

# Zarysowanie i ugięcie belek żelbetowych wykonanych z drobnokruszywowego fibrokompozytu

Dr hab. inż. Wiesława Głodkowska, prof. PK, dr inż. Marek Ziarkiewicz,  
mgr inż. Marek Lehmann, Wydział Inżynierii Lądowej, Środowiska i Geodezji, Politechnika Koszalińska

## 1. Wprowadzenie

Jednym z rodzajów fibrobetonu jest drobnokruszowy kompozyt ze zbrojeniem rozproszonym na bazie piasku odpadowego (*Steel Fibre Reinforced Waste Sand Concrete* – SFRWSC) opracowany w Katedrze Konstrukcji Betonowych i Technologii Betonu Politechniki Koszalińskiej. Opracowanie tego kompozytu miało przede wszystkim na celu zagospodarowanie kruszywa drobnego, które stanowi odpad po procesie hydroklasyfikacji w lokalnych kopalniach kruszywa [1–3].

Dotychczas zrealizowano obszerny program badań cech fizykomechanicznych tego kompozytu [2, 4, 5]. Wykazano, iż dodatek włókien stalowych w istotny sposób poprawia m.in. wytrzymałość na rozciąganie i ściskanie, wytrzymałość na ścinanie, statyczny moduł sprężystości, mrozoodporność czy odporność na ścieranie. Wysokie parametry wytrzymałościowe kompozytu, zwłaszcza wytrzymałość na rozciąganie i wytrzymałości resztkowe sugerują, że materiał ten może być stosowany do wykonywania elementów konstrukcyjnych.

W artykule przedstawiono wybrane wyniki szerokiego programu badań, dotyczącego możliwości zastosowania opracowanego drobnokruszowego fibrokompozytu do wytwarzania elementów zginanych. Analizę ograniczono do eksperymentalnego i teoretycznego określenia maksymalnej szerokości rozwarcia rys oraz ugięć belek wykonanych z fibrokompozytu. Uzyskane wyniki badań pozwoliły na ocenę wybranych metod obliczeniowych.

## 2. Elementy próbne i metodyka badań

Skład, sposób wykonania i właściwości drobnokruszowego fibrokompozytu na bazie piasków odpadowych szczegółowo omówiono w pracach [1, 2, 4]. Charakterystykę elementów próbnych przedstawiono w tabeli 1.

Stalowe pręty żebrowane o średnicy 8, 12 i 16 mm stanowiły konwencjonalne zbrojenie rozciągane. Użyto także strzemion o średnicy 6 mm w rozstawie 125 mm. W strefie ściskanej zastosowano 2 pręty podłużne o średnicy 8 mm. Cechy mechaniczne użytej stali zbrojeniowej omówiono w publikacji [6].

Dla każdej z belek wykonano elementy drobnowymiarowe do wyznaczenia wytrzymałości na ściskanie (łącznie 30 walców o średnicy 150 mm i wysokości 300 mm z kompozytu bez dodatku włókien stalowych i 30 walców z włóknami) oraz wytrzymałości resztkowych (30 beleczek o wymiarach 150x150x700 mm). Wyniki badań przedstawiono w pracach [5 i 6]. Belki badano jako wolnopodparte obciążone 2 siłami skupionymi rozłożonymi w 1/3 rozpiętości. Szerokość rozwarcia rys oraz ugięcia belek mierzono przy użyciu systemu SAD-256 oraz Aramis 4M. Metodykę badań szczegółowo omówiono w pracy [2].

