

Przyczynek do oceny stanu zarysowania belek z betonu zbrojonego prętami BFRP

Marek Urbański¹, Andrzej Łapko²

¹ *Instytut Inżynierii Budowlanej, Wydział Inżynierii Lądowej, Politechnika Warszawska,
e-mail: m.urbański@il.pw.edu.pl*

² *Katedra Konstrukcji Budowlanych, Wydział Budownictwa i Środowiska, Politechnika Białostocka,
e-mail: lapko@pb.białystok.pl*

Streszczenie: W pracy przedstawiono analizę porównawczą doświadczalnych i obliczonych teoretycznie szerokości rys w jednoprzęsłowych belkach swobodnie podpartych zbrojonych prętami bazaltowymi BFRP (Basalt Fibre Reinforced Polymers). Belki typu BFRP wykonano z betonu C30/37 ze zbrojeniem dolnym na zginanie prętami bazaltowymi o średnicy 8 mm, dodatkowo wykonano belki referencyjne ze zbrojeniem stalowym tej samej średnicy. Badano ugięcia i zarysowania oraz nośność belek zbrojonych prętami BFRP, o cechach wytrzymałościowych określonych w testach na rozciąganie. Wykazano, że znacznie zredukowana sztywność elementów zbrojonych prętami bazaltowymi BFRP wywołuje kilkakrotnie większe szerokości rys w porównaniu z belkami zbrojonymi prętami stalowymi o tym samym przekroju poprzecznym.

Słowa kluczowe: BFRP, sztywność na zginanie, beton, pręty BFRP, zarysowanie

1. Wprowadzenie

W II połowie XX wieku następowała ewolucja materiałów kompozytowych na bazie FRP (Fiber Reinforced Polymer). Początkowo materiały te znajdowały zastosowanie w przemyśle obronnym i kosmicznym, stopniowo, w przeciągu ostatnich 30 lat, znajdują zastosowanie w konstrukcjach budowlanych. Materiały kompozytowe na bazie włókien FRP w znaczącym stopniu zwiększyły rentowność ekonomiczną i konstrukcyjną materiałów budowlanych służących do wznoszenia budynków i mostów [ACI 440, 1]; [Bank 2006, 2].

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

W porównaniu do zbrojenia stalowego, a także innych włókien FRP, takich jak: szklane włókna GFRP (Glass Fiber Reinforced Polymer), węglowe włókna CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer), włókna bazaltowe BFRP (Basalt Fiber Reinforced Polymer) wykazują wiele istotnych zalet.

Żywotność płyt betonowych ze zbrojeniem stalowym, stosowanych w mostach zwykle przewiduje się na 25 lat. Natomiast żywotność płyt z udziałem zbrojenia FRP najczęściej przewiduje się na co najmniej 75 lat (tj. okres użytkowania mostu) [Wu Z. *et al.* 2012, 3].

Pręty bazaltowe FRP są nowym materiałem, których właściwości mechaniczne nie zostały w pełni określone. Ze względu na odmienną anizotropową budowę materiałów kompozytowych w stosunku do izotropowego zbrojenia stalowego należy uwzględnić zmodyfikowane relacje naprężeniowo – odkształceniowe.

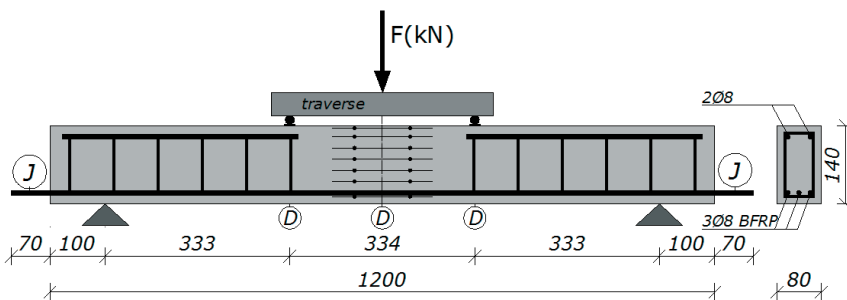
Moduł sprężystości prętów bazaltowych jest około 5 razy mniejszy od modułu sprężystości prętów stalowych, co skutkuje znacznie większą redukcją sztywności przekroju belki zbrojonej prętami bazaltowymi po zarysowaniu [4]. W belkach zginanych udział betonu w usztywnieniu elementu na odcinku między rysami uzależniona jest od efektu tension stiffening [Branson 1997, 5] [fib Bulletin 40, 6]. Moment bezwładności przekroju po zarysowaniu w belkach ze zbrojeniem bazaltowym jest około 4 razy mniejszy od analogicznego w belkach ze zbrojeniem stalowym [4]. W efekcie w stanie granicznym nośności (SGU) obserwuje się znacznie wyższe wartości ugięć oraz szerokości rys, w porównaniu do belek żelbetowych [Bank L. C. 2012, 3].

