

prof. dr hab. inż. Andrzej Łapko\*  
mgr inż. Marek Urbański\*\*

# Problemy badania betonowych elementów zginanych zbrojonych prętami bazaltowymi

Pręty bazaltowe do zbrojenia betonu o nazwie Basalt Fiber Reinforced Plastic (BFRP) są nowym materiałem i dlatego konieczne jest określenie ich właściwości i ograniczeń stosowania w stosunku do zbrojenia tradycyjnego. W artykule przedstawiono wyniki badań zginania sześciu belek swobodnie podpartych obciążonych dwupunktowo, zbrojonych prętami BFRP i porównanie z wynikami badań zginanych belek ze zbrojeniem stalowym. Badane belki wykonano z betonu C30/37 ze zbrojeniem dolnym prętami bazaltowymi średnicy 8 mm.

## Wytrzymałość na rozciąganie prętów bazaltowych BFRP

Głównym celem badania było określenie wytrzymałości na rozciąganie prętów BFRP o średnicy 8 mm i porównanie jej z wytrzymałością prętów stalowych. W związku z tym, że w ujęciu mikromechanicznym pręty bazaltowe pracują jednokierunkowo w odróżnieniu od izotropowych prętów stalowych, poprzeczna sztywność i wytrzymałość na rozciąganie podlega właściwościom matrycy [1, 2, 3]. Oznacza to, że wytrzymałość i sztywność poprzeczna jest stosunkowo mała w porównaniu ze sztywnością podłużną, co ogranicza stosowanie tradycyjnej metody testu na rozciąganie [4, 5]. Test ten wykonany w konwencjonalny sposób przez uchwyty generuje duże naprężenia ściskające w kierunku poprzecznym, które prowadzą do lokalnej koncentracji naprężeń, a w efekcie do kruszenia materiału, co z kolei skutkuje przedwczesnym zniszczeniem pręta BFRP. Najczęściej BFRP ulega zniszczeniu w uchwycie w wyniku efektu ścinania i kruszenia, który towarzyszy naprężeniom rozciągającym. System mocujący powinien być wykonany w taki sposób, żeby nie nastąpiło przedwczesne zniszczenie materiału w strefie zakotwienia, a z drugiej strony, aby można było łatwo określić rzeczywistą wytrzymałość na rozciąganie bez zaburzenia realnych właściwości pręta.

Oba końce badanego pręta BFRP zakotwiono w stalowych rurach (każda długości 450 mm) i wypełniono ekspansywną zaprawą wiążącą w celu osiągnięcia dostatecznej przyczepności. Istotnym problemem jest określenie wolnej (niezamocowanej) długości pręta. Na podstawie badań stwierdzono, że stosunek wolnej długości pręta do jego średnicy powinien być większy od 40. Wówczas można uznać, że średnia wytrzymałość na rozciąganie jest niezależna od geometrii badanego pręta oraz długości zakotwień. W tabeli 1 przedstawiono wyniki badań na rozciąganie sześciu prętów bazaltowych.

Średnia wytrzymałość prętów BFRP  $\varnothing 8$  jest ponad dwukrotnie większa niż prętów  $\varnothing 8$  wykonanych ze stali St3S ( $f_{yk} = 348$  MPa), a odkształcenia graniczne przy zerwaniu oraz moduł sprężystości średnio 5 razy mniejsze. Moduł sprężystości podłużnej prętów BFRP wyznaczono z zależności naprężenie – odkształcenie przy założeniu całkowitej li-

niowości w zakresie od 20% do 50% wytrzymałości na rozciąganie. Sposób zniszczenia w teście rozciągania prętów bazaltowych był odmienny od zerwania konwencjonalnych prętów stalowych. Mechanizm zniszczenia polegał na tym, że włókna ulegały uszkodzeniu przez rozszczępienie – rozdzielały się, a podczas rozrywania tworzyły rozszczępienie drzazgi.

Pręty BFRP, pomimo swoich jednokierunkowych właściwości mikromechanicznych, charakteryzują się bardzo dużą wytrzymałością na rozciąganie. Wytrzymałość na ściskanie nie została, jak dotąd, wystarczająco dokładnie przebadana [6]. Zależność naprężenie rozciągające – odkształcenie jest zawsze liniowa, aż do zniszczenia. Liniowy charakter konstytutywnej zależności jest główną wadą związaną z zastosowaniem prętów BFRP w konstrukcjach [7]. Liniowość powoduje, że brak jest redystrybucji naprężeń i w konsekwencji nie można stosować prętów w konstrukcjach wymagających dużych odkształceń plastycznych. Niewątpliwymi zaletami prętów BFRP są: niewielka gęstość, odporność na korozję, wysoka wytrzymałość zmęczeniowa, niewrażliwość elektromagnetyczna, znakomite właściwości wewnętrznego tłumienia, co skutkuje zmniejszeniem poziomu hałasu i drgań przenoszonych na sąsiednie konstrukcje.

## Nośność belek zbrojonych prętami bazaltowymi

Badano wytrzymałość na zginanie trzech modelowych belek ze zbrojeniem dolnym w postaci prętów BFRP o średnicy 8 mm oraz, w celu porównania, trzech belek referencyjnych ze zbrojeniem dolnym tradycyjnym w postaci 3 prętów stalowych średnicy 8 mm (St3S,  $f_{yk} = 348$  MPa). Wszystkie badane belki miały wymiary  $b \times h \times L = 80 \times 140 \times 1200$  mm. Były swobodnie podparte na dwóch podporach o rozstawie 1000 mm. Długość belek w świetle podpór wynosiła 1000 mm ( $L = 1200 = 100 + 1000 + 100$  mm). We wszystkich belkach w pobliżu podpór umieszczono strzemiona stalowe średnicy 8 mm ze względu na ścinanie. W części środkowej belek nie było zbrojenia górnego oraz strzemion. Zbrojenie górne we wszystkich badanych belkach składało się z 2 prętów stalowych średnicy 8 mm, natomiast środkowy dolny pręt wystawał obustronnie, w celu umożliwienia przeprowadzenia pomiaru poślizgu pręta podczas obciążania. Zbrojenie dolne zostało usytuowane w odległości 20 mm od dolnej krawędzi przekroju. Na bocznej powierzchni belek rozmieszczono 7 par reperów co 20 mm, licząc od dolnej krawędzi

**Tabela 1. Nośność, odkształcenie graniczne i podłużny moduł sprężystości prętów BFRP**

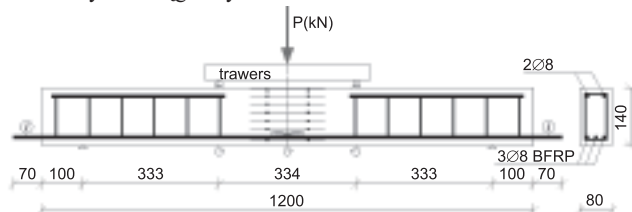
Nr pręta	Naprężenia graniczne $\sigma$ [MPa]	Odkształcenie graniczne $\epsilon$ [%]	Moduł sprężystości E [GPa]
1	1100,74	2,86	40,22
2	1009,16	2,71	38,73
3	1009,13	2,63	39,22
4	1089,43	2,92	39,63
5	1048,11	2,81	38,18
6	1054,17	2,95	38,34
Wartość średnia	1051,79	2,81	39,05

\* Politechnika Białostocka

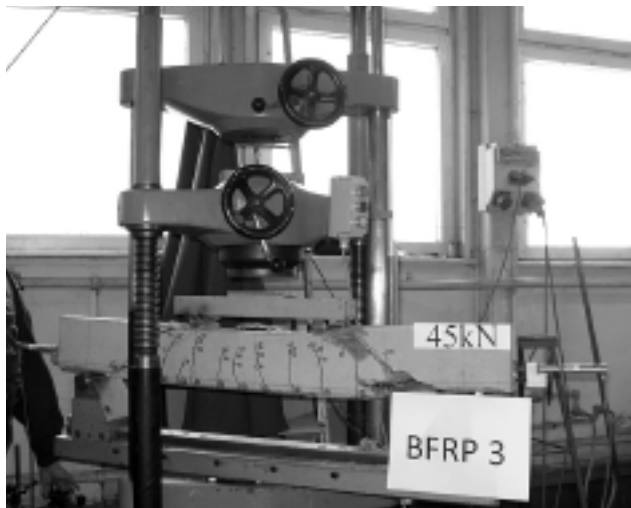
\*\* Politechnika Warszawska

przekroju. Pomiaru odkształceń dokonano za pomocą ekstensometru o bazie pomiarowej 100 mm. Rzeczywista, zbadana średnia wytrzymałość betonu próbek sześciennych wyniosła  $-f_{ck,cube} = 41,02$  MPa; a w odniesieniu do próbek walcowych  $f_{ck,cyl} = 0,8 \times 41,02 = 32,82$  MPa.

Na rysunku 1 przedstawiono schemat belki zbrojonej prętami BFRP (analogicznie wyglądał schemat belki ze zbrojeniem stalowym), a na fotografii belkę zbrojoną prętami BFRP w końcowej fazie obciążenia. Widoczny jest sposób zniszczenia na skutek przekształcenia się belki w system ciągnowy.



Rys. 1. Belka betonowa zbrojona prętami BFRP



Belka ze zbrojeniem BFRP pod obciążeniem 45 kN wyczerpującym nośność Fot. Autorzy

W tabeli 2 przedstawiono wyniki nośności belek (maksymalnej siły obciążającej i momentu przenoszonych przez przekrój krytyczny belki) ze zbrojeniem bazaltowym średnicy 8 mm (BFRP) oraz nośności belek referencyjnych ze zbrojeniem stalowym o identycznej średnicy (BRC). Dodatkowo podano wartości odkształcenia w betonie  $\epsilon_7$  w odległości 20 mm od dolnej krawędzi belek (na poziomie zbrojenia).

Średnia wartość siły niszczącej w przypadku belek ze zbrojeniem bazaltowym wyniosła 46,7 kN wobec 37,6 kN w przypadku belek ze zbrojeniem stalowym i była średnio o ok. 24% większa, zaś średnia nośność (moment niszczący) belek ze zbrojeniem bazaltowym wynio-

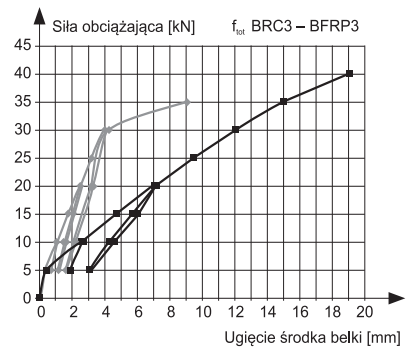
Tabela 2. Nośność na zginanie belek ze zbrojeniem prętami bazaltowymi (BFRP) i stalowymi (BRC)

Rodzaj belek	Belki ze zbrojeniem stalowym			Belki ze zbrojeniem bazaltowym		
	BRC1	BRC2	BRC3	BFRP1	BFRP2	BFRP3
Siła niszcząca [kN]	37,5	35,0	40,5	47,5	47,5	45
Średnia siła niszcząca [kN]	37,6			46,7		
Nośność na zginanie [kNm]	6,6	6,2	7,2	8,3	8,3	7,9
Odkształcenie $\epsilon_7$ [‰]	4,18	5,69	6,52	9,43	13,60	7,76
Średnia nośność na zginanie [kNm]	6,7			8,2		

sta 8,2 kNm, wobec 6,7 kNm w przypadku belek ze zbrojeniem stalowym i była średnio o ok. 23% większa.

W trzech zbadanych belkach ze zbrojeniem bazaltowym nie zauważono poślizgu zbrojenia. Nie doszło też do zerwania prętów dolnego zbrojenia bazaltowego. Zniszczenie belki bazaltowej nastąpiło natomiast przez zniszczenie betonu, ze względu na wyższy od równoważnego stopień zbrojenia. Mechanizm niszczenia miał kruchy charakter i objawił się ścięciem stref przypodporowych belek. Niemniej jednak zniszczenie nie było gwałtowne, ze względu na zachowaną ciągłość zbrojenia bazaltowego. W trzech belkach zbrojonych stałą stwierdzono kilkumilimetryowy poślizg prętów zbrojenia w końcowej fazie obciążenia.

W belkach zbrojonych prętami bazaltowymi, w przeciwieństwie do belek referencyjnych ze zbrojeniem stalowym, przyrost ugięcia do przyrostu siły był praktycznie stały, aż do zniszczenia elementu. Za tem odkształcenia zbrojenia przez cały czas miały charakter liniowy. Na rysunku 3 przedstawiono wykres zmienności ugięcia badanych belek w funkcji siły obciążającej. Wykresu ugięć belek zbrojonych prętami BFRP nie doprowadzono do poziomu obciążenia niszczącego, z uwagi na konieczność usunięcia czujników pomiarowych umieszczonych pod nadmiernie ugiętą belką.



Rys. 3. Zależność ugięcia środka belki od obciążenia dla belki ze zbrojeniem bazaltowym (kwadraty) oraz belki ze zbrojeniem stalowym (romby)

### Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że w przeciwieństwie do bilinearnej zależności naprężenie – odkształcenie dla zbrojenia stalowego, zbrojenie bazaltowe wykazuje linearną zależność aż do wyczerpania nośności przekroju belki. Nośność zbadanych belek zbrojonych prętami BFRP była znacznie większa niż nośność belek ze zbrojeniem tradycyjnym, co wyniknęło z różnych mechanicznych stopni zbrojenia obu typów belek. Zniszczenie belek ze zbrojeniem BFRP nie nastąpiło w sposób nagły i było konsekwencją przekształcenia się belki w układ ciągnowy, ze względu na zachowaną nośność dolnego zbrojenia w postaci prętów bazaltowych. Ugięcia belek ze zbrojeniem BFRP okazały się znacznie większe od ugięć belek referencyjnych, co spowodowane było znacznie niższym modułem sprężystości prętów BFRP w porównaniu z prętami stalowymi. Z uwagi na relatywnie niższy moduł sprężystości bazaltowych prętów, w porównaniu ze stałą, ugięcie może być głównym parametrem przy projektowaniu belek zbrojonych BFRP.

### Literatura

[1] fib Bulletin 40/2007, *FRP reinforcement in RC structures, technical report*. International Federation for Structural Concrete (fib), September 2007.  
 [2] Koch G.H., Brongers M.P.H., Thompson N.G., Virmani Y.P., Payer J.H. *Corrosion costs and preventive strategies in the United States*, Report no FHWA-RD-01-156, U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, Washington D.C., 2002.  
 [3] Hollaway L. *Polymer Composites for Civil and Structural Engineering*, first edition, Blackie Academic and Profession, 1993.  
 [4] www.basaltfm.com.  
 [5] www.withconcrete.com.  
 [6] Bank L. C., *Structural design with FRP materials, Composite for Construction*, John Wiley and Sons Ltd, 2006.  
 [7] Brik V., *Advanced Concept Concrete Using Basalt Fiber/BF Composite Rebar Reinforcement*, Research & Technology Corp. Madison, WI, 2003.