

Tadeusz Czarniawski¹

NOŚNOŚĆ KONSTRUKCJI ZESPOLONYCH POWŁOKOWYCH NA PRZYKŁADZIE ELEMENTÓW RUROBETONOWYCH CFST

Wprowadzenie

Coraz większe zastosowanie w konstrukcjach budowlanych mają obecnie elementy zespolone stalowo-betonowe, dające znacznie większe możliwości wykorzystania nośności zarówno stali, jak i betonu. W porównaniu do typowych konstrukcji stalowych czy żelbetonowych konstrukcje zespolone mają znacznie większą nośność, wynikającą ze zwiększonej nośności betonu pracującego w trójosiowym stanie naprężeń. Wśród szerokiej gamy konstrukcji zespolonych możemy wyróżnić obecnie bardzo popularne konstrukcje typu CFST (Concrete Filled Steel Tubular).

1. Konstrukcje typu CFST

Konstrukcje typu CFST (Concrete Filled Steel Tubular) wykorzystywane są głównie w konstrukcjach nośnych budynków wysokich i mostów. Charakteryzuje je duża nośność, sztywność, odporność na obciążenia sejsmiczne i mechaniczne oraz na wpływ czynników atmosferycznych.

Po raz pierwszy rury wypełnione betonem miały zastosowanie przy budowie mostu przez Zatokę Firth of Forth w Szkocji w latach 1882-1890.

W latach trzydziestych dwudziestego wieku zbudowano w Rosji dwa mosty łukowe o rozpiętości 101 i 140 m: pierwszy w 1936 roku w Leningradzie przez Nową, drugi jako most kolejowy.

Efektorem dużego zainteresowania konstrukcjami typu CFST w okresie po drugiej wojnie światowej były liczne prace badawcze, między innymi K. Klöppela i W. Godera [1] oraz A. Gardnera i E. Jacobsona [2]. Na terenie byłego ZSRR tą tematyką zajmowali się L. Łuksza [3] i L. Storożenko [4]. W Polsce konstrukcjami typu CFST zajmowali się między innymi: S. Domański [5], W. Merunowicz [6],

¹ Politechnika Częstochowska, Wydział Budownictwa, ul. Akademicka 3, 42-200 Częstochowa, e-mail: tczar@bud.pcz.czyst.pl

M. Sandowicz [7], S. Matyaszewski [8], P. Dawidowicz [9]. Ostatnio ukazały się prace L. Szopy [10], M. Abramskiego [11]. Obecnie najczęściej opisywanymi konstrukcjami tego typu są duże konstrukcje mostowe w Chinach i na terenie Japonii.

W mostach łukowych pręty typu CFST pracują jako ściskane, a ścinanie i skręcanie jest nieznaczne. Ostatnio powstało szereg modeli przedstawiających zależności naprężeń od odkształceń dla betonu ograniczonego płaszczem stalowym (Nosaki [12], Pan [13], Han [14]).

Na rysunku 1 pokazano krzywe opisujące zależności naprężeń od odkształceń dla betonu zwykłego i betonu ściskanego w płaszczu stalowym.



Rys. 1. Zależność naprężeń od odkształceń dla betonu zwykłego i betonu w płaszczu stalowym [15]

Jak widać, wytrzymałość betonu ograniczonego płaszczem stalowym jest większa od betonu zwykłego (bez ograniczeń).

Pierwsze opracowania dotyczące obliczania nośności ściskanych elementów powstały w 1957 roku. Wtedy to K. Klöppel i W. Goder [1] wyznaczyli dolną i górną granicę nośności takiego elementu. Początkowo stosowano do obliczeń nośności N elementów rurobetonowych proste sumowanie nośności części stalowej i betonowej:

$$N = f_{ck} A_c + f_y A_y \quad (1)$$

gdzie:

A_y, A_c - przekrój poprzeczny stali i betonu,

f_{ck}, f_y - wytrzymałości charakterystyczne betonu i stali.

Oczywiście przy tak przyjętym warunku nośności materiał nie wykorzystuje swoich możliwości, w związku z czym doprecyzowano formułę obliczeniową, wprowadzając współczynniki korygujące α i β , uwzględniające zmianę nośności elementu wskutek zmiany warunków pracy betonu, beton pracuje w trójosiowym stanie naprężenia:

$$N = \alpha \times f_{ck} + \beta \times f_y A_y \quad (2)$$

Według L. Łukszy, nośność krótkiego elementu rurobetonowego obciążonego na całej powierzchni przekroju poprzecznego przedstawia się następująco:

$$N = (f_{ck} + K\sigma_0)A_c + \sigma_z A_y \quad (3)$$

gdzie:

σ_0 - ciśnienie betonu na powłokę stalową,

σ_z - wytrzymałość osiowa powłoki stalowej z uwzględnieniem złożonego stanu naprężeń,

K - współczynnik bocznego ciśnienia

$$\sigma_0 = \frac{f_y + n f_{ck}}{n(K - 2\nu_c) - 1} \left(1 - \beta_r \frac{\alpha(K - 2\nu_c) - 1}{1 + \nu_a} \right) \quad (4)$$

$$\sigma_z = f_y - \sigma_0 \frac{\beta_r}{\beta_r - 1} \geq 0 \quad (5)$$

$$K = 10 - \frac{100\sigma_0}{f_{ck} + 15\sigma_0} \quad (6)$$

ν_a, ν_c - współczynniki Poissona stali konstrukcyjnej i betonu,

E_a - współczynnik sprężystości stali konstrukcyjnej,

E_{cm} - sieczny moduł sprężystości betonu,

r, R - zewnętrzny i wewnętrzny i zewnętrzny promień rury stalowej.

Podstawowy wzór na nośność krępego słupa rurobetonowego N_s jest funkcją wielu czynników mających wpływ na pracę tego elementu. Wprowadzając parametr m , określający stosunek nośności elementu typu CFST wynikającej z badań, gdy rura zaczyna się uplastyczniać (N_s), do nośności tego elementu, liczonej poprzez sumowanie nośności rury stalowej i betonu bez uwzględniania ich współpracy $f_{ck}A_c + f_yA_a$, jako kombinację niżej wymienionych czynników:

$$m = \frac{N_s}{f_{ck}A_c + f_yA_a} \quad (7)$$

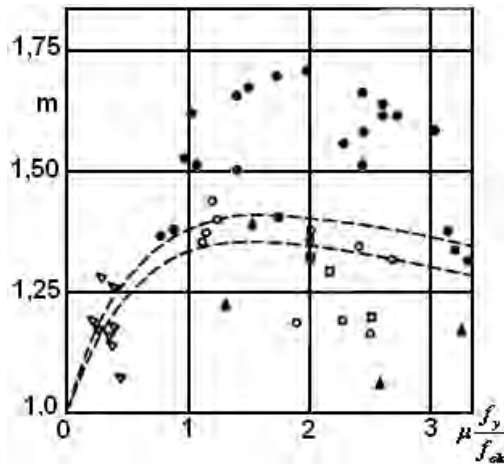
granicy plastyczności stali - f_y , wytrzymałości betonu na ściskanie - f_{ck} , współczynnika zbrojenia - μ , będącego funkcją grubości ścianki:

