

Nośność na zginanie belek żelbetowych wykonanych z fibrokompozytu drobnokruszywowego

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

1. Wprowadzenie

Jednym z rodzajów fibrobetonu jest drobnokruszywy 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 [1, 2].

Dotychczas zrealizowano obszerny program badań cech fizyko mechanicznych tego kompozytu [3, 4]. 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 [3, 4]. Wysokie parametry wytrzymałościowe kompozytu, zwłaszcza wytrzymałość na rozciąganie i wytrzymałości resztkowe sugerują, że materiał ten może być stosowany do wykonywania elementów konstrukcyjnych. Można oczekiwać, że dodatek włókien stalowych w elementach zginanych ze zbrojeniem konwencjonalnym poprawi nie tylko nośność elementu, ale także sztywność, ciągliwość oraz przyczyni się do redukcji rozstawu i szerokości rozwarcia rys [5, 6].

Publikacja przedstawia wybrane wyniki szerokiego programu badań, dotyczącego możliwości zastosowania opracowanego drobnokruszywowego kompozytu do wytwarzania elementów konstrukcyjnych. Analizę ograniczono do eksperymentalnego i teoretycznego określenia nośności na zginanie belek w skali naturalnej wykonanych z kompozytu na bazie kruszywa odpadowego. Program badań obejmował także wykonanie belek bez włókien, jako elementów kontrolnych, w celu określenia wpływu dodatku włókien stalowych na nośność na zginanie. Uzyskane wyniki badań pozwoliły na ocenę metod wymiarowania wg RILEM TC 162-TDF [7] i Model Code 2010 [8].

2. Materiały i elementy próbne

Do wykonania kompozytu SFRWSC użyto piasku odpadowego (frakcje od 0,125 do 4 mm) z lokalnej kopalni kruszyw naturalnych w ilości 1570 kg/m³. Jako spoiwa użyto cementu portlandzkiego CEM II/AV 42,5R (420 kg/m³). Pozostałe składniki to pył

krzemionkowy (21 kg/m³), plastyfikator BETOCRETE 406 FM (16,8 kg/m³) oraz włókna stalowe 50/0,8 mm o kształcie haczykowatym i smukłości $\lambda=62,5$ (94 kg/m³). Zastosowanie plastyfikatora oraz dodatku pyłu krzemionkowego pozwoliło na uzyskanie stosunku $w/c=0,38$.

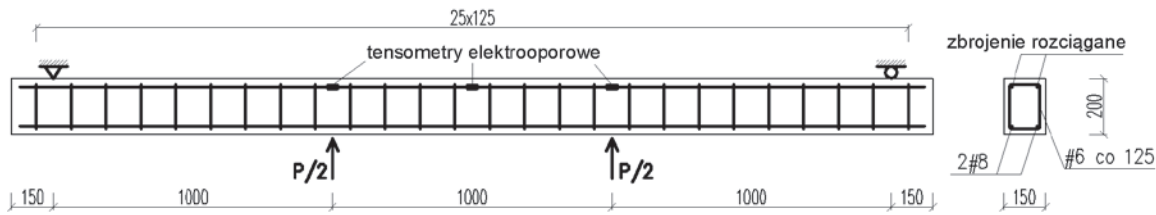
Nośność na zginanie określono na 9 belkach o wymiarach 150×200×3300 mm, podzielonych na trzy serie (tabela 1). Poszczególne serie różniły się pod względem ilości użytego zbrojenia konwencjonalnego (zbrojenie z uwagi na zginanie). W każdej serii wykonano jedną belkę bez dodatku włókien stalowych w celach porównawczych. Dodatkowo wszystkie belki z włóknami wykonano w dwóch wariantach – ze strzemiionami i bez nich.