2. Badania wstępne belek modelowych BFRP

Na Politechnice Warszawskiej rozpoczęto badania nad efektywnością zastosowania prętów bazaltowych do zbrojenia zginanych konstrukcji z betonu. Podstawowym celem badań było określenie głównych właściwości mechanicznych prętów zbrojeniowych wytworzonych z włókien bazaltowych BFRP oraz określenie ich przydatności jako zbrojenia belek poddanych obciążeniu wywołującemu zginanie. Określenie właściwości mechanicznych prętów BFRP o średnicy 8 mm polegało na ustaleniu wytrzymałości na rozciąganie, odkształcenia granicznego przy zerwaniu, średniego modułu sprężystości, a także ustaleniu granicznych naprężeń przyczepności pomiędzy prętami zbrojenia i otaczającym je betonem. W programie badań przewidziano badanie na zginanie 3 betonowych belek modelowych ($f_{cm}=41$ MPa, $E_{cm}=33,4$ GPa) ze zbrojeniem dolnym w postaci 3 prętów BFRP o średnicy 8 mm ($f_i=1050$ MPa, $E_f=39$ GPa) oraz, dla porównania, badanie na zginanie 3 belek referencyjnych ze zbrojeniem dolnym tradycyjnym w postaci 3 prętów stalowych ($f_y=348$ MPa- test , $E_s=200$ GPa). Wszystkie badane belki miały wymiary $b \times h \times L = 80 \times 140 \times 1200$ mm.

Pozostałe szczegóły rozmieszczenia zbrojenia oraz pomierzonych odkształceń przedstawiono w artykule [4].

Poniżej na rys. 1 przedstawiono schemat badanej belki zbrojonej prętami BFRP.

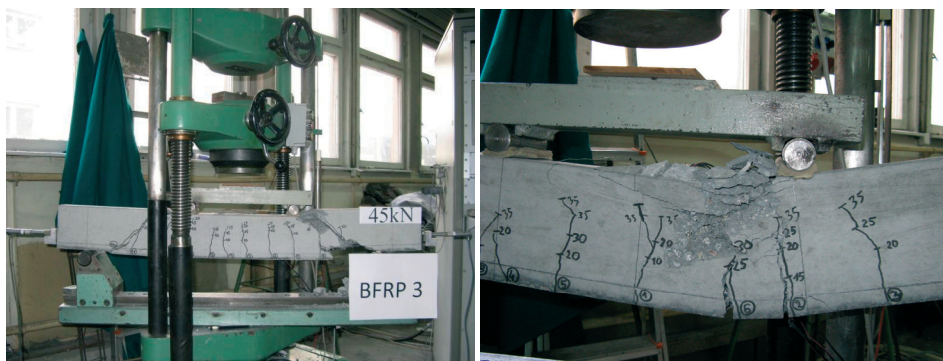


Rys. 1. Belka ze zbrojeniem prętami bazaltowymi (BFRP) z zaznaczonymi reperami pomiaru odkształceń przy użyciu ekstensometru, J – czujnik do pomiaru poślizgu, D – czujniki pomiaru ugięć, wymiary w mm

Układ zbrojenia belek referencyjnych (wyłącznie zbrojonych prętami stalowymi) był identyczny jak belek ze zbrojeniem BFRP.