$$m = f\left(\mu, \frac{f_y}{f_{ck}}\right) \quad (8)$$

$$\mu = \beta_r^2 - 1 \quad (9)$$

Rozkład efektywności rurobetonu przedstawia wykres na rysunku 2, powstały po zestawieniu badań wielu autorów. Na jego podstawie można stwierdzić, że to wyrażenie zbliża się do wartości maksymalnych dla betonu ograniczonego rurą, gdy:

$$1 \leq \mu \frac{f_y}{f_{ck}} \leq 3 \quad (10)$$



Rys. 2. Rozkład efektywności betonu [3]

Punkty na tym rysunku przedstawiają wyniki badań. Dwie krzywe na rysunku opisują wykresy funkcji $f\left(\mu, \frac{f_y}{f_{ck}}\right)$ dla dwóch wielkości liczby Poissona: górna dla $\nu_c = 0,5$ i dolna dla $\nu_c = 0,2$, obydwie dla $K = 4$. Wykresy te nie pokrywają się ze znaczną liczbą punktów. Krzywe te byłyby bardziej zbliżone do wyników badań, kiedy wartości parametru K były uzmiennione. Część wyników badań było ustalanych wzrokowo, tzn. wzrokowo określano punkt oznaczający początek uplastyczniania się rury stalowej.

Jednym z ważniejszych czynników w powyższej metodzie obliczeń jest współczynnik bocznego ciśnienia K . W uproszczonej metodzie obliczeniowej współczynnik przyjmuje wartość $K = 4$.

2. Eurokod 4

Podstawą obliczania słupów rurobetonowych są europejskie normy Eurokod 4 [16] i Eurokod 3 [17].

Do omawianych w tym artykule konstrukcji stosujemy uproszczoną metodę obliczeń. Zakres stosowania metody uproszczonej jest ograniczony do elementów o dwóch osiach symetrii i stałym przekroju na całej długości. Uwzględniamy również ograniczenie szeregu innych geometrycznych i mechanicznych parametrów:

dla rur o przekroju okrągłym $\frac{d}{t} \leq 90 \sqrt{\frac{235}{f_y}}$, gdzie: d - zewnętrzna średnica rury,
 t - grubość ścianki rury, f_y - nominalna granica plastyczności stali w N/mm^2 ,
 pomijamy efekty wynikające z wybożenia miejscowego elementów, udział stali
 $0,2 \leq \delta \leq 0,9$,
 δ określana jest wzorem:

$$\delta = \frac{A_a f_y}{N_{pl,Rd} \gamma_a} \quad (11)$$

smukłość względna $\bar{\lambda} \leq 2,0$, gdzie:

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{N_{pl,Rd}}{N_{cr}}} \quad (12)$$

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 (EJ)_e}{l^2} \quad (13)$$

$$(EJ)_e = E_a J_a + 0,8 E_{cd} J_c \quad (14)$$

gdzie:

$N_{pl,Rd}$ - obliczeniowa nośność plastyczna przekroju zespolonego na ściskanie,

N_{cr} - sprężysta krytyczna siła normalna,

$(EJ)_e$ - efektywna sztywność sprężysta przekroju na zginanie dla obciążeń krótkotrwałych,

E_a - moduł sprężystości stali konstrukcyjnej w rurze,

J_c - moment bezwładności przekroju niezarysowanej części betonu,

J_a - moment bezwładności rury stalowej,

E_{cd} - obliczeniowy sieczny moduł sprężystości betonu, $E_{cd} = \frac{E_{cm}}{\gamma_c}$,

$\gamma_c = 1,35$ - współczynnik bezpieczeństwa.

Przy spełnieniu powyższych warunków nośność zespolonego słupa przyjmujemy bezpośrednio z zależności:

$$N_{Sd} = \chi \times N_{pl,Rd} \quad (15)$$

gdzie χ to współczynnik redukcyjny zależny od postaci wybożenia.

Elementy niezbrojne na podstawie EC 4 można obliczać bezpośrednio z zależności:

$$N_{pl,Rd} = A_a f_y + 0,85 A_c f_{ck} \quad (16)$$

$$N_{pl,Rd} = \frac{A_a f_y}{\gamma_a} + 0,85 \frac{A_c f_{ck}}{\gamma_c} \quad (17)$$

Wyrażenie stosuje się do całkowicie lub częściowo obetonowanych przekrojów stalowych. W elementach wypełnionych betonem współczynnik 0,85 może być zastąpiony przez 1,0:

$$N_{pl,Rd} = \frac{A_a f_y}{\gamma_a} + \frac{A_c f_{ck}}{\gamma_c} \quad (18)$$

gdzie:

A_a, A_c - pole przekroju poprzecznego odpowiednio dla stali i betonu,

f_y - nominalna granica plastyczności rury stalowej,

f_{ck} - charakterystyczna wytrzymałość betonu po 28 dniach,

γ_a, γ_c - częściowe współczynniki bezpieczeństwa w stanach granicznych nośności (wg EC 2 i EC 3 odpowiednio 1,10 i 1,35).

Po spełnieniu warunków, że smukłość względna $\bar{\lambda}$ i mimośród obciążenia e będą odpowiednio w granicach: $\bar{\lambda} \leq 0,5$ i $e \leq \frac{d}{10}$, można uwzględnić wzrost nośności elementu CFST dla obu materiałów, tj. stali i betonu:

$$N_{pl,Rd} = \frac{A_a \eta_a f_y}{\gamma_a} + \frac{A_c f_{ck}}{\gamma_c} \left(1 + \eta_c \frac{t}{d} \frac{f_y}{f_{ck}} \right) \quad (19)$$

dla $e = 0$ współczynniki $\eta_a = \eta_{a0}$ i $\eta_c = \eta_{c0}$ zależą od smukłości względnej $\bar{\lambda}$ i opisujemy je:

$$\eta_{a0} = 4,9 - 18,5\bar{\lambda} + 17(\bar{\lambda})^2 \quad \eta_{a0} \geq 0 \quad (20)$$

$$\eta_{c0} = 0,25(3 + 2\bar{\lambda}) \quad \eta_{c0} \leq 0 \quad (21)$$

dla $0 < e \leq \frac{d}{10}$, to:

$$\eta_c = \eta_{c0} \left(1 - 10 \frac{e}{d} \right) \quad (22)$$

$$\eta_a = \eta_{a0} + (1 - \eta_{a0}) 10 \frac{e}{d} \quad (23)$$

dla przypadku gdy $e > \frac{d}{10}$, wówczas $\eta_c = 0$ i $\eta_a = 1$, co skutkuje brakiem wzrostu wytrzymałości betonu będącego w trójosiowym stanie naprężeń i osiągnięciem

pełnej wytrzymałości rury stalowej nieosłabionej dodatkowym naciskiem betonu na wewnątrz rury stalowej. W równaniu przyrost nośności betonu otoczonego stalową rurą jest przedstawiony poprzez wzrost wielkości współczynnika η_c , opisującego nośność betonu od wartości 0,0 do wartości przekraczającej wartość 1,0, uzależnionej od wielkości współczynnika smukłości względnej $\bar{\lambda}$, a także poprzez wzrost stosunku $\frac{t}{d}$ i $\frac{f_y}{f_{ck}}$.

Przyczyną wzrostu nośności betonu jest jego trójosiowe ściskanie uwzględniane wtedy, gdy smukłość względna elementu rurobetonowego jest mniejsza od 0,5, natomiast im mniejszej smukłości jest stal, tym w mniejszym stopniu przenosi obciążenia. Gdy względna smukłość jest większa niż 0,5, to stal pracuje w 100%. Największą nośność betonu, według powyższych wzorów, możemy uzyskiwać przy zerowej smukłości wraz z równoczesną utratą na nośności stali w granicach 25%. Należy zauważyć, że niewielkie nawet zmniejszenie smukłości względnej daje szybki wzrost wielkości współczynnika η_{c0} , a zatem duży wzrost nośności betonu. Najbardziej nas interesującą kwestią zawartą w normie Eurokod 4 jest wpływ obciążeń długotrwałych na efektywną sztywność przekroju wyrażoną wzorem: $(EJ)_e = E_a J_a + 0,8E_{cd} J_c$. Uwzględnienie wpływu obciążenia długotrwałego na efektywną sztywność przekroju ma miejsce, gdy $\bar{\lambda} > \frac{0,8}{1-\delta}$ dla ram sztywnych, nieprzesuwanych i $\bar{\lambda} > \frac{0,5}{1-\delta}$ dla ram przesuwanych, nieusztynionych oraz gdy $\frac{e}{d} < 2$ (δ - stosunek udziału stali). Spełnienie powyższych warunków umożliwia podstawienie do wzoru na $(EJ)_e = E_a J_a + 0,8E_{cd} J_c$ zamiast wartości E_{cd} wartość E_c :

$$E_c = E_{cm} \left(1 - 0,5 \frac{N_{G,Ed}}{N_{Ed}} \right) \quad (24)$$

gdzie:

N_{Ed} - nośność obliczeniowa słupa zespolonego,

$N_{G,Ed}$ - część stała obciążenia N_{Ed} .

Współczynnik redukcyjny χ występujący we wzorze (poz. 6.44 w Eurokod 4 „Projektowanie zespolonych konstrukcji stalowo-betonowych. Część 1-1:Reguły ogólne i reguły dla budynków. PN-EN 1994-1-1):

$$N_{Ed} = \chi \times N_{pl,Rd} \quad (25)$$

odczytujemy z tabeli europejskich krzywych wyboczeniowych, zamieszczonych w EC 3 [Eurokod 3 „Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków. PN-EN 1993-1-1].

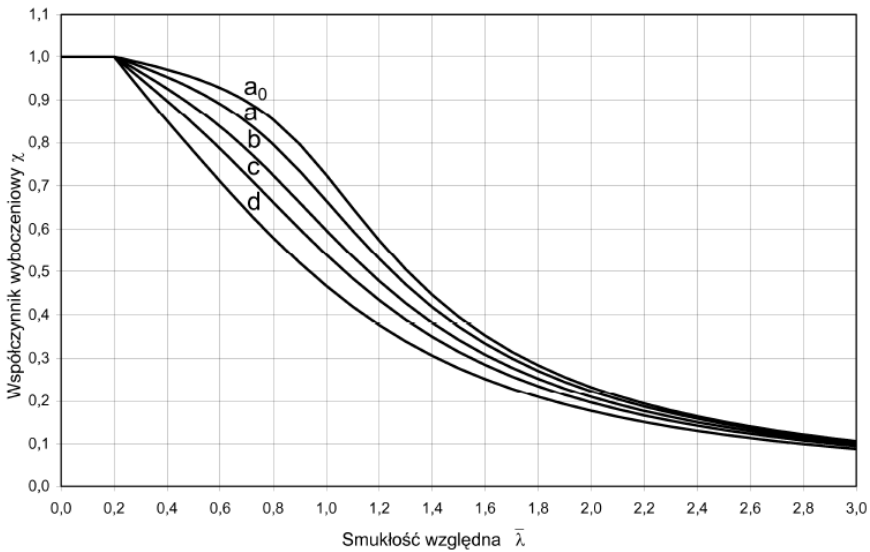
Dla rur wypełnionych betonem stosujemy krzywą oznaczoną symbolem „a”, przedstawioną na rysunku 3, która jest opisana równaniami Ayrytona-Perry’ego:

$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{(\phi^2 - \bar{\lambda}^2)}} \quad (26)$$

gdzie wielkość pomocniczą ϕ wyznaczamy z zależności:

$$\phi = 0,5[1 + 0,21(\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2] \quad (27)$$

lub z rysunku 4.



Rys. 3. Zależność współczynnika wyboczeniowego χ od smukłości względnej $\bar{\lambda}$ [14]

Przyporządkowanie krzywych wyboczenia

Rodzaj elementu i typ przekroju	Ograniczenia	Wyboczenie względem osi	Krzywa wyboczenia	
			S 235 S 275 S 355 S 420	S 460
Kształtowniki rurowe 	wykończone na gorąco	dowolna	a	a ₀
	wykończone na zimno	dowolna	c	c
Ceowniki, teowniki i pręty pełne 		dowolna	c	c

Rys. 4. Przyporządkowanie krzywych wyboczenia [18]

3. Obliczanie ściskanych elementów rurobetonowych według PN-91/B-03302

Norma PN 91/B-03302 [18], pomimo innych oznaczeń symboli opisujących wielkości wytrzymałościowe i materiałowe, jest w znacznym stopniu podobna do normy Eurokod 4. Występujące różnice dotyczą maksymalnego mimośrodu, który jest łagodniejszy, a także tego, że można uwzględniać wzrost wytrzymałości betonu w stanie trójosiowego ściskania:

$$\text{jeżeli } 0 < e \leq \frac{d}{8}, \text{ to } \eta_1 = \eta_{10} \left(1 - 8 \frac{e}{d} \right) \text{ i } \eta_2 = \eta_{20} + (1 - \eta_{20}) \times 8 \frac{e}{d}$$

$$\text{jeżeli } e > \frac{d}{8}, \text{ to } \eta_1 = 0 \quad \text{i} \quad \eta_2 = 1$$

Zmiana dotyczy również wyznaczania sztywności przekroju zespolonego, którą wyznaczamy ze wzoru:

$$B = E_a J_a + E'_b J_b \quad (28)$$

gdzie E'_b - współczynnik sprężystości betonu, zależny od charakteru i czasu trwania obciążenia.

