

# Nośność mimośrodowo ściskanych słupów betonowych ze zbrojeniem niemetalicznym



dr hab. inż.  
**JACEK KORENTZ, PROF. UZ**  
Uniwersytet Zielonogórski  
Instytut Budownictwa  
ORCID: 0000-0002-1521-8681

W artykule przeanalizowano wpływ rodzaju zastosowanego zbrojenia podłużnego w słupach krępych na interakcję sił granicznych momentu zginającego i siły podłużnej.

## Wprowadzenie

Konstrukcje żelbetowe niejednokrotnie są narażone na szkodliwe oddziaływania środowiska, takie jak działanie wilgoci, soli, mrozu, kwasu, a także częstych zmian temperatury i obciążeń. Urządzenia stosowane w energetyce oraz przemyśle, np. transformatory, prądy błędzące, mogą powodować indukowanie prądów w stalowych prętach zbrojeniowych. Są to czynniki powodujące przyspieszenie korozji zbrojenia w elementach żelbetowych. Z tych względów, w szczególnych przypadkach, konstrukcje żelbetowe wymagają częstej konserwacji i kosztownych napraw.

Dlatego w konstrukcjach z betonu coraz szersze zastosowanie ma zbrojenie niemetaliczne wykonane z prętów kompozytowych FRP (Fiber Reinforced Polimer). Pręty kompozytowe są odporne na korozję, nie przewodzą prądu, więc nie występuje w nich zjawisko indukcji, a urządzenia elektryczne pracują w ich pobliżu bez strat.

Rynek oferuje szeroką gamę prętów niemetalicznych wykonanych z różnych materiałów charakteryzujących się bardzo zróżnicowanymi właściwościami mechanicznymi. W artykule przeprowadzono analizę zachowania się krępych słupów betonowych zbrojonych prętami kompozytowymi o różnych właściwościach wytrzymałościowych. Przedmiotem dociekań jest nośność tych słupów.

## Rodzaje i właściwości zbrojenia niemetalicznego

Pręty niemetaliczne FRP są wykonane z ciągłych włókien z różnych materiałów o wysokiej wytrzymałości oraz osnowy, którą jest żywica polimerowa. Cechy wytrzymałościowe prętów kompozytowych zależą m.in. od rodzaju zastosowanych włókien, rodzaju matrycy (żywicy) i nasycenia włóknem matrycy. Pręty wykonane z FRP charakteryzują się między innymi wysoką wytrzymałością na rozciąganie, odpornością na czynniki korozyjne, brakiem właściwości magnetycznych. Najczęściej używanymi materiałami

do produkcji prętów niemetalicznych są włókna: szklane (GFRP), węglowe (CFRP) oraz ostatnio bazaltowe (BFRP), a także aramidowe (AFRP). Na rys. 1. zamieszczono zależności pomiędzy naprężeniami i odkształceniami dla prętów stalowych oraz prętów kompozytowych wcześniej wymienionych [1, 2].

Na podstawie wykresów z rys. 1. można stwierdzić, że pręty kompozytowe charakteryzują się dużo większą wytrzymałością na rozciąganie i dużo większą odkształcalnością niż pręty stalowe, np. klasy B500. Poza prętami z włókien węglowych moduł sprężystości pozostałych prętów kompozytowych jest znacznie niższy niż stali zbrojeniowej.

## Analiza zachowania się słupów krępych zbrojonych prętami kompozytowymi

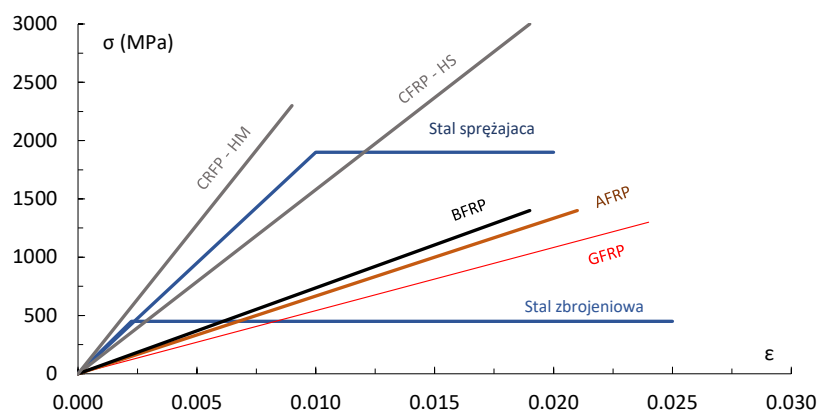
W słupach część prętów lub wszystkie pręty mogą pracować na ściskanie. Budowa prętów kompozytowych powoduje, że mają one właściwości anizotropowe. Ich wytrzymałość na ściskanie jest znacznie mniejsza niż wytrzymałość na rozciąganie. W przypadku prętów GFRP i CFRP wytrzymałość na ściskanie stanowi od 30% do 60% wytrzymałości na rozciąganie w zależności od średnicy prętów [3]. Dlatego niektóre normy [4, 5], ze wzglę-

du na brak wystarczających badań doświadczalnych, nie uwzględniają kompozytowych prętów w analizie nośności słupów osiowo ściskanych.

Prowadzone są liczne badania doświadczalne zachowania się słupów krępych, przede wszystkim z prętami z kompozytów szklanych i węglowych, pod obciążeniem osiowym oraz mimośrodowym [6, 7, 8, 9]. Prowadzone są też analizy numeryczne [10], a także formułowane są wytyczne i zalecenia do projektowania [11]. Wyniki badań doświadczalnych [8] wskazują, że nośność słupów z prętami kompozytowymi, ściskanych osiowo oraz mimośrodowo, jest niższa o kilka procent niż słupów ze zbrojeniem stalowym.

Aby uniknąć nadmiernych deformacji konstrukcji, ogranicza się odkształcenia i naprężenia w kompozytowym zbrojeniu rozciąganiem odpowiednio do wartości  $\epsilon_f = \min(\epsilon_{fu}; 0,010)$  i  $f_f = \min(f_{tu}; 0,010E_p)$  [11], a naprężenia w zbrojeniu ściskanym nie powinny przekraczać 40% wytrzymałości na rozciąganie [7].

Wytyczne projektowania elementów zbrojonych prętami polimerowymi, między innymi [12] i normy [4, 5], pozwalają na właściwe projektowanie słupów z takim zbrojeniem. Jednak projektant, aby mógł dokonać świadomego wyboru rodzaju prętów kompozy-



Rys. 1. Zależności naprężenie – odkształcenie dla prętów stalowych i prętów FRP

towych, powinien mieć możliwość prognozowania oraz oceny zachowania się słupów zbrojonych takimi prętami w całym zakresie obciążeń. Cel ten można osiągnąć, analizując krzywe interakcji moment zginający – siła podłużna dla różnych wariantów zbrojenia podłużnego.

Przedmiotem analizy są betonowe słupy krępe o przekroju kwadratowym, w których zastosowano zbrojenie podłużne z prętów stalowych, oraz słupy betonowe zbrojone prętami kompozytowymi (rys. 2.). Usytuowanie zbrojenia w przekroju określa parametr  $a_r/d = 0,10$ . Stopień zbrojenia podłużnego jest taki sam dla wszystkich rodzajów zbrojenia i wynosi  $\rho = 1,4\%$ . Dla betonu o wytrzymałości na ściskanie  $f_{co} = 30$  MPa przyjęto paraboliczno-prostokątny wykres zależności między naprężeniami a odkształceniami. W przypadku prętów stalowych B400 przyjęto model sprężysto-plastyczny bez wzmocnienia. Dla prętów kompozytowych węglowych wysokomodułowych CFRP-HM i wysokiej wytrzymałości CFRP-HS, bazaltowych BFRP oraz szklanych GFRP przyjęto modele liniowo-sprężyste. Wytrzymałość na rozciąganie  $f_{ru}$  i moduł Younga  $E_f$  prętów zbrojenia podłużnego są zamieszczone w tab. 1.

Nośność graniczna przekroju mimośrodowo ściskanego jest równa wartościom momentu zginającego i siły podłużnej leżącym na krzywej interakcji momentu oraz siły podłużnej zdeterminowanej przez dopuszczalny stan odkształceń betonu i zbrojenia podłużnego.

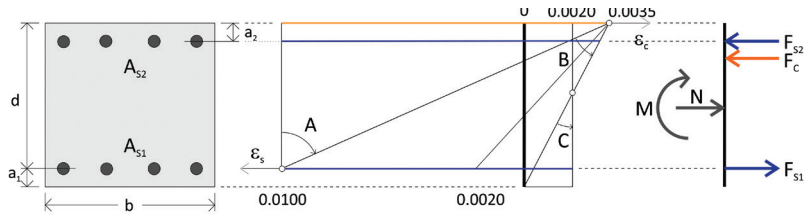
Na rys. 2. zamieszczono rozkład odkształceń granicznych w analizowanym przekroju mimośrodowo ściskanym, ilustrujących wyężenia przekroju od osiowego rozciągania do osiowego ściskania – punkty A, B i C. Odkształcenia w rozciąganych prętach stalowych oraz kompozytowych ograniczono do 0,01 [11]. Graniczne odkształcenia betonu w skrajnym ściskanym włóknie są ograniczone do 0,0035, przy czym nie mogą one być większe od 0,002 dla ściskania osiowego EC2 [13]. W tym samym zakresie zmieniają się odkształcenia w prętach ściskanych. W obliczeniach nie uwzględniono wpływu uzwojenia betonu w rdzeniu przekroju na zwiększenie jego wytrzymałości na ściskanie.

Krzywe interakcji moment zginający – siła podłużna rozpatrywanych przekrojów otrzymano na podstawie przeprowadzonych analiz MES wykonanych aplikacją XTRACT firmy Imbren Software Systems. Na rys. 3. są zamieszczone wykresy interakcji pomiędzy bezwymiarowym momentem zginającym  $m$  a bezwymiarową siłą podłużną  $n$  dla przekrojów ze wszystkimi rodzajami prętów zbrojeniowych. Na rysunku naniesiono także linie mimośrodu siły podłużnej  $e$  znormalizowanych względem wysokości użytecznej przekroju  $d$ .

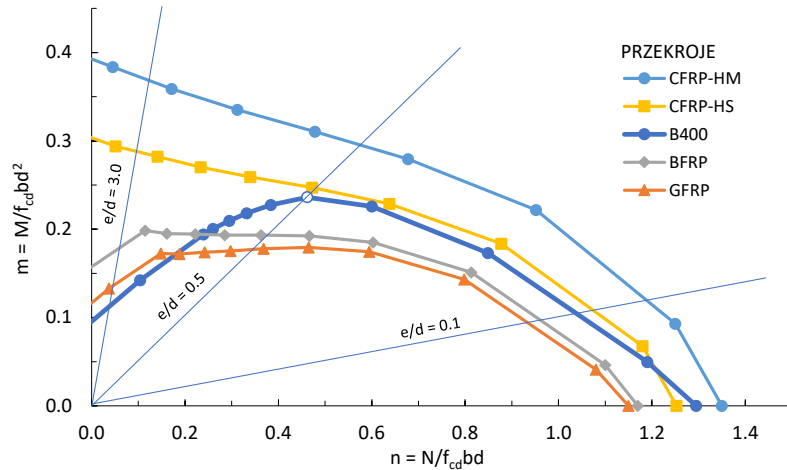
Linia mimośrodu względnego  $e/d = 0,5$

Tab. 1. Właściwości mechaniczne prętów stalowych i prętów FRP

Pręty	B400	CFRP-HM	CFRP-HS	BFRP	GFRP
$f_{ru}$ (MPa)	400	2300	3000	1400	1300
$E_f$ (GPa)	200 000	255 555	158 000	74 000	54 000



Rys. 2. Stany odkształceń w stanie granicznym nośności i siły przekrojowe



Rys. 3. Krzywe interakcji: bezwymiarowy moment zginający  $m$  – bezwymiarowa siła podłużna  $n$

przechodzi przez tzw. punkt „równowagi” leżący na krzywej interakcji dla przekroju B400 zbrojonego prętami stalowymi. W punkcie tym mamy do czynienia z jednoczesnym uplastycznieniem zbrojenia rozciąganego ( $\epsilon_{s1} = \epsilon_{sy} = 0,002$ ) i wyczerpaniem nośności betonu strefy ściskanej ( $\epsilon_c = \epsilon_{cu} = 0,0035$ ). Dla mimośrودów siły podłużnej  $e/d < 0,5$  o nośności przekroju decyduje beton strefy ściskanej, a dla mimośrودów siły podłużnej  $e/d > 0,5$  o nośności przekroju decyduje zbrojenie rozciągane. Ponadto na rys. 3. prowadzono linie mimośrودów:  $e/d = 0,1$  odpowiadającą przypadkowi małego mimośrودu i  $e/d = 3,0$  odpowiadającą przypadkowi dużego mimośrودu.

Krzywa interakcji dla przekroju B400 ze zbrojeniem stalowym jest traktowana jako krzywa referencyjna, do której będą odnoszone krzywe interakcji dla pozostałych przekrojów ze zbrojeniem niemetalicznym. Jak można zauważyć na rys. 3., zamiana prętów stalowych na pręty kompozytowe o takim samym polu powierzchni w istotny sposób zmienia zachowanie się tych przekrojów, które zależą od mimośrودu siły podłużnej.

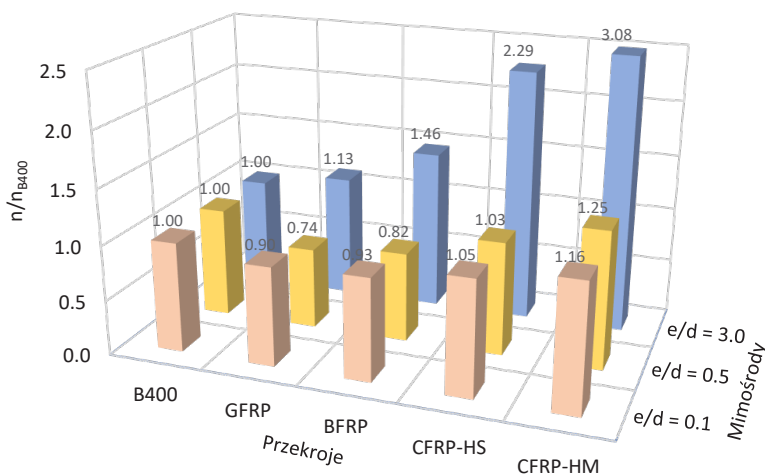
Na rys. 4. są zamieszczone wykresy słupkowe bezwymiarowych sił podłużnych  $n$ , działających na trzech mimośrودach  $e/d$ ,

przenoszonych przez poszczególne przekroje. Siły te zostały znormalizowane względem siły podłużnej przenoszonej przez przekrój B400 zbrojony prętami stalowymi  $n_{B400}$ .

Można zaobserwować na rys. 3 i 4., że nośność przekrojów zależy od mimośrودu siły podłużnej, przy czym zachowanie się poszczególnych przekrojów jest bardzo podobne, gdy mimośrود siły podłużnej  $e/d \leq 0,5$ . Różnice w nośności dla mimośrودów  $e/d = 0,5$  i  $e/d = 0,1$  są bardzo małe. W tym przypadku przekroje z prętami kompozytowymi szklanymi GFRP i bazaltowymi BFRP mają nośność niższą od 7% do 26% niż przekrój ze zbrojeniem stalowym B400, natomiast zastosowanie kompozytów węglowych, przekroje CFRP-HS i CFRP-HM, powoduje wzrost nośności od 3% do 25%. Różnice te są efektem różnych modułów Younga prętów zbrojeniowych i granicznych odkształceń ściskających.

Odmienne zachowanie się przekrojów jest obserwowane dla niskich poziomów obciążenia osiowego, gdy mamy do czynienia ze ściskaniem na dużym mimośrودzie, tj. dla  $e/d = 3,0$ . Zastosowanie zbrojenia niemetalicznego GFRP i BFRP powoduje znaczący wzrost nośności odpowiednio o 13% oraz 46% i bardzo duży wzrost nośności o 229%

**PRAWIDŁOWY SPOSÓB CYTOWANIA**  
 Korentz Jacek, 2022, Nośność mimośrodowo ściskanych słupów betonowych ze zbrojeniem niemetalicznym, „Builder” 4 (297). DOI: 10.5604/01.3001.0015.7987



Rys. 4. Wpływ mimośrodu siły podłużnej i rodzaju zbrojenia podłużnego na nośność przekrojów

oraz 308% w przypadku zastosowania prętów z kompozytów węglowych, odpowiednio CFRP-HS i CFRP-HM. Dla czystego zginania  $n = 0$  te przyrosty nośności są jeszcze większe (rys. 4). Potwierdzają to analizy wykonane dla belek ze zbrojeniem kompozytowym [14]. Jest to efekt przede wszystkim dużo większej wytrzymałości prętów kompozytowych niż stalowych dla granicznych odkształceń rozciągających. Można stwierdzić, że korzyści ze stosowania zbrojenia niemetalicznego w słupach nie są tak duże jak zastosowanie tego rodzaju prętów w belkach.

### Podsumowanie

W konstrukcjach z betonu coraz większe zastosowanie ma zbrojenie niemetaliczne w postaci prętów kompozytowych wykonanych na bazie różnego rodzaju włókien, najczęściej szklanych i węglowych. Zbrojenie niemetaliczne jest stosowane przede wszystkim w konstrukcjach eksploatowanych w niekorzystnych warunkach środowiskowych, kiedy chcemy wyeliminować korozję zbrojenia.

Były i aktualnie są prowadzone liczne badania doświadczalne, których celem jest wprowadzenie do norm, między innymi EC2, reguł projektowania konstrukcji z betonu ze zbrojeniem niemetalicznym. Aktualne nieliczne normy oraz zalecenia pozwalają na bezpieczne projektowanie tego rodzaju konstrukcji.

W artykule przeprowadzono analizy betonowych słupów krępych z różnymi rodzajami zbrojenia podłużnego. Wyniki tych analiz przedstawione w postaci krzywych interakcji pomiędzy momentem zginającym a siłą podłużną pozwalają na racjonalną ocenę różnic w pracy słupów krępych zbrojonych różnego rodzaju prętami podłużnymi. Nośność słupów krępych ze zbrojeniem niemetalicznym

zależy od rodzaju kompozytu i wielkości mimośrodu siły podłużnej. W zależności od rodzaju kompozytu i mimośrodu siły podłużnej w skrajnych przypadkach nośność słupów krępych ze zbrojeniem kompozytowym może być mniejsza o 26% lub większa nawet o 308% od nośności słupa z taką samą ilością zbrojenia stalowego.

### Literatura

- [1] Górski M., Kotala B., Białozor R., 2018, Rodzaje i właściwości zbrojenia niemetalicznego, XXXIII Ogólnopolskie Warsztaty Pracy Projektanta, Szczecin, 45-90.
- [2] Grygo R., Kosior-Kazberuk M., 2017, Zbrojenie konstrukcji betonowych niemetalicznymi prętami kompozytowymi, Budownictwo i Inżynieria Środowiska, 8, 21-28.
- [3] AlNajmi, Abed F., 2020, Evaluation of FRP Bars under Compression and Their Performance in RC Columns. Materials, 13, 4541, 1-12.
- [4] ACI 318-14. Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary. ACI: Farmington Hills, MI, USA, 2014.
- [5] CSA S806-12. Design and Construction of Building Components with Fiber-Reinforced Polymers; Canadian Standards Association: Mississauga, ON, Canada, 2012.
- [6] Afifi M.Z., Mohamed H.M., Benmokrane B., 2014, Strength and Axial Behavior of Circular Concrete Columns Reinforced with CFRP Bars and Spirals, Journal of Composites for Construction, 18, 1-9.
- [7] Hadhood A., Mohamed H.M., Benmokrane B., 2017, Axial Load-Moment Interaction Diagram of Circular Concrete Columns Reinforced with CFRP Bars and Spirals: Experimental and Theoretical Investigations, Journal of Composites for Construction, 21(2), 1-12.
- [8] Othman Z.S., Mohammad A.H., 2019, Behaviour of Eccentric Concrete Columns Reinforced with Carbon Fibre-Reinforced Polymer Bars, Advance in Civil Engineering, 2019, Article ID 1769213, 1-13.
- [9] Tobbi H., Farhaly A.S., Benmokrane B., 2012, Strength Model for Concrete Columns Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer Bars and Ties, ACI Structural Journal, 111(1-6).
- [10] AlHamaydeh M., Amin F., 2021, Data for Interaction Diagrams of Geopolymer FRC Slender Columns with Double-Layer GFRP and Steel Reinforcement, Data, 6(43), 1-7.
- [11] Zadeh H.J., Nanni A., 2013, Design of RC Columns Using Glass FRP Reinforcement, Journal of Composites for Construction, 17, 294-304.
- [12] ACI 440.1R-03, 2003, Guide for the design and construction of concrete reinforced with FRB bars, ACI Committee 440, ACI International.
- [13] PN-EN 1992-1-1:2008, Eurokod 2. Projektowanie konstrukcji z betonu. Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków.
- [14] Korentz J., 2020, Wpływ zbrojenia niemetalicznego na nośność i odkształcalność belek z betonu zbrojonego, Builder, t. 273, nr 4, 104-104.

**Streszczenie:** W konstrukcjach z betonu coraz częściej mają zastosowanie pręty kompozytowe FRP, które są wykonywane z różnych materiałów. Właściwości mechaniczne dostępnych na rynku prętów kompozytowych są bardzo zróżnicowane. Pręty kompozytowe różnią się od stalowych prętów zbrojeniowych: charakteryzują się bardzo wysoką wytrzymałością i niskim modułem sprężystości. Pręty te zachowują się sprężysto w całym zakresie obciążeń, a ich zniszczenie następuje w sposób nagły. Z tego względu zachowanie się słupów zbrojonych prętami kompozytowymi odbiega od znanego zachowania się słupów ze zbrojeniem stalowym: nośność tych słupów jest zróżnicowana. W artykule przeanalizowano wpływ rodzaju zastosowanego zbrojenia podłużnego w słupach krępych na interakcję sił granicznych momentu zginającego i siły podłużnej. Słupy ze zbrojeniem niemetalicznym w stosunku do słupów ze zbrojeniem stalowym charakteryzują się większą lub mniejszą nośnością w zależności od rodzaju kompozytu oraz wielkości mimośrodu siły podłużnej.

**Słowa kluczowe:** słup betonowy zbrojony, pręty kompozytowe, nośność, interakcja M-N

**Abstract:** THE RESISTANCE OF ECCENTRICALLY COMPRESSED CONCRETE COLUMNS WITH NON-METALLIC REINFORCEMENT. FRP composite bars, which are made from various materials, are increasingly used in concrete structures. The mechanical properties of commercially available composite bars vary greatly. Composite bars are different from steel reinforcing bars; they have very high strength and a low modulus of elasticity. These bars behave elastically over the entire load range and their failure is sudden. Therefore, the behavior of columns reinforced with composite bars may differ from the known behavior of columns with steel reinforcement; the load capacity of the columns varies. This paper investigates the influence of the type of longitudinal reinforcement used in brittle columns on the interaction of bending moment and longitudinal force limit forces. Columns with non-metallic reinforcement compared to columns with steel reinforcement have a higher or lower load capacity depending on the type of composite and the eccentricity of the longitudinal force.

**Keywords:** Concrete column with reinforcement, FRP rebar, resistance, M-N interaction