierzchni wewnętrznej rury. Zwiększenie obwodu i średnicy przekroju poprzecznego jest jednoznacznie związane z jednostkowym odkształceniem obwodowym płaszcza  $\varepsilon_s$ . Z zależności (1) można wyznaczyć odkształcenie obwodowe płaszcza  $\varepsilon_s$ :

$$\varepsilon_s = \frac{\sigma_2}{E_s \cdot t} = \frac{\sigma_2}{S} \quad (2)$$

gdzie:

$S$  – zdefiniowana przez nas sztywność obwodowa rury

$$S = \frac{E_s \cdot t}{\frac{d_{\text{core}}}{2}} = \frac{2 \cdot E_s \cdot t}{d_{\text{core}}} \quad (3)$$

Jak można zauważyć, tak zdefiniowana sztywność zależy, poza modułem sprężystości, od grubości ścianki płaszcza i jego średnicy i zwiększa się wraz ze wzrostem grubości ścianki płaszcza i zmniejszeniem jego średnicy. Znając wydłużenie obwodowe płaszcza, można bez trudu wyznaczyć także wzrost jego średnicy wskutek działania parcia  $\sigma_2$ . Obie wielkości będą tym większe, im większe będzie odkształcenie ob-

wodowe  $\varepsilon_s$ , a więc im mniejsza będzie sztywność  $S$ . Rury o dużej sztywności obwodowej (dużej grubości i małej średnicy) będą bardziej efektywne w kreowaniu przestrzennego stanu naprężenia w betonie rdzenia niż rury o małej sztywności obwodowej. Naszym zdaniem sztywność obwodowa płaszczka pozwala znacznie prościej niż sztywność przy rozciąganiu  $E_s \cdot A$  analizować efektywność rury w kreowaniu przestrzennego stanu naprężenia betonu w słupach CFST.

Przedstawiony model mechaniczny zjawiska przyrostu wytrzymałości betonu rdzenia jest powszechnie stosowany w projektowaniu słupów typu CFT. Model ten ma zastosowanie w normach projektowania konstrukcji betonowych [3] oraz zespolonych stalowo-betonowych [4]. Omawiane w artykule zjawisko skrępowania betonu zachodzi w żelbetowych słupach uzwojonych [5], dlatego też uzasadnione jest uwzględnianie w literaturze przedmiotu normy projektowania [3]. Norma ta wyznacza wytrzymałość na ściskanie  $f_{cc}$  betonu rdzenia słupa uzwojonego z zależności:

$$f_{cc} = f_c(1,0 + 5,0 \sigma_2/f_c) \text{ w przypadku } \sigma_2 \leq 0,05 \cdot f_c \quad (4)$$

$$f_{cc} = f_c(1,125 + 2,5 \sigma_2/f_c) \text{ w przypadku } \sigma_2 > 0,05 \cdot f_c \quad (5)$$

Wartość liczbowa nacisku poprzecznego  $\sigma_2$  płaszczka słupa na jego rdzeń, oznaczonego na rysunku 1 jako naprężenia promieniowe, może być wyznaczona na podstawie rozumowania przedstawionego graficznie na rysunku 2. Warunek równowagi sił i naprężeń w tym przekroju, przy założeniu uplastycznienia stali w stanie granicznym nośności, można zapisać następująco:

$$\sigma_2 \cdot d_{core} = 2 \cdot f_y \cdot t \quad (6)$$

gdzie:  $f_y$  – wytrzymałość obwodowa stali płaszczka na rozciąganie.

