

DOŚWIADCZALNA I TEORETYCZNA ANALIZA SZTYWNOŚCI BELEK Z BETONU ZBROJONEGO NA ZGINANIE PRĘTAMI BAZALTOWYMI

Marek Urbański, Andrzej Łapko

Politechnika Warszawska, Warszawa

Streszczenie. W pracy przedstawiono analizę porównawczą wyznaczonych doświadczalnie i obliczonych sztywności na zginanie i ugięcie jednoprzęsłowych belek swobodnie podpartych zbrojonych prętami bazaltowymi BFRP (*Basalt Fibre Reinforced Polymers*). Belki typu BFRP wykonano z betonu C30/37 ze zbrojeniem w postaci prętów bazaltowych o średnicy 8 mm. Ponadto wykonano belki referencyjne ze zbrojeniem stalowym tej samej średnicy. Badano ugięcia i zarysowania oraz nośność belek. Stwierdzono, że ugięcia i szerokość rys w belkach zbrojonych prętami bazaltowymi są znacznie większe niż w belkach zbrojonych stalą.

Słowa kluczowe: BFRP, sztywność na zginanie, beton, pręty bazaltowe, ugięcie

WSTĘP

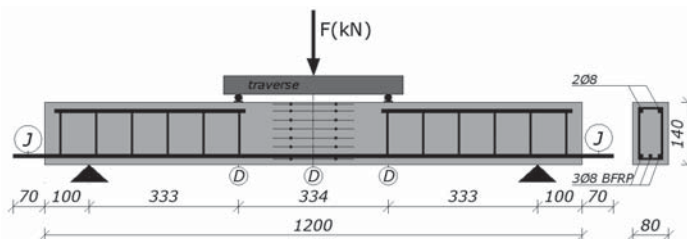
W II połowie XX wieku następował rozwój zastosowań materiałów kompozytowych na bazie FRP (*fiber reinforced polymer*). Początkowo materiały te znajdowały zastosowanie w przemyśle obronnym i kosmicznym, stopniowo w przeciągu ostatnich 30 lat znalazły zastosowanie w konstrukcjach budowlanych. Materiały kompozytowe na bazie włókien FRP znacząco ułatwiają montaż i zmniejszają koszty wznoszonych budynków i mostów [ACI 440.3R-06 2006, Bank, 2012]. Tam gdzie decydującą rolę w konstrukcjach inżynierii lądowej odgrywa wytrzymałość oraz odporność na czynniki środowiskowe, materiały kompozytowe na bazie FRP stały się rewelacyjnym zamiennikiem konwencjonalnego zbrojenia stalowego. 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. i in. 2012]. Pręty bazaltowe FRP są nowym materiałem, któ-

rego właściwości mechaniczne nie zostały w pełni rozpoznane. Moduł sprężystości prętów bazaltowych jest około 5 razy mniejszy od modułu sprężystości prętów stalowych, co skutkuje znacznie większym zmniejszeniem sztywności przekroju belki zbrojonej prętami bazaltowymi po zarysowaniu [Urbanski i in. 2013]. W belkach udział betonu w usztywnieniu przy rozciąganiu (przyczepność betonu i prętów zbrojenia pomiędzy rysami) uzależniona jest od efektu *tension stiffening* [Branson 1997, fib Bulletin 40, 2007]. Wpływ tego efektu zależy od stosunku momentu bezwładności przekroju elementu przed zarysowaniem do momentu bezwładności po zarysowaniu. Moment bezwładności przekroju po zarysowaniu w belkach ze zbrojeniem bazaltowym jest około 4 razy mniejszy od analogicznego w belkach ze zbrojeniem stalowym [Łapko i Urbanski 2014]. W rezultacie w fazie kontroli SGU obserwuje się znacznie większe wartości ugięć oraz większe szerokości rys [Bank 2012].

Podstawowym celem badań o charakterze doświadczalnym jest określenie przydatności prętów bazaltowych do zbrojenia elementów zginanych z betonu. Wyniki badań pozwalają na wysunięcie tezy, że zastosowanie prętów bazaltowych do zbrojenia zginanych elementów z betonu może mieć korzystny wpływ na trwałość, nośność i odkształcalność tych elementów pod obciążeniem krótkotrwałym i długotrwałym w porównaniu z belkami zbrojonymi prętami stalowymi.

