

Marcin ABRAMSKI*
Politechnika Gdańska

BADANIA EKSPERYMENTALNE SŁUPÓW CFST POD KĄTEM WYTEŻENIA I NOŚNOŚCI

Streszczenie. W artykule przedstawiono wyniki badań niszczących słupów typu CFST wykonanych jako pierwszy etap pracy doktorskiej. Omówiono zgodność wyników nośności słupów otrzymanych eksperymentalnie z nośnością obliczoną teoretycznie. Zamieszczono wykresy obrazujące wyteżenie słupów w poszczególnych fazach obciążenia aż do zniszczenia.

EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS OF CFST COLUMNS IN RESPECT OF EFFORT AND LOAD CARRYING CAPACITY

Summary. In the paper results of experimental tests on CFST columns are presented. This investigation is the first part of wider investigation program prepared for doctor thesis. The results of load capacity obtained from tests and from theoretic calculation are compared. Some diagrams illustrating load effort in particular stages of loading are presented.

1. Wprowadzenie

Słupy zespolone typu CFST są od lat w niektórych krajach jednym z podstawowych elementów konstrukcyjnych w budownictwie. Nazwa CFST pochodzi z języka angielskiego i jest skrótem słów: *Concrete Filled Steel Tube*. Konstrukcje typu CFST pojawiły się powszechnie w budownictwie lądowym przed około 50 laty. Do krajów, w których popularność konstrukcji CFST jest największa, należą: USA, Japonia, Rosja, Chiny. W Polsce konstrukcje te, mimo że znane, są rzadko stosowane.

Rury stalowe wypełnione betonem konstrukcyjnym charakteryzują się wysoką wytrzymałością i ciągliwością w obszarze obciążeń niszczących. Zwłaszcza ta druga cecha jest zdecydowaną zaletą słupów CFST w stosunku do zwykłych słupów żelbetowych. Wiąże

* Opiekun naukowy: Dr hab.inż. Piotr Korzeniowski.

się ona bowiem z dużą wartością energii zniszczenia, co jest ważne w przypadku pracy konstrukcji w warunkach sejsmicznych. Słupy CFST, charakteryzując się wyższą plastycznością, są zdecydowanie mniej wrażliwe na znaczne deformacje, mające miejsce podczas trzęsień ziemi i dzięki temu są w stanie przenosić w tych warunkach większe siły niż zwykle słupy żelbetowe. Nieprzypadkowo więc słupy zespolone znalazły swoje zastosowanie głównie w krajach o silnych wpływach sejsmicznych.

Omawiane słupy mają jednak wiele innych zalet, które od lat z powodzeniem wykorzystywane są w krajach europejskich. W Niemczech, Wielkiej Brytanii czy Francji słupy CFST stosowane są i opisywane w literaturze naukowej znacznie szerzej aniżeli w naszym kraju. Takie zalety, jak: oszczędność szalunków, przyspieszenie tempa budowy, technologiczna prostota prefabrykacji, jak również wykonywania połączeń i węzłów, zwiększona odporność udarowa konstrukcji czy wreszcie estetyka, decydują częstokroć o wyborze tej technologii budowania.

Dotychczasowe bardzo liczne badania eksperymentalne i teoretyczne prowadzone na całym świecie [1]-[3] wskazują, że w słupach CFST począwszy od pewnego poziomu obciążenia dochodzi do bardzo dobrej współpracy pomiędzy płaszczem stalowym i wypełniającym go betonem konstrukcyjnym. Na skutek ograniczenia odkształceń poprzecznych betonu przez otaczający go płaszcz stalowy powstaje w betonie trójosiowy stan naprężeń i w efekcie nośność betonu wzrasta. Z kolei, w płaszczu stalowym powstaje dwuosiowy stan naprężeń: ściskanie w kierunku podłużnym i rozciąganie w kierunku obwodowym. Z uwagi na współpracę płaszcza z betonem do utraty stateczności lokalnej rury dochodzi tuż przed zniszczeniem elementu jako całości. Reasumując, można stwierdzić, że słupy CFST, oprócz wykorzystania wszystkich mechanicznych właściwości betonu i stali traktowanych oddzielnie, wykorzystują z powodzeniem dodatkowe wzmocnienie tych elementów wynikające z ich pracy zespolonej.