Z wzoru (6) wynika, że:

$$\sigma_2 = \frac{2 \cdot f_y \cdot t}{d_{core}} \quad (7)$$

Po wstawieniu wyznaczonej zależności na  $\sigma_2$  do wzorów (4) i (5) otrzymuje się:

$$f_{cc} = f_c \left( 1,0 + 10,0 \frac{t \cdot f_y}{d_{core} \cdot f_c} \right) \text{ dla } \sigma_2 \leq 0,05 \cdot f_c \quad (8)$$

$$f_{cc} = f_c \left( 1,125 + 5,0 \frac{t \cdot f_y}{d_{core} \cdot f_c} \right) \text{ dla } \sigma_2 > 0,05 \cdot f_c \quad (9)$$

Wyprowadzone w ten sposób zależności prawie nie różnią się od podanych w drugiej z wspomnianych norm, dotyczącej projektowania konstrukcji zespolonych [4]:

$$f_{cc} = f_c [1,0 + \eta_{c0}(t \cdot f_y / (D \cdot f_c))] \quad (10)$$

gdzie:

$D$  – średnica zewnętrzna słupa CFST;

$\eta_{c0}$  – bezwymiarowy współczynnik zwiększający wytrzymałość betonu stosownie do dalszych, bardziej już złożonych zależności podanych w normie.

W związku z jednolitym podejściem obliczeniowym do wyznaczania wzrostu wytrzymałości betonu skrępowanego rozsądnie jest przyjąć iloraz  $\sigma_2/f_c$  za poszukiwaną miarę efektywności skrępowania rdzenia słupa CFST. Jak wynika z wzorów (4) i (5), jest to bowiem jedyny parametr wpływający na przyrost nośności rdzenia wyrażony ilorazem  $f_{cc}/f_c$ . Parametr  $\sigma_2/f_c$ , nazywany dalej współczynnikiem skrępowania betonu rdzenia, będzie oznaczany w artykule symbolem  $\varphi$ . Współczynnik ten można, zgodnie z zależnością (7), wyrazić wzorem:

$$\varphi = \frac{\sigma_2}{f_c} = \frac{2 \cdot f_y \cdot t}{f_c \cdot d_{core}} \quad (11)$$

Należy podkreślić, że stosując zaproponowany współczynnik  $\varphi$ , przy przyjęciu uproszczenia  $D = d_{core}$ , można zapisać normową zależność (10) w następujący sposób:

$$f_{cc} = f_c [1,0 + \eta_{c0}(\varphi/2)] \quad (12)$$

Współczynnik  $\varphi$ , chociaż niestosowany w nomach projektowania, bywa używany przez badaczy zajmujących się betonem skrępowanym, np. w pracach [6] oraz [7] autorzy użyli współczynnika  $\varphi$  (nie nadając mu jednak symbolu) do porównania efektywności skrępowania betonu przez płaszcz stalowy i płaszcz FRP. W tym miejscu należy zaznaczyć, że współczynnik  $\varphi$  zaproponowany jako miara efektywności skrępowania rdzenia słupa CFST nie jest rozwiązaniem idealnym. Nie uwzględnia on bowiem np. efektu zwiększenia średnicy płaszczka słupa, spowodowanego zjawiskiem Poissona zachodzącym w płaszczu. Współczynnik  $\varphi$  nie ujmuje ponadto w żaden sposób skurczu betonu rdzenia słupa, a zjawisko to negatywnie wpływa na skrępowanie betonu. Ponadto naprężenia obwodowe w stalowym płaszczu nie zawsze osiągają wartość granicy plastyczności stali  $f_y$  (szczególnie w grubych płaszczkach). Mimo wymienionych ograniczeń, zdecydowaliśmy się wybrać  $\varphi$  jako miarę efektywności skrępowania rdzenia słupa CFST, uważając przytoczone argumenty za jego wykorzystaniem za wystarczające.

