dr inż. Damian Sokołowski[1)]
ORCID: 0000-0002-6141-1116
dr hab. inż. Jacek Szafran, prof. uczelni[1)*)]
ORCID: 0000-0002-6984-0193
mgr inż. Tomasz Wudkiewicz[1)]
ORCID: 0009-0002-8595-0584

Comparative analysis of the load-bearing capacity and stiffness of a compressed and sheared CFST element according to selected international standards

Analiza porównawcza nośności i sztywności ściskanego i ścinanego elementu CFST na podstawie wybranych norm światowych

DOI: 10.15199/33.2026.10.17

Abstract. The paper presents an analysis of the load-bearing capacity of a compressed and sheared curved CFST *(Concrete-Filled Steel Tube)* member, as well as its flexural stiffness. The analysis was carried out in accordance with leading international design standards. The results obtained from the individual standards were compared and presented in the form of charts. The study revealed fundamental differences in the approaches adopted for calculating the load-bearing capacity of both the cross-section and the structural member under individual basic loading cases, leading to significant discrepancies in the values obtained during the design calculation process.
Keywords: CFST; compression; shear; stiffness; confinement effect.

Streszczenie. W artykule przedstawiono analizę nośności ściskanego oraz ścinanego łukowego elementu CFST *(Concrete-Filled Steel Tube)*, a także jego sztywność giętną na podstawie głównych norm światowych. Wyniki zestawiono w formie wykresów. Analiza wykazała fundamentalne różnice w podejściu do kalkulacji nośności przekroju i elementu w poszczególnych przypadkach, prowadzące do rozbieżnych wartości uzyskanych w procesie obliczeniowym.
Słowa kluczowe: CFST; ściskanie; ścinanie; sztywność; efekt ograniczenia.

Concrete-filled steel tubes (CFST) are an advanced form of composite structures. They consist of a ste-el tube with a closed cross-section filled with concrete. The steel shell, which carries tensile and bending stresses, provides longitudinal and transverse reinforcement, while the concrete core is responsible for carrying compressive loads. A characteristic property of CFST members is the confinement effect, which involves limiting the transverse deformations of the compressed concrete by means of the steel shell [1]. The state of triaxial compression of the concrete results in an increase in its compressive strength and ductility. The authors demonstrated high compressive strength in their experimental studies [2]. However, it should be noted that the full effectiveness of the confinement effect only begins at high levels of strain and load on the member, close to its failure [3]. In addition to compressive forces, shear forces are also important. Their safe transfer depends on many factors, which were compared by the authors of this paper [4].

Elementy stalowo-betonowe wypełnione betonem (*concrete-filled steel tube*, CFST) stanowią zaawansowaną formę konstrukcji zespolonych. Składają się one ze stalowej rury o przekroju zamkniętym, wypełnionej betonem. Stalowy płaszcz, który przenosi naprężenia rozciągające i zginające, pełni funkcję zbrojenia podłużnego i poprzecznego, a betonowy rdzeń odpowiada za przenoszenie obciążeń ściskających. Charakterystyczną cechą elementów CFST jest efekt ograniczenia *(confinement effect)*, który polega na ograniczaniu odkształceń poprzecznych ściskanego betonu za pomocą stalowego płaszcza [1]. Stan trójosiowego ściskania betonu powoduje zwiększenie jego wytrzymałości na ściskanie oraz plastyczności. Dużą nośność na ściskanie wykazali autorzy w swoich badaniach eksperymentalnych [2]. Należy jednak pamiętać, że pełna efektywność efektu ograniczenia zaczyna się dopiero przy wysokich poziomach odkształcenia i obciążenia elementu, blisko jego zniszczenia [3]. Oprócz sił ściskających, równie istotne są siły ścinające. Ich bezpieczne przeniesienie zależy od wielu czynników, które zostały porównane przez autorów pracy [4].

[1)] Politechnika Łódzka, Wydział Budownictwa Architektury i Inżynierii Środowiska
[*)] Correspondence address: jacek.szafran@p.lodz.pl

This article presents a comparative analysis of selected load-bearing capacity and flexural stiffness properties of an arched CFST member based on international standards. The calculated results are presented in graphs, and the percentage differences between the individual standards are provided.

Materials and methods

The methods for calculating the shear, compression, and buckling capacity, as well as the flexural stiffness of a CFST arch, were analyzed based on international design standards. The length of the arch element fixed at both ends (Figure 1) is 3310 mm. The supports are spaced 3000 mm, while the deflection measured to the element's axis is 600 mm. The cross-section of the element, along with its geometric characteristics, is shown in Figure 2. The 6,3 mm thick steel shell is designed using S235 steel, and the core is made of C40/50 concrete. No additional reinforcement of the cross-section with rebar was included. The following standards were taken into account in the analysis: PN-EN 1994-1-1 [5], ANSI-AISC 360-22 [6], GB 50923-2013 [7], GB 50936-2014 [8], JGJ/T 471-2019 [9], and GB/T 51446-2021 [10].

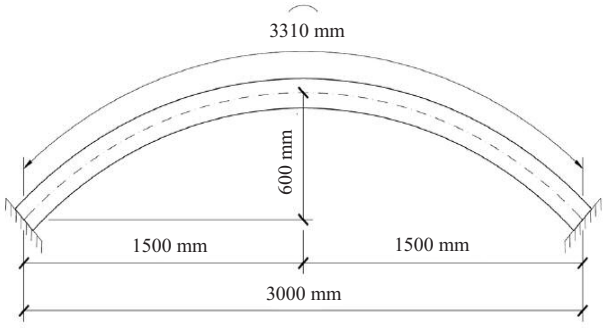


Fig. 1. Geometry of the CFST element
Rys. 1. Geometria elementu CFST

Confinement effect is a characteristic phenomenon occurring in CFST elements. The confinement of the concrete core's deformation by the steel shell leads to an increase in the concrete's compressive strength. A key factor here is the proper selection of steel grade and concrete class. The yield strain of the steel must be lower than the yield strain of the concrete in order to effectively resist the deformations of the concrete core. Then confinement coefficient is denoted by the symbol ξ_0 and defined by Equation (1):

$$\xi_0 = \frac{A_s f_{s,x}}{A_c f_{cd,x}} \quad (1)$$

where:
A_s and A_c – the cross-sectional area of the steel tube and the concrete core, respectively;
$f_{s,x}$ – the compressive strength of steel;
$f_{cd,x}$ – the compressive strength of concrete.

The values of the parameters found in Equation (1) vary depending on the specific design standards [7 ÷ 9]. The confinement effect factor is adopted in only three of the six analyzed standards. In the others, it is completely omitted.

W artykule omówiono analizę porównawczą wybranych wartości nośności oraz sztywności giętnej łukowego elementu CFST na podstawie norm światowych. Obliczone wartości zestawiono na wykresach oraz wskazano procentowe rozbieżności pomiędzy poszczególnymi normami.

Metody badań i materiały

Przeanalizowano sposoby obliczania nośności na ścinanie, ściskanie i wyboczenie oraz sztywności giętnej łuku CFST, na podstawie światowych standardów projektowych. Długość obustronnie zamocowanego elementu łukowego (rysunek 1) wynosi 3310 mm, podpory znajdują się w rozstawie 3000 mm, natomiast strzałka wygięcia mierzona do osi elementu, wynosi 600 mm. Przekrój poprzeczny elementu, wraz z jego charakterystyką geometryczną, przedstawiono na rysunku 2. Stalowy płaszcz o grubości 6,3 mm zaprojektowano ze stali S235, a rdzeń z betonu klasy C40/50. Nie zdecydowano się na dodatkowe wzmocnienie przekroju prętami zbrojeniowymi. W prowadzonej analizie wzięto pod uwagę następujące normy: PN-EN 1994-1-1 [5]; ANSI-AISC 360-22 [6]; GB 50923-2013 [7]; GB 50936-2014 [8]; JGJT 471-2019 [9]; GBT 51446-2021 [10].

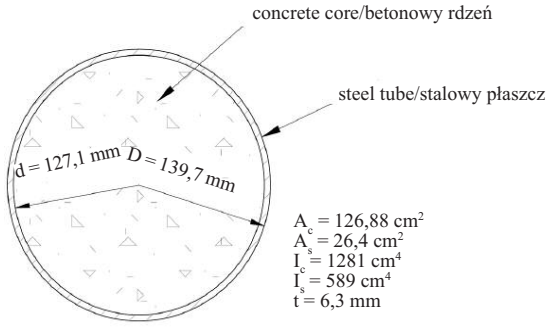


Fig. 2. Cross-section of the CFST element
Rys. 2. Przekrój poprzeczny elementu CFST

Efekt ograniczenia jest charakterystycznym zjawiskiem zachodzącym w elementach CFST. Ograniczenie odkształceń betonowego rdzenia przez stalowy płaszcz prowadzi do zwiększenia wytrzymałości betonu na ściskanie. Kluczową rolę odgrywa właściwy dobór gatunku stali oraz klasy betonu. Graniczne odkształcenie stali powinno być mniejsze niż graniczne odkształcenie betonu, aby z powodzeniem zapobiegać odkształceniom betonowego rdzenia. Współczynnik efektu ograniczenia oznaczono symbolem ξ_0 oraz zdefiniowano wzorem (1):

$$\xi_0 = \frac{A_s f_{s,x}}{A_c f_{cd,x}} \quad (1)$$

gdzie:
A_s i A_c – kolejno pole przekroju stalowego płaszcza i betonowego rdzenia;
$f_{s,x}$ – wytrzymałość stali na ściskanie;
$f_{cd,x}$ – wytrzymałość betonu na ściskanie.

Wartości parametrów znajdujących się we wzorze (1) są różne w przypadku poszczególnych norm projektowych [7 ÷ 9]. Współczynnik efektu ograniczenia przyjęto tylko w trzech z sześciu analizowanych norm. W pozostałych jest całkowicie pominięty.

The compressive capacity of a CFST cross-section N_0 depends on the effective interaction between steel and concrete. The approach to determining this capacity according to specific standards is fundamentally different. The formulas defining this capacity are summarized in Table 1.

Comparing the values in Table 1, it can be observed that the Eurocode and the American standard are quite similar. They sum up the tensile strength of steel with the compressive strength of concrete multiplied by a correction factor. The Eurocode sets this factor at 1,0, whereas the American standard adopts $C_2 = 0,95$. The difference in their approaches lies in the Eurocode's use of design strength, whereas the American standard uses the characteristic strength. In contrast, this standard employs the LRFD approach, in which the design factor $\phi = 0,75$ is applied only after calculating the characteristic load-bearing capacity. Other standards define the load-bearing capacity of a cross-section in a completely different way. GB 50923-2013 uses a more empirical approach, which is based on experimental studies, and the formula leads to an increase in the calculated strength compression of the concrete due to the confinement effect, the steel contribution factor, and the correction factor $k_3 = 1,0$. The GB 50936-2014 standard applies the reduced compressive strength of the CFST cross-section (f_{sc}) multiplied by the cross-sectional area of the entire member. The standard JGJ/T 471-2019 uses a similar formula, with the difference that it allows for higher compressive strength of the concrete (f_{cc}) and multiplies it by the cross-sectional area of the concrete core. The standard GB/T 51446-2021 uses the sum of two load-bearing capacities (that of the concrete core and the CSFT cross-section) multiplied by a factor of 0,9. The load-bearing capacity of the concrete core is calculated as the strength of the concrete multiplied by its cross-sectional area, while the load-bearing capacity of the CFST cross-section is determined according to the GB 50936-2014 standard.

The buckling capacity of an element depends on its support conditions. The static scheme determines the multiplier for the element's basic length, which defines the buckling length L_{cr}.

Nośność przekroju CFST na ściskanie (N_0) zależy od efektywnej współpracy stali i betonu. Podejście do jej wyznaczania poszczególnych norm jest fundamentalnie różne. Wzory definiujące nośność zobrazowano w tabeli 1.

Zestawiając ze sobą wzory z tabeli 1, można zauważyć podobieństwo w przypadku Eurokodu oraz normy amerykańskiej. Sumują one nośność na ściskanie stali z nośnością na ściskanie betonu pomnożoną przez współczynnik korekcyjny. Współczynnik ten Eurokod ustala na 1,0, natomiast norma amerykańska przyjmuje $C_2 = 0,95$. Różnica w ich podejściu polega na stosowaniu obliczeniowej wytrzymałości przez Eurokod, natomiast charakterystycznej przez normę amerykańską. W zamian norma ta stosuje podejście LRFD, w którym współczynnik obliczeniowy $\phi = 0,75$ wprowadzany jest dopiero po obliczeniu wartości charakterystycznej nośności. Pozostałe normy nośność przekroju ściskanego definiują zupełnie inaczej. GB 50923-2013 stosuje podejście bardziej empiryczne, które polega na badaniach eksperymentalnych, a wzór prowadzi do zwiększenia wytrzymałości obliczeniowej na ściskanie betonu przez efekt ograniczenia, współczynnik udziału stali oraz współczynnik korekcyjny $k_3 = 1,0$. Norma GB 50936-2014 stosuje sprowadzoną wytrzymałość na ściskanie przekroju CFST (f_{sc}) pomnożoną przez pole przekroju poprzecznego całego elementu. Podobny wzór stosuje norma JGJT 471-2019, z tą różnicą, że pozwala ona na zwiększenie wytrzymałości na ściskanie betonu (f_{cc}) i mnoży ją przez pole przekroju rdzenia betonowego. Ostatnia analizowana norma GBT 51446-2021 wykorzystuje sumę dwóch nośności (betonowego rdzenia i przekroju CSFT) pomnożoną przez współczynnik 0,9. Nośność betonowego rdzenia obliczana jest w niej jako wytrzymałość betonu pomnożona przez jego pole przekroju, natomiast nośność przekroju CFST ustalona jest analogicznie do normy GB 50936-2014.

Nośność wyboczeniowa elementu zależy od warunków jego podparcia. Schemat statyczny decyduje o mnożniku długości podstawowej elementu, która definiuje długość wyboczeniową

Table 1. Formulas for compressive cross-sectional resistance

Tabela 1. Wzory na nośność przekroju na ściskanie

Standard/Norma	Formula/Wzór	Formula number/Nr wzoru
PN-EN 1994-1-1	$N_0 = A_s f_{yd} + 1,0 A_c f_{cd} + A_{sr} f_{sd}$	(2)
ANSI-AISC 360-22	$N_0 = \phi \left(F_y A_s + C_2 f_c' \left(A_c + A_{sr} \frac{E_s}{E_c} \right) \right)$	(3)
GB 50923-2013	$N_0\, k_3 (1,14 + 1,02\xi_0)(1,0 + \rho_c) f_{cd} A_c$	(4)
GB 50936-2014	$N_0 = A_{sc} f_{sc}$ (5)	(5)
GBT 51446-2021	$N_0 = 0,9(N_{rc} + N_{cfst})$	(6)
JGJT 471-2019	$N_0 = f_{cc} A_c$ (7)	(7)

Designations/Oznaczenia: A_{sr} – the cross-sectional area of the reinforcement steel/pole przekroju stali zbrojeniowej and/i A_{sc} – the total CFST cross-section/pole łącznego przekroju CFST; ρ_s – the steel contribution coefficient/współczynnik udziału stali; E_s – longitudinal modulus of elasticity of steel/moduł sprężystości stali; E_c – longitudinal modulus of elasticity of concrete/moduł sprężystości podłużnej betonu; F_y – the yield strength of the steel tube/granica plastyczności stalowego płaszcza; f_{yd} – the design strength of the steel tube/obliczeniowa wytrzymałość na rozciąganie stalowego płaszcza; f_{sd} – the tensile strength of reinforcing steel/wytrzymałość na rozciągnie stali zbrojeniowej; f_{cd}, f_{cc}, f'_c – represent the design, enhanced, and characteristic compressive strength of the concrete core, respectively/odpowiednio obliczeniowa, zwiększona i charakterystyczna wytrzymałość rdzenia betonowego na ściskanie; f_{sc} – the compressive strength of the CFST composite section/wytrzymałość łącznego przekroju CFST na ściskanie; 1,0, C_2, k_3 – correction factors/współczynniki korekcyjne; N_{rc} – the compressive resistance of the concrete core/nośność na ściskanie rdzenia betonowego; N_{cfst} – the compressive resistance of the CFST cross-section/nośność przekroju CFST; ϕ – the coefficient used in the LRFD (Load and Resistance Factor Design) method/współczynnik wykorzystywany w metodzie obliczeniowej LRFD *(Load and Resistance Factor Design)*. The LRFD method involves the design of structural elements using certain factors to reduce their load-bearing capacity. The value of this factor depends on the type of load-bearing capacity considered/Metoda LRFD polega na wymiarowaniu elementów konstrukcyjnych przy użyciu pewnych współczynników w celu zmniejszenia ich nośności. Wartość tego współczynnika jest zależna od sprawdzanego typu nośności.

The formulas used by the selected standards are listed in Table 2, and the buckling capacity is denoted by the symbol N_u.

The normative approach to buckling capacity can be grouped into three sets. The first of these consists of the Eurocode and the JGJ/T 471-2019 standard, which represent the buckling capacity of a member as the product of the buckling factor ϕ_x and the ultimate capacity of the cross-section N_u. The next group consists of the standards GB 50923-2013 and GB 50936-2014, which also take into account the possibility of applied forces through the coefficient $\phi_{e,x}$. The last group includes the American standard. It presents assumptions that differ significantly from other design standards. In this standard, the yield strength of the cross-section is multiplied by a buckling factor, obtained by raising the number 0,658 to a power equal to the quotient of the yield strength of the cross-section and the critical force, and the resulting product is multiplied by the LRFD calculation method factor. In this way, the buckling load-carrying capacity of the member is defined.

Table 2. Formulas for buckling resistance of element
Tabela 2. Wzory na nośność elementu na wyboczenie

Standard/Norma	Formula/Wzór	Formula number/ Nr wzoru
PN-EN 1994-1-1	$N_u = \phi_x N_0$	(8)
ANSI-AISC 360-22	$N_u = \phi_c \left(N_0 \left(0{,}658^{\frac{N_0}{P_e}} \right) \right)$	(9)
GB 50923-2013	$N_u = \phi_x \phi_{e,x} N_0$	(10)
GB 50936-2014	$N_u = \phi_x \phi_{e,x} N_0$	(11)
GBT 51446-2021	–	
JGJT 471-2019	$N_u = \phi_x N_0$	(12)

Designations/Oznaczenia: ϕ_x – the buckling reduction factor/współczynnik wyboczeniowy; $\phi_{e,x}$ – coefficient applied due to the eccentric loading of the member/współczynnik stosowany ze względu na mimośrodowe obciążenie elementu; P_e – the Euler critical load/wartość siły krytycznej Eulera; ϕ_c – the factor used in the LRFD method/współczynnik wykorzystywany w metodzie obliczeniowej LRFD

Shear cross-sectional resistance. To determine the reliable shear capacity V_u of a CFST cross-section, the effective cross-section of the steel shell must be correctly defined, and the contribution of the concrete core to shear resistance must be determined. The formulas for this type of capacity from various standards are presented in Table 3.