## 3. Analiza wyników badań i obliczeń

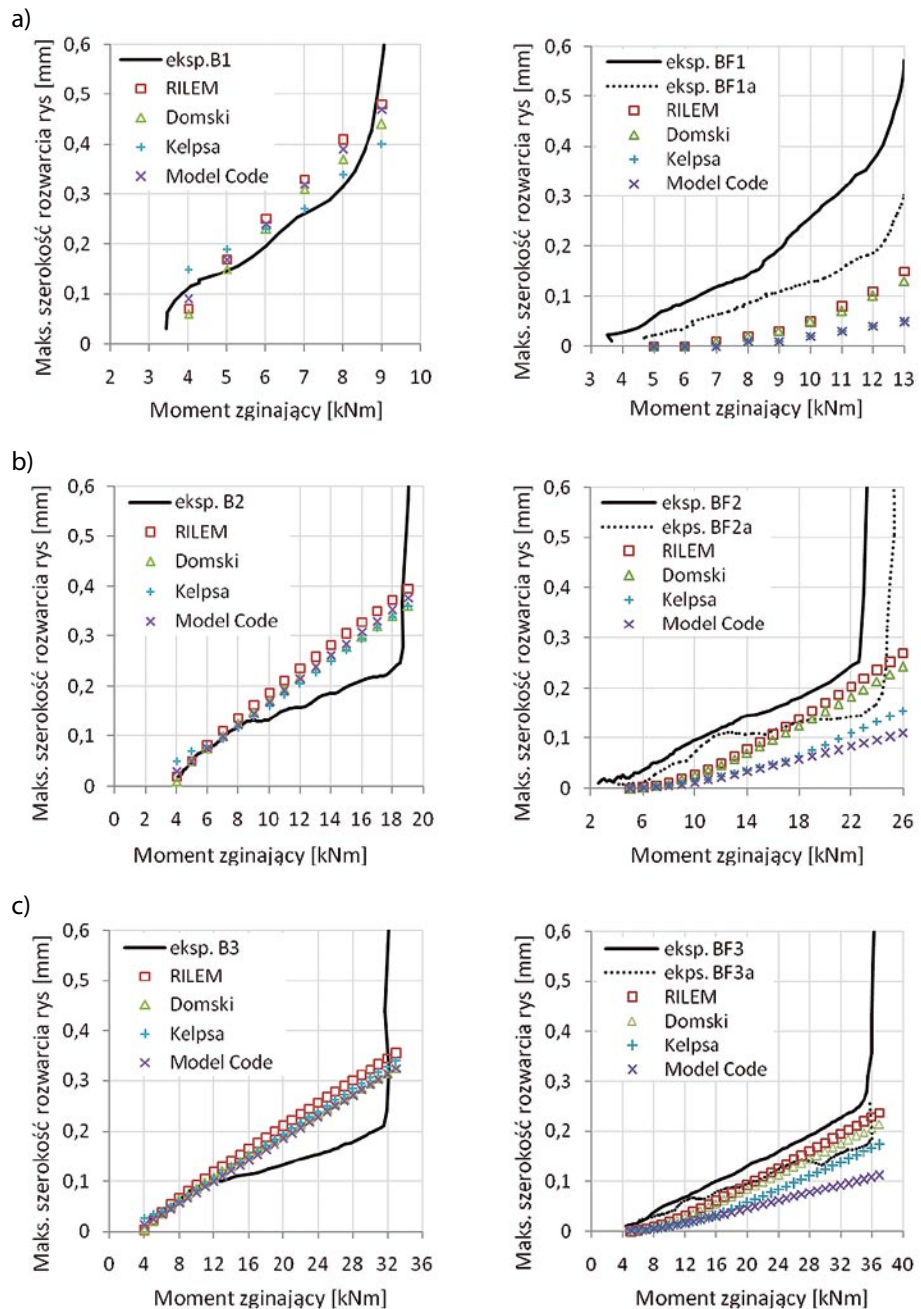
Maksymalną szerokość rozwarcia rys badanych belek ( $w_{max}$ ) obliczono metodą RILEMTC 162-TDF [7], propozycją Dom-