### Analiza wpływu wartości współczynnika skrępowania betonu na wzrost nośności słupa CFST

Przeanalizowaliśmy ten wpływ, wykorzystując własne badania eksperymentalne przeprowadzone na 48 słupach CFST [8]. Średnica zewnętrzna wszystkich przebadanych słupów wynosiła 168,3 mm, natomiast grubość płaszczka stalowego połowy słupów – 5 mm, a drugiej połowy – 10 mm. Pod względem wysokości, badane słupy także podzielono na dwie równe grupy. W przypadku jednej z nich wysokość wynosiła 800 mm, a drugiej – 2200 mm. Jedną połowę przebadanych słupów wykonano z betonu o średniej wytrzymałości walcowej  $f_{cm} \approx 30$  MPa, a drugą – o wytrzymałości  $f_{cm} \approx 60$  MPa. Kolejnym parametrem badań był sposób przyłożenia obciążenia do słupa. Połowa słupów obciążana była wyłącznie przez betonowy rdzeń, a druga połowa – za pośrednictwem blachy stalowej jednocześnie przez rdzeń i płaszcz stalowy. Program badań tak zaprojektowano, aby wymienione parametry badań były reprezentowane w sposób równomierny (tabela). Dokładniejsze informacje o programie, przebiegu i wynikach badań eksperymentalnych (w tym nośności eksperymentalnej słupów) podane są w pracy [8]. Wszystkie analizowane słupy badał ten sam zespół osób, w tym samym laboratorium. Obciążenie sterowane było przemieszczeniem, słupy podparto obustronnie przegubowo, a siłę ściskającą przykładano osiowo.

Za miarę przyrostu nośności słupów CFST, spowodowanego zwiększeniem wytrzymałości betonu rdzenia w wyniku panującego w nim trójosiowego stanu naprężeń ściskających, przyjęto stosunek rzeczywistej nośności słupa  $N_{column}$  do no-

**Poglądowe przedstawienie programu badań eksperymentalnych 48 słupów**
*Program of experimental tests of 48 CFST columns*

Grupa słupów	Smukłość $\lambda$ [-]/wysokość $L_0$ słupa [mm]	Grubość płaszcza t [mm]/stopień zbrojenia $\rho$ [%]	Obciążenie słupa przez:	Średnia wytrzymałość walcowa betonu $f_{cm}$ [MPa]	Liczba przebadanych elementów
1	19,0 / 800	5 / 11,5	rdzeń	$\approx 30$	3
2			cały przekrój	$\approx 60$	3
3			cały przekrój	$\approx 30$	3
4			cały przekrój	$\approx 60$	3
5		10 / 22,4	rdzeń	$\approx 30$	3
6			cały przekrój	$\approx 60$	3
7			cały przekrój	$\approx 30$	3
8			cały przekrój	$\approx 60$	3
9	52,3 / 2200	5 / 11,5	rdzeń	$\approx 30$	3
10			cały przekrój	$\approx 60$	3
11			cały przekrój	$\approx 30$	3
12			cały przekrój	$\approx 60$	3
13		10 / 22,4	rdzeń	$\approx 30$	3
14			cały przekrój	$\approx 60$	3
15			cały przekrój	$\approx 30$	3
16			cały przekrój	$\approx 60$	3
				Razem:	48

śności teoretycznej przekroju poprzecznego  $N_{\text{cross-section}}$  przy założeniu jego pełnego uplastycznienia w chwili zniszczenia:

$$\eta = N_{\text{column}} / N_{\text{cross-section}} \quad (13)$$

Stosunek ten nazwano **współczynnikiem efektywności skrzepowania betonu  $\eta$** . Nośność poszczególnych słupów określono na drodze eksperymentalnej:

$$N_{\text{column}} = N_{\text{exp}} \quad (14)$$

Teoretyczną nośność przekroju poprzecznego analizowanych słupów CFT (przy założeniu jego uplastycznienia) wyznaczyliśmy na podstawie eksperymentalnych badań materiałowych, towarzyszących badaniom słupów, jako sumę teoretycznej nośności płaszcza słupa i jego betonowego rdzenia:

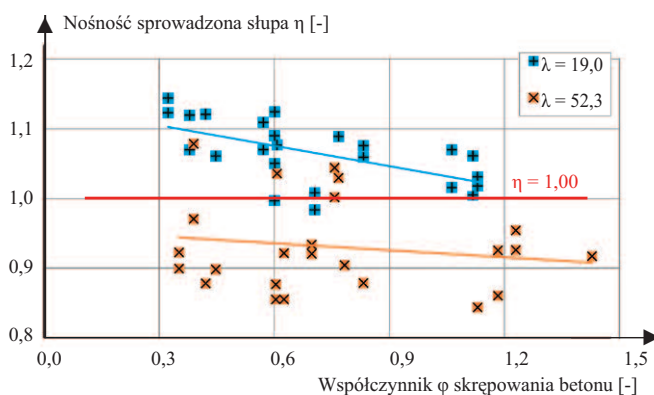
$$N_{\text{cross-section}} = N_{\text{tube}} + N_{\text{core}} = f_y \cdot A_{\text{tube}} + f_c \cdot A_c \quad (15)$$