Obciążenie było przenoszane przez wykonany z dwuteownika stalowego trawers, w dwóch punktach, odpowiednio w 1/3 i 2/3 rozpiętości w świetle belki.

W pierwszym cyklu belki obciążano siłą do 10 kN, a następnie odciążano do 5 kN. W drugim cyklu obciążano siłą do 20 kN, a następnie odciążano do 5 kN. W trzecim cyklu obciążano belki aż do zniszczenia.



Rys.2. Belka ze zbrojeniem bazaltowym BFRP pod obciążeniem 45 kN wyczerpującym nośność [4] oraz belka ze zbrojeniem tradycyjnym stalowym SRC pod obciążeniem 35 kN wyczerpującym nośność

Na rys. 2, z lewej strony pokazano belkę w końcowej fazie obciążenia poddaną obciążeniu 45 kN. Na zdjęciu widoczny jest sposób zniszczenia na skutek przekształcenia się belki w system ciągnowy. Godnym uwagi jest fakt, że nie doszło do zerwania prętów dolnego zbrojenia bazaltowego, a zatem nie została wyczerpana nośność zbrojenia na rozciąganie. Zniszczenie nastąpiło poprzez ściecie stref przypodporowych belki. Jednak zniszczenie nie było gwałtowne ze względu na zachowaną ciągłość zbrojenia bazaltowego.

Tabela 1. Wartości obciążeń, odkształceń jednostkowych w przekrojach i momentów niszczących

Lp.		Zbrojenie stalowe			Zbrojenie bazaltowe		
		SRC1	SRC2	SRC3	BFRP1	BFRP2	BFRP3
1	$F_{u,s}$, kN	37,5	35,0	40,5	47,5	47,5	45,0
2	$F_{u,ave}$, kN		37,6			46,7	
3	ε_1 , ‰	-1,58	-2,17	-2,02	-1,78	-2,60	-3,25
4	ε_7 , ‰	4,18	5,69	6,52	9,43	13,60	7,76
5	$M_{R,fl}$, kNm	6,3	5,8	6,8	7,9	7,9	7,5
6	$M_{R,fl,ave}$ kNm		6,3			7,8	

W tabeli 1 przedstawiono wyniki nośności belek (niszczącej siły obciążającej F_u i momentu niszczącego $M_{R,fl}$ przenoszonych przez przekrój krytyczny belek oraz odpowiednio średnie wartości $F_{u,ave}$ i $M_{R,fl,ave}$) belek z prętami bazaltowymi (BFRP) o średnicy 8 mm oraz belek referencyjnych (SRC) z prętami stalowymi o identycznej średnicy.

Ponadto podano dodatkowo wartości odkształceń w betonie belek: ε_1 na krawędziach górnych oraz ε_7 w odległości 20 mm od dolnych krawędzi belek (na poziomie zginania). Dla belek ze zbrojeniem stalowym ostatnie odczyty wykonano przy obciążeniu 35kN; dla belek ze zbrojeniem bazaltowym ostatnie odczyty dla belek o numerach 1, 2 i 3 zarejestrowano odpowiednio przy obciążeniu 35kN, 40kN i 45kN.

3. Badania wstępne belek modelowych BFRP

3.1. Wyniki badań zarysowania belek

Rozstaw rys w belce jest parametrem bezpośrednio wpływającym na szerokość rys, a właściwa ocena tej wielkości decyduje o wyznaczeniu szerokości rys.

W belkach ze zbrojeniem bazaltowym zmierzono rozstaw pionowych rys w strefie środkowej belki (obszar czystego zginania) przy narastających poziomach obciążenia. W tabeli 2 pokazano wartości rozstawu rys przy poziomym obciążeniu, w którym nastąpiła stabilizacja zarysowania.