2. Cel, zakres i dotychczasowe wyniki prowadzonych własnych badań eksperymentalnych

Podjęte przeze mnie badania eksperymentalne słupów CFST stanowią kontynuację i rozszerzenie badań prowadzonych na Wydziale Inżynierii Lądowej Politechniki Gdańskiej przez P. Korzeniowskiego [4], nad efektywnością słupów, w których można wykorzystać przestrzenny stan naprężenia, prowadzący do poprawy własności fizycznych betonu.

Przedstawione w artykule badania stanowią fragment szerszego programu badawczego w ramach przygotowywanej przeze mnie pracy doktorskiej. Celem tych badań jest analiza porównawcza stanu wyężenia i nośności osiowo ściskanych słupów typu CFST, uzwojonych oraz żelbetowych. Stałym parametrem badań jest zbliżony (ze względów technicznych nie udało się uzyskać identycznego) procent zbrojenia słupów każdego wariantu, wynoszący $\rho \cong 6\%$.

Do chwili obecnej przeprowadziłem badania niszczące sześciu słupów CFST obciążonych osiowo i podpartych obustronnie na przegubach kulistych. Wszystkie słupy miały średnicę 205 mm i wysokość 2000 mm. Wszystkie były ponadto obciążane przez rdzeń betonowy, a ich wyężenie było sterowane wielkością przyłożonej siły.

Tabela 1

Symbole i dane techniczne przebadanych słupów

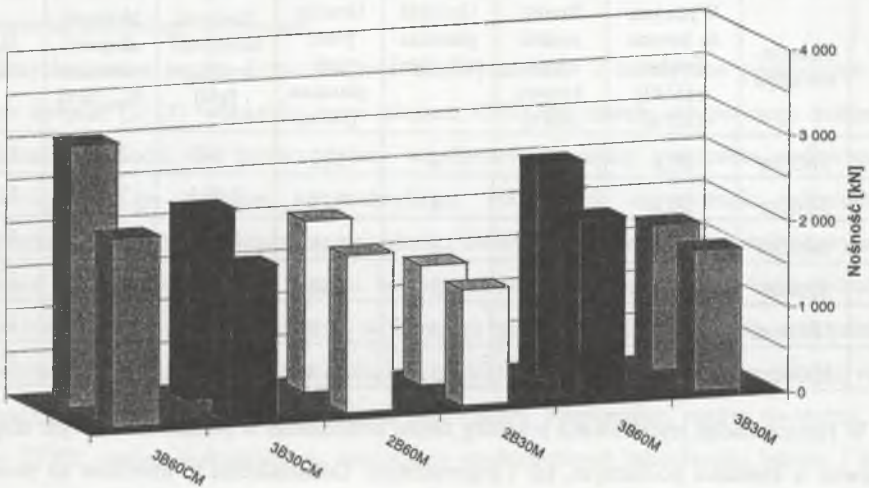
Lp.	Oznaczenie słupa	Wytrzymał. śr. betonu (walce $\phi 15/30$) [MPa]	Średni moduł spręż. betonu [GPa]	Grubość płaszczu stal. [mm]	Granica plast. stali płaszczu [MPa]	Nośność teoretyczna N_{calc} [kN]	Nośność eksperymentalna N_{exp} [kN]	N_{exp}/N_{calc}
1.	3B30m	30,6	31,4	3	312	1 646	1 699	1.03
2.	3B60m	50,8	33,3	3	312	2 091	2 500	1.20
3.	2B30m	32,3	27,5	2	243	1 353	1 399	1.03
4.	2B60m	52,1	31,8	2	243	1 838	2 000	1.09
5.	3B60cm	54,4	37,2	3	312	1 789	2 199	1.23
6.	3B30cm	35,4	32,5	3	312	2 200	3 044	1.38

W ramach badań rejestrowano przebieg zmian odkształceń w płaszczu stalowym słupów zarówno w kierunku podłużnym, jak i poprzecznym. Odkształcenia te mierzono za pomocą tensometrów elektrooporowych przyklejanych w trzech poziomach: górnym, środkowym i dolnym, każdorazowo w trzech miejscach na obwodzie słupa, w parach: tensometr poziomy + tensometr pionowy.

Otrzymane z badań nośności eksperymentalne słupów porównano do nośności obliczonych teoretycznie według projektu znowelizowanej polskiej normy „prPN/B-03302. Konstrukcje zespolone stalowo-betonowe. Obliczenia statyczne i projektowanie. Słupy zespolone”. Wykorzystano procedury obliczeniowe wspomnianej wyżej normy, wstawiając w miejsce parametrów materiałowych betonu i stali wartości średnie otrzymane z badań. W przypadku betonu wytrzymałość na ściskanie i moduł sprężystości określono na walcach

$\phi 15/30$ cm, a w przypadku stali granicę plastyczności określono w maszynie wytrzymałościowej na próbkach w kształcie pasków wycinanych z rury.

Porównanie nośności przedstawiono na rys.1. Jak widać, zgodność wartości eksperymentalnych i obliczeniowych mieści się w granicach od 3% do 38%, zawsze na korzyść bezpieczeństwa konstrukcji. Na kolejnych rysunkach: 2 i 3 przedstawiono przykładowe fotografie badanych słupów, a na rysunku 4 zobrazowano program ich obciążania. Na rysunkach 5-7 zilustrowano w postaci wykresów zachowanie słupów w trakcie niszczenia. Przedstawioną na rys.6. pokrytyczną gałąź wykresu $P-\Delta l$ uzyskano, pomimo sterowania siłą, dzięki temu, że zastosowana w badaniach prasa ma możliwość automatycznej rejestracji spadku siły przy rosnącym gwałtownie wysuwie tłoka prasy. Możliwy jest zapis wartości siły z częstotliwością do 10 razy na sekundę.



Rys. 1. Porównanie nośności teoretycznych i eksperymentalnych
Fig. 1. Comparison of theoretic and experimental load capacities

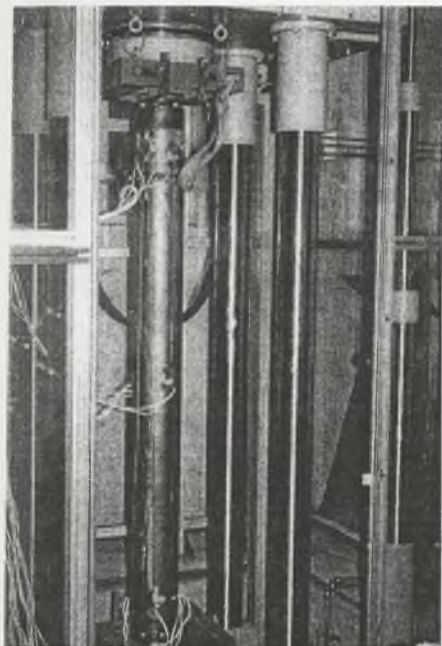
3. Uwagi końcowe

Analiza dotychczasowych wyników badań pozwala na sformułowanie następujących dość ostrożnych wniosków:

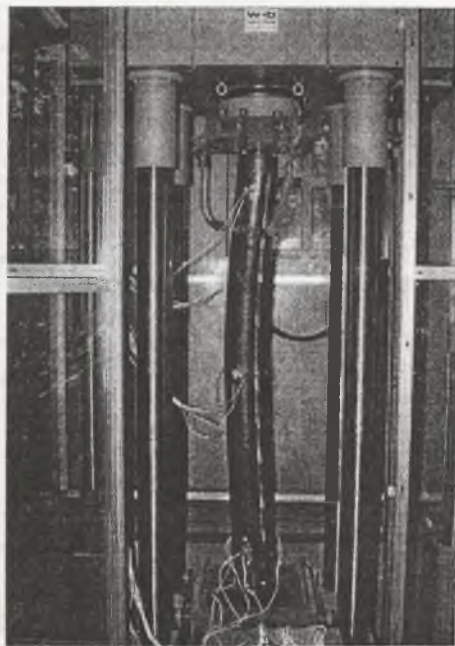
- Znaczący przyrost naprężeń obwodowych w stalowym płaszczu (rys. 7), świadczący o wzroście naporu betonu na płaszcz, obserwuje się podobnie jak w słupach uzwojonych w końcowej fazie wyęźnienia słupa. Może to oznaczać, że na poziomie obciążeń

eksploatacyjnych korzyści wynikające z wytworzenia przestrzennego stanu naprężenia w betonie są mniejsze, niż się dotychczas sądzi.

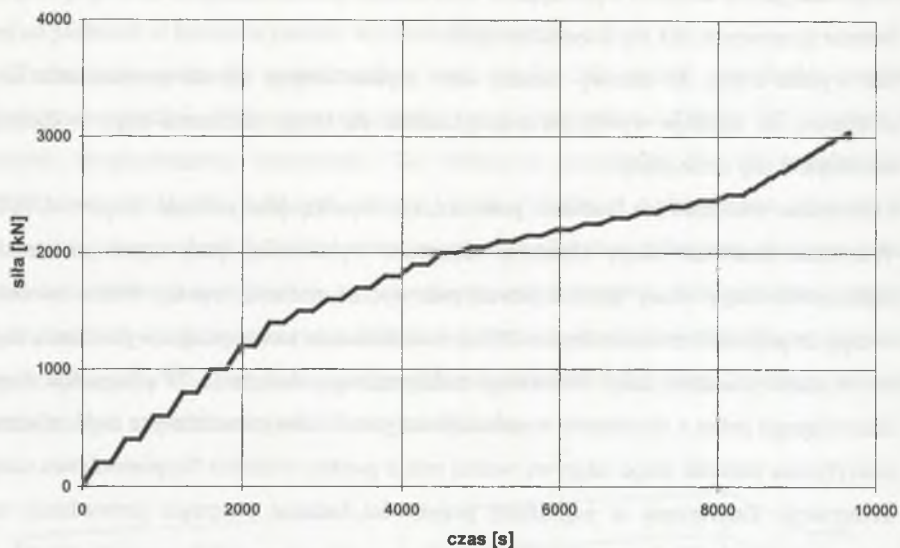
- Jak wynika z rys. 5, stalowy płaszcz dość szybko włącza się do przenoszenia siły podłużnej, co skutkuje wyraźnym zmniejszeniem się tempa skrócenia słupa w funkcji narastającej siły ściskającej.
- Dotychczas zrealizowane badania potwierdzają wysoką plastyczność słupów CFST. Wszystkie testowane słupy niszczyły się przez wyboczenie, przy czym po utracie stateczności słupy miały jeszcze pewną pokrytyczną nośność (rys.6). Warto zwrócić uwagę, że przy skróceniu się słupa o 20% ponad skrócenie towarzyszące wyboczeniu słup był w stanie przenosić dalej 50% swego maksymalnego obciążenia. W przypadku słupa stanowiącego jeden z elementów konstrukcji statycznie niewyznaczalnej ta dość znaczna pokrytyczna nośność słupa odgrywa ważną rolę z punktu widzenia bezpieczeństwa całej konstrukcji. Zamierzone w najbliższej przyszłości badania niszczące prowadzone na słupach żelbetowych i uzwojonych o analogicznych parametrach geometrycznych i materiałowych pozwolą na porównanie zachowania pokrytycznego tych trzech typów słupów.



Rys. 2. Słup CFST na stanowisku badawczym
Fig. 2. CFST column at the test stand

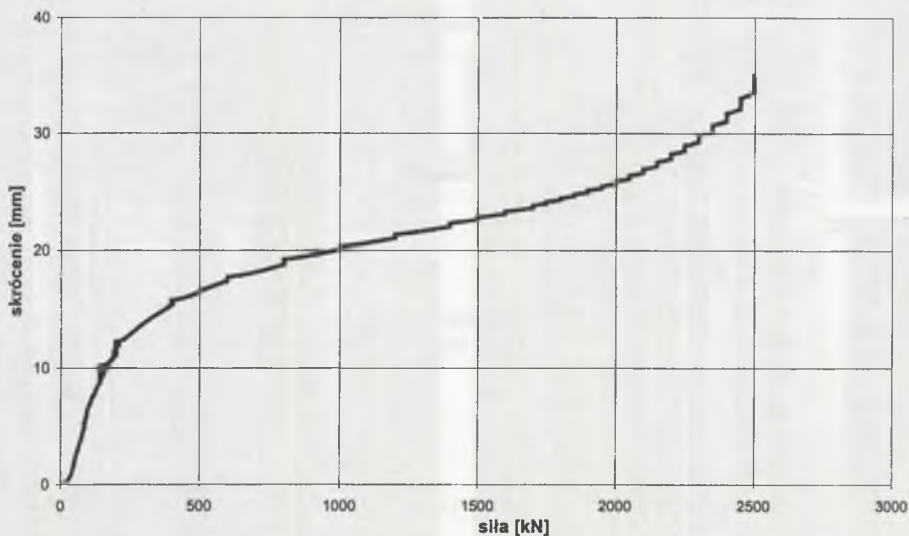


Rys. 3. Słup CFST po zniszczeniu
Fig. 3. CFST column after its failure



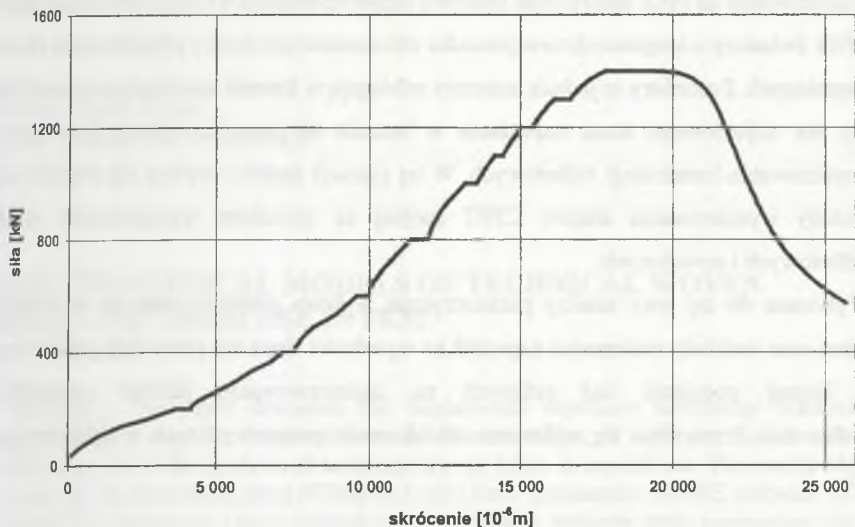
Rys. 4. Zastosowany w badaniach sekwencyjny sposób obciążania słupów na przykładzie słupa 3B60 cm

Fig. 4. Test programme of load applying for 3B60 cm column



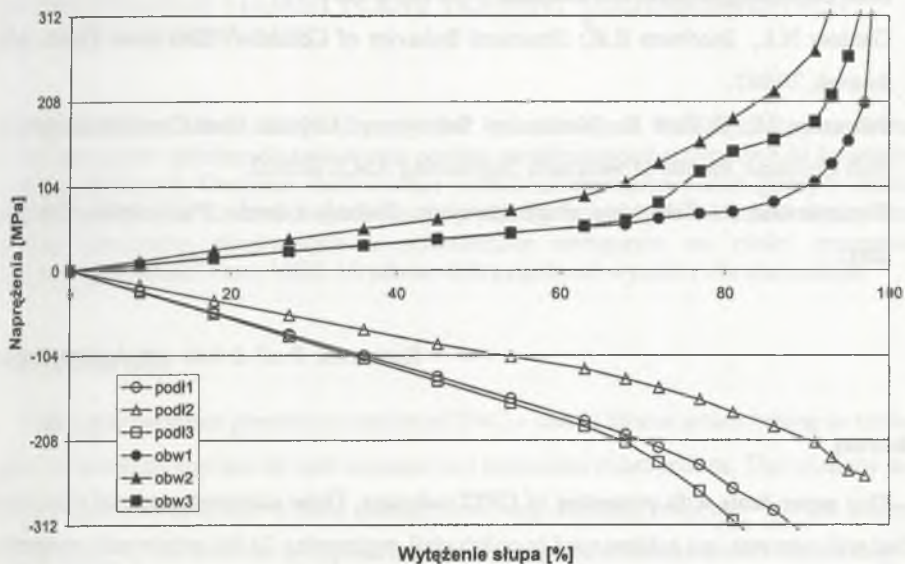
Rys. 5. Typowy wykres zależności skrócenia słupa od przyłożonej siły ściskającej na przykładzie słupa 3B60 m

Fig. 5. Typical relationship between compressing load and column shortening – example of 3B60 m column



Rys. 6. Zależność siły od przemieszczenia tłoka prasy (tym samym – skrócenia słupa) na przykładzie słupa 2B30 m

Fig. 6. Column shortening - compressing load relationship for 2B30 m column



Rys. 7. Przykładowy wykres zmienności naprężeń podłużnych i obwodowych dla przekroju słupa 3B30 cm w środku wysokości, wykonany osobno dla każdego z sześciu tensometrów

Fig. 7. Distribution of longitudinal and circumferential stresses for midheight cross section of 3B30 cm column

➤ Przedstawione na rys.1 zestawienie nośności eksperymentalnych i obliczeniowych słupów CFST świadczy o bezpieczeństwie procedur obliczeniowych normy projektowania słupów zespolonych. Procedury te jednak znacznie odbiegają w kwestii uwzględniania smukłości czy też trójosiowego stanu naprężenia w betonie od procedur zawartych w normie projektowania konstrukcji żelbetowych. W tej sytuacji zasadne wydaje się poszukiwanie metody wymiarowania słupów CFST spójnej ze sposobem wymiarowania słupów żelbetowych i uzwojonych.

Wykonane do tej pory analizy parametryczne wpływu grubości płaszcza na wielkość naprężeń oraz rozkładu zmienności naprężeń na wysokości słupa nie pozwalają przy obecnej, mało licznej populacji ciał próbnych na zaobserwowanie jakichś szczególnych prawidłowości. Przewiduje się wykonanie takich analiz parametrycznych w dalszym etapie badań.

LITERATURA

1. Klöppel K., Goder W.: Traglastversuche mit ausbetonierten Stahlrohren und Aufstellung einer Bemessungsformel. Der Stahlbau 1/1957 u. 2/1957.
2. Gardner N.J., Jacobson E.R.: Structural Behavior of Concrete Filled Steel Tubes. ACI Journal, 7/1967.
3. Johansson M., Gylltoft K.: Mechanical Behavior of Circular Steel-Concrete Composite Stub Columns. Journal of Structural Engineering ASCE 8/2002.
4. Korzeniowski P.: Żelbetowe słupy uzwojone. Badania i teoria. Politechnika Gdańska, 2000.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Andrzej Łapko

Abstract

This paper deals with properties of CFST columns. These columns, made of steel tubes filled with concrete, are seldom used in polish civil engineering. In the article main properties of these structures are characterized. The experimental results of author's investigations on CFST columns are presented. The loading capacity (obtained both from experiments and theoretical calculations) was investigated. Some diagrams illustrating load effort of columns and post-critical behaviour of them are inserted.