METODYKA BADANIA BELEK MODELOWYCH BFRP

Na Politechnice Warszawskiej prowadzi się badania, których podstawowym celem jest określenie głównych właściwości mechanicznych prętów zbrojeniowych wytworzonych z włókien bazaltowych BFRP oraz określenie ich przydatności jako zbrojenia belek. W programie badań wstępnych przewidziano badanie na zginanie 3 belek modelowych ze zbrojeniem dolnym w postaci 3 prętów BFRP o średnicy 8 mm oraz, dla porównania, badanie na zginanie 3 belek referencyjnych ze zbrojeniem dolnym tradycyjnym w postaci 3 prętów stalowych. Wszystkie badane belki miały wymiary $b \times h \times L = 80 \times 140 \times 1200$ mm (rys. 1). Pozostałe szczegóły rozmieszczenia zbrojenia oraz pomierzonych odkształceń betonu przedstawiono w artykule Urbańskiego i innych [2013].

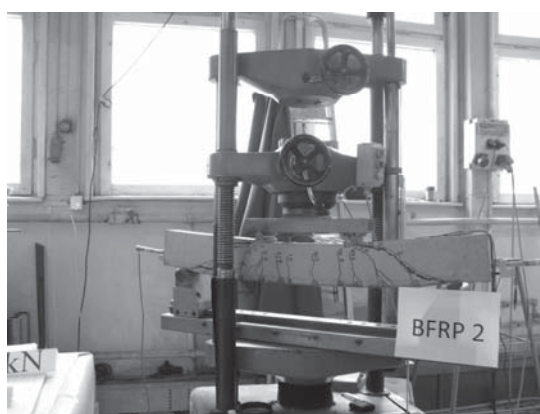


Rys. 1. Belka ze zbrojeniem dolnym w postaci prętów bazaltowych (BFRP) z zaznaczonym położeniem reperów do pomiaru odkształceń przy użyciu ekstensometru: *J* – czujnik do pomiaru poślizgu, *D* – czujniki do pomiaru ugięć, wymiary w mm

Fig. 1. Concrete beam with bottom reinforcement (BFRP bars) with visible distribution of benchmarks used to measure the strain with an extensometer: *J* – slip measurement sensor, *D* – deflection measurement sensor, dimensions in mm

Układ zbrojenia belek referencyjnych (wyłącznie zbrojonych prętami stalowymi) był identyczny jak belek ze zbrojeniem BFRP. W pierwszym cyklu belki obciążano siłą do 10 kN, a następnie odciążano do 5 kN. W drugim cyklu belki obciążano siłą do 20 kN, a następnie odciążano do 5 kN. W trzecim cyklu obciążano belki aż do zniszczenia.

Na rysunku 2 pokazano belkę w końcowej fazie obciążenia poddaną obciążeniu 45 kN. Na zdjęciu widoczny jest sposób zniszczenia na skutek przekształcenia się belki w system ciągnowy. Godny uwagi jest fakt, że nie doszło do zerwania prętów dolnego zbrojenia bazaltowego, a zatem nie została wyczerpana nośność zbrojenia na rozciąganie. Zniszczenie nastąpiło poprzez ścięcie stref przypodporowych belki i miało kruchy charakter. Niemniej jednak zniszczenie nie było gwałtowne ze względu na zachowaną ciągłość zbrojenia bazaltowego.



Rys. 2. Badana belka ze zbrojeniem BFRP po zniszczeniu [Lapko i Urbanski 2014]

Fig. 2. Tested beam with BFRP reinforcement after failure [Lapko and Urbanski 2014]

W tabeli 1 przedstawiono wyniki nośności belek (maksymalnej siły obciążającej (F_u) i momentu ($M_{R,fl}$) przenoszonych przez przekrój krytyczny oraz odpowiednio średnie wartości $F_{u,ave}$ i $M_{R,fl,ave}$) belek ze zbrojeniem bazaltowym o średnicy 8 mm (BFRP) na tle