Przyjmuje się następujące wartości E'_b :

$$\text{– w przypadku obciążeń krótkotrwałych i wpływu temperatury:} \quad E'_b = E_b \quad (29)$$

$$\text{– w przypadku obciążeń długotrwałych:} \quad E'_b = \frac{E_b}{1 + \psi \varphi_p} \quad (30)$$

$$\text{– w przypadku kiedy stosunek obciążeń długotrwałych do obciążeń całkowitych wynosi } v_d, \text{ otrzymujemy:} \quad E'_b = \frac{E_b}{1 + v_d \psi \varphi_p} \quad (31)$$

$$\text{– w przypadku uwzględnienia skurczu betonu w elemencie wyrażenie ma postać:} \quad E'_b = \frac{E_b}{1 + \psi_{sk} \varphi_p} \quad (32)$$

φ_p - współczynnik pełzania betonu

Współczynniki ψ i ψ_{sk} obliczamy na podstawie wzorów:

$$\psi = \frac{e^{\rho \varphi_p} - 1}{\rho \varphi_p} \quad (33)$$

$$\psi_{sk} = \frac{e^{\rho \varphi_p}}{\rho \varphi_p - 1} - \frac{1}{\rho \varphi_p} \quad (34)$$

gdzie ρ wynosi:

$$\rho = \frac{1}{1 + \frac{E_b F_b}{E_s F_s} + a^2 \frac{E_b F_b}{E_b F_b + E_s F_s}} \quad (35)$$

Parametr a w powyższym równaniu jest odległością środka ciężkości betonu od środka ciężkości stali.

4. Obliczanie ściskanych elementów rurobetonowych według normy niemieckiej DIN 18806

Norma niemiecka DIN [19] jest oparta na zasadzie stanów granicznych, podobnie jak EC 4, różni się jedynie od niej koncepcją bezpieczeństwa. EC jest oparty na metodach probabilistycznych, stosujących współczynniki bezpieczeństwa zarówno do obciążeń, jak i (osobno) do współczynników bezpieczeństwa materiałów.

Norma niemiecka jest oparta na koncepcji deterministycznej, uwzględniającej współczynniki bezpieczeństwa tylko w odniesieniu do obciążeń. Projektowanie zespolonych słupów CFST według prezentowanej metody uproszczonej, zgodnej z normą DIN, jest dokładnie takie samo jak w EC 4.

Nośność przekroju oblicza się na podstawie wzoru z EC 4:

$$N_{pl,Rd} = \frac{A_a f_y}{\gamma_a} + 0,85 \frac{A_c f_{ck}}{\gamma_c} \quad (36)$$

Nośność przekroju liczona z uwzględnieniem efektu ograniczenia betonu wg wzoru z EC 4

$$N_{pl,Rd} = \frac{A_a \eta_2 f_y}{\gamma_a} + \frac{A_c f_{ck}}{\gamma_c} \left(1 + \eta_1 \frac{t}{d} \frac{f_y}{f_{ck}} \right) \quad (37)$$

jest pomijana w nowszym wydaniu DIN [17], ponieważ efekt ten jest bardzo mały i pomijalny w deterministycznym sposobie uwzględniania bezpieczeństwa. Istnieje również różnica w określaniu współczynnika sztywności przyjmowanego wg EC 4 jako:

$$(EJ)_e = E_a J_a + 0,6 E_{cm} J_c + E_s J_s \quad (38)$$

gdzie $E_s J_s$ - moduł sprężystości i moment bezwładności stali zbrojeniowej:

$$(EJ)_e = \frac{E_a J_a}{1,1} + \frac{0,6 E_{cm} J_c}{1,35} + \frac{E_s J_s}{1,1} \quad (39)$$

Dodatkowo skurcz i pęcznienie betonu narzuca konieczność wprowadzenia w powyższym wzorze, zgodnie z Eurokodem 4, zamiast E_{cm} , wtórnego modułu sprężystości betonu E_c opisanego wyrażeniem:

$$E_c = E_{cm} \left(1 - 0,5 \frac{N_{G,Sd}}{N_{Sd}} \right) \quad (40)$$

Stosowany jest on wyłącznie w przypadku, gdy mimośród obciążenia jest mniejszy niż dwukrotny wymiar przekroju poprzecznego i smukłość względna jest mniejsza niż wartości graniczne podane w EC 4.

5. Wytyczne norm japońskich do obliczania elementów CFST

Najbardziej szczegółowe wytyczne do projektowanych elementów typu CFST, ze względu na największe dotychczasowe zaawansowanie badań i analiz elementów rurobetonowych, powstały w Japonii. Szczegółowo omówione zostały one w pracy [2]. Na podstawie [20] można przytoczyć następujące założenia:

1. Metoda projektowania opiera się na zasadzie naprężeń dopuszczalnych opartych na analizie sprężystej konstrukcji.
2. Przyjmuje się granice plastyczności stali stosowane w konstrukcjach od 235 MPa dla blachy grubości $t \leq 40$ mm do 335 MPa dla grubości blachy $t \geq 40$ mm.
3. Graniczne wartości stosunku $\frac{D}{t_s}$ dla przekrojów okrągłych:

$$\frac{D}{t_s} \leq 1,5 \leq \frac{23500}{F}$$

gdzie:

D - średnica zewnętrzna przekroju okrągłego,

t_s - grubość ścianki rury stalowej,

F - wytrzymałość normowa stali, służąca do określenia dopuszczalnych naprężeń stali (mniejsza niż granica plastyczności stali, wytrzymałość stali na rozciąganie mnożona przez współczynnik 0,7, wyrażona w MPa).

