

WSPÓLPRACA BETONU I STALI W ZESPOLONYCH ELEMENTACH STALOWO-BETONOWYCH

Radosław DUDA*

Wydział budownictwa i Inżynierii Środowiska, Politechnika Białostocka, ul. Wiejska 45A, 15-351 Białystok

Streszczenie: Artykuł stanowi pracę poglądową dotyczącą współpracy zespolonych elementów stalowo-betonowych. Autor opracowania szczególną uwagę zwraca na rurowe elementy typu CFST. W opracowaniu zostały podane podstawowe zalety omawianych elementów konstrukcyjnych, zasady przykładania obciążeń oraz sposób obliczania nośności elementów rurowo-betonowych.

Słowa kluczowe: CFST, konstrukcje zespolone, naprężenia.

doi: 10.24427/bis-2018-vol9-no4-0001

1. Wprowadzenie

We współczesnym budownictwie, uzyskanie optymalnych właściwości konstrukcji otrzymuje się w wyniku łączenia różnych materiałów. W budownictwie przemysłowym i mostownictwie bardzo często wykorzystywane są zespolone konstrukcje typu beton-stal.

Artykuł przedstawia aktualny stan wiedzy dotyczący współpracy słupów zespolonych stalowo-betonowych złożonych z rury stalowej wypełnionej betonem (CFST – *Concrete Filled Steel Tube*). Rysunek 1 przedstawia typowe przekroje słupów zespolonych. W przeprowadzanych przez autora badaniach dokładniejszej analizie są poddane słupy o przekroju kołowym (Rys. 1e).

Pierwsze zastosowanie zespolonych rur stalowo-betonowych zaproponował Sewell w 1901 roku (Sandowicz, 1970). Przypadkowe przeciążenia słupów wykazały znacznie wyższą nośność w odniesieniu do przewidywanej, zakładającej prostą sumę nośności poszczególnych przekrojów. Wyjściowe metody obliczania zespolonych elementów stalowo-betonowych zostały opracowane na początku XX wieku. Prace badawcze Niemców Klöppela i Godera (1957) oraz Amerykanów Gardnera i Jacobsona (1967) znacząco przyczyniły się do rozwoju omawianej tematyki.

Zasady obliczania słupów typu CFST zostały zawarte w normie europejskiej PN-EN 1994-1-1:1992 *Eurokod 4. Projektowanie zespolonych konstrukcji stalowo-betonowych. Część 1-1: Zasady ogólne i reguły dla budynków* dotyczącej konstrukcji zespolonych. Od 1985 roku, co 3 lata, odbywają się, organizowane pod patronatem ASCCS (Association for International Cooperation and Research in Steel-Concrete Composite