Tabela 1. Porównanie nośności na zginanie belek ze zbrojeniem prętami BFRP i prętami stalowymi
Table 1. Beam flexural capacity of basalt reinforcement bars (BFRP) and steel (SRC)

Parametry Parameters	Zbrojenie stalowe Steel reinforcement			Zbrojenie bazaltowe Basalt reinforcement		
	SRC1	SRC2	SRC3	BFRP1	BFRP2	BFRP3
F_u [kN]	37,5	35,0	40,5	47,5	47,5	45,0
$F_{u,ave}$ [kN]		37,6			46,7	
ε_1 [‰]	-1,58	-2,17	-2,02	-1,78	-1,80	-2,60
ε_7 [‰]	4,18	5,69	6,52	9,43	10,73	6,75
$M_{R,fl}$ [kN·m]	6,3	5,8	6,8	7,9	7,9	7,5
$M_{R,fl,ave}$ [kN·m]		6,3			7,8	

ności belek referencyjnych ze zbrojeniem stalowym. Ponadto w tabeli 1 podano wartości odkształceń w betonie belek przy obciążeniu 35 kN: ε_1 – na krawędziach górnych belek, oraz ε_7 – w odległości 20 mm od dolnych krawędzi belek (na poziomie zbrojenia na zginanie). Dla belek ze zbrojeniem stalowym ostatnie odczyty odkształceń i ugięć wykonano przy obciążeniu 35 kN; dla belek ze zbrojeniem bazaltowym BFRP1, BFRP2, BFRP3 ostatnie odczyty wykonano odpowiednio przy obciążeniu 35, 45 i 40 kN.

WYNIKI PORÓWNIANIA UGIĘĆ TESTOWYCH Z MODELAMI ANALITYCZNYMI DLA BELEK ZBROJONYCH BFRP

Wyniki badań ugięcia belek

W tabeli 2 przedstawiono wartości ugięć belek (w środku rozpiętości belki) ze zbrojeniem bazaltowym (BFRP) oraz belek żelbetowych (SRC) w zależności od poziomu obciążenia.

Tabela 2. Ugięcia belek ze zbrojeniem prętami bazaltowymi (BFRP) oraz prętami stalowymi (SRC)

Table 2. Deflections of tested beams with basalt bars (BFRP) and steel bars (SRC)

Obciążenie [kN] Loading force	Ugięcie belki [mm] Beam deflection					
	SRC1	SRC2	SRC3	BFRP1	BFRP2	BFRP3
5	0,97	1,81	1,61	3,21	3,04	3,10
10	1,71	2,23	2,06	4,35	4,11	4,23
20	2,45	3,30	3,14	7,33	6,99	7,21
30	3,48	4,43	4,24	12,63	11,58	12,01
40	x	x	x	–	19,54	19,03

W belce referencyjnej SRC1 ugięcie różni się od dwóch pozostałych belek SRC ze względu na odmienny początkowy cykl obciążenia – odciążenia. W belce BFRP1 ugięcie w końcowej fazie nie zostało zmierzone ze względu na możliwość uszkodzenia czujników.

Teoretyczne obliczenie ugięcia belek ze zbrojeniem bazaltowym

W rzeczywistych warunkach belki są zwykle obciążone w taki sposób, że moment zginający zmienia się wzdłuż belki. Pociąga to za sobą zmianę normalnych naprężeń wzdłuż długości. W zależności od wielkości narastania naprężeń nie wszystkie przekroje będą zarysowane. Stąd niezarysowana część będzie uwzględniana w sztywności belki, a fragment zarysowany zostanie pominięty. Rzeczywista sztywność belki może więc być zawarta pomiędzy sztywnością brutto – początkową ($E_c I_g$) – a sztywnością po zarysowaniu ($E_c I_{cr}$). Rzeczywisty zmienny moment bezwładności wzdłuż długości belki można przedstawić za pomocą zastępczego momentu bezwładności (I_e), który nazwano efektywnym momentem bezwładności. Na podstawie określonego efektywnego momentu bezwładności można obliczyć wartości ugięcia zginanej belki.