Symbole  $A$  w równaniu (15) oznaczają pola przekroju poprzecznego dwóch części składowych przekroju słupa CFST. Wytrzymałość rur na ściskanie  $f_y$  przyjęto jako ich wytrzymałość na rozciąganie. Wytrzymałość tę oraz wytrzymałość betonu rdzenia na ściskanie  $f_c$  mierzono na próbkach rury i betonu ją wypełniającego. Próbkę stali rur przeznaczoną do testu rozciągania przygotowano jako łódeczkowe, frezowane z próbek paskowych, które z kolei były wycinane z rur stalowych. Egzemplarze rur do próbek zostały dostarczone do laboratorium wyłącznie w celu oznaczenia parametrów mechanicznych stali i nie służyły do badania słupów CFST. Pomierzona wytrzymałość na rozciąganie stali rur wynosiła 300 – 380 MPa. Wytrzymałość betonu mierzono natomiast na standardowych cylindrach o średnicy 150 mm i wysokości 300 mm. Dokładna, pomierzona wartość wytrzymałości betonu wahała się między 28,8 a 38,7 MPa w przypadku betonu o  $f_{cm} \approx 30$  MPa oraz między 49,4 a 68,4 MPa w przypadku betonu o  $f_{cm} \approx 60$  MPa).

Opisany współczynnik efektywności skrzepowania betonu  $\eta$  bywa często nazywany **nośnością sprowadzoną słupa** [9]. Na rysunku 3 pokazano zależność między nośnością sprowadzoną słupów CFST a współczynnikiem skrzepowania betonu ( $\eta - \phi$ ). Poszczególne punkty na wykresie symbolizują pojedyncze elementy badawcze (słupy), natomiast linie proste to trendy wyznaczone w przypadku dwóch grup słupów wymienionych w tabeli. W grupie 48 przebadanych słupów CFST ich smukłość ( $\lambda = L/i = 4L/D$ ) miała istotny wpływ na nośność sprowadzoną. Słupy smukłe (ukośne krzyżyki na wykresie) mają zdecydowanie mniejszą nośność sprowadzoną niż słupy krępe (oznaczone plusami), przy zbliżonych wartościach współczynnika skrzepowania. Efektu takiego należało oczekiwać. Wzrost smukłości powoduje spadek nośności wszystkich słupów, a w przypadku słupów CFST jest on dodatkowo zwiększony wskutek niekorzystnego wpływu efektów drugiego rzędu na efekt skrzepowania betonu rdzenia.

Maksymalny odnotowany przyrost nośności  $N_{\text{column}}$  słupa w stosunku do nośności jego przekroju  $N_{\text{cross-section}}$  wyniósł kilkanaście procent. W przypadku ok. 50% przebadanych słupów nastąpił przyrost, natomiast w pozostałych odnotowano spadek spowodowany wpływem efektów drugiego rzędu. Przy smukłości  $\lambda = 52,3$  przyrosty odnotowywano sporadycznie i nie przekraczały one 10%.

Analiza wyników przedstawionych na rysunku 3 prowadzi do mniej oczywistego spostrzeżenia niż wpływ smukłości, a mianowicie współczynnik efektywności skrzepowania betonu rdzenia (nośność sprowadzona) zmniejsza się ze wzrostem współczynnika skrzepowania. Jest to widoczne w monotoniczności obu przedstawionych linii trendu: są to funkcje malejące. W słupach uzwojonych zwiększenie zbrojenia poprzecznego prowadzi do wzrostu nośności słupa wskutek zwiększenia wytrzymałości betonu rdzenia pracującego w trójosiowym stanie naprężenia. Wydawać by się mogło, że w przypadku słupów CFST wzrost współczynnika skrzepowania powinien także prowadzić do zwiększenia poprzecznych naprężeń ściskających, a tym samym do zwiększenia wytrzymałości betonu rdzenia, a w efekcie do wzrostu nośności słupa CFST. W słupach CFST