4. Długotrwałe naprężenia w styku pomiędzy wewnętrzną powierzchnią rury stalowej i wypełniającym betonem: 0,15 MPa dla rury okrągłej. Naprężenia w styku nie zależą od wytrzymałości betonu, dla naprężeń krótkotrwałych wartości można zwiększyć 1,5-krotnie.
5. Naprężenia dopuszczalne na ściskanie betonu:

$$f_c = \frac{F_c}{3} \quad \text{- dla naprężeń długotrwałych,}$$

$$f_c = \frac{2F_c}{3} \quad \text{- dla naprężeń krótkotrwałych, gdzie } F_c \text{ - normowa wytrzymałość betonu na ściskanie.}$$

6. Maksymalna efektywna długość wybocheniowa elementu rurobetonowego:

$$\frac{l_k}{D} \leq 50 \text{ - dla elementów ściskanych,}$$

$$\frac{l_k}{D} \leq 30 \text{ - dla elementów ściskanych ze zginaniem,}$$

gdzie:

l_k - efektywna długość wybocheniowa elementu,

D - mniejszy wymiar przekroju poprzecznego.

Dopuszczalna nośność na ściskanie słupów zespolonych CFST

$$\text{dla } \frac{l_k}{D} \leq 4 \quad N_{c1} = {}_cN_c + (1 + \eta)_s N_c \quad (41)$$

$$\text{dla } 4 < \frac{l_k}{D} \leq 12 \quad N_{c2} = N_{c1} - 0,125 \left[N_{c1} - N_{c3} \left(\frac{l_k}{D} = 12 \right) \right] \left(\frac{l_k}{D} - 4 \right) \quad (42)$$

$$\text{dla } \frac{l_k}{D} > 12 \quad N_{c3} = {}_cN_c + {}_sN_c \quad (43)$$

gdzie:

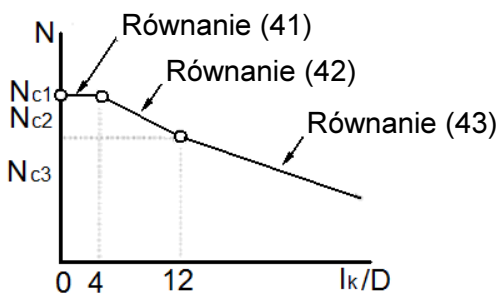
$\eta = 0,27$ - dla przekrojów okrągłych,

N_{c1}, N_{c2}, N_{c3} - dopuszczalna nośność słupów CFST,

${}_cN_c$ - dopuszczalna nośność słupa betonowego,

${}_sN_c$ - dopuszczalna nośność rury stalowej.

Na rysunku 5 przedstawiono zależności opisane powyższymi równaniami.



Rys. 5. Dopuszczalna nośność na ściskanie słupów zespolonych CFST wg równań (41), (42) i (43) [opracowanie własne]

Poszczególne parametry wyznaczmy z poniższych zależności:

$$\text{dla } \frac{l_k}{D} \leq 4 \quad {}_cN_c = {}_cA_c f_c = {}_cA \frac{{}_cF}{{}_c v} \quad (44)$$

$$\text{dla } \frac{l_k}{D} \geq 12 \quad {}_c N_c = \frac{{}_c N_{cr}}{{}_c v} = {}_c A \frac{{}_c \sigma_{cr}}{{}_c v} \quad (45)$$

$$\text{dla } \frac{l_k}{D} \leq 4 \quad {}_s N_c = {}_s A_s f_c = {}_s A \frac{F}{{}_s v} \quad (46)$$

$$\text{dla } \frac{l_k}{D} > 12 \text{ i } {}_s \lambda \leq \Lambda \quad {}_s N_c = {}_s A_s f_c = \frac{{}_s A \left[1 - 0,4 \left(\frac{{}_s \lambda}{\Lambda} \right)^2 \right] F}{{}_s v} \quad (47)$$

$$\text{dla } \frac{l_k}{D} > 12 \text{ i } {}_s \lambda > \Lambda \quad {}_s N_c = {}_s A_s f_c = {}_s A \frac{0,6F}{\left(\frac{{}_s \lambda}{\Lambda} \right)^2} {}_s v \quad (48)$$

gdzie:

${}_s A, {}_c A$ - przekrój poprzeczny stali i betonu,

${}_c f_c, {}_s f_c$ - dopuszczalne naprężenia ściskające betonu i stali,

${}_c v$ - współczynnik bezpieczeństwa dla betonu równy:

3,0 - naprężenia długotrwałe,

1,5 - naprężenia krótkotrwałe,

${}_s v$ - współczynnik bezpieczeństwa dla rury stalowej (dla naprężeń długotrwałych):

$$\text{dla } \frac{l_k}{D} \leq 4 \quad {}_s v = 1,5$$

$$\text{dla } \frac{l_k}{D} > 12 \text{ i } {}_s \lambda \leq \Lambda \quad {}_s v = 1,5 + \frac{2}{3} \left(\frac{{}_s \lambda}{\Lambda} \right)^2$$

$$\text{dla } \frac{l_k}{D} > 12 \text{ i } {}_s \lambda > \Lambda \quad {}_s v = \frac{13}{6}$$

gdzie:

${}_s v$ - dla naprężeń krótkotrwałych 1,5-krotność powyższych wartości,

${}_c \sigma_{cr}$ - krytyczne naprężenie w betonie obliczane w zależności od współczynnika smukłości słupa betonowego ${}_c \lambda$,

F - normowa wartość wytrzymałości rury stalowej,

${}_s \lambda$ - efektywny współczynnik smukłości rury stalowej,

Λ - krytyczny współczynnik smukłości

$$\Lambda = \pi \sqrt{\frac{s E}{0,6F}} \quad (49)$$

sE - moduł sprężystości stali.

Nośność graniczna dla ściskanego słupa rurobetonowego:

$$\text{dla } \frac{l_k}{D} \leq 4 \quad N_{cu1} = c N_{cu} + (1 + \eta) s N_{cu} \quad (50)$$

$$\text{dla } 4 < \frac{l_k}{D} \leq 12 \quad N_{cu2} = N_{cu1} - 0,125 \left[N_{cu1} - N_{cu3} \left(\frac{l_k}{D} = 12 \right) \right] \left(\frac{l_k}{D} - 4 \right) \quad (51)$$

$$\text{dla } \frac{l_k}{D} > 12 \quad N_{cu3} = c N_{cr} + s N_{cr} \quad (52)$$

Poszczególne oznaczenia użyte we wzorach:

$N_{cu1}, N_{cu2}, N_{cu3}$ - graniczne nośności słupa rurobetonowego,

$c N_{cu}$ - graniczna nośność słupa betonowego,

$s N_{cu}$ - graniczna nośność stalowego słupa rurowego,

$c N_{cr}$ - wyboczeniowa nośność słupa betonowego,

$s N_{cr}$ - wyboczeniowa nośność stalowego słupa rurowego.

Graniczna wartości siły ściskającej w przekroju słupa rurobetonowego:

$$\text{dla } \frac{l_k}{D} \leq 4 \quad N_{cu1} = c A_c \sigma_{cB} + s A_s \sigma_z \quad (53)$$

Osiowe naprężenie w betonie uwzględniające efekt ograniczenia odkształceń poprzecznych betonu:

$$c \sigma_{cB} = s \sigma_z + k \sigma_r \quad (54)$$

gdzie:

$c \sigma_{cB}$ - naprężenie osiowe w części betonowej przekroju słupa rurobetonowego,

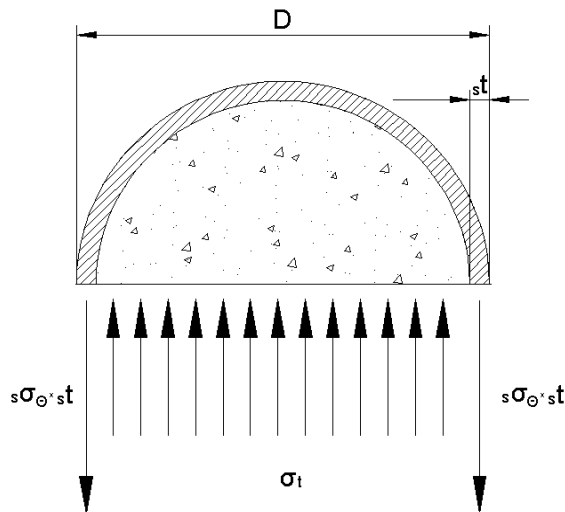
$s \sigma_z$ - osiowe naprężenie w części stalowej słupa rurobetonowego,

σ_r - boczne ciśnienie na beton,

$k = 4,1$ - współczynnik ograniczenia.

Równowaga sił przekrojowych przedstawionych na rysunku 6 zachodząca pomiędzy ciśnieniem bocznym na beton i naprężeniem rozciągającym obwodowym:

$$(d - 2_s t) \sigma_t = 2_s t \sigma_\Theta, \text{ skąd } \sigma_r = \frac{2_s t}{D - 2_s t} s \sigma_\Theta \quad (55)$$



Rys. 6. Równowaga sił przekrojowych między ciśnieniem bocznym i naprężeniem rozciągającym rurę stalową [opracowanie własne]

Podstawiając powyższe do równań na N_{cu1} , otrzymujemy wartość współczynnika η równą:

$$\eta = \frac{s\sigma_z}{s\sigma_y} - 1 + k \frac{s\sigma_\Theta}{s\sigma_y} \frac{D - 2t}{2(D - t)} \quad (56)$$

Dla $\frac{s\sigma_\Theta}{s\sigma_y} = 0,19$ oraz $k = 4,1$ przy stosunku $D/t = 50$ η przyjmuje wartość równą 0,27, wskutek czego otrzymujemy: $N_{cu1} = {}_cN_{cu} + (1 + \eta)_s N_{cu}$.

$$\text{dla } \frac{l_k}{D} > 12 \quad N_{cu3} = {}_cA_c\sigma_{cr} + {}_cA_c r_u F_c \quad (57)$$

gdzie:

${}_c\sigma_{cr}$ - krytyczne naprężenie w betonie obliczane w zależności od współczynnika smukłości słupa betonowego ${}_c\bar{\lambda}_1$,

${}_c r_u = 0,85$ - współczynnik bezpieczeństwa dla wytrzymałości betonu.

Naprężenie krytyczne ${}_c\sigma_{cr}$ obliczamy ze wzorów:

$$\text{dla } {}_c\bar{\lambda}_1 \leq 1,0 \quad {}_c\sigma_{cr} = \frac{2}{1 + \sqrt{{}_c\lambda_1^4 + 1}} {}_c r_u F_c \quad (58)$$

$$\text{dla } {}_c\bar{\lambda}_1 > 1,0 \quad {}_c\sigma_{cr} = 0,83e^{C_c(1 - {}_c\lambda_1)} {}_c r_u F_c \quad (59)$$

gdzie:

$${}_c\bar{\lambda}_1 = \frac{{}_c\lambda}{\pi} \sqrt{{}_c\varepsilon_u}, \quad {}_c\varepsilon_u = 0,934 \sqrt{{}_c r_u F_c} \times 10^{-3}, \quad C_c = 0,568 + 0,00612 F_c$$

Graniczna nośność na ściskanie rury stalowej:

$${}_s N_{cr} = {}_s A F \quad (60)$$

Nośność wyboczeniowa rury stalowej jest obliczana z wzorów i uzależniona jest od parametru ${}_s\bar{\lambda}_1$:

$$\text{jeżeli } {}_s\bar{\lambda}_1 < 0,3, \text{ to } \quad {}_s N_{cr} = {}_s A F \quad (61)$$

$$\text{jeżeli } 0,3 \leq {}_s\bar{\lambda}_1 < 1,3, \text{ to } \quad {}_s N_{cr} = [1 - 0,545({}_s\bar{\lambda}_1 - 0,3)] {}_s A F \quad (62)$$

$$\text{jeżeli } {}_s\bar{\lambda}_1 \geq 1,3, \text{ to } \quad {}_s N_{cr} = \frac{{}_s N_E}{1,3} \quad (63)$$

gdzie: ${}_s\bar{\lambda}_1$ oraz ${}_s N_E$ obliczane są z następujących wzorów:

$${}_s\bar{\lambda}_1 = \frac{{}_s\lambda}{\pi} \sqrt{\frac{F}{{}_s E}} \quad (64)$$

$${}_s N_E = \frac{\pi^2 {}_s E_s J}{l_k^2} \quad (65)$$

gdzie:

${}_s\bar{\lambda}$ - współczynnik smukłości słupa stalowego,

${}_s E$ - moduł sprężystości stali.

6. Badania laboratoryjne

Dane materiałowe

W trakcie przeprowadzonych badań zastosowano następujące materiały:

Rury stalowe ze stali R35, $D = 106$ mm, $t = 3$ mm i $t = 4$ mm, $L = 290$ mm.

Beton ekspansywny:

- o wytrzymałości 25 MPa
- o wytrzymałości 50 MPa

Wykonano badanie 8 próbek oznaczonych numerami od R1 do R8.

Szczegółowe dane dotyczące badanych próbek zestawiono w tabeli 1.

Do wykonania próbek zastosowano cement ekspansywny klasy 42,5 R.

Wytrzymałość na ściskanie:

Dla próbek R1 i R3 - 26,9 MPa, dla próbek R2 i R4 - 27,1 MPa, dla próbek R5 i R7 - 41,9 MPa, dla próbek R6 i R8 - 42,4 MPa.

