

Wpływ zbrojenia niemetalicznego na nośność i odkształcalność belek z betonu zbrojonego



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

W artykule przeanalizowano wpływ rodzaju zastosowanego zbrojenia w belkach na ich nośność i odkształcalność. Spełnienie warunków stanu granicznego nośności belek ze zbrojeniem niemetalicznym wymaga zastosowania mniejszej ilości zbrojenia niż takich samych belek ze zbrojeniem stalowym. Jednak stan graniczny ugięcia belek ze zbrojeniem kompozytowym może być znacznie przekroczony.

Jednym z podstawowych materiałów stosowanych w budownictwie jest beton zbrojony prętami stalowymi, który ma jedną podstawową wadę, jaką jest korozja prętów. Konstrukcje żelbetowe niejednokrotnie narażone są na szkodliwe działanie wilgoci, soli, mrozu, częstych zmian temperatury i obciążeń. Urządzenia dużej mocy pracujące w energetyce i przemyśle, np. transformatory, w bliskim kontakcie z żelbetem mogą powodować indukowanie prądów w stalowych prętach zbrojeniowych. Są to czynniki powodujące przyśpieszenie korozji zbrojenia. Tak więc żelbet nie jest materiałem aż tak trwałym, w szczególnych przypadkach wymaga częstej konserwacji i kosztownych napraw.

Dlatego w konstrukcjach z betonu coraz szersze zastosowanie ma zbrojenie niemetaliczne wykonane z prętów kompozytowych (FRP). 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 belek żelbetowych zbrojonych prę-

tami kompozytowymi o różnych właściwościach wytrzymałościowych. Przedmiotem dociekań jest nośność na zginanie i odkształcalność tych belek.

Rodzaje i właściwości zbrojenia niemetalicznego

Pręty niemetaliczne FRP (ang. *Fiber Reinforced Polymer*) wykonane są z ciągłych włókien, z różnych materiałów o wysokiej wytrzymałości oraz osnowy, którą jest żywica polimerowa. 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), aramidowe (AFRP) i ostatnio bazaltowe (BFRP). W tabeli 1. zestawiono podstawowe cechy mechaniczne prętów kompozytowych FRP: wytrzymałość na rozciąganie f_t , moduł sprężystości E_t i odkształcenie w chwili zerwania ϵ_t oraz granicę plastyczności i moduł Younga dla prętów stalowych klasy B400. Prezentowane wyniki zestawiono na podstawie opracowań [1, 2, 3]. Rodzaje i właściwości zbrojenia niemetalicznego stosowane w konstrukcjach z betonu, a także przykłady takich kon-

strukcji, opisane są między innymi w pracach [1, 2, 3, 4]. Badania właściwości mechanicznych prętów kompozytowych i współdziałania tych prętów z betonem opisują prace [1, 5, 6].

Na podstawie danych z tabeli 1. można stwierdzić, że pręty kompozytowe charakteryzują się dużo większą wytrzymałością na rozciąganie niż pręty stalowe np. klasy B400. Niestety, poza prętami z włókien węglowych, moduł sprężystości pozostałych prętów kompozytowych jest znacznie niższy niż stali zbrojeniowej. Zatem praca belek, zbrojonych prętami kompozytowymi, pod wpływem obciążeń będzie odmienna niż belek zbrojonych prętami stalowymi.

Analiza zachowania się belek zbrojonych prętami kompozytowymi

Znane są badania doświadczalne belek zbrojonych prętami kompozytowymi, na przykład z włóknami szklanymi [5], a także zbrojonych prętami stalowymi i kompozytowymi [7]. Badania te wykazały, że sztywność giętna belek z prętami kompozytowymi jest niższa niż belek z prętami stalowymi, a do zniszczenia belek z prętami kompozytowymi najczęściej dochodzi w sposób nagły w wyniku zerwania tych prętów. Jest to spowodowane tym, że pręty kompozytowe nie mają cech plastycznych. Wytyczne projektowania elementów zbrojonych prętami polimerowymi (między innymi [8]) pozwalają na odpowiednie projektowanie belek z takim zbrojeniem. Jednak projektant, aby mógł dokonać świadomego wyboru rodzaju prętów kompozytowych, powinien mieć możliwość prognozowania i oceny zachowania się belek zbro-