**Rys. 3. Zależność między nośnością sprowadzoną  $\eta$  słupów CFST a ich smukłością  $\lambda$  oraz współczynnikiem  $\phi$  skrzepowania betonu (będącym miarą sztywności obwodowej płaszcza stalowego) w przypadku 48 słupów przebadanych eksperymentalnie**

*Fig. 3. Relationship between the effective load capacity  $\eta$  of CFST columns and their slenderness  $\lambda$  and the coefficient  $\phi$  of concrete confinement (which is a measure of the circumferential stiffness of the steel tube) for 48 experimentally tested columns*

sytuacja jest jednak zasadniczo inna niż w słupach uzwojonych. W słupach uzwojonych zbrojenie poprzeczne (uzwojenie) wpływa jedynie na kreowanie naprężeń poprzecznych, nie przenosząc siły podłużnej, a w słupach CFST płaszcz stalowy, będący odpowiednikiem zbrojenia poprzecznego, bierze też udział w przeniesieniu siły ściskającej słup, zmniejszając siłę przejmowaną przez betonowy rdzeń. Powoduje to zmniejszenie naprężeń pionowych w betonie rdzenia i tym samym naprężeń poprzecznych w wyniku ograniczenia odkształceń poprzecznych betonu przez płaszcz stalowy. Jak wynika ze wzoru (11), współczynnik skrępowania betonu wzrasta wraz z grubością płaszcza stalowego. Z jednej strony, przy wzroście wartości tego współczynnika, powinny więc zwiększać się naprężenia poprzeczne w betonie rdzenia, natomiast z drugiej większa grubość płaszcza stalowego prowadzi do zmniejszenia udziału siły przenoszonej przez betonowy rdzeń i tym samym do zmniejszenia naprężeń poprzecznych. Wpływ wzrostu wartości współczynnika skrępowania na wzrost wytrzymałości betonu rdzenia nie jest więc wcale jednoznaczny, a z rysunku 3 wynika, że jest wręcz niekorzystny.

W przypadku słupów krępych prawie zawsze (poza dwoma przypadkami) odnotowano zwiększenie nośności słupa w stosunku do nośności przekroju. Świadczy to o korzystnym wpływie skrępowania na wzrost wytrzymałości i tym samym nośności betonu rdzenia. Jak to już zaznaczono wcześniej, wzrost nośności spowodowany zwiększeniem nośności betonowego rdzenia, jest mniejszy, im większy jest współczynnik skrępowania. W słupach smukłych obserwuje się podobną tendencję. Nośność spowodowana tych słupów jest w przeważającej mierze mniejsza od jedności, co wynika z niekorzystnego wpływu smukłości i związanych z tym efektów drugiego rzędu. Obserwuje się jednak również zmniejszenie nośności spowodowanej towarzyszące wzrostowi współczynnika skrępowania  $\varphi$ , określonego wzorem (11).

Przedstawione wnioski sformułowane zostały na podstawie analizy badań eksperymentalnych słupów CFST o płaszczach grubościennych. W przypadku cienkościennych słupów CFST może być uzasadnione stosowanie współczynnika skrępowania betonu  $\varphi$  do oceny efektywności wykorzystania wytrzymałości betonu. W celu zorientowania się, jak duże różnice mogą wystąpić w grubości płaszcza słupów CFST, można zastosować stopień zbrojenia:  $\rho = A_{\text{tube}}/A_c$  rozumiany jako iloraz pola przekroju stali płaszcza do pola przekroju rdzenia betonowego. W przypadku słupów analizowanych w artykule stopień zbrojenia  $\rho$  wyniósł 11,5% przy grubości płaszcza  $t = 5$  mm i 22,4% przy  $t = 10$  mm. Wstępna analiza zależności  $\eta - \varphi$  w przypadku cienkościennych słupów CFST daje wyniki potwierdzające korzystny wpływ współczynnika skrępowania betonu  $\varphi$  na współczynnik  $\eta$  efektywności skrępowania betonu.