The algorithms for calculating the shear capacity of a cross-section vary greatly among the analyzed standards, although similarities can be found in the formulas proposed by the GB/T 51446-2021 and GB 50936-2014 standards. These formulas multiply the cross-sectional area of the CFST by the reduced shear strength of the cross-section and the appropriate correction factor proposed by each design standard. Both the steel shell and the concrete core were taken into account in the load-bearing capacity. The American standard also considers both of these factors as a sum calculated using the appropriate correction factors, multiplied by the LRFD factor. The Eurocode takes a different approach, considering only the load-bearing capacity of the steel

Table 3. Formulas for shear cross-sectional resistance
Tabela 3. Wzory na nośność przekroju na ścinanie

Standard/Norma	Formula/Wzór	Formula number/ Nr wzoru
PN-EN 1994-1-1	$V_u = \frac{A_{v,x}\left(\frac{f_y}{\sqrt{3}}\right)}{\gamma_{M0}}$	(13)
ANSI-AISC 360-22	$V_u = \phi_v(0{,}6A_{v,x}F_y + 0{,}06K_c A_c \sqrt{f'_c})$	(14)
GB 50923-2013	–	
GB 50936-2014	$V_u = 0{,}71 f_{sv} A_{sc}$	(15)
GBT 51446-2021	$V_u = \gamma_v A_{sc} f_{sv}$	(16)
JGJT 471-2019	$V_u = \frac{1{,}4}{\lambda+1} f_{ct} A_c + 1{,}9 D t f_y + k_{re} N_{Ed}$	(17)

Designations/Oznaczenia: $A_{v,x}$ – the effective cross-sectional area of the steel tube in shear/czynne pole przekroju stalowego płaszcza przy ścinaniu; γ_{M0} – partial safety factor/współczynnik częściowy; K_c, γ_v – correction coefficients/współczynniki korekcyjne; f_{sv} – the shear strength of the CFST cross-section/wytrzymałość przekroju CFST na ścinanie; ϕ_V – coefficient used in the LRFD method/współczynnik wykorzystywany w metodzie obliczeniowej LRFD; λ – the ratio of the shear span to the effective eccentric compression length/stosunek rozpiętości ścinania do efektywnego zasięgu mimośrodowego ściskania; f_{ct} – the tensile strength of concrete/nośność betonu na rozciąganie; k_{re} – coefficient accounting for seismic effects/współczynnik do uwzględnienia sejsmiki; N_{Ed} – the design value of the compressive force/obliczeniowa wartość siły ściskającej

L_{cr}. Wzory wykorzystywane przez wybrane normy zostały zestawione w tabeli 2, a nośność wyboczeniową oznaczono symbolem N_u.

Podejście normowe do nośności wyboczeniowej można zgrupować w 3 zbiory. Pierwszy z nich stanowią Eurokod oraz norma JGJT 471-2019, które nośność wyboczeniową elementu przedstawiają jako iloczyn współczynnika wyboczeniowego ϕ_x i plastycznej nośności przekroju N_u. Kolejną grupę tworzą normy GB 50923-2013 oraz GB 50936-2014, które dodatkowo uwzględniają mimośrodowe przyłożenie siły przez współczynnik $\phi_{e,x}$. Do ostatniego zbioru można zaliczyć normę amerykańską. Przedstawia ona podejście znacznie różne od innych standardów projektowych. Nośność plastyczna przekroju mnożona jest w niej przez współczynnik wyboczeniowy, uzyskiwany przez podniesienie liczby 0,658 do potęgi składającej się z ilorazu nośności plastycznej przekroju i siły krytycznej, a powstały iloczyn mnożony przez współczynnik metody obliczeniowej LRFD. W ten sposób definiowana jest nośność wyboczeniowa elementu.

Nośność przekroju ścinanego. Do uzyskania miarodajnej nośności przekroju CFST na ścinanie V_u należy poprawnie zdefiniować przekrój czynny stalowego płaszcza oraz określić udział betonowego rdzenia w przeniesieniu ścinania. Wzory poszczególnych norm na ten rodzaj nośności przedstawiono w tabeli 3.

Algorytmy obliczania nośności przekroju ścinanego bardzo się różnią w analizowanych normach, natomiast podobieństw można się doszukać we wzorach proponowanych przez normy GBT 51446-2021 oraz GB 50936-2014. Mnożą one pole przekroju CFST przez sprowadzoną wytrzymałość na ścinanie przekroju oraz odpowiedni współczynnik korekcyjny zaproponowany przez każdy ze standardów projektowych. W nośności wzięto pod uwagę zarówno stalowy płaszcz, jak i betonowy rdzeń. Norma amerykańska również uwzględnia oba wymienione czynniki w postaci sumy obliczonej z odpowiednimi współczynnikami korekcyjnymi, pomnożonej przez współczynnik LRFD. Odmienne podejście jest w Eurokodzie w przypadku którego bierze się pod uwagę jedynie nośność stalowego płaszcza. Najbardziej złożony wzór zaprezentowano w normie

shell. The most complex formula is presented in the JGJ/T 471-2019 standard. In addition to the load-bearing capacity of the steel shell and the concrete core, it also provides for an additional load-bearing capacity due to the compressive force N_{Ed} multiplied by the correction factor k_{re}.

The effective flexural stiffness $(EI)_{eff}$ has a direct impact on the resulting critical force values, which in turn determine the buckling load-carrying capacity of the member. The approach taken by the various standards to calculate this characteristic is very similar and is illustrated in Equation (18) as a single formula. The differences result only from coefficients that depend on the standards.

$$(EI)_{eff} = c_{1,x}E_aI_a + c_{2,x}E_sI_s + c_{3,x}E_{cm}I_c \quad (18)$$

where:

$c_{1,x}$, $c_{2,x}$, $c_{3,x}$ – coefficients dependent on the specific design standard;

E_a, E_s, E_{cm} – the longitudinal modulus of elasticity of the steel tube, reinforcing steel, and concrete core, respectively;

I_a, I_s, I_c – the second moments of area of the steel tube, reinforcing steel, and concrete core, respectively.

The proposed formula (18) is general in nature and outlines the method for calculating effective stiffness used by five of the six standards analyzed. Only GB 50936-2014 uses a fundamentally different formula. It is based on the reduced longitudinal modulus of elasticity E_{sem} multiplied by the moment of inertia of the entire CFST cross-section.

Results and discussion

Confinement effect. The approaches taken by the various standards show significant differences with regard to this coefficient, which is reflected in its values (Table 4). The difference results primarily from the use of different strength values for steel and concrete in the various standards. GB 50923-2013 specifies the following design values:$f_{s,x}$ = 190 MPa, $f_{cd,x}$ = 19,1 MPa. GB 50936-2014 and GB/T 51446-2021 refer to the following standards: GB 50010-2010 [11] and GB 50017-2017 [12] and, based on them, require the use of specific strength values for steel and concrete.

Table 4. The confinement effect coefficient
Tabela 4. Współczynnik efektu ograniczenia

Standard/Norma	Confinement effect coefficient/Współczynnik efektu ograniczenia
GB 50923-2013	2,07
GB 50936-2014	2,34
GBT 51446-2021	1,83

The differences in the values of the confinement coefficient between these two standards results from the fact that the GB 50936-2014 standard uses calculated values, whereas GB/T 51446-2021 uses characteristic values. In the case of the considered example, the calculated coefficient derived from the calculated values of the strength of steel and concrete is 28% greater than the coefficient derived from the characteristic values.

The design compressive resistance of the cross-section was determined based on each of the analyzed standards. The results are shown in Figure 3 in light gray. The load-bearing capacity ranges from 795,86 kN (ANSI-AISC 360-22) to 1010,6 kN (GB/T 51446-2021). The extreme values differ by approximately 25%. This discrepancy is caused by the different formulas used in each standard. Only JGJ/T 471-2019 does not directly account for the load-bearing capacity of the steel shell. This standard uses an increased compressive

JGJT 471-2019. Oprócz nośności stalowego płaszcza oraz betonowego rdzenia przewidziany jest w niej także dodatek nośności z uwagi na siłę ściskającą N_{Ed} pomnożoną przez współczynnik korekcyjny k_{re}.

Efektywna sztywność giętna $(EI)_{eff}$ ma bezpośredni wpływ na uzyskane wartości siły krytycznej, która kolejno decyduje o nośności wyboczeniowej elementu. Podejście poszczególnych norm do obliczenia tej charakterystyki jest bardzo podobne i zostało zobrazowane we wzorze (18), w postaci jednej formuły. Różnice wynikają jedynie ze współczynników zależnych od norm.

$$(EI)_{eff} = c_{1,x}E_aI_a + c_{2,x}E_sI_s + c_{3,x}E_{cm}I_c \quad (18)$$

gdzie:

$c_{1,x}$, $c_{2,x}$, $c_{3,x}$ – współczynniki zależne od normy;

E_a, E_s, E_{cm} – kolejno moduł sprężystości podłużnej stalowego płaszcza, stali zbrojeniowej i betonowego rdzenia;

I_a, I_s, I_c – kolejno moduł bezwładności stalowego płaszcza, stali zbrojeniowej i betonowego rdzenia.

Zaproponowany wzór (18) ma charakter ogólny i przedstawia schemat obliczania efektywnej sztywności przez pięć z sześciu analizowanych norm. Fundamentalnie inny wzór stosuje jedynie GB 50936-2014. Bazuje on na sprowadzonym module sprężystości podłużnej E_{sem} mnożonym przez moduł bezwładności całego przekroju CFST.

Wyniki i ich omówienie

Efekt ograniczenia. Podejście poszczególnych norm wykazuje istotne różnice w przypadku tego współczynnika, co przekłada się na jego wartości (tabela 4). Różnica wynika przede wszystkim z powodu użycia w poszczególnych standardach innych wartości wytrzymałości dla stali i betonu. GB 50923-2013 wskazuje następujące wartości obliczeniowe: $f_{s,x}$ = 190 MPa, $f_{cd,x}$ = 19,1 MPa. GB 50936-2014 oraz GBT 51446-2021 odwołują się do następujących norm GB 50010-2010 [11] oraz GB 50017-2017 [12] i na ich podstawie każą przyjmować wytrzymałości dla stali i betonu.

Różnice wartości współczynnika efektu ograniczenia pomiędzy tymi dwoma normami wynikają z faktu, że norma GB 50936-2014 stosuje wartości obliczeniowe, natomiast GBT 51446-2021 wartości charakterystyczne. W przypadku rozważonego przykładu obliczeniowego współczynnik uzyskany z wartości obliczeniowych wytrzymałości stali i betonu jest większy o 28% od współczynnika uzyskanego z wartości charakterystycznych.

Nośność obliczeniową przekroju na ściskanie uzyskano na podstawie każdej z analizowanych norm. Wyniki przedstawiono na rysunku 3 w kolorze jasnoszarym. Zakres nośności waha się od 795,86 kN (ANSI-AISC 360-22) do 1010,6 kN (GBT 51446-2021). Skrajne wartości odbiegają od siebie o ok. 25%. Rozbieżność spowodowana jest różnymi wzorami, jakie stosowane są w każej z norm. Nośności stalowego płaszcza nie uwzględnia bezpośrednio jedynie JGJT 471-2019. Standard ten stosuje zwiększoną wytrzymałość na ściskanie

strength of the concrete, which, when multiplied by the cross-sectional area of the core, yields the ultimate load-bearing capacity. The load-bearing capacity obtained through calculations based on the other standards ranges around 950 kN.

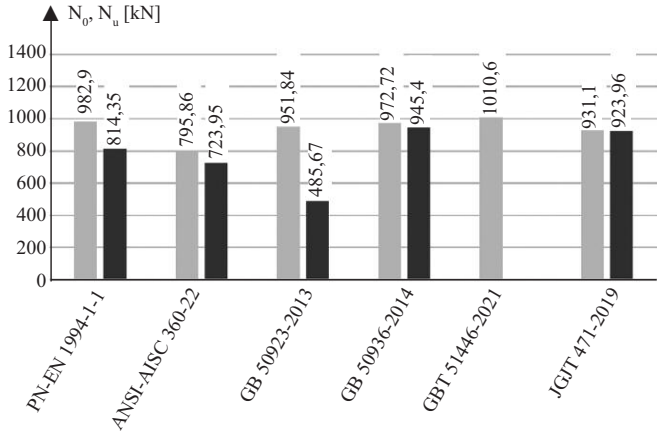
The buckling capacity results were obtained based on all standards except GB/T 51446-2021. They are shown in dark gray in Figure 3. They range from 485,67 kN (GB 50923-2013) to 945,4 kN (GB 50936-2014) and are lower than the section's load-bearing capacity for all of the analyzed standards. This is due to the relatively high slenderness ratio of the member. The results can be divided into three groups with similar values. The highest values were obtained for the GB 50936-2014 and JGJ/T 471-2019 standards, the average values according to PN-EN 1994-1-1 and ANSI-AISC 360-22, while the lowest value was obtained for the GB 50923-2013 standard. Despite significant methodological differences, the American standard and the Eurocode indicate similar buckling load-bearing capacity values. The remaining three standards present virtually identical formulas, and the difference in the resulting values is due to different methods for calculating the buckling coefficient ϕ_x. Of all the standards for calculating N_u, GB 50923-2013 takes the most conservative approach. Importantly, only two of them (GB 50923-2013 and GB 50936-2014) provide a procedure for calculating the buckling length of a curved CFST member. It is also worth noting that neither the Eurocode nor the American standard explicitly specifies how L_e should be determined; therefore, the PN-EN-1993-2 standard [13] was used for its calculation. Similarly, the JGJ/T 471-2019 standard does not specify a procedure for determining the buckling length; therefore, was adopted as defined in GB 50923-2013.

Shear resistance. The shear resistance was calculated according to all analyzed standards except GB 50923-2013. The results are shown in Figure 4. The highest load-bearing capacity value was obtained based on the GB 50936-2014 standard. It takes into account the shear strength of the CFST cross-section f_{SV} = 57,29 MPa, multiplied by a correction factor and the cross-sectional area of the member. A slightly lower value results from GB/T 51446-2021, despite the use of a similar calculation scheme, because a lower shear strength

betonu, która pomnożona przez pole przekroju rdzenia daje nośność końcową. Nośność uzyskana w procesie obliczeniowym na podstawie pozostałych norm oscyluje w granicach 950 kN.

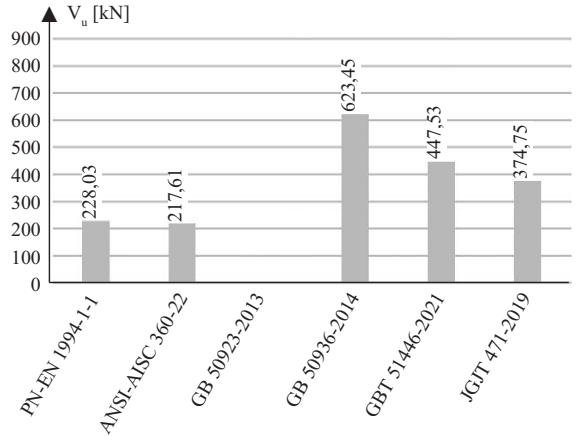
Wyniki nośności na wyboczenie uzyskano na podstawie wszystkich norm z wyjątkiem GBT 51446-2021. Przedstawiono je na rysunku 3 w kolorze ciemnoszarym. Wynoszą one od 485,67 kN (GB 50923-2013) do 945,4 kN (GB 50936-2014) i są mniejsze od nośności przekroju w przypadku wszystkich z analizowanych norm. Jest to spowodowane relatywnie dużą smukłością elementu. Wyniki można podzielić na 3 zbiory ze zbliżonymi wartościami. Największe otrzymano w przypadku normy GB 50936-2014 i JGJT 471-2019, średnie wg PN-EN 1994-1-1 oraz ANSI-AISC 360-22, natomiast najmniejszą wartość w przypadku normy GB 50923-2013. Pomimo znacznych różnic metodologicznych, norma amerykańska oraz Eurokod wskazują podobne wartości nośności wyboczeniowej. Pozostałe 3 normy przedstawiają praktycznie identyczne wzory, a różnica w osiągniętych wartościach spowodowana jest różnymi metodami obliczeniowymi współczynnika wyboczeniowego ϕ_x. Spośród wszystkich norm do obliczeń N_u najbardziej konserwatywnie podchodzi GB 50923-2013. Co istotne, tylko dwie z nich (GB 50923-2013 i GB 50936-2014) przedstawiają procedurę obliczenia długości wyboczeniowej łukowego elementu CFST. Warto również zaznaczyć, że Eurokod oraz standard amerykański nie podają wprost, jak należy przyjmować L_{er}, dlatego do jej obliczenia posłużono się normą PN-EN-1993-2 [13]. Podobnie norma JGJT 471-2019 nie podaje procedury uzyskania długości wyboczeniowej, dlatego przyjęto L_{cr} takie, jak w GB 50923-2014.

Nośność na ścinanie. Uzyskano ją na podstawie wszystkich analizowanych norm z wyjątkiem GB 50923-2013. Wyniki zobrazowano na rysunku 4. Największą wartość nośności uzyskano na podstawie normy GB 50936-2014. Uwzględnia ona wytrzymałość na ścinanie przekroju CFST f_{SV} = 57,29 MPa, pomnożoną przez współczynnik korekcyjny i pole przekroju elementu. Nieco mniejsza wartość wynika z GBT 51446-2021, pomimo zastosowania podobnego schematu obliczeniowego, ponieważ stosuje się mniejszą wytrzymałość na ścinanie przekroju CFST, która w analizowanym przykładzie wyno-



design compressive resistance of the cross-section/ obliczeniowa nośność przekroju na ściskanie
design buckling resistance of the member/obliczeniowa nośność elementu na wyboczenie

Fig. 3. Compressive resistance
Rys. 3. Nośność na ściskanie



design shear resistance of the shear/ obliczeniowa nośność przekroju na ścinanie

Fig. 4. Shear resistance
Rys. 4. Nośność na ścinanie

of the CFST cross-section is applied, which in the analyzed example is f_{SV} = 26,76 MPa. It should be emphasized that in each case, the steel shell accounts for the largest portion of the load-bearing capacity (approx. 360 kN), while the contribution of the concrete core and the axial compressive force are considerably smaller, amounting to approximately 7,5 kN. Intermediate results are provided by JGJ/T 471-2019, which also features the most comprehensive calculation procedure. The lowest, but similar, load-bearing capacity values were obtained for PN-EN 1994-1-1 and ANSI-AISC 360-22. Their similarity may result from the fact that both are based on the effective shear area of the steel shell. Although the American standard adds a load-bearing capacity due to the shear strength of the concrete core, the allowance is negligible compared to the load-bearing capacity of the steel shell (approx. 5 kN).

Flexural stiffness. The results are shown in Figure 5. The effective flexural stiffness is approximately 1.5 MN•m² and is the most consistent among the characteristics specified in the analyzed standards. The differences are due to the values of the correction factors applied to the stiffness of the steel shell and the concrete core, as well as the values of E_c and E_a. The Eurocode and the American standard assume E_c = 35 GPa and E_a = 210 GPa, respectively, while the other standards assume E_c = 32,5 GPa and E_a = 206 GPa. The value obtained based on GB 50936-2014 exceeds the other results by a significant margin (1.98 MN•m²). This is due to a different algorithm, in which the longitudinal stiffness of the cross-section is reduced to a single equivalent value E_{scm} = 105,91 GPa, which replaces the summation of the stiffnesses of steel and concrete. The resulting stiffness is then multiplied by the entire CFST cross-section along with the appropriate coefficient.

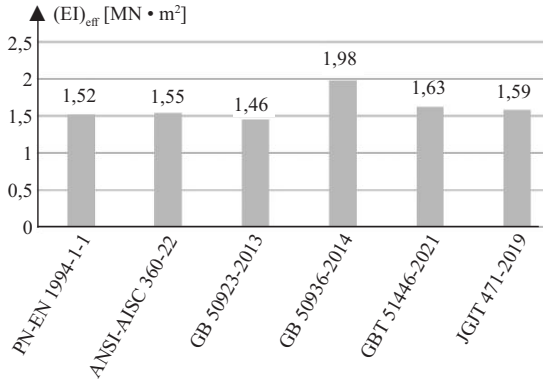


Fig. 5. Effective flexural stiffness
Rys. 5. Efektywna sztywność giętna

si f_{SV} = 26,76 MPa. Należy podkreślić, że każdorazowo za największą część nośności odpowiada stalowy płaszcz (ok. 360 kN), a za nieco mniejszą betonowy rdzeń oraz siła ściskająca (po ok. 7,5 kN). Pośrednie wyniki wskazuje JGJT 471-2019. Ma ona również najbardziej rozbudowaną procedurę obliczeniową. Najmniejsze, ale zbliżone wartości nośności uzyskano w przypadku PN-EN 1994-1-1 oraz ANSI-AISC 360-22. Ich podobieństwo może wynikać z faktu, że obie bazują na czynnym polu przekroju na ścinanie stalowego płaszcza. Standard amerykański dodaje wprawdzie nośność ze względu na ścinanie betonowego rdzenia, ale naddatek jest znikomy w porównaniu z nośnością stalowego płaszcza (ok. 5 kN).

Efektywna sztywność giętna. Wyniki przedstawiono na rysunku 5. Efektywna sztywność giętna wynosi ok. 1,5 MN•m² i jest najbardziej spójna spośród charakterystyk wg analizowanych norm. Różnice spowodowane są wartościami współczynników korekcyjnych, stosowanych w przypadku sztywności stalowego płaszcza, betonowego rdzenia oraz wartościami E_c i E_a. Eurokod oraz norma amerykańska przyjmują odpowiednio E_c = 35 GPa i E_a = 210 GPa, natomiast pozostałe normy E_c = 32,5 GPa i E_a = 206 GPa. Wartość uzyskana na podstawie GB 50936-2014 wykracza mocno poza pozostałe wyniki (1,98 MN•m²). Spowodowane jest to różnym algorytmem, w którym sprężystość podłużną przekroju sprowadza się do jednej zamiennej wartości E_{scm} = 105,91 GPa, co zastępuje sumowanie sztywności stali i betonu. Otrzymaną sztywność mnoży się następnie przez cały przekrój poprzeczny CFST wraz z odpowiednim współczynnikiem.

Summary

The comparative analysis performed revealed significant discrepancies in the load-bearing capacity values of the CFST member obtained based on selected standards. The values of effective flexural stiffness were much closer. The confinement factor differed by 28% among the individual standards, despite their use of the same formulas. GB/T 51446-2021 yields the lowest value, while GB 50936-2014 yields the highest. The results for the compressive strength of the cross-section also vary greatly. The load-carrying capacity according to ANSI-AISC 360-22 is nearly 25% lower than that obtained according to GB/T 51446-2021. Significant differences were also observed in buckling load capacity. The highest value (according to GB 50936-2014) is nearly twice the lowest (GB 50923-2013). The buckling load capacity can be divided into three groups with similar values. The calculated shear resistance also differed substantially among the standards. In this case, the Eurocode and the American standard are the most conservative, indicating a shear capacity nearly three times lower than that of GB 50936-2014. The most similar results were

Podsumowanie

Przeprowadzona analiza porównawcza wykazała istotne rozbieżności w przypadku wartości nośności elementu CFST uzyskanych na podstawie wybranych norm. Wartości efektywnej sztywności giętnej były znacznie bardziej zbliżone. Współczynnik efektu ograniczenia różnił się o 28% w przypadku poszczególnych norm, pomimo stosowania przez nie tych samych wzorów. Najmniejszą wartość wskazuje GBT 51446-2021, a największą GB 50936-2014. Bardzo rozbieżne są również wyniki uzyskane w przypadku nośności przekroju na ściskanie. Nośność zgodna z ANSI-AISC 360-22 jest mniejsza o prawie 25% od otrzymanej zgodnie z GBT 51446-2021. Istotne różnice uzyskano również w przypadku nośności wyboczeniowej. Największa (wg GB 50936-2014) jest niemal dwukrotnością najmniejszej (GB 50923-2013). Nośność wyboczeniową można ponadto podzielić na 3 zbiory ze zbliżonymi wartościami. Także nośność na ścinanie wykazywała duże różnice w przypadku poszczególnych norm. W jej przypadku Eurokod oraz norma amerykańska są najbardziej konserwatywne, wskazując prawie trzykrotnie mniejszą nośność od GB 50936-2014. Naj-

obtained for effective flexural stiffness. The difference between the highest and lowest effective stiffness is approximately 36%, and only GB 50936-2014 shows significantly different results.

Conclusion

From an engineering perspective, the GB 50936-2014 standard is the most comprehensive, as it was used as the basis for calculating each of the analyzed characteristics. However, GB 50936-2014 yields markedly higher values of effective stiffness, shear capacity, and the relevant reduction factor than the other analyzed standards. Only the buckling capacity and the compressive section capacity are comparable to those in the other standards. It is worth noting that the calculations pertained to a single member with a specific geometry, steel grade, and concrete class. It is therefore reasonable to extend the calculations to include members with different spans and ratios of steel shell thickness to concrete core diameter, using different steel grades and concrete classes. Only such a comparison will demonstrate the accuracy of the formulas proposed by the standard and allow for an assessment of the validity of their use in the structural design process.

A significant discrepancy in the obtained load-bearing capacity results may lead to substantial design differences that directly affect the assessment of the safety and reliability of structures built using CFST technology. The discrepancies observed for the selected cases indicate that the further research on the resistance of CFST structures is warranted. The lack of uniformity in the calculation procedure for simple cases also points to a shortage of appropriate normative approaches. To resolve the discrepancies in the results, it is reasonable to conduct experimental studies and numerical validations. The results can help identify the impact of individual coefficients and assumptions in existing standards on the accuracy of the calculated load-bearing capacity. The studies and validations should cover both simple and complex cases encountered in modern infrastructure.

In our future research, we plan to conduct numerical analyses of the CFST element, compare the results with relevant standards, and attempt to recommend standardized formulas for verifying specific load-bearing capacities in the case of simple loading scenarios, supported by experimental results.

Received: 23.04.2026
Revised: 02.07.2026
Published: 21.10.2026

bardziej zbliżone wyniki uzyskano w przypadku efektywnej sztywności giętnej. Różnica pomiędzy największą i najmniejszą sztywnością efektywną wynosi ok. 36% i jedynie GB 50936-2014 wskazuje znacznie odmienne wyniki.

Wnioski

Z inżynierskiego punktu widzenia najbardziej kompletna jest norma GB 50936-2014, ponieważ na jej podstawie obliczono każdą z analizowanych charakterystyk. Proponuje ona jednak istotnie zawyżone wartości sztywności efektywnej, nośności na ścinanie oraz współczynnika efektu ograniczenia w porównaniu z pozostałymi normami. Zbliżona do pozostałych jest jedynie nośność wyboczeniowa oraz przekroju ściskanego. Warto podkreślić, że obliczenia dotyczyły jednego elementu o określonej geometrii, gatunku stali i klasie betonu. Zasadne jest zatem poszerzenie obliczeń o elementy o różnej rozpiętości i stosunku grubości stalowego płaszcza do średnicy betonowego rdzenia, wykorzystując różne gatunki stali i klasy betonu. Dopiero takie porównanie pokaże dokładność zaproponowanych przez normę wzorów oraz pozwoli ocenić zasadność ich wykorzystania w procesie wymiarowania konstrukcji.

Znaczna rozbieżność uzyskanych wyników nośności może prowadzić do istotnych różnic projektowych, mających bezpośredni wpływ na ocenę bezpieczeństwa oraz niezawodności konstrukcji, wykonanych w technologii CFST. Zestawiając wyniki dotyczące prostych przypadków obliczeniowych zauważono, że wskazana jest dalsza praca nad zagadnieniem nośności konstrukcji CFST. Brak jednolitości w procedurze obliczania przypadków prostych wskazuje także na deficyt odpowiednich podejść normowych. W celu zniwelowania rozbieżności w wynikach zasadne jest przeprowadzenie badań doświadczalnych oraz walidacji numerycznych. Wyniki pozwolą wskazać wpływ poszczególnych współczynników oraz założeń w istniejących normach na dokładność obliczanej nośności. Badania i walidacje powinny dotyczyć przypadków prostych i złożonych, występujących we współczesnej infrastrukturze.

W dalszych pracach naukowych planujemy przeprowadzić badania numeryczne elementu CFST, zestawić ich wyniki z poszczególnymi normami oraz podjąć próbę zarekomendowania ujednoliconych wzorów do weryfikacji poszczególnych nośności w przypadku prostych przypadków obciążenia, potwierdzonych wynikami badań eksperymentalnych.

Artykuł wpłynął do redakcji: 23.04.2026 r.
Otrzymano poprawiony po recenzjach: 02.07.2026 r.
Opublikowano: 21.10.2026 r.

Literature

[1] Duda R. Współpraca betonu i stali w zespolonych elementach stalowo-betonowych. Budownictwo i Inżyniera Środowiska. 2018. DOI: 10.24427/bis-2018-vol9-no4-0001.
[2] Hassooni AN, Salah R Al Z. Behavior and Strength of Composite Columns under the Impact of Uniaxial Compression Loading. Engineering, Technology & Applied Science Research. 2022, 12 (4).
[3] He L, Lin S, Jiang H. Confinement Effect of Concrete-Filled Steel Tube Columns With Infill Concrete of Different Strength Grades. Frontiers in Materials. 2019. DOI: 10.3389/fmats.2019.00071.
[4] Awad M. Behaviour of Concrete Filled Steel Tube (CFST) Subjected to Shear: A Review. International Journal of Trend in Scientific Research and Development (ijtsrd), 2025, 9 (5).
[5] PN-EN-1994-1-1:2005 Eurokod 4: Projektowanie zespolonych konstrukcji stalowo-betonowych. Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków, 2005.
[6] ANSI/AISC 360-22:2022 Specification for Structural Steel Buildings, 2022.
[7] GB 50923:2013 Technical Code for Concrete-Filled Steel Tube Arch Bridges, 2013.
[8] GB 50936:2014 Technical Code for Concrete-Filled Steel Tubular Structures, 2014.
[9] JGJT 471:2019 Technical Standard for Steel Tube Confined Concrete Structures, 2019.
[10] GBT 51446:2021 Technical Standard for Concrete-Filled Steel Tubular Hybrid Structures, 2021.
[11] GB 50010: 2010 Code for Design of Concrete Structures, 2010.
[12] GB 50017: 2017 Standard for design of steel structures, 2017.
[13] PN-EN-1993-2: 2010 Eurokod 3 Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 2: Mosty Stalowe, 2010.