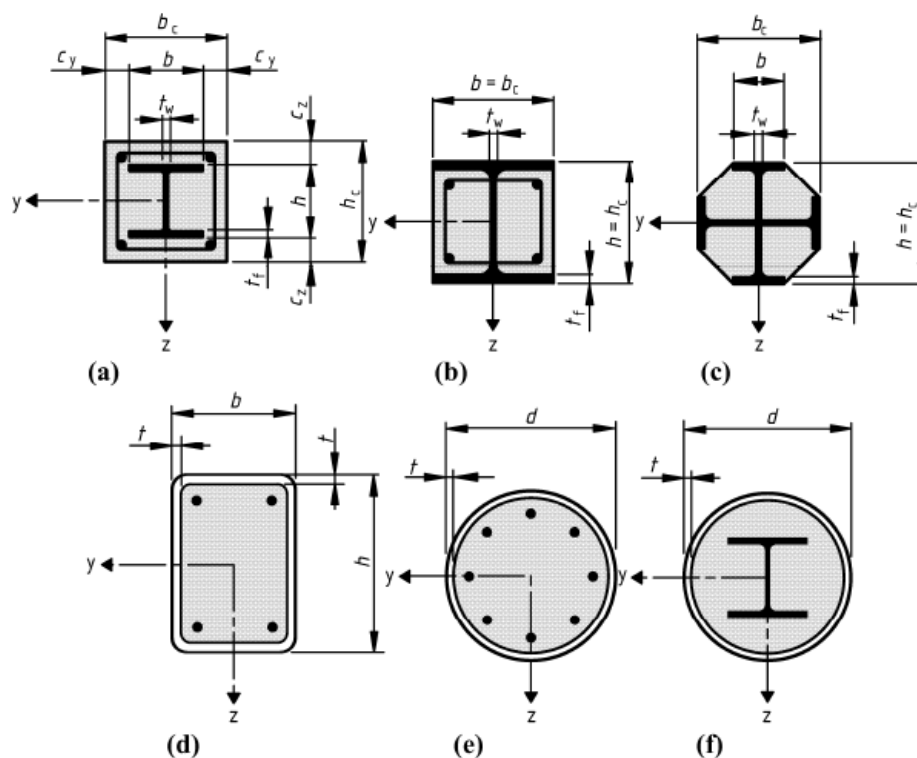
Structures), międzynarodowe konferencje poświęcone stalowo-betonowym konstrukcjom zespolonym. W Polsce raz na 4 lata mają miejsce konferencje naukowe dotyczące konstrukcji zespolonych, co świadczy o ciągłym rozwoju tej technologii. Obecnie największa liczba publikacji na temat CFST pochodzi z Japonii oraz Chin. W dużej mierze wynika to z ciągłości rurowych elementów stalowo betonowych, co jest istotną zaletą podczas pracy w warunkach obciążeń sejsmicznych. W 1967 roku została opublikowana pierwsza edycja norm AIJ (Architectural Institute of Japan), która opisuje trzy typy okrągłych przekrojów zespolonych:

- rura pokryta betonem,
- CFST – rura wypełniona betonem,
- rura pokryta i wypełniona betonem.

W Japonii działa stowarzyszenie ANUHT, zajmujące się propagowaniem konstrukcji wykonanych w technologii CFT. W latach 1998-2002 przeprowadzono kontrolę 175 budynków o wysokości do 60 m wykonanych w technologii CFST. Poniżej przedstawiono kilka wniosków otrzymanych na podstawie analizy zebranych danych (Szopa, 2007):

1. 65% budynków stanowiły sklepy i budynki biurowe. Zastosowanie CFST do tych budynków wskazuje na zalety tych elementów przy projektowaniu otwartych przestrzeni.
2. CFST rzadko wymaga stosowania ścian nośnych.
3. System CFST nie jest stosowany do stężonych budynków ramowych. Wynika to z jednakowej sztywności i wytrzymałości w kierunkach poprzecznym i podłużnym.
4. Powierzchnia stropu podpierana przez słupek CFST jest znacznie większa niż w przypadku zastosowania słupów żelbetowych czy stalowych. W ponad 40%

* Autor odpowiedzialny za korespondencję. E-mail: radek.avo@gmail.com



Rys. 1. Typowe przekroje poprzeczne słupów zespolonych (PN-EN 1994-1-1:1992).

- przypadków powierzchnia stropu przypadająca na podpierający ją jeden słup CFST wynosi około 90 m².
- W budynkach biurowych siatka słupów ma często wymiary 8×18 m, natomiast w centrach handlowych częściej siatka słupów ma wymiary zbliżone do kwadratu.
 - Najczęstsze zastosowanie znajdują kwadratowe i okrągłe przekroje poprzeczne o wymiarach 500/700 mm (w 80% przypadków), $D/t = 16-90$. Głównie używa się stali o wytrzymałości 325 MPa (85%), oraz betonu o wytrzymałości 36-42 MPa (65%). Opierając się na doświadczeniach naukowców zebrano dużą wiedzę odnośnie projektowania i praktyki budowlanej. Niestety opracowania naukowe i teorie obliczeniowe nie znajdują odzwierciedlenia w praktyce. Z tego względu rozpoczęto zarówno badania doświadczalne, jak i teoretyczne analizy. Opisane metody projektowania z 2004 roku nie uwzględniają między innymi tak zwanego „efektu ograniczenia” rdzenia betonowego przez rurę stalową oraz bazują na projektowaniu wyłącznie w zakresie sprężystym.
- Pomimo iż na świecie elementy CFST cieszą się coraz większą popularnością, w Polsce nie są jeszcze wystarczająco rozpowszechnione w budownictwie i jest niewiele publikacji dotyczących ich zastosowania.