Tabela 2. Średni ($s_{r,m}$), minimalny ($s_{r,min}$) i maksymalny ($s_{r,max}$) rozstaw rys oraz procentowy stopień obciążenia, przy którym nastąpiła stabilizacja rys (F_{sta}) do obciążenia niszczącego (F_u) w belkach typu (BFRP) oraz (SRC)

Lp.		Zbrojenie stalowe			Zbrojenie bazaltowe BFRP		
		SRC1	SRC2	SRC3	BFRP1	BFRP2	BFRP3
1	$s_{r,m}$ [mm]	80	62	78	58	73	70
2	$s_{r,min}$ [mm]	58	20	53	38	45	52
3	$s_{r,max}$ [mm]	113	80	99	92	89	78
4	$s_{r,min} / s_{r,m}$	0,73	0,32	0,68	0,66	0,62	0,74
5	$s_{r,max} / s_{r,m}$	1,41	1,29	1,27	1,59	1,22	1,11
6	$F_{sta} (\%F_u)$	53,6	57,1	61,7	21,6	31,6	22,2

Rozstaw rys dla belek ze zbrojeniem BFRP wyniósł od 38 do 94 mm. Poziom obciążenia, przy którym nastąpiła stabilizacja rys stanowił od 21,6% do 31,6% obciążenia niszczącego, a jego średnia wartość 25,1% F_u . Stosunek minimalnego rozstawu rys do średniego wyniósł od 0,62 do 0,74 (średnio 0,67). Natomiast stosunek maksymalnego do średniego rozstawu rys wyniósł od 1,11 do 1,59 (średnio 1,31). Z badań w literaturze dotyczących belek żelbetowych iloraz $s_{r,min} / s_{r,m}$ wynosi od 0,67 do 0,77 ($s_{r,m}$ jest od 1,30 do 1,49 razy większe od $s_{r,min}$). Ponadto oczekuje się, że $s_{r,max} / s_{r,m}$ wynosi od 1,33 do 1,54 [Borosnyoi, 7]. Średnia wartość ilorazu maksymalnego do minimalnego rozstawu rys dla belek BFRP wynosi 1,96 [Borosnyoi, 7], co jest zgodne z wartością określaną dla elementów zbrojonych prętami stalowymi.

W tabeli 3 przedstawiono wartości maksymalnych szerokości rys (na odcinku występowania stałego momentu) dla belek zbrojonych prętami BFRP oraz prętami stalowymi.

Tabela 3. Maksymalna szerokość rys [mm] w belkach ze zbrojeniem prętami bazaltowymi (BFRP) oraz w belkach zbrojonych prętami stalowymi (SRC)

Lp.	Obciążenie kN	Zbrojenie stalowe			Zbrojenie bazaltowe BFRP		
		SRC1	SRC2	SRC3	BFRP1	BFRP2	BFRP3
1	5	0,06	0,04	0,04	0,15	0,18	0,15
2	10	0,08	0,05	0,05	0,25	0,23	0,25
3	20	0,10	0,05	0,10	0,40	0,45	0,45
4	30	0,20	0,12	0,20	1,10	0,71	0,72

Maksymalna szerokość rys w belkach BFRP przy poziomie obciążenia 30 kN stanowiącym 67% obciążenia niszczącego, wyniosła średnio 0,84 mm i była 5 krotnie większa od maksymalnej szerokości rys w belkach żelbetowych.

Tabela 4. Średnia (w_m), minimalna (w_{min}) i maksymalna (w_{max}) szerokość rys (mm) w belkach BFRP i SRC

Lp.		Zbrojenie stalowe			Zbrojenie bazaltowe BFRP		
		SRC1	SRC2	SRC3	BFRP1	BFRP2	BFRP3
1	w_m	0,11	0,11	0,13	0,64	0,50	0,54
2	w_{min}	0,05	0,07	0,07	0,50	0,30	0,40
3	w_{max}	0,20	0,12	0,20	1,10	0,71	0,72
4	w_{min} / w_m	0,50	0,64	0,54	0,78	0,60	0,74
5	w_{max} / w_m	1,82	1,10	1,27	1,72	1,42	1,33

Stosunek minimalnej do średniej szerokości rys wyniósł od 0,60 do 0,78 (średnio 0,71). Stosunek maksymalnej do średniej szerokości rys wyniósł od 1,33 do 1,72 (średnio 1,49).