## Podsumowanie

W analizie porównawczej 48 grubościennych słupów CFST, przebadanych eksperymentalnie, stwierdzono istnienie efektu skrępowania betonu ich rdzenia. Wynikający z tego efektu przyrost nośności słupa wyniósł maksymalnie kilkanaście procent. Na podstawie analizy wyciągnięto następujące wnioski:

- potwierdzono istotny wpływ smukłości słupów na wykorzystanie efektu skrępowania betonu ich rdzenia; stopień wykorzystania tego efektu jest wyraźnie mniejszy w przypadku słupów smukłych;

- współczynnik skrępowania  $\varphi$ , określony za pomocą wzoru (11), nie jest miarą rzeczywistego skrępowania betonu rdzenia prowadzącego do wzrostu jego wytrzymałości na ściskanie w przestrzennym stanie naprężenia; niewykluczone, że współczynnik ten nadaje się do oszacowania efektu skrępowania w cienkościennych słupach CFST, tj. takich, w których stopień zbrojenia  $\rho$  wynosi maksymalnie kilka procent;

- nadmierne zwiększanie grubości płaszcza w słupach CFST powoduje oczywisty wzrost nośności słupa, przede wszystkim w wyniku zwiększenia przekroju poprzecznego płaszcza, ale nie pociąga to za sobą wzrostu naprężeń poprzecznych w betonie rdzenia i tym samym nie przekłada się na wzrost jego nośności. Jest wręcz przeciwnie, naprężenia poprzeczne w betonowym rdzeniu maleją wraz ze wzrostem przekroju stalowego płaszcza, ponieważ zmniejsza się udział siły pionowej przenoszonej przez betonowy rdzeń przy wzrastającym udziale siły w stalowym płaszczu. W efekcie następuje spadek nośności spowodowanej (wartości współczynnika efektywności skrępowania);

- znacznie lepsze wykorzystanie pozytywnego wpływu przestrzennego stanu naprężenia w betonowym rdzeniu można osiągnąć z zastosowaniem rur cienkościennych niż grubościennych.

Słupy CFST odznaczają się wieloma zaletami w porównaniu z żelbetowymi (np. dużą nośnością pokrywczą i małymi kosztami robocizny, ale nie można im przypisywać znacznego wzrostu nośności w wyniku wykorzystania przestrzennego stanu naprężenia w betonowym rdzeniu).

## Literatura

- [1] ISO 9969:2016 Thermoplastics pipes – Determination of ring stiffness. International Organization for Standardization. 2016; Geneva, Switzerland.
- [2] ISO 7685:2019 Glass-reinforced thermosetting plastics (GRP) pipes – Determination of initial ring stiffness. International Organization for Standardization. 2019; Geneva, Switzerland.
- [3] PN-EN 1992-1-1:2008 Eurokod 2: Projektowanie konstrukcji z betonu. Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków. Polski Komitet Normalizacyjny, 2016.
- [4] PN-EN 1994-1-1:2008 Eurokod 4: Projektowanie zespolonych konstrukcji stalowo-betonowych – Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków. Polski Komitet Normalizacyjny, 2008.
- [5] Korzeniowski P. Żelbetowe słupy uzwojone. Badania i teoria. Gdańsk: Politechnika Gdańska, 2000.
- [6] Samaan MS. An Analytical and Experimental Investigation of Concrete-Filled-Fiber Reinforced Plastics (FRP) Tubes. PhD Thesis. University of Central Florida, 1997.
- [7] Samaan M, Mirmiran A, Shahawy M. Model of Concrete Confined by Fiber Composites. Journal of Structural Engineering. 1998; t. 124, nr 9: 1025 – 1031.
- [8] Abramski M, Kondrat J, Korzeniowski P. Badania eksperymentalne słupów CFST z betonem zwykłym i ekspansywnym. Czasopismo Inżynierii Lądowej, Środowiska i Architektury, Journal of Civil Engineering, Environment and Architecture. 2017; t. XXXIV, ss. 307 – 323.

Przyjęto do druku: 22.08.2023 r.