**Tabela 1.** Charakterystyka badanych belek

Oznaczenie serii belek	Oznaczenie belki	Wymiary [mm]	Zbrojenie rozciągane	Strzemiona	Zawartość włókien w stosunku do objętości kompozytu [%]
Seria 1	B1	150x200x3300	2#8	#6 co 125	-
	BF1			-	1,20%
	BF1a			-	-
Seria 2	B2		2#12	#6 co 125	-
	BF2			-	1,20%
	BF2a			-	-
Seria 3	B3		2#16	#6 co 125	-
	BF3			-	1,20%
	BF3a			-	-

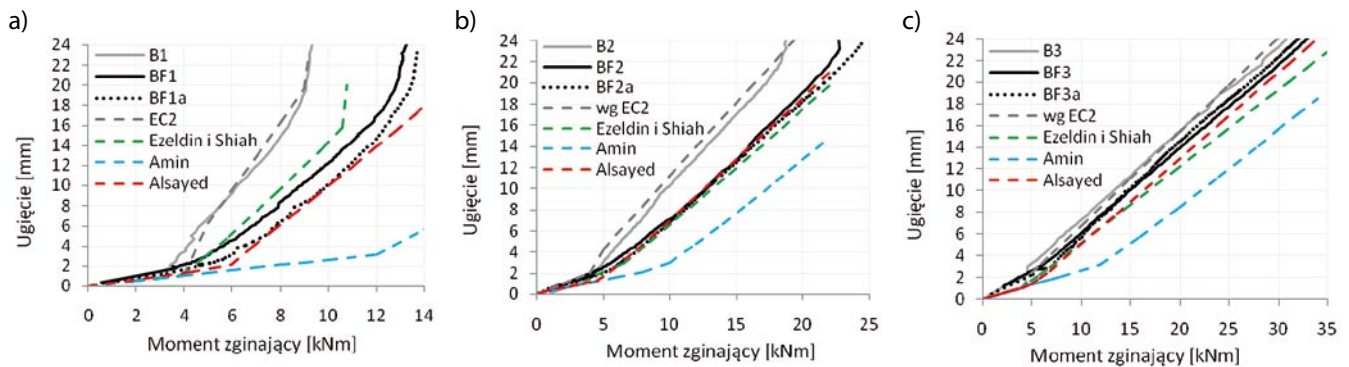
**Rys. 1.** Eksperymentalne i obliczeniowe zależności maksymalnej szerokości rozwarcia rysy od momentu zginającego [12]: a) belki serii 1, b) belki serii 2, c) belki serii 3

skiego [8] i Kelpsa [9] oraz metodą wg Model Code 2010 [10]. Wyniki obliczeń przedstawiono na rysunku 1 w postaci zależności maksymalnej szerokości rozwarcia rysy ( $w_{max}$ ) od momentu zginającego. Do oceny rozbieżności pomiędzy wielkościami obliczonymi a pomierzonymi użyto indeksu IAE [11]. Dobrą zgodność uzyskano tylko w przypadku belki B1. Dla wszystkich analizowanych metod w tym przypadku wielkość IAE nie przekracza 22%. Dla pozostałych belek rozbieżności są już znaczne. W przypadku belek bez włókien B2 i B3 zgodność obliczeniowej wartości  $w_{max}$  i doświadczalnej jest bardzo dobra tylko w początkowej fazie obciążenia. Dla momentu zginającego przekraczającego 50% momentu uplastycznienia zbrojenia rozciąganego ( $M_y$ ) (dla belki B2) i 30% momentu  $M_y$  (dla belki B3) obserwuje się nieco wolniejszy przyrost  $w_{max}$ , niż wynika to z metod obliczeniowych. W skrajnym przypadku wartość teoretyczna  $w_{max}$  jest większa od eksperymentalnej o 62% (dla belki B2, metoda RILEMTC 162-TDF) i 70% (dla belki B3, metoda RILEMTC 162-TDF). Wskaźniki IAE w zależności od metody zawierają się w przedziale od 36 do 45% dla belki B2 i od 38 do 54% dla belki B3. Średnia wartość IAE dla belek bez włókien zawiera się w przedziale od 31% (Model Code 2010) do 40% (RILEMTC 162-TDF). W przypadku belek z włóknami sytuacja jest odwrotna. Wszystkie analizowane metody zaniżają wielkość  $w_{max}$  w stosunku do wartości doświadczalnych. Okazuje się, że wraz ze wzrostem stopnia zbrojenia konwencjonalnego błąd IAE maleje. Dla belek BF1 i BF1a zawiera się on w przedziale od 57 do 92%, a dla belek BF3 i BF3a w przedziale od 18 do 63%. Przeprowadzona analiza wykazała, że metodą najlepiej opisującą maksymalną szerokość rozwarcia rysy w belkach z włóknami jest metoda RILEM TC 162-TDF oraz jej korekta