3.2. Obliczanie szerokości rys w zginanych belkach zbrojonych prętami bazaltowymi

Elementy zbrojone prętami BFRP cechują się małą sztywnością po zarysowaniu. Na przykład, zastąpienie zbrojenia stalowego zbrojeniem bazaltowym o porównywalnym polu przekroju prowadzi do zwiększenia szerokości rys w belce betonowej. Zatem warunki SGU odgrywają decydującą rolę w projektowaniu ze względu na większe ugięcia. Ze względu na różnicę pomiędzy właściwościami zbrojenia stalowego i BFRP powinny zostać zmodyfikowane warunki określania szerokości rys.

Zbrojenie bazaltowe BFRP jest odporne na korozję, zatem graniczne wartości szerokości rys mogą być zwiększone w stosunku do belek zbrojonych prętami stalowymi. W Eurokodzie 2 [8] odnośnie do belek zbrojonych stałą zakłada się ograniczenie szerokości rys odpowiednio do 0,3 mm i 0,4 mm, zależnie od klasy ekspozycji środowiska. W normie ACI 318-08 [9] sugeruje się te same wartości, odpowiednio dla zewnętrznej i wewnętrznej ekspozycji elementów. W elementach zbrojonych prętami bazaltowymi, zalecenia FRP – ISIS (Intelligent Sensing for Innovative Structures, Canada Design Manual 3, 2001) [10] zezwalają na przyjmowanie dopuszczalnej szerokości rys nawet do 0,5 mm oraz 0,7 mm, odpowiednio dla zewnętrznej i wewnętrznej ekspozycji konstrukcji.

Szerokość rys w_k wg EC2 (2004) [8] można obliczać wg wzorów (1-2)

$$w_k = s_{r,max} (\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}) \quad (1)$$

$$s_{r,max} = 3,4c + 0,425 \cdot k_1 \cdot k_2 (\phi / \rho_{p,eff}) \quad (2)$$

gdzie $s_{r,max}$ – maksymalny rozstaw rys, ε_{sm} – średnie odkształcenie zbrojenia, ε_{cm} – średnie odkształcenie betonu na odcinku między rysami, c – grubość otuliny zbrojenia, k_1 – współczynnik zależny od przyczepności zbrojenia ($k_1 = 0,8$ dla prętów o wysokiej przyczepności, $k_1=1,6$ dla prętów gładkich), k_2 – współczynnik zależny od rozdziału naprężeń ($k_2=0,5$ dla zginania, $k_2=1$ dla rozciągania), $\rho_{p,eff}$ – efektywny stopień zbrojenia obliczany na powierzchnię betonu otaczającego zbrojenie.

Maksymalna szerokość rys w podana w normie ACI 440.1R [2] jest niezależna od rodzaju zbrojenia (stalowe lub niemetaliczne FRP), z wyjątkiem konieczności określenia warunku przyczepności reprezentowanego we wzorze (4) przez współczynnik k_b . Maksymalna szerokość rysy w elementach zbrojonych FRP może być obliczana ze wzoru (3)

$$w = 2 \frac{f_f}{E_f} \beta \cdot k_b \sqrt{d_c^2 + \left(\frac{s}{2}\right)^2} \quad (3)$$

gdzie f_f – naprężenie w zbrojeniu (MPa), E_f – moduł sprężystości (MPa), β – stosunek różnicy między wysokością elementu a wysokością strefy ściskanej do różnicy między wysokością użyteczną przekroju elementu a wysokością strefy ściskanej, d_c – odległość od powierzchni rozciąganej belki do środka ciężkości najbliższego pręta, s – rozstaw prętów.

Współczynnik przyczepności k_b dla prętów FRP zależy od technologii produkcji, typu FRP, właściwości żywicy spajającej włókna FRP oraz rodzaju powierzchni pręta. Wartość k_b waha się od 0,60 do 1,72; średnio wynosi 1,10. Jeśli nie są dostępne dane doświadczalne, należy przyjmować wartość $k_b=1,4$, która jest wielkością konserwatywną.

Metoda obliczania szerokości rys według ISIS, (Canada Design Manual 3) [10] oparta jest na zmodyfikowanej zależności Gergely – Lutza [11], stosowanej w elementach żelbetowych. Dla elementów zbrojonych prętami FRP konieczne jest ustalenie parametrów przyczepności pomiędzy prętami FRP a otaczającym je betonem. Równanie (4) przedstawia wzór na maksymalną szerokość rysy:

$$w = 2,2k_b \cdot \frac{f_{frp}}{E_{frp}} \cdot \beta \cdot \sqrt[3]{d_c A} \quad (4)$$

gdzie w – szerokość rysy w mm, k_b – współczynnik przyczepności (dla prętów FRP mających przyczepność podobną do betonu $k_b=1$, dla prętów z przyczepnością mniejszą $k_b > 1$; dla prętów z większą przyczepnością $k_b < 1$; jeśli jest brak danych - należy przyjmować $k_b = 1,2$), f_{frp} – naprężenia w pręcie w miejscu zarysowania, E_{frp} – moduł sprężystości pręta FRP, β – stosunek różnicy między wysokością elementu a wysokością strefy ściskanej do różnicy między wysokością użyteczną przekroju elementu a wysokością strefy ściskanej, d_c – odległość od powierzchni rozciąganej do środka ciężkości najbliższego pręta (mm), A – efektywna powierzchnia rozciąganego betonu otaczająca zbrojenie (w odległości d_c licząc od środka ciężkości zbrojenia) podzielona przez liczbę prętów FRP (mm²).

Zgodnie z JSCE Standard Specification [12] szerokość rys może być obliczona ze wzoru (5)

$$w = k \left[4c + 0,7(c_f - \phi) \right] \frac{\sigma_f}{E_f} \quad (5)$$

gdzie: k – współczynnik przyczepności prętów FRP do betonu (przyjmowany w zakresie od 1 do 1,3), c – otulina betonu w (mm), c_f – rozstaw prętów pomiędzy środkami ciężkości prętów w (mm), ϕ – średnica pręta w (mm), σ_f – naprężenia w zbrojeniu (MPa), E_f – moduł sprężystości zbrojenia (MPa).

Współczynniki uwzględniające przyczepność betonu do zbrojenia k_1 w normie EC2 (2004) [8], k_b w normie ACI 440.1R [2] i w ISIS (Canada Design Manual 3) [10] oraz k w JSCE Standard Specification [12] powinny być przedmiotem weryfikacji uwzględniającej charakterystykę przyczepności prętów bazaltowych BFRP.

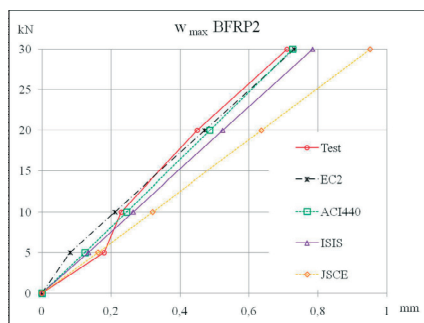
3.3. Porównanie teoretycznych i doświadczalnych szerokości rys

Na podstawie wymienionych wyżej metod na rys.3 przedstawiono dla zbadanych belek graficzne zależności szerokości rys od poziomu obciążenia określone według norm: EC2 [8], ACI 440 [9], ISIS [10] oraz JSCE [12]. Na rys. 4 porównano doświadczalne i określone teoretycznie szerokości rys w relacji do poziomu obciążenia.