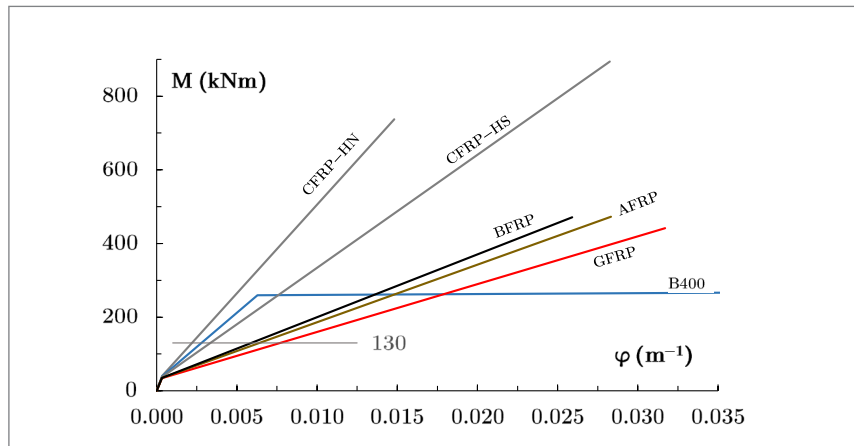
Tabela 1. Właściwości mechaniczne prętów kompozytowych FRP [1, 2, 3].

Rodzaj kompozytu	E_t (GPa)	f_t (MPa)	ϵ_t (%)
GFRP	46 - 65	760 - 1300	0.74 - 2.5
CFRP	100 - 240	1200 - 3000	0.75 - 2.0
BFRP	55 - 78	1100 - 1450	2.2
AFRP	60	1400	2.3

ionych takimi prętami w całym zakresie obciążeń. Cel ten można osiągnąć, analizując ścieżki równowagi statycznej belek na podstawie zależności moment zginający – krzywizna lub ugięcie.

Przedmiotem analizy są belki z betonu ($f_{co}=30$ MPa, $E_c=32$ GPa), swobodnie podparte o rozpiętości $l=7,5$ m i przekroju prostokątnym o wymiarach $h=50$ cm, $b=30$ cm, w których zastosowano różne zbrojenie podłużne; pręty stalowe i pręty kompozytowe. Zbrojenie belki referencyjnej z prętami stalowymi ze stali B400 to: dołem – $As1=5\phi20$, górną – $As2=2\phi10$ (stopień zbrojenia rozciągającego $\rho_1 = 1,14\%$), a jej nośność na zginanie $M=260$ kNm. Zbrojenie belek prętami kompozytowymi: węglowymi, bazaltowymi, aramidowymi i szklanymi pod względem ilości zbrojenia było takie samo, jak zbrojenie belki z prętami stalowymi. W tabeli 2. zestawiono właściwości mechaniczne wszystkich rodzajów prętów zbrojenia podłużnego, którymi były zbrojone belki.

Dla pięciu belek, jednej ze zbrojeniem stalowym i czterech ze zbrojeniem kompozytowym, zbudowano zależności moment M krzywizna φ na podstawie modelu tej zależności zaczerpniętej z pracy [10]. W obliczeniach przyjęto założenie, że w prętach kompozytowych naprężenie graniczne stanowi połowę wytrzymałości kompozytu. Zależno-



Rys.1. Zależności moment M - krzywizna φ , dla belek zbrojonych prętami FRP oraz stalą B400 o takim samym stopniu zbrojenia $\rho_1 = 1,14\%$

ści $M-\varphi$ dla wszystkich belek, o takim samym stopniu zbrojenia rozciąganego $\rho_1=1,14\%$, zilustrowano na rysunku 1.

Ilościowe zestawienie wyników przeprowadzonych analiz zamieszczono w tabeli 2. Jak można zauważyć, zachowanie się poszczególnych belek w istotny sposób zależy od rodzaju prętów, którymi były one zbrojone. Nośność badanych belek i ich odkształcalność jest bardzo zróżnicowana. Zgodnie z oczekiwaniami większą nośność wykazują belki zbrojone prętami kompozytowymi. Nośność

belki z prętami węglowymi może być większa ponad trzykrotnie (zbrojenie prętami CFRP-HS – 343%, zbrojenie prętami CFRP-HM – 283%) od nośności belki zbrojonej prętami stalowymi B400. W pozostałych przypadkach przyrost nośności belek, w porównaniu z belką zbrojoną prętami stalowymi B400, nie jest tak duży: dla zbrojenia prętami BFRP i AFRP wynosi 181%, a dla zbrojenia prętami GFRP wynosi 170%. Oznacza to, że nośność belki na zginanie ($M=260$ kNm) można zapewnić mniejszą ilością zbrojenia kompozytowe-

REKLAMA

PBW
INŻYNIERIA

PROJEKTUJEMY
BADAMY
WYKONUJEMY

WWW.PBWINZYNIERIA.PL

probudowa.com
wykonawstwo | obsługa kontraktów | nadzory

- ✓ roboty drogowe i mostowe
- ✓ budowa i modernizacja obiektów kubaturowych
- ✓ wykonawstwo konstrukcji stalowych i żelbetowych
- ✓ kompleksowa realizacja obiektów przemysłowych
- ✓ roboty rozbiórkowe
- ✓ roboty inżynierskie
- ✓ zagospodarowanie terenu

www.probudowa.com

Tabela 2. Właściwości prętów stalowych i prętów FRP, wyniki przeprowadzonych analiz

	B400	CFRP-HM	CFRP-HS	BFRP	AFRP	GFRP
f_t (MPa)	400	2300	3000	1400	1400	1300
E_t (GPa)	200 000	255 555	158 000	74 000	67 000	54 000
M (kNm) ($\rho_1 = 1,14\%$)	260	737	894	471	472	442
ρ_1 ($M = 260$ kNm)	1.14%	0.39%	0.28%	0.63%	0.62%	0.56%
a_0 (cm)	1.56	1.23	1.74	3.20	3.55	4.25
a_1 (cm)	2.22	1.85	2.45	4.17	4.49	5.26

go. Przykładowo dla belek zbrojonych prętami węglowymi CFRP-HS ilość tego zbrojenia można zmniejszyć z 1,14% do 0,28%, a w przypadku belek z prętami GFRP wystarczy stopień zbrojenia 0,56%. Tak, więc oszczędność zbrojenia kompozytowego pod względem ilości jest dwu, trzykrotna.

W tabeli 2. zamieszczono także wyniki obliczeń doraźnej strzałki ugięcia a_0 analizowanych belek i strzałki ugięcia z uwzględnieniem pełzania betonu a_p . Strzałki ugięcia belek określono przy wykorzystaniu metody obliczania ugięcia zaproponowanej w opracowaniu [9]. Obliczenia ugięcia wykonano dla quasi-stalej kombinacji obciążeń, dla której $M = 130$ kNm i współczynnika pełzania betonu $\varphi_p = 2$. Zgodnie z EC2 dopuszczalna strzałka ugięcia belki o rozpiętości 7,50 m wynosi $a_{max} = 3,0$ cm.

Strzałka ugięcia badanych belek zależy od modułu Younga zastosowanych prętów zbrojeniowych. Największe odkształcenia wykazują belki ze zbrojeniem bazaltowym, aramidowym i szklanym. W tym przypadku dopuszczalna strzałka ugięcia jest przekroczona już w zakresie obciążeń doraźnych. Uwzględnienie długotrwałego charakteru oddziaływań zwiększa ugięcie belek i przekroczenie dopuszczalnej strzałki ugięcia jest większe: wynosi 1,17 cm dla belek z prętami BFRP, a dla belek zbrojonych prętami AFRP i GFRP dopuszczalna strzałka ugięcia jest przekroczona odpowiednio o 1,49 cm i 2,26 cm. W celu ograniczenia ugięcia tych belek trzeba zwiększyć stopień zbrojenia podłużnego lub zwiększyć wymiary przekroju betonowego. Tak więc oszczędności w ilości zbrojenia w stanie granicznym nośności niwelowane są przez stan graniczny ugięcia.

Podsumowanie

W konstrukcjach z betonu coraz częściej stosowane jest zbrojenie niemetaliczne w postaci prętów kompozytowych. Dotyczy to głównie konstrukcji z betonów użytkowanych w niekorzystnych warunkach środowiskowych, w których chcemy wyeliminować rozwój zbrojenia. Liczne badania doświadczalne i opracowane na tej podstawie zalecenia projektowe pozwalają na odpowiednie projektowanie belek zbrojonych prętami kompo-

zytowymi. Przeprowadzone analizy wykazały, że zachowanie się belek zbrojonych prętami kompozytowymi jest bardzo zróżnicowane. Przedstawiona w artykule metoda pozwala na prognozowanie i racjonalną ocenę zachowania się belek ze zbrojeniem niemetalicznym w całym zakresie obciążeń. Metoda ta może być przydatna przy wyborze odpowiedniego rodzaju zbrojenia kompozytowego.

Literatura:

- [1] Grygo R., Kosior-Kazberuk M., 2017, Zbrojenie konstrukcji betonowych niemetalicznymi prętami kompozytowymi, „Budownictwo i Inżynieria Środowiska”, 8, 21-28.
- [2] Szumigala M., Pawłowski D., 2014, Zastosowanie kompozytów prętowych w konstrukcjach budowlanych, „Przegląd Budowlany”, 47-50.
- [3] Jarek B., Kubik A., 2016, Zastosowanie prętów zbrojeniowych z włókna szklanego (GFRP) w budownictwie, „Przegląd Budowlany”, 12, 21-26.
- [4] Górski M., Kotala B., Białozor R., 2018, Rodzaje i właściwości zbrojenia niemetalicznego, XXXIII Ogólnopolskie Warsztaty Pracy Projektanta, Szczyrk, 45-90.
- [5] Sheikh S.A., Kharal Z., 2018, Replacement of steel with GFRP for sustainable reinforced concrete, “Construction and Building Materials”, 160, 767-774.
- [6] Salyom S., Di Benedetti M., Szijarto A., Balzas G.L., 2018, Non-metallic reinforcement with different moduli of elasticity and surfaces for concrete structures, “Architecture Civil Engineering Environmental”, 79-88.
- [7] Mustafa S.A.A., Hassan H.A., 2017, Behavior of concrete beams reinforced with hybrid steel and PFR composite, “HBRC Journal”, 14, 300-308.
- [8] ACI 440.1R-03, 2003, Guide for the design and construction of concrete reinforced with FRB bars, ACI Committee 440, ACI International.
- [9] Korentz J., 2019, A model of the moment-curvature relationship for reinforced concrete beams strengthened under load, Proceedings of the fib Symposium 2019: Concrete – Innovations in Materials, Design and Structures, Kraków, Poland, 263-264.
- [10] Korentz J., 2010, Model zależności moment-krzywizna dla belek żelbetonowych – obliczanie ugięcia, „Problemy naukowo-badawcze budownictwa”, 56. konferencja naukowa KILiW PAN oraz KN PZITB Krynica 2010, Wydaw. Politechniki Świętokrzyskiej, 555-562.

DOI: 10.5604/01.3001.0013.9707

PRAWIDŁOWY SPOSÓB CYTOWANIA

Korentz Jacek, 2020, Wpływ zbrojenia niemetalicznego na nośność i odkształcalność belek z betonu zbrojonego, „Builder” 04 (273). DOI: 10.5604/01.3001.0013.9707

Streszczenie: W konstrukcjach z betonu coraz częściej stosuje się pręty kompozytowe FRP (ang. *Fiber Reinforced Polymer*) wykonane z różnych materiałów. Właściwości wytrzymałościowe dostępnych na rynku prętów kompozytowych są bardzo zróżnicowane. Pręty kompozytowe mają bardzo wysoką wytrzymałość, moduł sprężystości więk-

szości z nich jest niski. Pręty te nie mają cech plastycznych, ich zniszczenie następuje w sposób nagły. Dlatego zachowanie się belek zbrojonych prętami kompozytowymi odbiega od znanego zachowania się belek ze zbrojeniem stalowym; nośność na zginanie i odkształcalność tych belek są bardzo zróżnicowane. W artykule przeanalizowano wpływ rodzaju zastosowanego zbrojenia w belkach na ich nośność i odkształcalność. Belki ze zbrojeniem niemetalicznym w stosunku do belek ze zbrojeniem stalowym charakteryzują się większą nośnością i mniejszą sztywnością, a tym samym większymi ugięciami.

Słowa kluczowe: belka żelbetowa, pręty kompozytowe, nośność na zginanie, ugięcie

Abstract: Reinforced concrete constructions use nonmetallic rebar (FRP) made of various materials. The strength properties of FRP rebar available on the market are very diverse. FRP rebar have very high strength, the modulus of elasticity of most of them is low. These rebar have no plastic features, their failure occurs suddenly. Therefore, the behavior of reinforced beams with FRP rebar differs from the known behavior of steel reinforced beams; the flexural strength and deformability of these beams vary widely. The article analyzes the impact of the type of FRP rebar used in beams on their load-bearing capacity and deformability. Beams behind non-metallic reinforcement in relation to steel-reinforced beams are characterized by higher load capacity and lower stiffness, and thus greater deflections.

Keywords: RC beams, FRP rebar, flexure strength, deflection