zaproponowana przez Domskiego. Dla tych metod otrzymano najmniejsze średnie wartości indeksu IAE wynoszące odpowiednio 41 i 44%.

Ugięcia badanych belek obliczono metodą Alsayeda [13], Ezeldina i Shiaha [14] oraz Amina i innych [15]. Metoda Alsayeda stanowi przystępny przykład sposobów bazujących na amerykańskiej normie ACI Building Code 318 [16]. Metoda Ezeldina i Shiaha [14] bazuje z kolei na normie EC2 [17]. W analizie uwzględniono także metodę Amina, gdyż wykorzystuje ona wytrzymałości resztkowe oraz odmienny sposób obliczania efektu usztywnienia zbrojenia rozciąganego w elementach fibrobetonowych. Należy podkreślić, że w rekomendacji RILEM TC 162-TDF i prenormie Model Code 2010 nie podano sposobu obliczania ugięć. Analiza



Rys. 2. Eksperymentalne i teoretyczne zależności ugięcia od momentu zginającego: a) belki serii 1, b) belki serii 2, c) belki serii 3 [11]

dostępnej literatury wykazała, że oprócz metody Amina nie ma metod obliczania ugięć bazujących na wytrzymałościach resztkowych.

Wyniki obliczeń przedstawiono na rysunku 2. Przeprowadzona analiza wykazała, że metoda Alsayeda najlepiej opisuje ugięcie dla belek z włóknami. Średnia wartość indeksu IAE dla tej metody wynosi 9%. Dobrą zgodność uzyskano także dla metody Ezeldina i Shiaha, dla której średnia wartość IAE wynosi 16%. Metoda Amina z kolei obarczona jest największym błędem. Średnia wartość indeksu IAE dla tego sposobu wynosi 118%. W przypadku belek bez włókien ugięcie obliczono zgodnie z EC2. Średnia wartość indeksu IAE wynosi 8%, co świadczy o dobrej zgodności wyników analitycznych i doświadczalnych.

#### 4. Podsumowanie

W odniesieniu do maksymalnej szerokości rozwarcia rys należy podkreślić, że zgodność pomiędzy wartościami teoretycznymi i doświadczalnymi jest zdecydowanie niezadowolająca zarówno dla belek z włóknami, jak i bez włókien. W przypadku belek fibrokompozytowych przyczyn tego stanu rzeczy należy doszukiwać się przede wszystkim w sposobie wyznaczania naprężeń w stali zbrojeniowej  $\sigma_s$ . W przypadku belek bez włókien tak duże wartości błędów IAE mogą wynikać z faktu, że w badaniach użyto materiału drobnokruszywowego.