Stanowisko badawcze

Maszyna wytrzymałościowa Toni-Technik z górną i dolną płytą, okrągłe nakładki stalowe o grubości 30 i 50 mm. Stanowisko badawcze zlokalizowane w Laboratorium Materiałów Budowlanych Wydziału Budownictwa Politechniki Częstochowskiej.



Rys. 7. Stanowisko badawcze: maszyna wytrzymałościowa Toni-Technik [fot. autora]

7. Obliczenia

Na podstawie ww. analizy teoretycznej wykonano obliczenia nośności elementów ruropetonowych, przyjmując do analizy wyniki badań laboratoryjnych przedstawionych w pracy doktorskiej A.S. Godzibała (tab. 1 - próbki od poz. 9 do poz. 13).

TABELA 1

Zestawienie wyników badań laboratoryjnych

Lp.	Próbka	D _s [mm]	t _s [mm]	d _s [mm]	L [mm]	A _s [cm ²]	A _c [cm ²]	E _s x 10 ⁵ [MPa]	E _c x 10 ³ [MPa]	f _s [MPa]	f _c [MPa]	N _{ex} [kN]	N _{obl} Łuksza [kN]	N _{obl} Eurokod 4 [kN]	N _{obl} DIN 18806 [kN]	N _{obl} Japonia [kN]
1	2	3	4	5	6	8	9	10	11	12	13	14	15	18	19	20
1	R1	106	3,00	100,0	290	9,71	78,54	2,10	30	210	26,9	616	604,1	580,1	556,6	470,2
2	R2	106	3,00	100,0	290	9,71	78,54	2,10	30	210	27,1	620	606,5	581,3	557,6	471,7
3	R3	106	4,00	98,0	290	12,82	75,43	2,10	30	210	26,9	786	668	709,6	687,1	544,8
4	R4	106	4,00	98,0	290	12,82	75,43	2,10	30	210	27,1	795	671	710,7	688,0	546,3
5	R5	106	3,00	100,0	290	9,71	78,54	2,10	30	210	41,9	751	785,7	667,4	630,8	588,0
6	R6	106	3,00	100,0	290	9,71	78,54	2,10	30	210	42,4	768	791,7	670,3	633,3	591,9
7	R7	106	4,00	98,0	290	12,82	75,43	2,10	30	210	41,9	924	846,8	793,4	758,3	657,9
8	R8	106	4,00	98,0	290	12,82	75,43	2,10	30	210	42,4	945	852,7	796,2	760,7	616,7
9	RB-A-III-1	110	4,25	101,5	x	14,12	80,91	2,10	30	310	28,8	1028,1	908,8	788,4	762,6	788,5
10	RB-A-III-2	110	4,40	101,2	x	14,60	80,44	2,10	30	310	28,8	1023,2	923	808,3	782,6	805,9
11	RB-A-III-4	114	4,15	105,7	x	14,32	87,75	2,10	30	310	28,8	1042,9	950,6	811,8	783,8	816,1
12	RB-A-III-5	114	4,25	105,5	x	14,65	87,42	2,10	30	310	28,8	1047,8	960,7	825,6	797,7	828,2
13	RB-A-III-6	114	4,30	105,4	x	14,82	87,25	2,10	30	310	28,8	1045,3	965,8	832,5	804,6	840,3

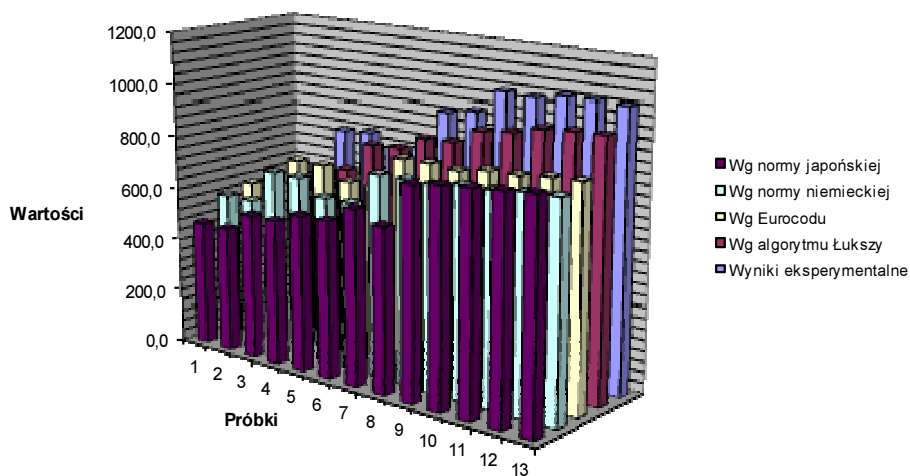
Wnioski

Na podstawie analizy porównawczej otrzymanych wyników uzyskanych z badań laboratoryjnych i wyników otrzymanych z obliczeń przeprowadzonych w oparciu o omawiane wzory uzyskano interesujące wyniki (tab. 2, rys. 8). Wyniki eksperymentalne są najbardziej zbliżone do wyników uzyskanych na podstawie algorytmu proponowanego przez L. Łukszę.

TABELA 2

Porównanie wyników laboratoryjnych z wynikami obliczeniowymi

Próbka	N_{ex} [kN]	N_{obl} Łuksza [kN]	Różnica [%]	N_{obl} Eurokod 4 [kN]	Różnica [%]	N_{obl} DIN 18806 [kN]	Różnica [%]	N_{obl} Japonia [kN]	Różnica [%]
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
R1	616	604,1	-1,97%	580,1	-5,83%	556,6	-9,64%	470,2	-23,67%
R2	620	606,5	-2,23%	581,3	-6,24%	557,6	-10,06%	471,7	-23,92%
R3	786	668	-17,66%	709,6	-9,72%	687,1	-12,58%	544,8	-30,69%
R4	795	671	-18,48%	710,7	-10,60%	688,0	-13,46%	546,3	-31,28%
R5	751	785,7	4,42%	667,4	-11,13%	630,8	-16,01%	588,0	-21,70%
R6	768	791,7	2,99%	670,3	-12,72%	633,3	-17,54%	591,9	-22,93%
R7	924	846,8	-9,12%	793,4	-14,13%	758,3	-17,93%	657,9	-28,80%
R8	945	852,7	-10,82%	796,2	-15,75%	760,7	-19,50%	616,7	-34,74%
RB-A-III-1	1028,1	908,8	-13,13%	788,4	-23,31%	762,6	-25,82%	788,5	-23,31%
RB-A-III-2	1023,2	923	-10,86%	808,3	-21,00%	782,6	-23,51%	805,9	-21,24%
RB-A-III-4	1042,9	950,6	-9,71%	811,8	-22,16%	783,8	-24,84%	816,1	-21,75%
RB-A-III-5	1047,8	960,7	-9,07%	825,6	-21,21%	797,7	-23,87%	828,2	-20,96%
RB-A-III-6	1045,3	965,8	-8,23%	832,5	-20,36%	804,6	-23,03%	840,3	-19,61%



Rys. 8. Porównanie wyników badań z wynikami uzyskanymi z obliczeń wg różnych metod obliczeniowych [opracowanie własne]

Literatura

- [1] Klöppel K., Goder W., Traglasversuche mit ausbetonierten Stahlrohren und Aufstellung einer Bemessungsformel, Stahlbau 1957, 26, 1-2, 44-50.
- [2] Gardner N., Jacobson E., Structural behavior of concrete filled steel tubes, Journal of the American Concrete Institute 1967, 64, 7, 404-413.

- [3] Łuksza L.K., Wytrzymałość rurobetonu, Mińsk 1977.
- [4] Storozhenko L.U., Efimienko W.U., Płachotnyj P.U., Zginane rurobetonowe konstrukcje, Kijów 1994.
- [5] Domański S., Badania nośności osiowo ściskanych zespolonych elementów stalobetonowych, Praca doktorska, Politechnika Warszawska, Warszawa 1969.
- [6] Merunowicz W., Nośność graniczna ściskanych stalowych cienkościennej prętów o przekroju kwadratowym wypełnionych betonem, Praca doktorska, Politechnika Warszawska, Warszawa 1962.
- [7] Sandowicz M., Nośność i odkształcalność ściskanych osiowo słupów z rur siatkobetonowych wypełnionych betonem, Praca doktorska, Politechnika Warszawska, Warszawa 1970.
- [8] Matyszewski S., Cechy wytrzymałościowe i konstrukcyjne stalowych prętów rurowych o przekroju kołowym wypełnionych betonem, Praca doktorska, Politechnika Warszawska, Warszawa 1966.
- [9] Dawidowicz P., Badania słupów z rur stalowych wypełnionych betonem ściskanych osiowo, Inżynieria i Budownictwo 1982, 1-4.
- [10] Szopa L., Współpraca betonu i stali na różnych poziomach obciążenia w osiowo ściskanych elementach zespolonych stalowo-betonowych, Praca doktorska, Politechnika Krakowska, Kraków 2007.
- [11] Abramski M., Badania eksperymentalne własności osiowo ściskanych słupów CFST, Praca doktorska, Politechnika Gdańska, Gdańsk 2006.
- [12] Nosaki K., Research on bending performance of steel tube confined concrete column, Journal of Japan Concrete 1996, 18(2), 1289-1294 (in Japanese).
- [13] Pan Y.G., The constitutive relationship of the core concrete in concrete filled steel tubes, Journal of Harbin Architectural and Civil Engineering Institute 1989, 22(1), 37-47 (in Chinese).
- [14] Lubiński M., Filipowicz A., Sółtowski W., Konstrukcje metalowe, Część 1, Arkady, Warszawa 2000.
- [15] Xie X., Chen H., Li H., Numerical analysis of ultimate strength of concrete filled steel tubular arch bridges, Zhejiang Univ. SCI 2005, 6A(8), 859-868.
- [16] Eurokod 4: Projektowanie zespolonych konstrukcji stalowo-betonowych. Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków.
- [17] Eurokod 3: Projektowanie zespolonych konstrukcji stalowych. Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków.
- [18] PN-91/B-03302: Konstrukcje zespolone stalowo-betonowe. Obliczenia statyczne i projektowanie. Słupy zespolone.
- [19] DIN 18806 Teil 1, Verbundkonstruktionen, Verbundstützen, Beuth Verlag, Berlin, März 1984.
- [20] Shosuke Morino, Keigo Tsuda, Design and construction of concrete-filled steel tube column system in Japan, Architectural Institute of Japan, <http://ctsee.org.tw>
- [21] Łuksza L.K., Tur W.W., Algorytm obliczenia wytrzymałości warstwowego stalobetonu, Wiestnik Briestkowsko Gosudarstwiennowo Tiejniceskowo Uniwersitetu, Brest 2007, N1, 106-109.
- [22] Łuksza L., Podstawy teorii obliczania wytrzymałości konstrukcji rurobetonowych, Zeszyty Naukowe Politechniki Częstochowskiej 1997, 151, Budownictwo 7, 71-79.
- [23] Łuksza L., Czerkasow D., Al. Mchana N., Obliczenie wytrzymałości konstrukcji rurobetonowych o podwójnym płaszczu stalowym, Zeszyty Naukowe Politechniki Częstochowskiej 2000, 152, Budownictwo 8, 21-28.
- [24] Łuksza L., Obliczenie wytrzymałości osiowo ściskanych konstrukcji rurobetonowych o przekroju pierścieniowym, Zeszyty Naukowe Politechniki Częstochowskiej 2000, 152, Budownictwo 8, 29-34.
- [25] Godziła A.S., Proczność i deformatywność niegiębkich stałetrubobetonowych elementów kolejowo sieczenia pri kratkowriemiennoj osiewoj zagruzenii, Diss. Kand. Tiejn. Nauk, Mińsk 1987, 144 s.

Streszczenie

W przemysłowych konstrukcjach budowlanych wypełniane betonem rury stalowe mają rosnącą popularność. W porównaniu do konwencjonalnych stalowych albo żelbetowych konstrukcji słupowych konstrukcje zespolone stalowo-betonowe typu CFST (Concrete Filled Steel Tube) charakteryzują się zarówno większą wytrzymałością na ściskanie, jak i większą sztywnością. Osiowosymetryczne konstrukcje zespolone stalowo-betonowe mogą być stosowane w wielu gałęziach przemysłu. Konstrukcje te są często stosowane w budownictwie mostowym zarówno jako słupy podtrzymujące, jak i, coraz częściej, jako łuki mostów, zapewniając przenoszenie obciążeń statycznych oraz dynamicznych przy ekonomicznych rozmiarach konstrukcji.

Słowa kluczowe: rurobeton, nośność, beton, stal, ściskanie, sztywność

Carrying capacity of united structures on the example of CFST elements

Abstract

In industrial building structures steel pipes filled up with concrete have a growing popularity. In comparing to conventional steel or reinforced concrete poles, united structures steel-concrete of type CFST (Concrete Filled Steel Tube) are characterized by both a greater compressive strength and a greater stiffness. Axial-symmetrical united structures steel-concrete can be applied in many branches of industry. These structures are often applied in bridge buildings, both as sustaining poles as well as, more and more often, as curves of routes, providing the transfer operation both of static loads as well as dynamic at economic scopes of the construction.

Keywords: stiffness, concrete, tubular, steel, axial, compression