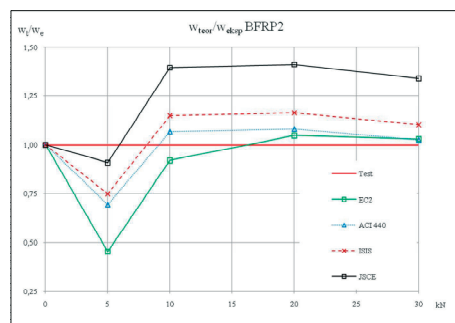
W zakresie obciążeń od 0 – 10 kN wszystkie przedstawione modele obliczania szerokości rys dają wartości zaniżone w porównaniu do wartości doświadczalnych. Na rys.3 i 4 można zauważyć skokową zmianę eksperymentalnie określonej szerokości rys, co jest wynikiem spadku sztywności belki po zarysowaniu. Teoretyczne wartości szerokości rys (w obszarze występowania stałego momentu zginającego) obliczone na podstawie opisanych metod wykazują wartości zawyżone w zakresie obciążenia od 10 – 30kN. Niemniej jednak, w zakresie obciążeń od 10 do 30 kN, obliczona szerokość rys jest większa od wartości doświadczalnych maksymalnie o 8% wg ACI 440 1R oraz o 16% wg wzoru ISIS Canada. Szerokość rys obliczona wg JSCE w tym samym zakresie jest większa od testowych o 41% i znacznie odbiega od wartości akceptowanych. Niemniej jednak, w całym zakresie obciążenia, szerokość rys wg JSCE daje wartości większe od testowych.

Należy zaznaczyć, że zarówno norma ACI 440 jak i ISIS dają możliwość kalibracji wyników szerokości rys przy uwzględnieniu współczynnika przyczepności k_b .

Na podstawie skorygowanych według metody ACI 440 współczynników $k_b=1,0 - 1,05$ ($w_{teor}/w_{eksp}=1,02 - 1,08$), oraz $k_b=0,90 - 0,95$ ($w_{teor}/w_{eksp}=1,00-1,06$) otrzymano zadawalającą zbieżność pomiędzy szerokością rys określoną teoretycznie i eksperymentalnie. Znaczące różnice szerokości rys, określone wg wymienionych metod wynikają także z odmiennej ocyeny efektywnej wysokości rozciąganej strefy betonu wokół prętów zbrojenia.



Rys.3. Teoretyczna i testowa zależność szerokości rys od obciążenia dla belek ze zbrojeniem bazaltowym (BFRP) wg rozpatrywanych modeli obliczeniowych



Rys.4. Porównanie teoretycznych i testowych szerokości rys w funkcji obciążenia dla belek ze zbrojeniem BFRP wg rozpatrywanych modeli obliczeniowych

4. Wnioski

1. Stabilizacja rys w badanych belkach BFRP wystąpiła przy niższym poziomie obciążenia niż w belkach zbrojonych stalą (25,1% wobec 57,5% obciążenia niszczonego).
2. Stosunek minimalnego do średniego rozstawu rys w badanych belkach BFRP wyniósł 0,68; natomiast stosunek maksymalnego do średniego rozstawu rys wyniósł 1,31, co jest zgodne z wartościami dotyczącymi belek żelbetowych.
3. Stosunek minimalnej do średniej szerokości rys w testowych belkach BFRP wyniósł średnio 0,71, natomiast stosunek maksymalnej do średniej szerokości rys wyniósł średnio 1,49. Wartości te są zbliżone z analogicznymi stosunkami rozstawu rys testowanych belek BFRP. Maksymalna szerokość rys w belkach BFRP wyniosła średnio 0,84 mm i była 5-cio krotnie większa od maksymalnej szerokości rys w belkach żelbetowych.
4. W zakresie obciążeń od 10 do 30 kN (20 do 67% siły niszczonej) obliczona szerokość rys wg ISIS Canada okazała się większa od wartości doświadczalnych maksymalnie o 16%, natomiast obliczona w tym zakresie szerokość rys wg JSCE była większa o 41% od szerokości określonych doświadczalnie i znacznie odbiegała od wartości akceptowanych.
5. Przyjęte wg metody ACI 440 1R współczynniki przyczepności k_b rzędu 1,0-1,05 pozwoliły wyznaczyć wartości ilorazu teoretycznej do eksperymentalnej szerokości rys w_{teor}/w_{eksp} w zakresie 1,02-1,08. Natomiast na podstawie współczynników k_b rzędu 0,90-0,95 wartości ilorazu w_{teor}/w_{eksp} okazały się w zakresie 1,00-1,06. Wartości te wykazały zadawalającą zbliżność określonej teoretycznie i eksperymentalnie szerokości rys.
6. Ze względu na większą trwałość belek ze zbrojeniem BFRP wymagania dotyczące szerokości granicznej rys mogą być złagodzone w przypadkach, kiedy estetyczny wygląd nie stanowi podstawowego problemu. Wszystkie parametry projektowania, które mają bezpośredni wpływ na deformacje belek BFRP po zarysowaniu, takie jak minimalna powierzchnia zbrojenia, maksymalna średnica prętów lub ich rozstaw, powinny być uwzględnione z uwagi na odmienne cechy fizyko - mechaniczne prętów BFRP.
7. Przeprowadzone badania i analizy wskazują na możliwość szerszego stosowania odpornego na korozję zbrojenia bazaltowego jako alternatywy zbrojenia stalowego w konstrukcjach inżynierskich.