Tabela 1. Charakterystyka badanych belek

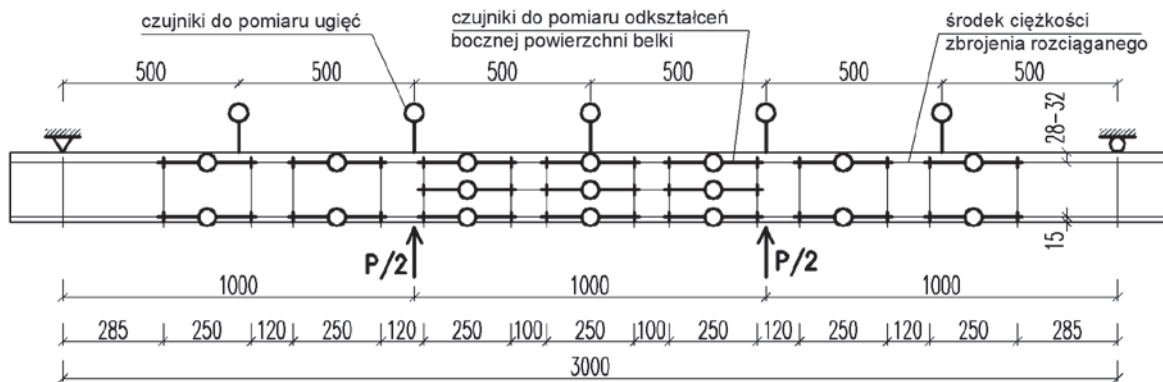
Oznaczenie belki	Wymiary [mm]	Zbrojenie rozciągane	Strzemiiona	Objętościowa zawartość włókien [%]
B1	150×200×3300	2#8	#6	-
BF1			co 125	1,20%
BF1a			-	
B2		2#12	#6	-
BF2			co 125	1,20%
BF2a			-	
B3		2#16	#6	-
BF3			co 125	1,20%
BF3a			-	

Stalowe pręty żebrowane o średnicy 8, 12 i 16 mm stanowiły konwencjonalne zbrojenie rozciągane. Użyto także strzemiion o średnicy 6 mm w rozstawie 125 mm. W strefie ścispanej zastosowano 2 pręty podłużne o średnicy 8 mm. Cechy wytrzymałościowe użytych prętów zbrojenia podłużnego zestawiono w tabeli 2.

Dla każdej z belek wykonano elementy drobnowymiarowe niezbędne 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 150×150×700 mm).



Rys. 1. Zbrojenie konwencjonalne belek oraz lokalizacja tensometrów elektrooporowych



Rys. 2. Lokalizacja czujników przemieszczeń

Tabela 2. Cechy mechaniczne prętów stalowych

Średnica [mm]	Granica plastyczności [MPa]	Wytrzymałość na rozciąganie [MPa]	Moduł sprężystości [GPa]
8	559	596	197
12	597	690	208
16	535	625	207

Elementy próbne poddano badaniom po upływie 30 dni od momentu ich zaformowania.

3. Metodyka badań

Belki badano na specjalnie zaprojektowanym stendzie w schemacie odwróconej belki swobodnie podpartej (rys. 1). Obciążenie przykładano poprzez trawers w sposób statyczny ze stałą prędkością $\sim 0,25 \text{ kN/s}$ „od spodu” belki za pomocą siłownika hydraulicznego. Po osiągnięciu granicy plastyczności w zbrojeniu rozciągającym (por. tab. 2) obciążenie kontrolowano za pomocą prędkości przyrostu ugięcia belki, która wynosiła $0,1 \pm 0,025 \text{ mm/s}$.

Badania belek przeprowadzono przy użyciu systemu akwizycji danych SAD256 oraz systemu optyczno-pomiarowego ARAMIS 4M. System akwizycji danych SAD256 służył do pomiaru siły obciążającej P , ugięć (5 czujników przemieszczeń), odkształceń jednej powierzchni bocznej belki (17 czujników przemieszczeń) oraz odkształceń zbrojenia rozciąganego (6 tensometrów elektrooporowych). Lokalizację tensometrów elektrooporowych oraz czujników przemieszczeń pokazano odpowiednio na rysunkach 1 i 2.

System optyczno-pomiarowy ARAMIS 4M (rys. 3) umożliwił precyzyjne śledzenie procesu powstawania i propagacji rys oraz pomiar odkształceń drugiej powierzchni belki. Obszar



Rys. 3. Ogólny widok stanowiska badawczego z systemem ARAMIS 4M

badanej powierzchni, o długości 1 m, obejmował środkowy odcinek belki pomiędzy siłami skupionymi. Wszystkie czujniki zarówno systemu SAD256, jak i Aramis 4M rejestrowały mierzone wielkości z częstotliwością 1 pomiaru co 2 s. Dokładność pomiarów dla obu systemów wynosiła 1×10^{-3} mm. Badanie wytrzymałości resztkowych przeprowadzono wg PN-EN 14651 [9] na belkach o wymiarach $150 \times 150 \times 700 \text{ mm}$.