2. Przegląd stanu wiedzy

Pierwsze zastosowania rur stalowych wypełnionych betonem miały na celu wyłącznie zabezpieczenie stali przed miejscową utratą stateczności oraz zapewnienie ochrony przed korozją. Nie dostrzegano korzyści wynikających z zespolonej współpracy obu materiałów. Najistotniejszą, z punktu widzenia pracy konstrukcji, zaletą jest duża nośność elementów CFST wynikająca z tak zwanego efektu ograniczenia (*confinement effect*) odkształceń poprzecznych betonu zamkniętego wewnątrz płaszcza stalowego. Przeprowadzone badania oraz realizacje konstrukcji z użyciem elementów typu CFST pozwoliły na opracowanie zalet, które opisano poniżej za wieloma publikacjami (Goode, 1994; Flaga i Szopa, 1997; Shams i Saadeghvaziri, 1997; Morino i Tsuda, 2004).

3. Główne zalety CFST

3.1. Współpraca betonu i stalowej rury

Poprzez efekt ograniczenia odkształceń beton wypełniający rurę ma wyższą wytrzymałość, natomiast stal jest zabezpieczona przed wyboczeniem, a co ważniejsze nawet po miejscowej utracie stateczności spadek wytrzymałości stali jest spowolniony dzięki współpracy z betonem. Również niszczenie betonu po uplastycznieniu nie jest bardzo szybkie ze względu na współpracę ze stalą. Warto zauważyć, iż zarówno skurcz, jak i pęcznienie betonu wypełniającego wnętrze rury stalowej są znacznie mniejsze niż w konstrukcjach żelbetowych.

3.2. Proporcje przekroju

Beton przenosi większą część obciążenia ściskającego, stal współpracuje z rdzeniem betonowym aż do momentu znacznego uplastycznienia ścianek. Warto zwrócić uwagę, iż transport i składowanie stali w postaci rur jest znacznie wygodniejsze niż przykładowo kształowników walcowanych z łącznikami. Pomimo iż w CFST ilość stali w stosunku do pola przekroju betonu jest dużo większa niż w konstrukcjach żelbetowych, to uzyskuje się mniejsze wymiary przekroju poprzecznego projektowanego elementu (Furtak, 1999).

3.3. Praca statyczno-wytrzymałościowa

Słupy CFST cechują się wysoką sztywnością przekroju, nośnością oraz odpornością na uderzenia mechaniczne. Posiadają wysoką absorpcję energii, a także dużą ciągliwość, co jest szczególnie istotne na terenach sejsmicznych i parasejsmicznych.

3.4. Konstruowanie

CFST charakteryzują się brakiem konieczności wykonania deskowań oraz zbrojenia. Pozwala to na redukcję siły roboczej oraz skrócenie czasu realizacji prac budowlanych.

3.5. Odporność ogniowa

Zastosowanie betonu do wypełnienia rury stalowej poprawia ognioodporność stali, co pozwala na ograniczenie zastosowania materiałów ognioodpornych. Jest to szczególnie istotne zagadnienie z uwagi na coraz bardziej restrykcyjne wymagania stawiane konstrukcjom w zakresie przeciwpożarowym.

3.6. Koszty

Zastosowanie konstrukcji CFST w znacznym stopniu obniża koszty inwestycji poprzez mniejsze zużycie materiałów, w porównaniu do konstrukcji stalowych czy żelbetowych.