Literatura

- 1 ACI 440.1R-06. 2006. Guide for the Design and Construction of Concrete Reinforced with FRP Bars. ACI Committee 440, American Concrete Institute, USA.
- 2 Bank Lawrence C., Progressive Failure of FRP Composites for Construction, 13-15 June, CICE2012, Rome 2012, 10 pp.
- 3 Wu Zhishen, Wang Xin, Wu Gang, 2012. Advancement of Structural Safety and Sustainability with Basalt Fiber Reinforced Polymers, 13-15 June, CICE2012, Rome 2012, 29 pp.
- 4 Urbanski M., Lapko 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, Volume 57, May 2013, 1183-1191.
- 5 Branson, D.E. Deformation of concrete structures. New York Mc Graw-Hill, 1997.
- 6 fib Bulletin 40/2007, *FRP reinforcement in RC structures, technical report*. International Federation for Structural Concrete (fib), September 2007.
- 7 Borosnyoi A. Serviceability of CFRP prestressed concrete beams. Budapest 2002.
- 8 Eurokod 2, PN-EN 1992-1-1: Projektowanie konstrukcji z betonu - Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków. PKN Warszawa 2008.
- 9 ACI 318-08. 2008. Building Code Requirements for Reinforced Concrete. ACI Committee 318, American Concrete Institute, Detroit, Michigan.
- 10 ISIS Canada. 2007. Reinforcing concrete structures with fiber reinforced polymers. Design manual N° 3 Version 2, Manitoba, Canada ISIS Canada Corporation.
- 11 Gergely P. Lutz L. Maximum Crack Width in Reinforced Flexural Members, ACI SP-20, Causes, Mechanism and Control of Cracking in Concrete, (1968), 87-117.
- 12 JSCE 1997 "Recommendation for Design and Construction and Construction of Concrete Structures Using Continuous Fiber Reinforcing Materials", Edited by Machida, Vol.23 JSCE, Tokyo, 1997.

On assessment of cracking of concrete beams reinforced with BFRP bars

Marek Urbański¹, Andrzej Lapko²

¹ *Institute of Building Engineering, Faculty of Civil Engineering, Warsaw University of Technology, e-mail: m.urbanski@il.pw.edu.pl*

² *Chair of Building Structures, Faculty of Civil & Environment Engineering, Bialystok University of Technology, e-mail: lapko@pb.bialystok.pl*

Abstract: This paper presents a comparative analysis of experimental and theoretical crack widths of simply supported beams reinforced with BFRP rebar (Basalt Fiber Reinforced Polymers). The tested BFRC model beams have been made of concrete class C30/37 and of bottom flexural basalt bars 8 mm in diameter. The reference RC beams with traditional flexural steel reinforcement have been additionally made of the same diameter. Beam deflections, concrete crack widths and strength capacity of beams reinforced with BFRP bars as well as with traditional steel bars have been registered. It has been shown that crack widths of beams reinforced with BFRP bars have been much (three to four times) higher than in the beams reinforced traditionally.

Keywords: BFRP, cross-sectional stiffness, concrete, basalt bars, cracking behavior