Ocena efektywnego momentu bezwładności oparta jest na ustaleniach doświadczalnych. Ugięcia obliczone na podstawie I_e dają zadowalające wyniki, jeśli moment od obciążenia użytkowego jest większy od dwukrotności momentu rysującego przekrój (M_{cr}) [Ghali i Azarnejad 1999]. Początkowo w badaniach do obliczenia ugięć belek zbrojonych FRP stosowano normowy wzór [ACI 318-08, 2008] na efektywny moment bezwładności. Jednakże obliczane ugięcia nie wykazywały zgodności z danymi doświadczalnymi [Benmokrane i in. 1996]. Z tego powodu dla belek zbrojonych FRP podjęto próby modyfikacji wzoru, na podstawie którego określa się I_e . Zmodyfikowany wzór na I_e bazuje na założeniu, że rzeczywisty zmienny moment bezwładności wzdłuż długości belki można przedstawić za pomocą zastępczego momentu bezwładności, który nazwano efektywnym momentem bezwładności. Obliczone wartości ugięć w dużym stopniu zależą od właściwego ustalenia momentu rysującego oraz poziomu obciążenia [Mota i in. 2006]. Ze względu na znacznie mniejszą wartość modułu sprężystości zbrojenia BFRP w porównaniu ze zbrojeniem stalowym sztywność belki zmniejsza się znacznie po wystąpieniu zarysowania [CEN, Eurocod 2, 2004]. Skutkuje to zmniejszeniem się efektywnego momentu bezwładności do wartości niewiele większej od momentu bezwładności bezpośrednio po zarysowaniu.

Do obliczania ugięcia elementów żelbetowych w testach na zginanie 4-punktowe belkę można wykorzystać wzór, w którym I_e jest efektywnym momentem bezwładności:

$$\delta = \frac{P \cdot L_a}{96 \cdot E_c \cdot I_e} (3L^2 - 4L_a^2) + \frac{5}{384} \cdot \frac{g \cdot L^4}{E_c \cdot I_e} \quad (1)$$

We wzorze (1) P jest całkowitą siłą skupioną działającą na belkę (siła ta poprzez trawers obciąża belkę w dwóch punktach równo oddalonych od podpór), L_a – odległością od przyłożenia siły do podpory belki (tzw. długość ścinania), L – rozpiętością belki, g – ciężarem własnym belki, E_c – modułem sprężystości betonu, I_e – efektywnym modułem bezwładności po zarysowaniu przekroju belki.

CEN, Eurokod 2 (EC2) [2004] oraz Model Code 2010 (MC 2010) [fib Bulletin 56, 2010] dla belek zbrojonych prętami stalowymi proponują równanie ugięcia dla obciążeń krótkotrwałych oraz długotrwałych jako interpolację ugięcia przekroju przed zarysowaniem (δ_1) i po zarysowaniu (δ_2):

$$\delta_{\max} = \left[1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_a} \right)^2 \right] \cdot \delta_2 + \left[1 - \left(1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_a} \right)^2 \right) \right] \cdot \delta_1 \quad (2)$$

W równaniu (2) M_{cr} jest momentem zarysowania, a M_a – momentem przyłożonym do belki. MC 2010 proponuje do obliczania sztywności w stanie zarysowania równanie bez wpływu efektu *tension stiffening*, przy uwzględnieniu tylko zbrojenia rozciąganego:

$$(EI)_{II} = d^2 \left(1 - \frac{x}{d} \right) \left(1 - \frac{1}{3} \frac{x}{d} \right) A_f E_f \quad (3)$$

W ACI 440.1R-06 [2006] przyjęto równanie, będące modyfikacją równania Bransona, polegającą na wprowadzeniu parametru β_d zaproponowanego przez Yost i in. [2003]. (parametr β_d uwzględnia wpływ przyczepności zbrojenia BFRP do betonu i wartość modułu sprężystości prętów FRP):

$$I_e = \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^3 \cdot \beta_d \cdot I_g + \left[1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^3\right] \cdot I_{cr} \leq I_g \quad (4)$$

W równaniu (4) M_{cr} jest momentem zarysowania, M_a – momentem przyłożonym do belki, I_g – momentem bezwładności przekroju przed zarysowaniem bez uwzględnienia zbrojenia, I_{cr} – sprowadzonym momentem bezwładności przekroju po zarysowaniu.

W ACI 440.1R-06 [2006] parametr β_d uzależniono od stosunku ρ_f/ρ_{fb} , gdzie ρ_f jest stopniem zbrojenia, a ρ_{fb} – zrównoważonym stopniem zbrojenia:

$$\beta_d = \frac{1}{5} \cdot \frac{\rho_f}{\rho_{fb}} \leq 1 \quad (5)$$

W ISIS (*Intelligent Sensing for Innovative Structures*) [ISIS Canada 2007] zaproponowano na podstawie przeprowadzonych badań [Mota i in. 2006] równanie na efektywny moment bezwładności wyprowadzony z metody krzywizny:

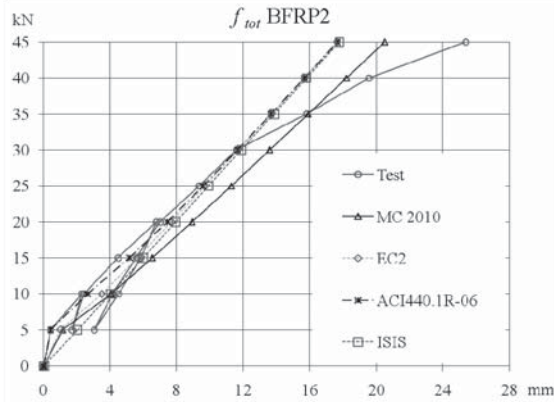
$$I_e = \frac{I_T \cdot I_{cr}}{I_{cr} + \left[1 - 0,5 \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^2\right] (I_T - I_{cr})} \quad (6)$$

W równaniu (6) I_T oraz I_{cr} oznaczają sprowadzone momenty bezwładności odpowiednio dla przekroju niezarysowanego i zarysowanego.

Porównanie ugięć teoretycznych i doświadczalnych

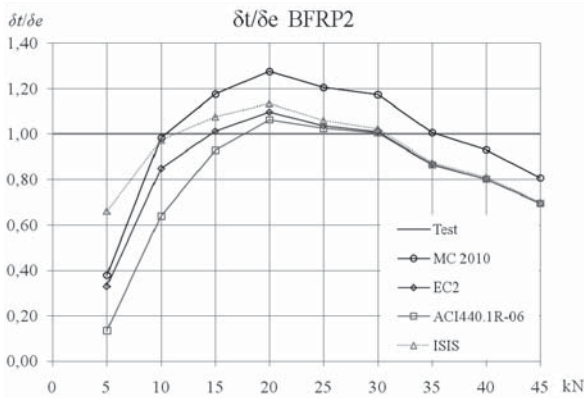
Wszystkie zbadane belki ze zbrojeniem bazaltowym uległy zniszczeniu poprzez zmiążdżenie betonu w części ściskanej przekroju. Ponieważ stopień zbrojenia belek zbrojonych prętami bazaltowymi (ρ_f) jest większy od stopnia równoważnego (ρ_{fb}), więc przekrój jest przezbrojony i zniszczenie następuje poprzez zmiążdżenie betonu w strefie ściskanej belki. W sytuacji gdy stopień zbrojenia belki ze zbrojeniem bazaltowym (ρ_f) jest mniejszy od stopnia równoważnego (ρ_{fb}), przekrój jest niedozbrojony, a zniszczenie belki następuje wskutek zerwania prętów BFRP. Na rysunku 3 pokazano oszacowanie ugięcia dla belek BFRP przy użyciu metod: MC 2010, EC2, ACI 440.1R-06 oraz ISIS. Na rysunku 4 przedstawiono porównanie ugięć teoretycznych z ugięciami testowymi belki BFRP2.