W odniesieniu do ugięć badanych elementów wykazano, że metody Alsayeda oraz Ezeldina i Shiaha dobrze opisują ugięcie belek z fibrokompozytu drobnokruszywowego. Należy jednak podkreślić, że metody te zostały opracowane na podstawie wyników badań belek o identycznym schemacie statycznym. Ważne jest także to, że bazują one nie na wytrzymałościach resztkowych, ale na takich parametrach, jak objętościowa zawartość włókien i smukłość włókien. Zdecydowanie niezadowolające wartości ugięć uzyskano metodą Amina, która jako jedyna bazuje na wytrzymałości resztkowej  $f_{R1}$ . Dla każdej belki uzyskano mocno zaniżone wartości ugięć względem wartości doświadczalnych. Duży błąd wynika przede wszystkim z przeszacowania efektu usztywnienia zbrojenia rozciąganego.

#### BIBLIOGRAFIA

- [1] Głodkowska W., Kobaka J., Modelling of properties and distribution of steel fibres within a fine aggregate concrete, *Construction and Building Materials* 44/2013, str. 645–653
- [2] Głodkowska W., Fibrokompozyt drobnokruszywowy – modele opisu właściwości i zastosowanie, *Rocznik Ochrona Środowiska*, Wydawnictwo Środkowo-Pomorskiego Towarzystwa Naukowego, 2018, str. 291
- [3] Głodkowska W., Laskowska-Bury J., Waste Sands as a Valuable Aggregates to Produce Fibrecomposites. *Annual Set The Environment Protection*, tom 17, 2015, str. 507–525
- [4] Laskowska-Bury J., Wybrane cechy fizykomechaniczne fibrokompozytu wytworzonego na bazie kruszywa odpadowego. *Rozprawa doktorska*, Politechnika Koszalińska, 2017
- [5] Głodkowska W., Lehmann M., Ziarkiewicz M., Wytrzymałości resztkowe fibrokompozytu na bazie piasków odpadowych, *Materiały Budowlane*, 493, 9/2013, str. 28–30
- [6] Głodkowska W., Ziarkiewicz M., Nośność na zginanie belek żelbetowych wykonanych z fibrokompozytu drobnokruszywowego, *Przegląd Budowlany* 7–8/2018, str. 124–127
- [7] RILEM TC 162-TDF. Test and design methods for steel fibre reinforced concrete – sigma-epsilon design method: final recommendation, *Materials and Structures* 36/2003, str. 560–567
- [8] Domski J., Nośność, ugięcie i zarysowanie belek piaskobetonowych z włóknami stalowymi pod obciążeniem doraźnym. *Rozprawa doktorska*, Koszalin, 2005
- [9] Kelpsa S., Augonis M., Dauksys M., Augonis A., Analysis of crack width calculation of steel fibre and ordinary reinforced concrete flexural members, *Journal of sustainable architecture and civil engineering* 1, 6/2014, str. 50–57
- [10] Fib Model Code 2010, Comité euro-international du béton-Fédération internationale de la précontrainte, 2010
- [11] Ziarkiewicz M., Doświadczalna ocena wybranych metod wymiarowania belek z fibrokompozytu drobnokruszywowego. *Rozprawa doktorska*, Politechnika Koszalińska, Koszalin, 2018
- [12] Głodkowska W., Ziarkiewicz M., Cracking behavior of Steel Fiber Reinforced Waste Sand Concrete beams in flexure – experimental investigation and theoretical analysis. *Engineering Structures* 176, 2018, str. 1–10
- [13] Alsayed S. H., Flexural deflection of reinforced fibrous beams, *ACI Structural Journal* 1993, str. 72–76
- [14] Ezeldin A. S., Shiah T. W., Analytical immediate and long-term deflections of fibre-reinforced concrete beams, *ASCE Journal of Structural Engineering*, 1995, str. 727–738
- [15] Amin A., Foster S. J., Kaufmann W., Instantaneous deflection calculation for steel fibre reinforced concrete one way members, *Engineering Structures*, 131, 2017, str. 438–445
- [16] ACI 318-02 and ACI 318R-02, *Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary*, 2002
- [17] PN-EN 1992-1-1. Eurokod 2. Projektowanie konstrukcji z betonu. Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków