

Zastosowanie zbrojenia HFRP o podwyższonej sztywności w betonowych belkach

APPLICATION OF FRP REINFORCEMENT WITH INCREASED STIFFNESS IN THE CONCRETE BEAMS

Streszczenie

Na podstawie dotychczas przeprowadzonych badań nośności zginanych belek o rozpiętości 3 m ze zbrojeniem prętami BFRP stwierdzono przekroczenie akceptowalnych wartości ugięć i zarysowania. Po przeanalizowaniu wyników badań postanowiono zwiększyć sztywność (moduł sprężystości) zbrojenia poprzez modyfikację składu materiałowego. W tym celu zaproponowano pręty hybrydowe HFRP złożone z odpowiedniej mieszanki włókien bazaltowych i węglowych.

Włókna BFRP mają wysoką wytrzymałość na rozciąganie, ale ich stosunkowo niski moduł sprężystości zazwyczaj powoduje niedobór konstrukcyjnej sztywności. Dodatek włókien CFRP o wysokim module sprężystości ma zapewnić wzmocnienie początkowej sztywności. Mieszanina włókien o wysokim module i wysokiej wytrzymałości powoduje zachowanie pewnych, trwałych odkształceń, aż do zerwania włókien wysokiej wytrzymałości.

Synergia cech wytrzymałościowych odpowiednio dobranego składu prętów HFRP, pozwoli na zwiększenie sztywności, a tym samym na spełnienie wymagań SGU dotyczących ograniczenia ugięcia i zarysowania elementów betonowych nimi zbrojonych.

Abstract

Based on previously conducted research beams bearing capacity with a span of 3 m with BFRP bars reinforcement were found exceeding the acceptable deflections and cracks. After analyzing the test results it was decided increase the reinforcement stiffness (modulus

of elasticity) by modifying the material composition. For this purpose proposed hybrid HFRP bars, consisting of an appropriate mixture of carbon and basalt fibers.

BFRP fibers have a high tensile strength, but their relatively low modulus of elasticity usually results in a scarcity of structural rigidity. The addition of CFRP fibers having a high modulus of elasticity is to ensure strengthening of the initial stiffness. The mixture of high modulus and high strength fibers, maintains some, permanent deformations until rupture of high strength fibers.

Synergy mechanical characteristics - strength a properly selected weight composition of HFRP bars, allows to increase stiffness. Hence on meeting the requirements relating to the limitation SGU deflection and cracks of concrete elements.

Wstęp

W II połowie XX wieku następowiała ewolucja materiałów kompozytowych, w szczególności kompozytów polimerowych zbrojonych włóknem ciągłym (z ang. Fiber Reinforced Polymer – FRP). Początkowo materiały te znajdowały zastosowanie w przemyśle obronnym i kosmicznym, stopniowo, w przeciągu ostatnich 30 lat znajdują zastosowanie w konstrukcjach budowlanych. Materiały kompozytowe FRP w znaczącym stopniu zwiększyły możliwości konstrukcyjne oraz rentowność ekonomiczną materiałów budowlanych służących do wznoszenia budynków i mostów (ACI 440, 2006); (Bank 2006).

Tam, gdzie decydującą rolę w konstrukcjach inżynierii lądowej odgrywa wytrzymałość, sztywność oraz odporność na czynniki środowiskowe, materiały kompozytowe FRP stały się bardzo użytecznym zamiennikiem konwencjonalnego zbrojenia stalowego.

Pręty zbrojeniowe FRP wytwarzane są z ciągłych włókien żywic epoksydowych i poliestrowych za pomocą procesu pultruzji. Zawartość włókien wynosi do 80% objętości pręta, a co najmniej 20% spoiwo; najczęściej żywica epoksydowa. Stosowane jest też uzwojenie poprawiające przyczepność prętów do betonu. W zależności od rodzaju zastosowanego włókna ciągłego rozróżnia się następujące typy kompozytów FRP: z włóknem szklanym GFRP (Glass Fiber Reinforced Polymer), węglowym CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer), aramidowym (Aramid Fiber Reinforced Polymer) oraz ostatnio bazaltowym BFRP (Basalt Fiber Reinforced Polymer). W przeciwieństwie do stali, która jest materiałem izotropowym, pręty FRP są materiałem anizotropowym, co implikuje różnicę właściwości mechanicznych w kierunku podłużnym i poprzecznym. Anizotropia wynika stąd, że właściwości prętów FRP w kierunku podłużnym zależą od cech mechanicznych włókien, natomiast właściwości w kierunku poprzecznym i ścinanie regulowane są przez cechy żywicy (Łapko *et al.* 2013).

Pręty bazaltowe grupy BFRP wykazują wiele istotnych zalet, w porównaniu do zbrojenia stalowego, a także innych kompozytów FRP. Jednakże stosunkowo nieduży moduł sprężystości podłużnej prętów BFRP w porównaniu do prętów stalowych, powoduje nadmierne przekroczenie ugięć i zarysowania w zginanych elementach betonowych nimi zbrojonych. Rozwiązaniem powyższego problemu jest zwiększenie sztywności prętów BFRP, poprzez modyfikację ich składu materiałowego. W wyniku zastąpienia części włókien bazaltowych przez włókna węglowe można uzyskać wzrost modułu sprężystości podłużnej.

2. Charakterystyka włókien BFRP i CFRP

Włókna BFRP

Skład chemiczny bazaltów, z których wykonuje się włókna bazaltowe jest w pewnym stopniu zróżnicowany. Oprócz składu chemicznego, właściwości mechaniczne włókien bazaltowych pochodzące z różnych źródeł są także zróżnicowane (Subramanian *et al.* 1977); (Artemenko 2003), (Sim *et al.* 2005), prawdopodobnie z powodu odmiennych składników chemicznych i warunków przetwarzania takich jak na przykład temperatura wytwarzania włókien. Wytrzymałość na rozciąganie włókien ma tendencję do zwiększania się od 1,5 do 2,9 GPa, wraz ze wzrostem temperatury wytwarzania, w przedziale 1200~1375°C. Wynika to ze zwiększenia proporcji krystalicznych struktur bazaltu przy niższych temperaturach (Subramanian *et al.* 1977). Moduł Younga włókien bazaltowych waha się między 78 i 90 GPa, w zależności od źródła pochodzenia, przy czym Rosja zgłasza

najwyższy moduł 90 GPA (Subramanian *et al.* 1977). W porównaniu do włókien szklanych, większość doniesień wskazuje, że włókno bazaltowe ma wyższy lub porównywalny moduł i wytrzymałość (Subramanian 1978), (Artemenko 2003), natomiast odnotowano kilka przypadków znacznie niższej wytrzymałości włókien bazaltowych, niż była deklarowana (Sim *et al.* 2005). Włókna bazaltowe są materiałem ekologicznie kompatybilnym, charakteryzującym się o wiele łatwiejszym procesem recyklingu w porównaniu np. do włókien szklanych (Garbacz *et al.* 2013).

Poza dobrymi właściwościami mechanicznymi, bazalt ma wysoką chemiczną i termiczną stabilność (Artemenko 2003), dobre właściwości izolacyjne termiczne, elektryczne i dźwiękowe (Parnas, Shaw 2007). Termoizolacyjność bazaltu jest trzy razy większa od azbestu, a dzięki tak dobrym właściwościom izolacyjnym bazalt z powodzeniem jest stosowany w ochronie przeciwpożarowej (Parnas, Shaw 2007). Ponadto włókna bazaltowe mają właściwości elektryczno – izolacyjne 10 razy lepsze niż włókna GFRP. Włókna bazaltowe mają także znacznie lepszą odporność chemiczną niż włókna szklane, zwłaszcza w środowisku silnie alkalicznym. Na przykład rurami wykonanymi z BFRP można transportować korozyjne ciecze i gazy (Militky 1996), (Van de Velde 2002).

Pręty BFRP stanowią alternatywę jako zbrojenie przęseł mostowych ze względu na minimalizację ciężaru płyty, ograniczenie napraw oraz zdecydowane zwiększenie okresu użytkowalności (Karbhari 2007).

Trwałość płyt betonowych ze zbrojeniem stalowym, stosowanych w mostach zwykle wynosi 25 lat. Natomiast trwałość płyt z udziałem zbrojenia FRP najczęściej co najmniej 75 lat (tj. okres użytkowania mostu) (O'Connor, Hooks 2000). Przeprowadzone badania wykazały, że po upływie 2 lat w warunkach tropikalnych oraz w środowisku silnie alkalicznym własności fizyko–chemiczne platformy zbrojonej FRP nie uległy degradacji (Tomosawa, Nakatsuji 1997), (Clarke, Sheard 1998). Także inspekcja dokonana po 20 i 25 latach użytkowania obiektu Mondial House w Londynie (rok budowy 1974) wykazała, że konstrukcja elementów płytowych zbrojonych FRP jest nieomal jak nowa (Karbhari 2007).

W maju 2008 Southeast University, Zhejiang GBF Basalt Fiber Co Ltd. i Zhang Shi Shijiazhuang zarządzające autostradą wspólnie opracowały technologię ciągłego zbrojenia konstrukcji za pomocą zbrojenia BFRP, w celu wzmocnienia drogi, części północnego i południowego końca mostu na przeprawie przez Xingtang. Ta technologia konstruowania ciągłego zbrojenia wyeliminowała konieczność połączeń spawanych, rozwiązała problem wpływu korozji stalowego zbrojenia wywołanego solą do odladzania, co tym samym pozytywnie wpłynęło na jakość i trwałość autostrad, oraz zmniejszyło koszty autostrady i skróciło czas budowy (Wu Z. *et al.* 2012).

Poniżej zestawiono istotne korzyści wynikające z zastosowania prętów zbrojeniowych BFRP, w porównaniu do konwencjonalnego zbrojenia stalowego.

- znacznie wyższa (ponad dwukrotnie) wytrzymałość na rozciąganie niż zbrojenia ze stali lub z prętów GFRP, przy tej samej średnicy.
- pręty BFRP nie korodują, a zatem grubość otuliny betonowej może być zmniejszona. To pozwala na stosowanie cieńszych betonowych przekrojów, co powoduje oszczędności materiałów i kosztów
- pręty BFRP są o 89% lżejsze niż pręty ze stali zbrojeniowej; tona bazaltowych prętów zbrojeniowych zastępuje zbrojenie 9,6 ton stali zbrojeniowej. Jeden człowiek może łatwo podnieść 150 m zwoju 10 mm BFRP. Tak więc, nie ma potrzeby stosowania przy przenoszeniu BFRP na przykład dźwigów lub wózków widłowych na placu budowy. Pozwala to na znacznie szybsze konstruowanie i montaż zbrojenia.

- bardzo wysoka wytrzymałość pozwala na mniejszą średnicę prętów zbrojeniowych. W wielu przypadkach, średnica zbrojenia może być zmniejszona, jeżeli zastosuje się BFRP.
- pręty BFRP mają podobny współczynnik rozszerzalności cieplnej, jak beton i stal. W ten sposób pręty BFRP rozszerzają się i kurczą się w tempie bardzo zbliżonym do betonu (Karbhari 2007).
- pręty BFRP są z natury odporne na korozję (Bin Wei *et al.* 2010). Pręty BFRP nie korodują, a zatem pęknięcia betonu ze względu na pęczniące produkty korozji są całkowicie wyeliminowane. W przeciwieństwie do prętów GFRP pręty BFRP nie potrzebują specjalnej powłoki chroniącej przed oddziaływaniem środowiska o wysokim pH betonu.
- włókna bazaltowe, w przeciwieństwie do włókien szklanych, nie wchłaniają (Wu *Z. et al.* 2012). Poza tym wystające włókna nie tworzą „ścieżek” dla wody, która mogłaby penetrować i niszczyć beton.
- pręty BFRP nie przewodzą prądu, są niemagnetyczne i nie indukują pola magnetycznego pod wpływem ekspozycji na pole elektromagnetyczne lub na energię częstotliwości radiowej (RF). Dlatego mogą być stosowane w pomieszczeniach z rezonansem magnetycznym (MRI) i w pobliżu czytników identyfikacji radiowej (RFID) (Sim *et al.* 2005).
- pręty bazaltowe mogą być stosowane w szerokim zakresie temperatur, $-260/-200^{\circ}\text{C}$ do około $650/800^{\circ}\text{C}$, przy temperaturze topnienia 1450°C . Mimo zawartości żywic w prętach BFRP, graniczny zakres temperatur pracy wynosi od -70°C do $+100^{\circ}\text{C}$, a zatem są przydatne w zastosowaniach, które wymagają odporności na ogień. Pręty BFRP mają także niską przewodność cieplną i są niepalne (Subramanian *et al.* 1977).

Włókna węglowe

Włókna węglowe, w porównaniu do włókien szklanych i węglowych wykazują około 3 razy większą wytrzymałość oraz wyższy moduł sprężystości. Włókna te charakteryzują się wysoką wytrzymałością zmęczeniową, bardzo dobrą odpornością na działanie alkaliów i kwasów, niskim współczynnikiem rozszerzalności cieplnej. Podstawową wadą włókien węglowych jest ich wysoka cena (od 10 do 30 razy większa, niż włókien GFRP i BFRP). Ponadto włókna węglowe nie są łatwo zwilżalne żywicami, wykazują niską odporność na uderzenia, a także wysoką przewodność elektryczną, co może inicjować korozję galwaniczną w obecności metali. W tabeli 1 przedstawiono porównanie właściwości włókien FRP.

Tabela 1. Właściwości włókien przy rozciąganiu [Zhishen *et al.* 2012], [fib MC2010, 2014], [Incotology 2012]

Właściwość włókien	węglowe	szklane	aramidowe	bazaltowe
Wytrzymałość na rozciąganie, MPa	3500-5000	1800-4580	2760-4200	3000-4840
Moduł sprężystości, GPa	230-650	72-86	62-175	89-110
Współczynnik Poissona	0,20	0,22	0,35	0,26
Odształcenia graniczne %	0,5-1,5	2,4-5,3	1,4-4,4	2,6-6,0
Średnica włókien, μm	5-15	6-21	12	6-21
Ciężar właściwy, g/cm^3	1,75-1,95	2,5-2,62	1,39-1,44	2,65-2,68
Gęstość liniowa, tex	60-2400	40-4200	60-4000	60-4200

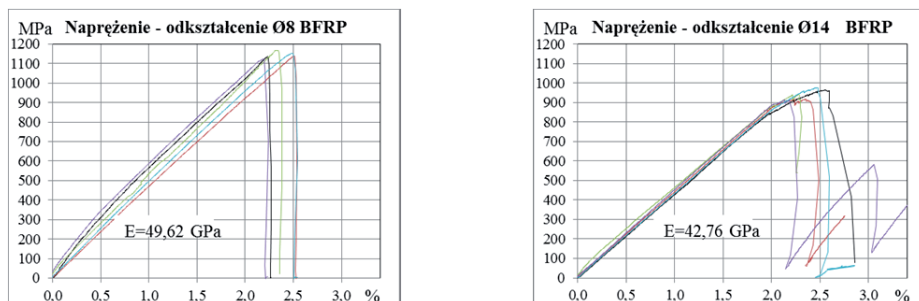
3. Badanie własne wytrzymałości na rozciąganie prętów bazaltowych

Celem badania było, po pierwsze, określenie wytrzymałości na rozciąganie prętów BFRP o nominalnych średnicach 8, 10 i 14 mm i porównanie ich z wytrzymałością prętów stalowych. Zastosowano specjalny system mocujący końce rozciąganego pręta bazaltowego, aby 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.

Ze względu na to, że pręty BFRP są materiałem anizotropowym, wytrzymałość włókien bazaltowych w kierunku poprzecznym jest niewielka, w porównaniu do bardzo wysokiej wytrzymałości w kierunku podłużnym. Właściwość ta wymaga zastosowania odpowiedniego zamocowania na obu końcach badanego pręta, poddawanego badaniu na rozciąganie w maszynie wytrzymałościowej. W tym celu zaprojektowano 2 rury stalowe o średnicy zewnętrznej 40 mm, grubości ścianek 5 mm, oraz długości 400 mm każda. Na końcach stalowych rur zaprojektowano stalowe nasadki z otworem pośrodku na badany pręt BFRP.

Mocowanie pręta BFRP w stalowej rurze odbywa się poprzez wypełnienie wolnej przestrzeni pomiędzy rurą a prętem żywicą epoksydową z utwardzaczem (materiał wypełniający rury kotwiące ustalono na podstawie wcześniejszych badań próbnych). Długość rur kotwiących została ustalona na podstawie wcześniejszych badań próbnych (Urbański, Łapko, Garbacz 2013).

Na rysunku 1 przedstawiono uzyskaną na podstawie przeprowadzonych badań zależność naprężenie – odkształcenie dla prętów BFRP o średnicy 8 mm i 14 mm.



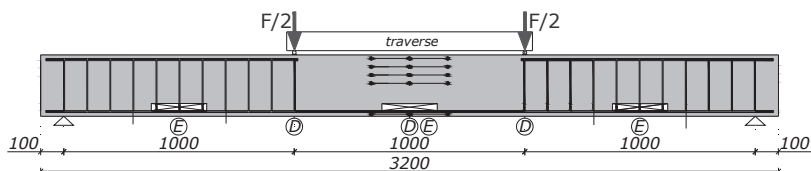
Rys. 1. Zależność naprężenie – odkształcenie prętów BFRP o nominalnej średnicy 8 i 14 mm

Wszystkie badane pręty o średnicy nominalnej 8 mm uległy zniszczeniu podczas rozciągania przez rozszczępienie. Średnie maksymalne naprężenie wynosiło 1148 MPa przy średnim odkształceniu 2,35%. Średni moduł sprężystości wyniósł 49,6 GPa. W przypadku prętów o średnicy nominalnej 14 mm średnie maksymalne naprężenie wynosiło 943 MPa przy średnim odkształceniu 2,36%. Średni moduł sprężystości wyniósł 42,8 GPa. Należy zauważyć, że wytrzymałość na rozciąganie prętów zależy także od ich średnicy. Podobny efekt nie występuje w tradycyjnym zbrojeniu stalowym. Zjawisko to spowodowane jest występowaniem efektu opóźnionego ścinania. Polega ono na tym, że włókna znajdujące się bliżej środka pręta nie są poddawane tak dużym naprężeniom jak włókna znajdujące

się bliżej zewnętrznej powierzchni. To powoduje zmniejszenie wytrzymałości na rozciąganie dla prętów zbrojeniowych o większych średnicach.

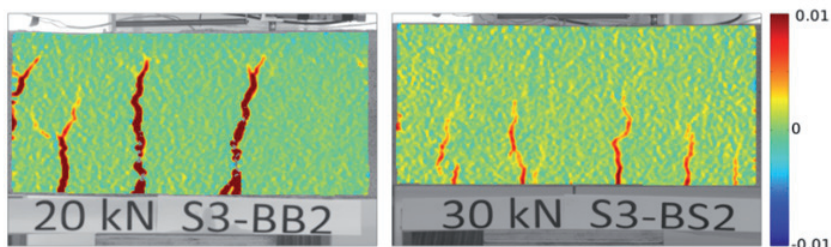
4. Badania nośności i odkształcalności belek ze zbrojeniem bazaltowym

W celu określenia nośności na zginanie oraz wartości ugięć i zarysowania przeprowadzono badanie na zginanie 3 serii belek betonowych zbrojonych prętami BFRP i stalowymi. Wszystkie belki o rozstawie 3000 mm i wymiarach: $b \times h \times L = 140 \times 260 \times 3200$ mm były swobodnie podparte. W pobliżu podpór zastosowano strzemiona, natomiast środkowa część belek była ich pozbawiona. We wszystkich belkach BFRP zbrojenie górne stanowiły 2 pręty BFRP o średnicy 8 mm, natomiast w belkach zbrojonych stalą odpowiednio 2 pręty stalowe o średnicy 10 mm. Obciążenie było realizowane dwupunktowo i przekazywane osiowo przez siłownik za pomocą trawersu. Podczas procesu obciążania belek rejestrowano szerokość i rozstaw rys w obszarze występowania stałego momentu. Średnia wytrzymałość betonu wynikająca z badań na kostkach wynosiła $f_{ck, cube} = 43,82$ MPa ($f_{ck, cyl} = 0,8 \times 43,82 = 35,06$ MPa). Zbrojenie główne we wszystkich belkach znajdowało się w odległości 35 mm od dolnej powierzchni (rys. 2). Na bocznej powierzchni belek zainstalowano 10 par reperów w rozstawie 25 mm, licząc od górnej powierzchni. Odkształcenia mierzono ekstensometrem o bazie 100 mm.



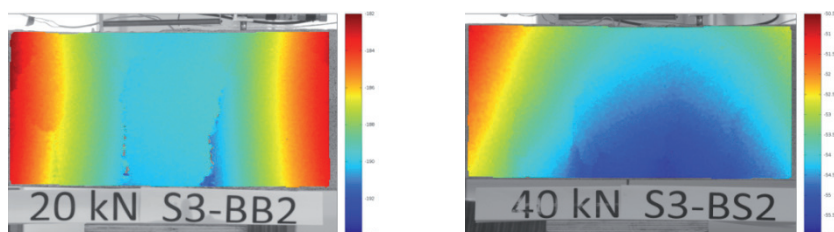
Rys. 2. Belka ze zbrojeniem i rozkładem reperów służących do pomiaru odkształceń ekstensometrem, E – czujnik pomiaru odkształcenia zbrojenia, D – czujnik pomiaru ugięcia, wymiary w mm

Dla belek BFRP charakter odkształceń w kierunku pionowym w początkowym zakresie obciążeń ($25\% F_u$) podobny jest do belek żelbetowych. Przy zwiększeniu obciążenia (zwłaszcza w końcowej fazie obciążenia) w belce BFRP można zauważyć znaczny wzrost odkształceń pionowych w górnych częściach rys, przy jednoczesnym jednorodnym odkształceniu betonu w poziomie zbrojenia. Szerokość rys dla belek zbrojonych prętami BFRP wzrasta wraz z poziomem obciążenia i jest większa w porównaniu do belek ze zbrojeniem stalowym. Na rysunku 3 pokazano porównanie odkształceń poziomych uzyskanych za pomocą metody Cyfrowej Korelacji Obrazu środkowych części belek ze zbrojeniem BFRP i stalowym dla poziomu $1/3$ obciążenia niszczonego.