W pierwszym i drugim cyklu obciążenia ugięcia obliczone według ACI 440.1R-06 i EC2 wykazują lepszą zbieżność z ugięciami testowymi (są nieznacznie większe) niż ugięcia obliczone zgodnie z MC 2010 i ISIS. W trzecim cyklu obciążenia, w zakresie od 5 do 15 kN, wszystkie ugięcia teoretyczne są mniejsze od ugięć testowych, przy czym najmniejszą różnicę wykazuje równanie EC2 i równanie ISIS. Teoretyczne wartości ugięć obliczone na podstawie omówionych metod wykazują zbieżność z ugięciami testowymi w zakresie średnich obciążeń od 15 do 30 kN (32–63% obciążenia niszczącego). Natomiast w zakresie obciążeń od 35 do 40 kN (74–84% obciążenia niszczącego) ugięcia teoretyczne są mniejsze w porównaniu z ugięciami testowymi. Różnice te wynikają z metody



Rys. 3. Teoretyczne i eksperymentalne (MC 2010, EC2, ACI 440.1R-06, ISIS) zależności ugięcia od obciążenia

Fig. 3. Theoretical and experimental (MC 2010, EC2, ACI 440.1R-06, ISIS) load – deflection relationship



Rys. 4. Porównanie teoretycznych i testowych ugięć belki BFRP2 (dla 3. cyklu obciążenia)

Fig. 4. Comparison of theoretical and experimental deflections of BFRP2 beam (for the 3rd load cycle)

obliczania ugięć, która dotyczy tylko sprężystej fazy pracy belki. Przyczyną nieliniowego przyrostu ugięć (powyżej obciążenia 35 kN) jest uplastycznienie odkształceń w strefie ściskanej betonu na skutek przebrojenia belki. Bezpośrednio po zarysowaniu (od obciążenia rysującego $F_{cr} = 3,72$ kN do poziomu obciążenia 10 kN) metody obliczania ugięć są mało wiarygodne, a wartości ugięć teoretycznych w stosunku do ugięć testowych wykazują niedoszacowanie. Ugięcia teoretyczne są mniejsze od ugięć testowych od 13% (w przypadku równania ACI 440.1R-06), poprzez 33–38% przy zastosowaniu równania EC2 i MC 2010, do 66% (ISIS). Dla poziomu obciążeń w zakresie 10–15 kN (21–32% obciążenia niszczonego) ugięcia teoretyczne były mniejsze niż testowe o 34% w przypadku ACI 440.1R-06, o 15% w przypadku EC2 i tylko nieznacznie mniejsze (do 2–3%)

w przypadku obliczeń według wzoru podanego w MC 2010 oraz według wzoru podanego w normie ISIS. W zakresie poziomu obciążeń 20–30 kN (42–63% obciążenia niszczącego) ugięcia teoretyczne są większe niż testowe od 1% (obliczone według ACI 440.1R-06) do 28% (obliczone według MC 2010). W końcowej fazie obciążenia 35–45 kN (powyżej 74% obciążenia niszczącego) teoretyczne ugięcia obliczone na podstawie wszystkich omawianych metod są mniejsze od ugięć testowych od 19–30%.

WNIOSKI

1. Stwierdzono, że zbrojenie bazaltowe wykazuje liniową zależność naprężenie – odkształcenie aż do wyczerpania nośności przekroju belki.

2. Moduł sprężystości prętów bazaltowych jest znacznie mniejszy od modułu sprężystości stali. Z tego powodu ugięcia belek ze zbrojeniem BFRP okazały się znacznie większe od ugięć belek referencyjnych.

3. Dla belek przebrojonych obliczone wartości ugięć ze zmodyfikowanego równania Bransona (ACI 440.1R-06) są zdecydowanie zaniżone w stosunku do wyników doświadczalnych w początkowej fazie obciążenia (po 3 cyklach obciążenie – odciążenie). W przedziale obciążenia od 5 do 10 kN (10–21% siły niszczącej) różnica wynosi od 87 do 36%. W przypadku EC2 różnica ta wynosi od 67 do 15%, natomiast najlepszą zbieżność w tym zakresie obciążeń wykazują wartości ugięć obliczone na podstawie MC 2010 oraz ISIS (różnica wynosi od 62 do 2%).

4. Stosunkowo najlepszą zgodność obliczonych ugięć z wynikami doświadczalnymi w szerokim zakresie obciążeń od 15 do 30 kN (od 31 do 63% siły niszczącej) wykazują ugięcia obliczone na podstawie ACI 440.1R-06 i EC2 (do 10% większe od testowych). Natomiast ugięcia teoretyczne są większe od testowych do 14% w przypadku metody ISIS oraz do 28% w przypadku MC 2010.