3.7. Ekologia

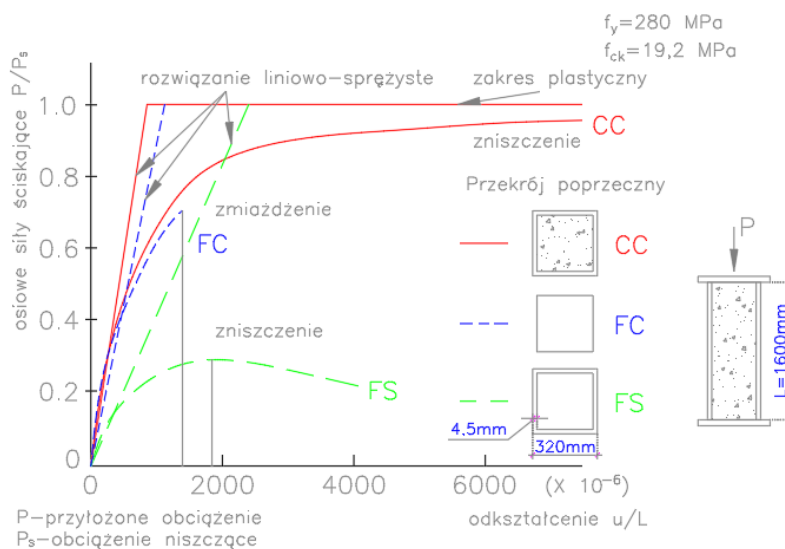
Brak konieczności stosowania deskowań, a także możliwość użycia kruszywa pochodzącego z recyklingu stanowi rozwiązanie bardziej ekologiczne w odniesieniu do tradycyjnych konstrukcji żelbetowych.

4. Współpraca stalowej rury i wypełniającego ją betonu

Elementy typu CFST znajdują zastosowanie jako ściskane lub mimośrodowo ściskane części konstrukcji – słupy, bądź pylony obiektów mostowych, czy też dźwigary mostów łukowych i kratowych. Poprzez ograniczenie odkształceń poprzecznych betonu płaszczem stalowym mamy do czynienia ze stanem trójosiowego ściskania betonu, co znacznie zwiększa jego nośność.

W początkowej fazie pracy elementów zespolonych nie dochodzi do pełnej współpracy obu materiałów, związane jest to z różnicą wartości normowych współczynników rozszerzalności poprzecznej betonu $\nu_c = 0,2$ oraz stali $\nu_a = 0,3$. Szybsza rozszerzalność poprzeczna stali od betonu może prowadzić do powstania szczeliny na styku stali i betonu. Dopiero rozwój mikro-spękań obciążonego betonu (wartość współczynnika Poissona betonu powyżej 0,3) gwarantuje stan trójosiowego naprężenia w betonie.

Dzięki współpracy betonu i stali wartość ściskającego obciążenia niszczonego słup typu CFST jest znacznie większa niż suma wartości obciążeń niszczących stal i beton o identycznym przekroju poprzecznym (efekt wyżej wymienionej współpracy występuje także w elementach żelbetowych). Zagadnienie to ilustruje rysunek 2, na którym (Hiroshi i in., 1998) przedstawiono zależność siła-odkształcenie dla trzech osiowo ściskanych słupów krępych o kwadratowym przekroju poprzecznym. Symbol CC oznacza słup wykonany z rury stalowej wypełnionej betonem, FC – słup betonowy, natomiast FS – rura stalowa. Wzrost mechanicznych właściwości konstrukcji CFST w stosunku do zsumowanych własności stali i betonu może



Rys. 2. Zależność obciążenie – odkształcenie dla słupów o kwadratowym przekroju poprzecznym (Hiroshi i in. 1998)

być opisany poprzez energię zniszczenia słupa zespolonego, w porównaniu do energii zniszczenia słupa stalowego czy betonowego. Wartość energii zniszczenia stanowi pole powierzchni zawarte pomiędzy wykresem funkcji $P/P_s = f(e_x)$, a osią odciętych i rzędną odpowiadającą momentowi zniszczenia każdego z tych słupów. Jeżeli powierzchnię tę oznaczmy jako E to iloraz energii zniszczenia tych słupów ma się do siebie tak jak:

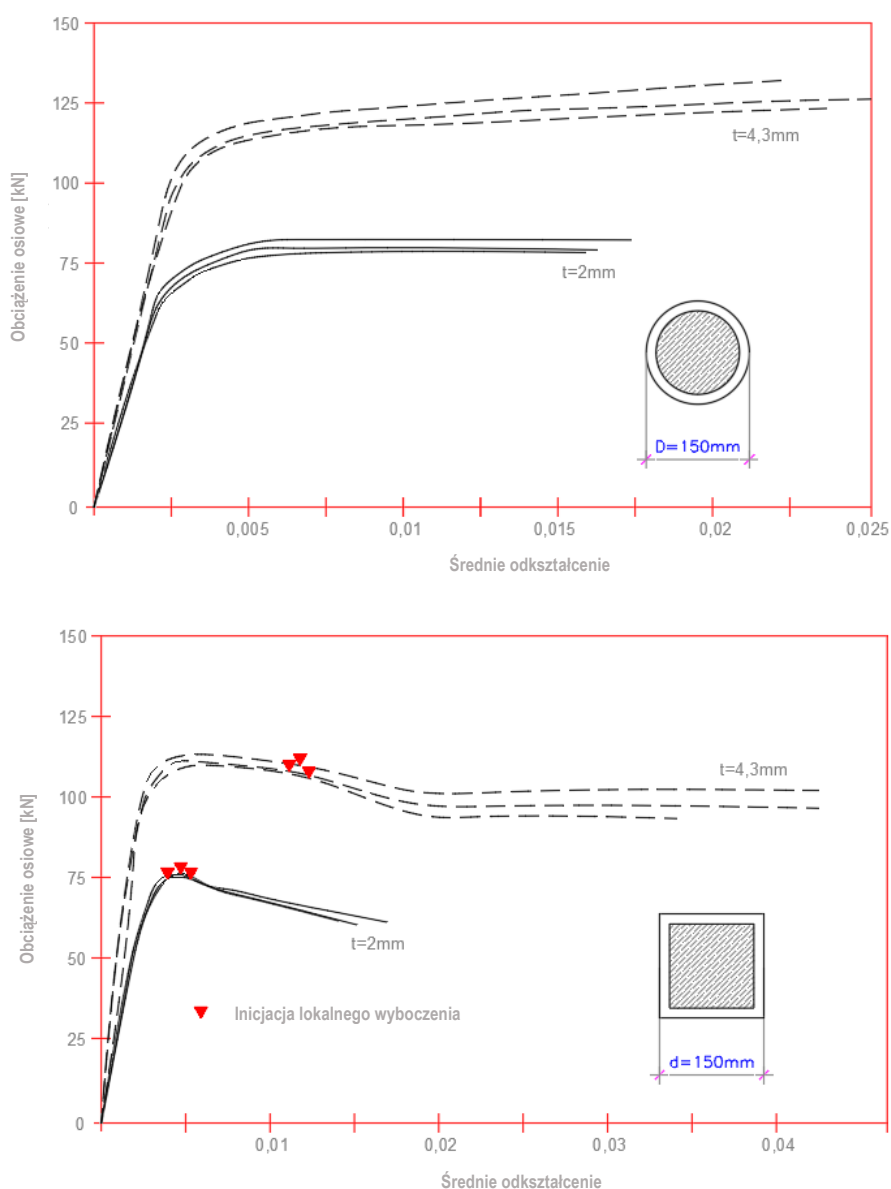
$$E_{FC} : E_{FS} : E_{CC} = 1,0 : 0,6 : 9,5 \quad (1)$$

Na podstawie analizy rysunku można zauważyć, że słupy te cechują się bardzo dużą odkształcalnością przy ściskaniu (ciągłość) oraz, że charakter pracy słupów jest zbliżony do sprężysto-plastycznej.

5. Charakterystyka przekroju

Przeprowadzone przez naukowców badania dają zgodne wyniki dotyczące wpływu kształtu przekroju na nośność elementów CFST. Stalowe rury, które wypełnia się mieszanką betonową mają najczęściej przekrój poprzeczny kwadratowy (prostokątny) lub okrągły.

Wyłącznie przekrój okrągły pozwala na osiągnięcie jednorodnego trójosiowego stanu naprężenia w wypełniającym betonie, co skutkuje dużo wyższym efektem zwiększenia nośności niż w przypadku słupów o przekroju kwadratowym. Zauważalna jest też różnica w wykresach obciążenie-odkształcenie (Shams i Saadeghvaziri, 1997). Zastosowanie rur okrągłych determinuje idealnie sprężysto-plastyczne zachowanie elementu, natomiast w przypadku słupów kwadratowych krzywa obciążenie-odkształcenie może być typu uszkodzeniowego (rys. 3).



Rys. 3. Zależność między odkształceniem i siłą ściskającą dla osiowo obciążonych słupów CFST (Shams i Saadeghvaziri, 1997)

Ze względu na lepsze właściwości wytrzymałościowe w dalszej części omówiono wyłączenie elementy CFST o kołowym przekroju poprzecznym.

Charakterystyczną wielkością w rurowych elementach CFST jest współczynnik kształtu D/t , gdzie t to grubość ścianki rury, a D jest średnicą zewnętrzną, którego wartość określa proporcje stali i betonu w przekroju poprzecznym. Nośność elementów rurowo-betonowych rośnie wraz ze zmniejszeniem współczynnika, lecz wiąże się to z koniecznością zwiększenia grubości ścianki, co może prowadzić do braku ekonomicznego uzasadnienia.

Za Dawidowiczem (1992) można przytoczyć wartość $D/t > 39$ jako oznaczającą rury cienkościennie. Istotnym jest, że współczynnik kształtu nie wpływa na ciągłość konstrukcji CFST. Ekonomicznie jest zatem stosować rury CFST o możliwie najniższym współczynniku D/t . Kolejnym ważnym parametrem, wpływającym na nośność CFST, jest stosunek f_y/f_{ck} , gdzie f_y jest charakterystyczną granicą plastyczności stali, a f_{ck} jest wytrzymałością charakterystyczną betonu. Wzrost wartości tego współczynnika powoduje wzrost nośności elementu (Goode, 1994).

6. Zasady przyłożenia obciążenia

Sposób przyłożenia obciążeń można wykonać stosując zasadę de Saint-Venanta, w myśl której przy obciążaniu prętów przyrzutowych, jeżeli poddany analizie układ sił oddziałuje na niewielkim fragmencie powierzchni przekroju pręta o wymiarach $a \times a$, to w odległości wynoszącej $(1-1,5)a$ od miejsca przyłożenia, obciążenie to działa już na całą powierzchnię przekroju. Zasadność stosowania tej reguły została potwierdzona przez wszystkie przytoczone wcześniej badania dotyczące ściskanych słupów typu CFST. Oznacza to, że nie dalej niż w odległości $(1-1,5)D$ rura stalowa współdziała z betonem w przenoszeniu podłużnej siły ściskającej, bez względu na to, iż jest ona przykładana wyłącznie na fragmencie rdzenia betonowego. Przyłożenie obciążenia do całej powierzchni przekroju poprzecznego prowadzi do uniknięcia zwiększonej destrukcji betonu w strefie przyłożenia obciążenia.

Przeprowadzono badania analizujące wpływ sposobu obciążenia konstrukcji CFST na jej nośność. Siłę ściskającą przykładano tylko do rdzenia betonowego, bądź tylko do rury stalowej (Dawidowicz, 1992). Na podstawie wyników badań można stwierdzić, że przyłożenie obciążenia wyłącznie do rdzenia betonowego prowadziło do szybszej współpracy płaszcza stalowego w przenoszeniu obciążeń podłużnych.

7. Obliczanie nośności elementów rurowo-betonowych

Na nośność elementów rurowo-betonowych wpływa wiele czynników, jako podstawowe można wskazać:

- wymiary i kształt przekroju poprzecznego,
- smukłość elementu,
- mimośród obciążenia elementu.

W artykule przytoczono wyłącznie obciążenia słupów

krępych. W Polsce zagadnieniami związanymi z wpływem wybożenia słupów typu CFST na ich nośność zajmowali się między innymi Matyaszewski (1966) i Dawidowicz (1992). Proponowane przez różne grupy badaczy teorie obliczeniowe i procedury projektowe dotyczące zwiększonej nośności krępego, ściskanego osiowo słupa zespolonego typu CFST o okrągłym przekroju poprzecznym są podmiotem wielu badań.

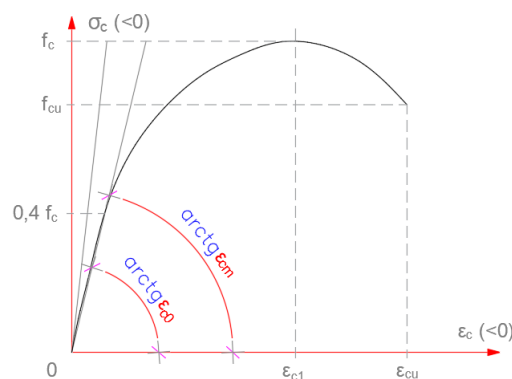
Po raz pierwszy górną i dolną granicę nośności tego typu elementów oszacowali Klöppel i Goder (1957). Dolna granica została powiązana z wybożeniem słupów, natomiast górna była zbyt konserwatywna dla krótkich słupów. Jak już wspomniano na wstępie, pierwszym sposobem obliczania nośności N_n słupów rurowo-betonowych było sumowanie nośności części betonowej oraz stalowej. Obliczane w ten sposób elementy nie oddają w pełni zdolności do przenoszenia obciążeń. W celu lepszego odzwierciedlenia nośności elementów CFST do formuły obliczeniowej wprowadzono współczynniki korekcyjne α i β :

$$N_n = \alpha \cdot f_{ck} A_c + \beta \cdot f_y \cdot A_a \quad (2)$$

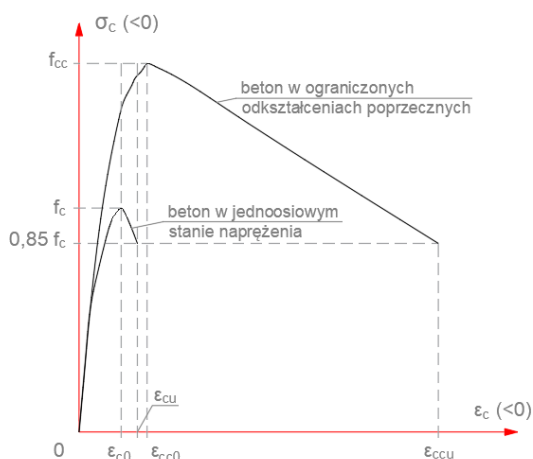
gdzie: A_c i A_a są odpowiednio polem powierzchni przekroju poprzecznego betonu i stali, a f_{ck} , f_y wytrzymałością charakterystyczną betonu i stali.

Wartości współczynników korekcyjnych określono na podstawie przeprowadzonych doświadczeń. W pracy (Storożenko i in., 1994) Storożenko podaje wartości tych współczynników w granicach: $\alpha = 1,2-5,0$; $\beta = 1,0-2,0$. W późniejszych opracowaniach zauważalna jest tendencja do zmniejszania wartości współczynnika β zmierzającego do 1,0 oraz wzrostu współczynnika α . Proponowane przez rosyjskich badaczy teoretyczne rozwiązanie nośności elementów rurowo-betonowych przedstawiono w opracowaniu (Szopa, 2007). Wzrost nośności słupów typu CFST w głównej mierze zależy od zmiany właściwości wytrzymałościowych betonu spowodowanych ograniczeniem jego poprzecznych odkształceń tak zwany *confinement effect*.

Na rysunku 4 pokazano wykres zależności naprężenie-odkształcenie przewidzianej do stosowania w nieliniowej analizie konstrukcji, natomiast rysunek 5 przedstawia zależność naprężenie-odkształcenie dla betonu o odkształceniach poprzecznych ograniczonych przy pomocy uzwojenia.



Rys. 4. Zależność naprężenia od odkształcenia dla betonu ściskanego (Małek, 2004)



Rys. 5. Zależność naprężenia od odkształcenia dla betonu ściskanego z ograniczonymi odkształceniami poprzecznymi (Małek, 2004)

8. Podsumowanie

Elementy typu CFST stanowią wartą uwagi i prężnie rozwijającą się dziedzinę nauki. Zastosowanie rur stalowych wypełnionych betonem jest uzasadnione ekonomicznie oraz pozwala na przeniesienie znacznych obciążeń ściskających. Należy zauważyć, że beton, pomimo ograniczenia wpływu oddziaływań środowiskowych, podlega skurczowi autogenicznemu co w czasie prowadzi do pogorszenia współpracy stal-beton. Autor opracowania prowadzi badania mające na celu zniwelowanie skurczu autogenicznego w elementach typu PCFST (*pre-stressing concrete filled steel tube*) poprzez zastosowanie betonu ekspansywnego oraz odpowiedni dobór kruszywa.

Literatura

- Dawidowicz P. (1992). Badania słupów z rur stalowych wypełnionych betonem ściskanych osiowo. *Inżynieria i Budownictwo*, 1-4/1992, 28-31.
- Flaga K., Szopa L. (1998). Słupy zespolone typu CFST jako alternatywa dla słupowych żelbetonowych filarów mostowych. W: Materiały Konferencji naukowo-technicznej „Mosty zespolone”, Kraków.
- Furtak K. (1999). *Mosty Zespolone*. PWN, Warszawa-Kraków.

- Gardner N., Jacobson E. (1967). Structural behavior of concrete filled steel tubes. *Journal of the American Concrete Institute*, Vol. 64, Issue 7, 404-413.
- Goode C.D. (1994). Composite columns – state of the art. W: *IV International Conference ASCCS*, Koszyce, Słowacja.
- Hiroshi N., Shigeyuki M., Teruhiko Y., Akimitsu K. (1998). Trends in steel-concrete composite bridges in Japan. *SEI*, Vol. 8, No.1, 30-34.
- Klöppel K., Goder W. (1957). Traglasversuche mit ausbetonierten Stahlrohren und Aufstellung einer Bemessungsformel. *der Stahlbau*, Vol. 26, Nr 1. 1-10.
- Małek E. (2004). Metoda Nieliniowej Analizy Prętowych Elementów Stalowo-Żelbetonowych Obciążonych Statycznie. *Wydawnictwa Politechniki Częstochowskiej*, Monografie, nr 97.
- Matyszewski S. (1966). Cechy Wytrzymałościowe i Konstrukcyjne Stalowych Prętów Rurowych o Przekroju Kołowym Wypełnionych Betonem. Praca doktorska, *Politechnika Warszawska*.
- Morino S., Tsuda K. (2002). Design and construction of Concrete-Filled Steel Tube column system in Japan. *Earthquake Engineering and Engineering Seismology*, Vol. 4, No. 1, 51-73.
- Sandowicz M. (1970). Nośność i Odkształcalność Ściskanych Osiowo Słupów z Rur Siatkobetonowych Wypełnionych Betonem. Praca doktorska, *Politechnika Warszawska*.
- Shams M., Saadeghvaziri M. A. (1997). State of the art of concrete-filled tubular columns. *ACI Structural Journal*, Vol. 94, Issue 5, 558-571.
- Storożenko L. U., Efimienko W.U., Płachotnyj P.U. (1994). *Zginane Ruro-Betonowe Konstrukcje*. Kijów.
- Szopa L. (2007). Współpraca Betonu Ii Stali Na Różnych Poziomach Obciążenia w Osiowo Ściskanych Elementach Zespolonych Stalowo-Betonowych. Rozprawa doktorska, *Politechnika Krakowska*, Kraków.

CONCRETE AND STEEL WORK IN COMBINED STEEL CONCRETE ELEMENTS

Abstract: The article presents the current state of knowledge regarding the cooperation of steel-concrete composite columns composed of a concrete filled steel tube (CFST). The most important, from the point of view of work construction, is the high load-bearing capacity of CFST elements resulting from the so-called the confinement effect of lateral deformation of the concrete sealed inside the steel pipe. It should be noted that concrete, despite limiting the impact of environmental impacts, is subject to autogenous contraction, which in time leads to a deterioration of steel-concrete cooperation.