

dr inż. Julita Krassowska^{1)*}

ORCID: 0000-0001-9209-1285

dr hab. inż. Marta Kosior-Kazberuk, prof. PB¹⁾

ORCID: 0000-0001-8171-2242

Pręty kompozytowe BFRP jako zbrojenie w prefabrykowanych belkach betonowych

BFRP composite bars as reinforcement in precast concrete beams

DOI: 10.15199/33.2022.04.05

Streszczenie. Do głównych zalet prętów kompozytowych BFRP (*basalt fibre reinforced polymers*) należy zaliczyć odporność na korozję oraz małą masę. Ich wykorzystanie w budownictwie jest jednak ograniczone ze względu na wysoki koszt początkowy oraz zbyt małą sztywność elementów konstrukcyjnych. Rozwiązaniem może okazać się pełna prefabrykacja takich elementów. W artykule zaprezentowano wyniki badań porównawczych prefabrykowanych elementów belkowych o długości 4500 mm ze zbrojeniem podłużnym oraz poprzecznym w postaci prętów stalowych i prętów kompozytowych BFRP. Określono nośność na zginanie oraz ścinanie, a także ugięcie i charakter zniszczenia badanych elementów.

Słowa kluczowe: zbrojenie BFRP; zginanie; prefabrykacja.

Abstract. Composite bars BFRP (*basalt fiber reinforced polymers*) are increasingly used in construction. Their main advantages are corrosion resistance and the lightweight of the bars. However, despite the advantages over steel bars, the development of structures using non-metallic composite bars is limited due to the high initial cost and insufficient stiffness of the structural elements. The solution may be the full prefabrication of such elements. The article presents the results of a comparative study of 4500 mm long prefabricated beam elements with longitudinal and transverse reinforcement in the form of steel bars and BFRP composite bars. The resistance to bending and shear was determined, as well as the deflection and the nature of the failure of the tested elements.

Keywords: BFRP reinforcement; bending; prefabrication.

Współczesna prefabrykacja, dzięki pełnej automatyzacji procesu produkcyjnego, reżimowi technologicznemu, dobrej jakości oraz estetyce produkowanych elementów betonowych umożliwia swobodę kształtowania obiektów budowlanych, a także wpisuje się w szeroko rozumianą ochronę środowiska [1 ÷ 4]. Pozwala również skrócić czas budowy w porównaniu z technologiami tradycyjnymi oraz w znacznym stopniu uniezależnić się od zewnętrznych warunków pogodowych.

W ostatnich latach odnotowano znaczny wzrost cen stali, a także cementu i kruszywa oraz kosztów siły roboczej, usług i energii. Zaczęto też dbać o efektywne wykorzystanie surowców [5]. Ze względu na ograniczenie wykorzystania stali w niekorzystnych warunkach środowiskowych, a także wzrost jej ceny, zaczęto poszukiwać alternatywnego produktu, który mógłby zastąpić konwencjonalne zbrojenie w betonie [7]. Obecnie alternatywą dla prętów stalowych staje się zbrojenie kompozytowe. Wykazuje ono bardzo dużą odporność

korozyjną, co skutkuje zwiększeniem trwałości obiektu i zmniejszeniem kosztów eksploatacji. Zastosowanie zbrojenia kompozytowego umożliwia zmniejszenie wymiarów elementów konstrukcyjnych m.in. dzięki zastosowaniu otuliny betonowej o mniejszej grubości.

Celem badań przedstawionych w artykule była ocena zachowania się belek z betonu zbrojonego prętami z włókien bazaltowych (BFRP), poddanych zginaniu, w porównaniu z belkami ze zbrojeniem stalowym. Do wykonania belek zastosowano beton zwykły, a także beton z dodatkiem włókien bazaltowych. Określono nośność, wartość ugięcia i odkształcenia badanych elementów w warunkach czteropunktowego zginania. Projekt miał charakter pilotażowy i był przygotowaniem do badań nad wykorzystaniem zbrojenia kompozytowego na szeroką skalę.

Badania

Materiały. Do wykonania betonu wykorzystano cement portlandzki CEM I 42,5R (320 kg/m³), a wartość współczynnika w/c wynosiła 0,5. Jako kruszywo zastosowano mieszankę piasku o uziarnieniu do 2 mm i naturalnego kruszywa grubego o uziarnieniu do 16 mm. Frakcja do 2 mm stanowiła 38% stosu okruszowego, a frakcja 2 – 16 mm – 62%.

Zbrojeniem rozproszonym były włókna bazaltowe w ilości 8 kg/m³ o średnicy elementarnej 20 μm, długości 50 mm, wytrzymałości na rozciąganie 750 MPa, module Younga 89 GPa. Zastąpiono nim objętościowo część kruszywa. Charakterystykę betonów przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Charakterystyka stosowanych betonów

Table 1. Characteristics of applied concretes

Oznaczenie	Zawartość włókien [kg/m ³]	f _{ck} [MPa]	f _{ctm} [MPa]	E _{cm} [GPa]
W0	0	43,78	5,55	40,64
WB	8	44,52	6,11	42,02

Sposób przygotowania próbek. Wykonano następujące serie próbných elementów belkowych, różniące się zbrojeniem podłużnym: A-I-W0 – pręty stalowe; A-I-WB – pręty stalowe, beton z dodatkiem włókien bazaltowych i B-I-WB – pręty kompozytowe, beton z dodatkiem włókien bazaltowych. Każda seria składała się z dwóch belek 120 × 300 × 4500 mm. Punkty ich podparcia umieszczano w odległości 150 mm od ich zewnętrznej krawędzi, uzyskując rozpiętość przęsła l_{eff} = 4200 mm. **W seriach A zbrojeniem głównym były pręty stalowe.** W strefie ściskanej zastosowano pręty 2 Ø 12 mm (f_{yk} = 500 MPa), a w rozciąganej 4 Ø 16 mm (f_{yk} = 500 MPa). Strzemiona konstrukcyjne i klamry spi-

¹⁾ Politechnika Białostocka; Wydział Budownictwa i Nauk o Środowisku

^{*} Adres do korespondencji: j.krassowska@pb.edu.pl

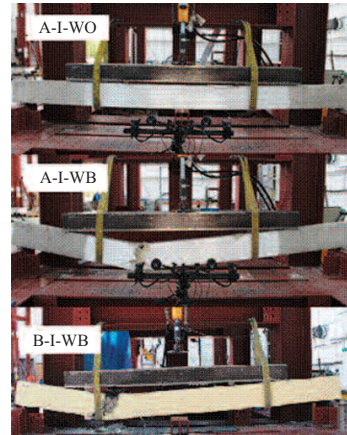
nające wykonano z prętów $\varnothing 6$ mm ($f_{yk} = 500$ MPa). Stopień zbrojenia rozciąganego wszystkich belek wynosił $\rho_e = 2,2\%$. W serii B zbrojeniem głównym były pręty kompozytowe. W strefie ściskanej zastosowano pręty $2 \varnothing 12$ mm ($f_u = 800$ MPa), a w rozciąganej $4 \varnothing 14$ mm ($f_u = 800$ MPa). Strzemię konstrukcyjne i klamry spinające wykonano z prętów $\varnothing 6$ mm ($f_u = 800$ MPa). Gwarantowany moduł sprężystości prętów kompozytowych E_f wynosił 47,6 GPa. Dokładny opis badań właściwości prętów kompozytowych można znaleźć w [6]. Stopień zbrojenia rozciąganego wszystkich belek to $\rho_e = 1,7\%$. Ustalając stopień zbrojenia belek uwzględniono różną wytrzymałość prętów zbrojeniowych. Schemat zbrojenia belek przedstawiono na rysunku 1.

75 mm i dokładności do 0,001 mm. Pomiar rejestrowano w sposób ciągły za pomocą rejestratora diagnostycznego KSR-32 z częstotliwością próbkowania równą 2 s. Miejsce pomiaru ugięcia oznaczono na rysunku 1 jako U-1/2/3/4/5.

Analiza wyników badań

Zestawienie sił niszcących P_{ult} belki przedstawiono w tabeli 2 wraz ze średnią wartością siły niszcącej \bar{P}_{ult} w poszczególnych seriach oraz zmianą wartości sił ΔP_{ult} w stosunku do siły niszcącej belek referencyjnych A-I-W0.

Wprowadzenie zbrojenia rozproszonego w postaci włókien bazaltowych spowodowało zwiększenie siły niszcącej (A-I-WB). Wartość tej siły określonej w przypadku belek serii B-I-WB była nieznacznie mniejsza w porówna-

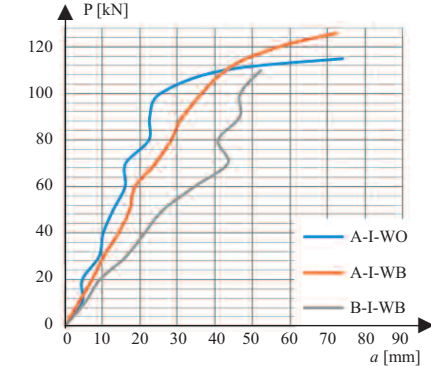


Fot. 2. Sposób niszczenia belek poszczególnych serii

Photo 2. Model of failure of beams in particular series

a [mm] od wartości obciążenia P [kN]. Wykresy przedstawiają ugięcia doraźne z uwzględnieniem osiadania podpór.

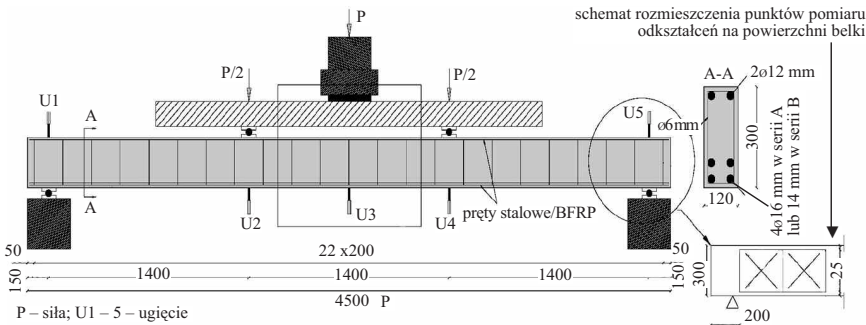
Analizując wartość ugięć w przypadku belek serii A (referencyjnej i z włóknami bazaltowymi) stwierdzono, że w początkowej fazie były do siebie zbliżone, natomiast belki ze zbrojeniem kompozytowym wykazywały, przy tym samym obciążeniu, wartości ugięcia większe nawet o 40%, co wynikało m.in. ze znacznie mniejszej wartości modułu sprężystości zbrojenia kompozytowego w porównaniu ze stalowym. Wraz ze zwiększeniem obciążenia różnica wartości ugięć zwiększała się zarówno w serii A-WB, jak i B-WB.



Rys. 2. Zależność siła niszcąca P [kN] – średnie ugięcie w środku przęsła a [mm]

Fig. 2. The diagram of the dependence, the destructive force P [kN] – mean deflection in the center of the span a [mm]

Wykresy porównawcze wartości odkształceń na powierzchni betonu w strefach przypodporowych, w poszczególnych seriach w fazie zniszczenia belek, przedstawiono na rysunku 3. Zasięg strefy ściskanej ulegał znacznemu



Rys. 1. Geometria i schemat podparcia belek podczas badania

Metoda badania belek. Podczas badań określono nośność na zginanie elementu. Dokonano również pomiarów ugięcia i odkształceń belki w strefie przypodporowej na poziomie zbrojenia górnego i dolnego. Stanowisko badawcze z oprzyrządowaniem przedstawiono na fotografii 1. Obciążenie zadawano za pomocą sterowanego siłownika hydraulicznego o zakresie obciążenia do 500 kN. Belki obciążono w układzie czteropunktowym, stosując przyrost siły co 5 kN, aż do zniszczenia elementu. Pomiaru ugięcia dokonano za pomocą czujników indukcyjnych Megatron-Munchen o zakresie pomiarowym 25; 50 oraz



Fot. 1. Stanowisko badawcze

Photo 1. The test stand

Tabela 2. Zestawienie sił niszcących badanej belki

Table 2. List of the load capacity of the tested beams

Seria	P_{ult} [kN]	\bar{P}_{ult} [kN]	ΔP_{ult} [%]
A-I-W0	110/110	110	
A-I-WB	137/115	126	15
B-I-WB	84/110	97	-12

niu z serią A-I-W0. Zastosowanie włókien bazaltowych spowodowało ograniczenie zarysowania belek. Znacznie większą liczbę rys obserwowano jednak w przypadku belek ze zbrojeniem BFRP, które wykazywały większą odkształcalność. W głównej mierze były to rysy prostopadłe spowodowane zginaniem. Przy obciążeniach niszcących zbrojenie stalowe utraciło lokalnie przyczepność, natomiast zbrojenie kompozytowe ulegało kruchemu pękaniu. Sposób niszczenia belek poszczególnych serii pokazano na fotografii 2.

Na rysunku 2 przedstawiono zależność średniego ugięcia w środku przęsła



SODASIL – TiO₂ Extender

– lepsze krycie, wzrost stopnia białości,
– obniżenie kosztów produkcji dzięki zmniejszeniu udziału TiO₂



Rettenmaier Polska

Sp. z o.o.

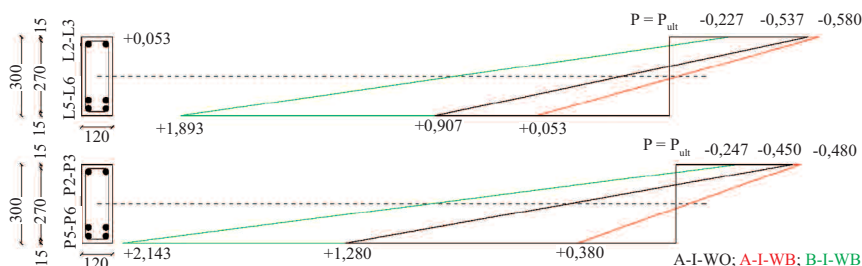
Bitwy Warszawskiej 1920 r. 7B

02-366 Warszawa

mobile +48 600 423 423

Tel + 48 22 608 51 00

e-mail: arbolcel@jrs.pl



Rys. 3. Wykres porównawczy wartości odkształceń na powierzchni betonu w strefach przypodporowych w poszczególnych seriach (czarny – A-I-WO; czerwony – A-I-WB; zielony – B-I-WB)
Fig. 3. A comparative diagram of the deformation values on the concrete surface in the support zones in individual series (black – A-I-WO; red – A-I-WB; green – B-I-WB)

zmniejszeniu w przypadku belek ze zbrojeniem kompozytowym. Zarejestrowano wówczas największą wartość naprężeń rozciągających. Odmienny charakter odkształceń zarysowanych belek zbrojonych prętami BFRP, w porównaniu z belkami żelbetowymi wynika, m.in., ze sposobu odkształcania się obu typów zbrojenia. Pręty stalowe odkształcają się sprężysto do osiągnięcia granicy sprężystości, natomiast pręty BFRP sprężysto aż do ich zerwania. Wprowadzenie dodatku włókien bazaltowych w ilości 8 kg/m³ wpłynęło na znaczne ograniczenie odkształceń elementu betonowego. Duże wartości odkształceń są typowe w przypadku elementów ze zbrojeniem BFRP, co wynika ze zbliżonej wartości modułów sprężystości zbrojenia kompozytowego i betonu.

Podsumowanie

Na podstawie badań stwierdzono, że model zniszczenia belek oraz wartość siły krytycznej zależały przede wszystkim od rodzaju zbrojenia podłużnego oraz obecności włókien bazaltowych w betonie. Charakterystyki dotyczące wytrzymałości prętów kompozytowych mają istotny wpływ na zachowanie się belki zginanej. W przypadku belek ze zbrojeniem kompozytowym zaobserwowano znacznie większe wartości odkształceń w strefie rozciąganej niż w przypadku belek żelbetowych. Ze względu na stosunkowo małą wartość modułu sprężystości zbrojenia BFRP, znacznie zmniejsza się sztywność belki po zarysowaniu. Po przekroczeniu momentu rysującego, w środkowej części belki powstają rysy prostopadłe o znacznej szerokości w poziomie zbrojenia rozciąganego. Ze względu na odporność prętów BFRP na korozję, szerokość rys nie ma tak istotnego znaczenia, jak

w przypadku konstrukcji żelbetowych. Pręty bazaltowe BFRP wpłynęły również na charakter zniszczenia belek, które nie następowało nagle, lecz było związane z powstawaniem dużej liczby rys i znacznym ugięciem elementu.

Efektywne stosowanie zbrojenia kompozytowego BFRP w betonowych elementach prefabrykowanych będzie wymagało odmiennego podejścia do projektowania, gdyż parametrem decydującym będzie sztywność elementu. Odębne zagadnienie stanowi ustandaryzowanie charakterystyk prętów pochodzących od różnych producentów.

Literatura

- [1] Adamczewski G, Woyciechowski PP. Prefabrykacja – jakość, trwałość, różnorodność. Warszawa, Stowarzyszenie Producentów Betonów. 2014; 62.
- [2] Adamczewski G, Woyciechowski PP. Prefabrykaty przemysłowe w budownictwie przemysłowym. Materiały Budowlane. 2015; 40 – 43.
- [3] Adamczewski G, Nicał A. Wielkowymiarowe prefabrykowane elementy z betonu. Inżynier Budownictwa. (n. d.) 46 – 53.
- [4] Derkowski W. Prefabrykacja betonowa – zrównoważone rozwiązanie dla budownictwa, Materiały Budowlane. 2021; 9 – 11.
- [5] Deryło P. Prefabrykacja betonowa w dobie racjonalnego i efektywnego wykorzystywania surowców. Materiały Budowlane. 2022; 36 – 37.
- [6] Kosior-Kazberuk M, Wasilczyk R. Analiza ugięć i zarysowania betonowych belek ze zbrojeniem niemetalicznym. Budownictwo i Inżynieria Środowiska. 2017; 8.
- [7] Grygo R, Kosior-Kazberuk M. Zbrojenie konstrukcji betonowych niemetalicznymi prętami kompozytowymi FRP, Budownictwo i Inżynieria Środowiska. 2017; ISSN 2081-3279. 8: 21 – 28.

Pracę wykonano w Politechnice Białostockiej w ramach realizacji projektu badawczego finansowanego ze środków NCBiR pt. „Innowacyjne hybrydowe zbrojenie kompozytowe FRP do konstrukcji infrastrukturalnych o podwyższonej trwałości” numer projektu PBS3/A2/20/2015 (ID 245084) oraz w ramach finansowania przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego RP; numer projektu WZ/WB-IIL/4/2020.

Przyjęto do druku: 31.03.2022 r.