5. W przedziale obciążeń 30–35 kN (od 63 do 74% siły niszczącej) jedynie ugięcia obliczone według MC 2010 są większe od testowych (od 17 do 1%). W końcowej fazie obciążenia 35–45 kN (od 74 do 95% siły niszczącej) ugięcia belek obliczone na podstawie wszystkich wymienionych metod są coraz mniejsze w stosunku do ugięć testowych odpowiednio od 13 do 30%. Wynika to ze sposobu obliczania ugięć jak dla sprężystej fazy pracy belki. W rzeczywistości w końcowej fazie obciążenia następuje uplastycznienie betonu w strefie ściskanej na skutek przebrojenia belki.

6. Przeprowadzone badania i analizy wskazują na możliwość szerokiego zastosowania odpornego na korozję zbrojenia bazaltowego jako alternatywy zbrojenia stalowego w konstrukcjach inżynierskich.

PIŚMIENNICTWO

- ACI 318-08., 2008. Building Code Requirements for Reinforced Concrete. ACI Committee 318, American Concrete Institute, Detroit, Michigan.
ACI 440.1R-06., 2006. Guide for the Design and Construction of Concrete Reinforced with FRP Bars. ACI Committee 440, American Concrete Institute, USA.

- Bank L.C., 2012. Progressive Failure of FRP Composites for Construction, 13–15 June, CICE2012, Rome 2012, 1–10.
- Benmokrane B., Chaallal O., Masmoudi R., 1996. Flexural Response of Concrete Beams Reinforced with FRP Reinforcing Bars. *ACI Structural Journal* 93, 1, 46–55.
- Branson D.E., 1997. Deformation of concrete structures. Mc Graw-Hill, New York.
- CEN 2004. Eurocode 2, 2008. PN-EN 1992-1-1. Projektowanie konstrukcji z betonu. Część 1–1: Reguły ogólne i reguły dla budynków.
- fib Bulletin 40, 2007. FRP reinforcement in RC structures, technical report. International Federation for Structural Concrete (fib).
- fib Bulletin 56, 2010. *fib* Model Code 2010. First complete draft. Volume 2. International Federation for Structural Concrete (fib).
- Ghali A., Azamejad A., 1999. Deflection Prediction of Members of Any Concrete Strength. *ACI Structural Journal* 96, 5, 807–816.
- ISIS Canada, 2007. Reinforcing concrete structures with fibre reinforced polymers. Design manual No 3 Version 2, Manitoba, Canada, ISIS Canada Corporation.
- Lapko A., Urbanski M., 2014. Experimental and theoretical analysis of concrete beams deflections reinforced with basalt rebar. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. ACME, Elsevier.
- Mota C., Alminar S., Svecova D., 2006. Critical Review of Deflection Formulas for FRP Reinforced Concrete. *ASCE Journal of Composites for Construction*, 183–194.
- Urbanski M., Lapko A., Garbacz A., 2013. Investigation on Concrete Beams Reinforced with Basalt Rebars as an Effective Alternative of Conventional R/C Structures. *Procedia Engineering*. Elsevier, Science Direct 57, 1183–1191.
- Yost J.R., Gross P., Dinehart D.W., 2003. Effective moment of inertia for glass fibre reinforced polymer reinforced concrete beams. *ACI Structural Journal* 100 (6), 732–739.
- Wu Z., Wang X., Wu G., 2012. Advancement of Structural Safety and Sustainability with Basalt Fiber Reinforced Polymers, 13–15 June, CICE2012, Rome 2012, 1–29.

EXPERIMENTAL AND THEORETICAL ANALYSIS OF STIFFNESS OF RC BEAMS WITH BASALT BARS

Abstract. This paper presents a comparative analysis of experimental and theoretical deflections 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 bottom traditional steel reinforcement have been made of the same diameter additionally. During the investigation there were registered beam deflections, concrete width cracks and strength capacity of BFRP reinforced beams diameter with the characteristic identified in strength tests in tension. It has been shown that much lesser cross-sectional stiffness of basalt BFRP bars produces higher deflections and crack widths compared to the beams reinforced with steel bars of the same cross-section.

Key words: BFRP, cross-sectional stiffness, concrete, basalt bars, deflection

Zaakceptowano do druku – Accepted for print: 25.08.2014