Rys. 3. Propagacja zarysowania powierzchni belki ze zbrojeniem BFRP (po lewej stronie i ze zbrojeniem stalowym (po prawej) przy poziomie obciążenia 1/3 obciążenia niszczonego

Znacznie większe przemieszczenia pionowe (rys. 4) w belce BFRP wynikają ze znacznie mniejszej sztywności bezpośrednio po zarysowaniu, co z kolei spowodowane jest mniejszym modułem sprężystości prętów BFRP w porównaniu do stalowych.



Rys. 4. Przemieszczenia pionowe w belce ze zbrojeniem BFRP przy obciążeniu 20 kN (0,33 F_u) i ze zbrojeniem stalowym przy obciążeniu 40 kN (0,31 F_u)

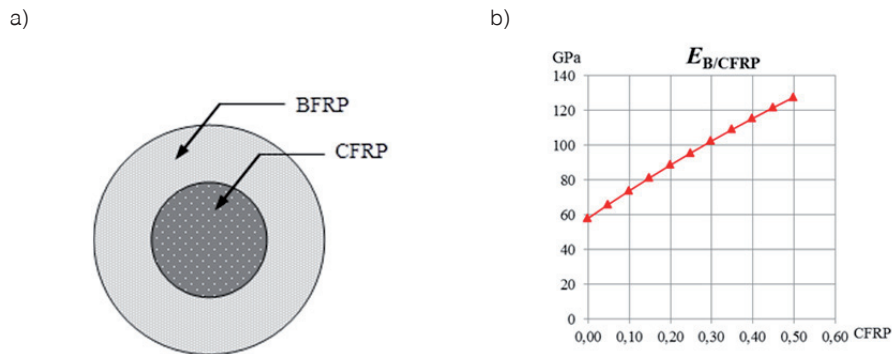
W celu redukcji szerokości zarysowania, a także wyeliminowania nadmiernych ugięć w belkach zbrojonych prętami BFRP, postanowiono zastąpić część włókien BFRP, włóknami CFRP o większym module sprężystości podłużnej.

5. Modyfikacja zbrojenia BFRP

Włókna BFRP mają wysoką wytrzymałość na rozciąganie, ale ich stosunkowo niski moduł sprężystości zazwyczaj powoduje niedobór konstrukcyjnej sztywności. Dodatek włókien CFRP o wysokim module sprężystości ma zapewnić wzmocnienie początkowej sztywności. Mieszanka włókien o wysokim module i wysokiej wytrzymałości powoduje zachowanie pewnych, trwałych odkształceń, aż do zerwania włókien wysokiej wytrzymałości. Na rysunku 5a pokazano przekrój pręta B/CFRP z konfiguracją poszczególnych rodzajów włókien FRP.

W celu zwiększenia sztywności kompozytowych prętów zastosowano rowing CFRP Tenax-J UTS50 F24 1600tex o następujących parametrach: wytrzymałość na zerwanie $f_f=5000$ MPa, moduł sprężystości $E_f=245$ GPa, odkształcenie graniczne $\varepsilon_f=2,1\%$; średnica włókna $\varnothing=7\mu\text{m}$, gęstość właściwa $\rho_f=1,79\text{g/cm}^3$. Rowing BFRP charakteryzował się następującymi parametrami: wytrzymałość na zerwanie $f_f=950$ MPa, moduł sprężystości $E_f=90$ GPa, odkształcenie graniczne $\varepsilon_f=2,8\%$; średnica włókna $\varnothing=11\mu\text{m}$, gęstość właściwa $\rho_f=2,89$ g/cm³. Jako matrycę zastosowano żywicę epoksydową o module sprężystości

$E_m=3$ GPa i gęstości właściwej $\rho_f=1,20$ g/cm³. Przy uwzględnieniu powyższych parametrów materiałowych uzyskano przy 10% udziale włókien CFRP moduł sprężystości E (B/CFRP)=73,75 GPa, natomiast przy 30% udziale włókien CFRP $E=102,33$ GPa. Zależność podłużnego modułu sprężystości prętów B/CFRP w zależności od procentowego udziału włókien CFRP pokazano na rysunku 5b.



Rys. 5. a) Przekrój pręta B/CFRP, b) Zależność sztywności prętów B/CFRP od procentowego udziału włókien CFRP

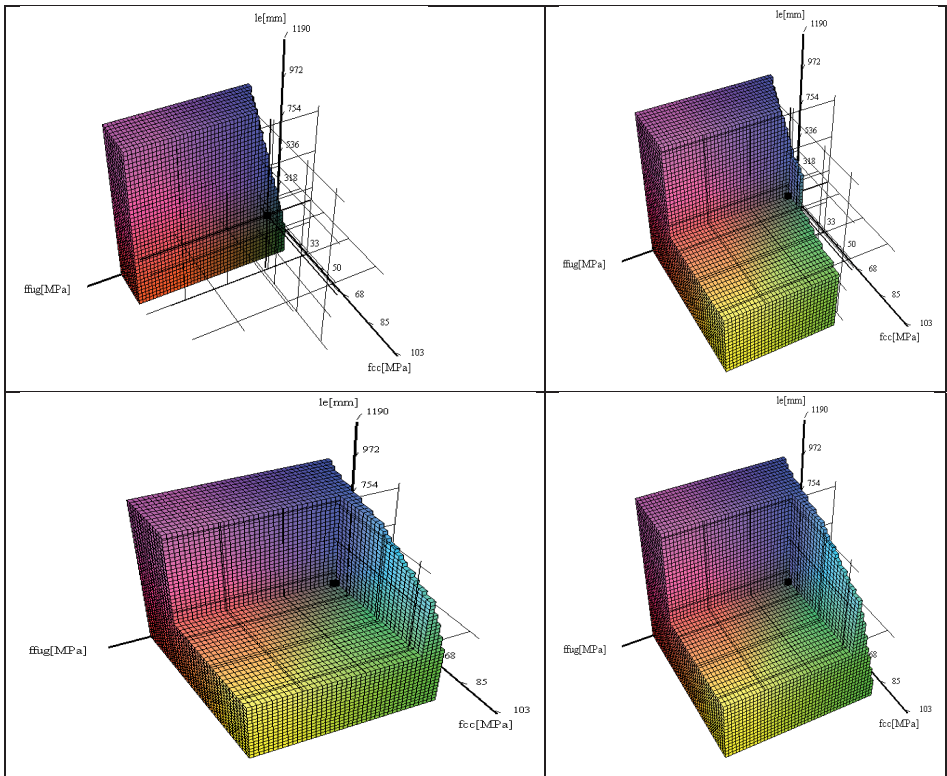
Wykorzystując zmodyfikowany model kompatybilności układu BFRP – beton (Mossakowski *et al.*, 2014) uwzględniający wymagania ACI 440.1R, wykazano, że wzrost modułu sprężystości prętów BFRP jest szczególnie istotny w przypadku prętów o mniejszej średnicy (rys. 6a). Przy większych średnicach wpływ modułu sprężystości jest mniej widoczny.

Wysokomodularne pręty B/CFRP, o zwiększonej sztywności zastosowano jako zbrojenie typowych belek o przekroju $b \times h=250 \times 260$ mm i rozpiętości $L=3000$ mm, które były przedmiotem badań nośności przedstawionych w poprzednim punkcie. Belki obciążono łączną siłą $F=30$ kN, co odpowiada obciążeniom współpracującej z belką płyty o szerokości 2 m i grubości 0,1 m oraz obciążeniu użytkowym w wysokości 5 kN/m. Jak już wspomniano, ze względu na mniejszą sztywność prętów FRP decydującą rolę w projektowaniu odgrywają SGU. Graniczne wartości ugięć zaznaczone grubą pionową (czerwoną) linią stanowią 1/250 rozpiętości belek. Natomiast graniczna szerokość rys wynosi 0,7 mm, zgodnie z zaleceniami ACI 440.1R.

Przy obciążeniu użytkowym, dopuszczalna szerokość rys jest większa niż dla żelbetu, ze względu na wysoką odporność BFRP na korozję. Zalecane wartości dopuszczalnych szerokości rys dla elementów zbrojonych FRP wg normy kanadyjskiej (CSA 2002) wynoszą:

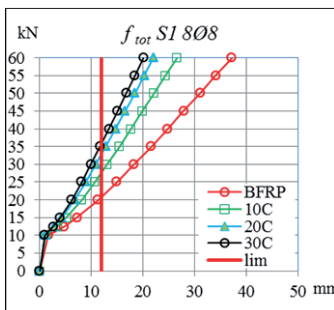
- dla zbrojenia zewnętrznego 0,5 mm (dla stali 0,3 mm),
- dla zbrojenia wewnętrznego 0,7 mm (dla stali 0,4 mm).

Na rysunkach 7, 8, 9 pokazano zależność obciążenie – ugięcie oraz obciążenie – szerokość rys w zależności od procentowego udziału włókien CFRP w prętach B/CFRP przy obciążeniu eksploatacyjnym dla różnych średnic zmodyfikowanych prętów i różnych stopni zbrojenia S1 8Ø8, S2 6Ø14 i S3 4Ø18.

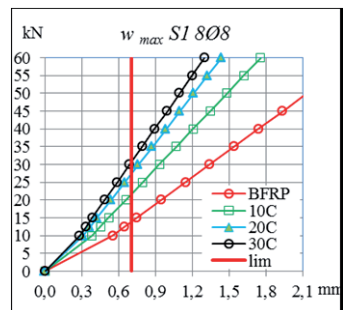


Rys. 6. Przykłady podprzestrzeni kompatybilności, wyznaczonej za pomocą programu ANCOMP, zdefiniowanej przez gwarantowaną wytrzymałość pręta HFRP na rozciąganie, f_{lug} , długość zakotwienia, l_e i wytrzymałość charakterystyczną betonu na ściskanie, f_{cc} pokazujące wpływ modułu sprężystości w przypadku prętów o średnicy $d_b=6$ mm (u góry) i $d_b=10$ mm (na dole); we wszystkich przypadkach $f_{cc}=40$ MPa, moduł sprężystości po lewej: $E_t = 23$ GPa, po prawej $E_t = 100$ GPa

a)



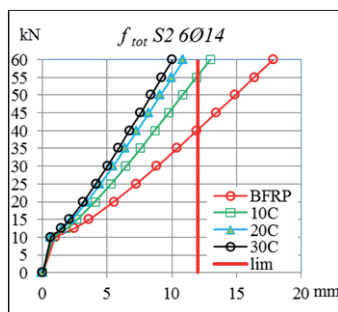
b)



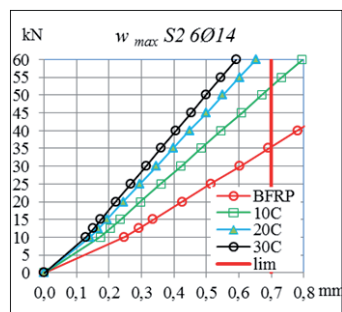
Rys. 7. Zestaw zbrojenia S1 8Ø8 a) zależność obciążenie – ugięcie; b) obciążenie – zarysowanie

W przypadku zestawu S1 w belkach ze zbrojeniem w postaci 8 prętów B/CFRP o średnicy 8 mm już przy 10% udziale CFRP następuje wzrost nośności (przy zachowaniu warunku ugięcia SGU) z 20 do 30 kN (o 50% więcej) i odpowiednio z 15 do 20 kN ze względu na szerokość rys. Dla zbrojenia o 30% udziale CFRP graniczna wartość ugięcia uzyskuje się przy obciążeniu $F=35$ kN (75% większym) niż w przypadku prętów BFRP. Natomiast szerokość graniczna rys osiągnięta jest przy obciążeniu dwukrotnie większym (z 15 kN do 30 kN).

a)



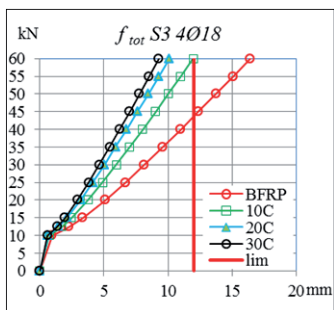
b)



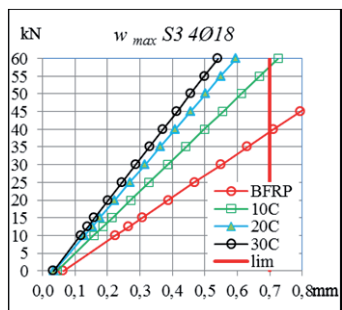
Rys. 8. Zestaw zbrojenia S2 6Ø14 a) obciążenie – ugięcie; b) obciążenie – zarysowanie

W przypadku zestawu S2 w belkach ze zbrojeniem w postaci 6 prętów B/CFRP o średnicy 14 mm już przy 10% udziale CFRP następuje wzrost nośności (przy zachowaniu warunku ugięcia SGU) z 40 do 55 kN (o 50% więcej) i odpowiednio z 35 do 50 kN ze względu na szerokość rys. Dla zbrojenia o 30% udziale CFRP, graniczną wartość ugięcia uzyskuje się przy obciążeniu $F=75$ kN (o 80% większym) niż w przypadku prętów BFRP. Natomiast szerokość graniczna rys osiągnięto przy obciążeniu dwukrotnie większym (z 35 kN do 75 kN).

a)



b)



Rys. 9. Zestaw zbrojenia S3 4Ø18 a) obciążenie – ugięcie; b) obciążenie – zarysowanie

W przypadku zestawu S3 w belkach ze zbrojeniem w postaci 4 prętów B/CFRP o średnicy 18 mm już przy 10% udziale CFRP następuje wzrost nośności (przy zachowaniu warunku ugięcia SGU) z 45 do 60 kN (o 30% więcej) i odpowiednio z 40 do 60 kN ze

względu na szerokość rys. Dla zbrojenia o 30% udziale CFRP graniczna wartość ugięcia uzyskuje się przy obciążeniu $F=80$ kN (80% większym) niż w przypadku prętów BFRP. Natomiast szerokość graniczna rys osiągnięto przy obciążeniu dwukrotnie większym (z 40 kN do 75 kN).

6. Wnioski

W przeprowadzonych badaniach stwierdzono, że w przeciwieństwie do bilinearnej zależności naprężenie – odkształcenie dla zbrojenia stalowego, zbrojenie BFRP wykazuje linearną zależność aż do wyczerpania nośności przekroju belki.

Z uwagi na relatywnie niższy moduł sprężystości prętów BFRP, w porównaniu do stali zarówno ugięcie, jak i szerokość rys może być głównym parametrem przy projektowaniu belek zbrojonych BFRP.

Odpowiednio dobrany skład materiałowy prętów B/CFRP, pozwala na znaczne zwiększenie sztywności z 60 GPa przy braku włókien CFRP w przecie, do 100 GPa przy 30% udziale CFRP w całkowitej masie prętów.

Zwiększona sztywność prętów B/CFRP umożliwia spełnienie wymagań SGU dotyczących ograniczenia ugięcia i zarysowania elementów betonowych nimi zbrojonych.

Literatura

- [1] ACI, 2006, *Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with FRP Bars*, ACI 440.1R-06, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2007.
- [2] Artemenko, S.E., *Polymer Composite Materials Made from Carbon, Basalt, and Glass Fibers. Structure and Properties*. Fiber Chemistry, 2003. 35(3): p. 226–229.
- [3] Bank L.C., *Structural design with FRP materials, Composite for Construction*, John Willey and Sons Ltd, 2006.
- [4] Bank Lawrence C., *Progressive Failure of FRP Composites for Construction*, 13-15 June, CICE2012, Rome 2012, 10 pp.
- [5] Barris C., Torres L., a , Miàs C. Vilanova I., *Design of FRP reinforced concrete beams for serviceability requirements*, Journal of Civil Engineering and Management, 2012, Vol.18 , No 6, pp. 843–857.
- [6] Bin Wei, Hailin Cao, Shenhua Song, *Tensile behavior contrast of basalt and glass fibers after chemical treatment*, Materials and Design 31 (2010) pp. 4244–4250.
- [7] Garbacz A., Urbański M., Łapko A.: BFRP bars as an alternative reinforcement of concrete structures – Compatibility and adhesion issues, *Advances Materials Research*, Trans Tech Publications, Switzerland, Vol. 1129 (2015), 233–241 pp.
- [8] Incotology Ltd. 2012. *Quality Certificates for Fabrics and Rovings.*, Bonn, January 2012.
- [9] Karbhari V.M., *Durability of composites for civil structural applications*. Woodhead Publishing Ltd, Cambridge, England, 2007.
- [10] Militky J.K., *Ultimate Mechanical Properties of Basalt Filaments*. Textile Research Journal, 1996. 66(4): p. 225–229.
- [11] Parnas R., Shaw M., *Basalt fiber reinforced polymer composites*, Project No. 03 – 7 NETCR63, 2007.
- [12] Rafi, M. M.; Nadjai, A.; Ali, F.; Talamona, D. 2008. *Aspects of behaviour of CFRP reinforced concrete beams in bending*, *Construction and Building Materials* 22(3): 277–285. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.08.014>
- [13] Sim, J., Park, Cheolwoo & Moon, Do Young, *Characteristics of basalt fiber as a strengthening material for concrete structures*. *Composites, Part B*, 2005. 36(6-7): p. 504–512.
- [14] Subramanian, R.V., *Basalt Fiber - A New Cost Mineral Fiber For Composites*. *Advanced Composites Technology - Conference on Advanced Composite Technology*, 1978.
- [15] Bischoff, P. H. 2005. *Reevaluation of deflection prediction for concrete beams reinforced with steel and fiber reinforced polymer bars*, *Journal of Structural Engineering* 131(5): 752–762. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2005\)131:5\(752\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2005)131:5(752))

- [16] CAN/CSA-S6-02,2002, *Design and Construction of Building Components with Fibre-Reinforced Polymers*, CAN/CSA S806-02, Canadian Standards Association, Rexdale, Ontario, Canada, 177 pp.
- [17] Clarke J. L., Sheard P., *Designing durable FRP reinforced concrete structures*, Proceedings of the 1st International Conference on Durability of Fiber Reinforced Polymer (FRP), Composites for Construction (CDCC 1998), Shearbrooke, Quebec, Canada, pp. 13–24.
- [18] O'Connor J., Hooks J. M., *U.S.A.'s experience using fiber reinforced polymer (FRP) composite bridge decks to extend bridge service life*, FHWA' Virtual Team.
- [19] fib Bulletin 40 / 2007, *FRP reinforcement in RC structures, technical report*. International Federation for Structural Concrete (fib), September 2007, 160p.
- [20] *fib Model Code 2010 Final Draft*, International Federation for Structural Concrete (fib), 2011, 653p.
- [21] Gribniak, V.; Kaklauskas, G.; Cygas, D.; Bacinskas, D.; Kupliauskas, ; Sokolov, A. 2010. *Investigation of concrete cracking effect in deck slab of continuous bridges*, The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering 5(2): 83–88. <http://dx.doi.org/10.3846/bjrbe.2010.12>
- [22] Hau Yan Leung, *Flexural capacity of concrete beams reinforced with steel and fibre reinforced polymer (FRP) bars*, Journal of Civil Engineering and Management, 2004, Vol.10 , No 3, pp. 209–215.
- [23] Hollaway L., *Polymer Composites for Civil and Structural Engineering*, first edition, Blackie Academic and Profession, 1993.
- [24] Kaklauskas, G.; Gribniak, V.; Jakubovskis, R.; Gudonis, E.; Salys, D.; Kupliauskas, R. 2012. *Serviceability analysis of flexural reinforced concrete members*, Journal of Civil Engineering and Management 18:24-29,
- [25] Łapko A., Urbański M.: *Problemy badania betonowych elementów zginanych zbrojonych prętami bazaltowymi*, Materiały Budowlane, 2013/3.
- [26] Mossakowski P., Garbacz A., Radomski W. *Alternatywne zbrojenie betonu kompozytami FRP – zagadnienie kompatybilności*, Dni betonu 2014, str. 1–11.
- [27] Subramanian, R.V., Tang, T. J. Y. and Austin, H. F., *Reinforcement of Polymers By Basalt Fibers*. SAMPE Quarterly, 1977: p. 1–10.
- [28] Tomosawa F., Nakatsuji T., *Evaluation of ACM reinforcement durability by exposure tests*, Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures, Proceedings of 3rd International Symposium, Sapporo 1997, Vol.2, pp. 75–82.
- [29] Van de Velde K., Kiekens P., Van Langenhove L. Cater, S., *Basalt fibers as reinforcement for composites*, Editorial. International Composites News, March 2002.
- [30] Urbanski M., Lapko A., *Problemy badania betonowych elementów zginanych zbrojonych prętami bazaltowymi*, Materiały Budowlane, 2013/3.
- [31] Urbański M., Łapko A., Garbacz A.: *Investigation on Concrete Beams Reinforced with Basalt Rebars as an Effective Alternative of Conventional R/C Structures*, Procedia Engineering, Elsevier, Science Direct, Vol.57, May 2013, 1183–1191pp.
- [32] Wu Zhishen, Wang Xin, Wu Gang, *Advancement of Structural Safety and Sustainability with Basalt Fiber Reinforced Polymers*, 13-15 June, CICE2012, Rome 2012, 29 pp.