Tabela 3. Wyniki badań wytrzymałości na ściskanie i wytrzymałości resztkowych fibrokompozytu

Parametry statystyczne	Wytrzymałość na ściskanie [MPa]		LOP* [MPa]	Wytrzymałości resztkowe [MPa]			
	$V_f = 0\%$	$V_f = 1,2\%$		$f_{cl,L}^f$	f_{R1}	f_{R2}	f_{R3}
Wartość średnia \bar{x} [MPa]	52,6	64,4	6,32	9,80	9,14	8,06	7,19
Odchylenie standardowe s [MPa]	2,4	4,7	0,82	1,40	1,35	1,23	1,14
Wskaźnik zmienności v [%]	5	7	13	14	15	15	16
Wartość minimalna x_{min} [MPa]	48,7	56,7	4,99	7,51	6,54	5,68	5,01
Wskaźnik jednorodności k [-]	0,93	0,88	0,79	0,77	0,76	0,75	0,74
Przedział ufności [MPa]	51,7–53,5	62,6–66,1	6,0–6,6	9,3–10,3	8,6–9,7	7,6–8,5	6,8–7,6
Liczba wyników uwzględnionych w analizie, n [szt.]	29**	30		29**			
Klasyfikacja wg Model Code 2010							7b

* – granica proporcjonalności,
 ** – w wyniku analizy statystycznej jeden wynik odrzucono.

Wytrzymałość na ściskanie fibrokompozytu zbadano zgodnie z EN 12390-3 [10] na próbkach walcowych.

4. Analiza wyników badań i obliczeń

Wyniki badań wytrzymałości na ściskanie i wytrzymałości resztkowych fibrokompozytu zestawiono w tabeli 3. Wskazują one, że dodatek włókien stalowych w ilości 1,2% zwiększa wytrzymałość na ściskanie fibrokompozytu o 22% w stosunku do kompozytu bez włókien. Przeprowadzone badania wykazały, że włókna stalowe w ilości 1,2% (94 kg/m³) w stosunku do objętości kompozytu efektywnie zwiększają tę wytrzymałość. Powyżej tego poziomu nie następuje już istotny wzrost wytrzymałości na ściskanie [2].

Uzyskane wyniki badań wytrzymałości resztkowych wskazywały na ciągły charakter badanego materiału. Do celów konstrukcyjnych klasyfikacja materiałowa betonów zbrojonych włóknami oraz betonów wysokiej wytrzymałości oparta jest na wartościach charakterystycznych wytrzymałości resztkowych. Zgodnie z wytycznymi Model Code 2010 [8] klasę fibrokompozytu można oznaczyć jako 7b. Oznacza to, że materiał ma wysoką wartość f_{R1} (zakres od 1 do 8). Litera „b” oznacza,

że badany fibrokompozyt charakteryzuje się osłabieniem po zarysowaniu, co ustala się w oparciu o relację f_{R3}/f_{R1} . Zależność obciążenie-ugięcie badanych belek dla różnych stopni zbrojenia konwencjonalnego przedstawiono na rysunku 4. W pierwszej fazie obciążenia (belki niezarysowane) wpływ włókien stalowych jest całkowicie pomijalny. Z chwilą pojawienia się pierwszych rys sytuacja ulega zmianie. Zdolność kompozytu do przenoszenia naprężeń rozciągających w przekroju zarysowanym sprawia, że belki z dodatkiem włókien stalowych wykazują większą sztywność niż belki bez włókien. To z kolei powoduje, że ugięcie badanych belek przy tym samym poziomie obciążenia jest mniejsze od ugięcia belek bez włókien. Różnica ugięć jest tym większa, im mniejszy jest stopień zbrojenia konwencjonalnego. Przykładowo dla belek zbrojonych prętami #8, siły obciążającej równej 16 kN, ugięcie belki BF1 i BF1a jest mniejsze od ugięcia belki B1 o odpowiednio: 44% i 55%. W przypadku belek zbrojonych prętami #12 różnice są już mniejsze. Dla obciążenia równego 35 kN ugięcia belek BF2 i BF2a są mniejsze od ugięć belki B2 o odpowiednio: 24% i 28%. Z kolei dla belek zbrojonych prętami #16 różnica sztywności jest nieistotna.

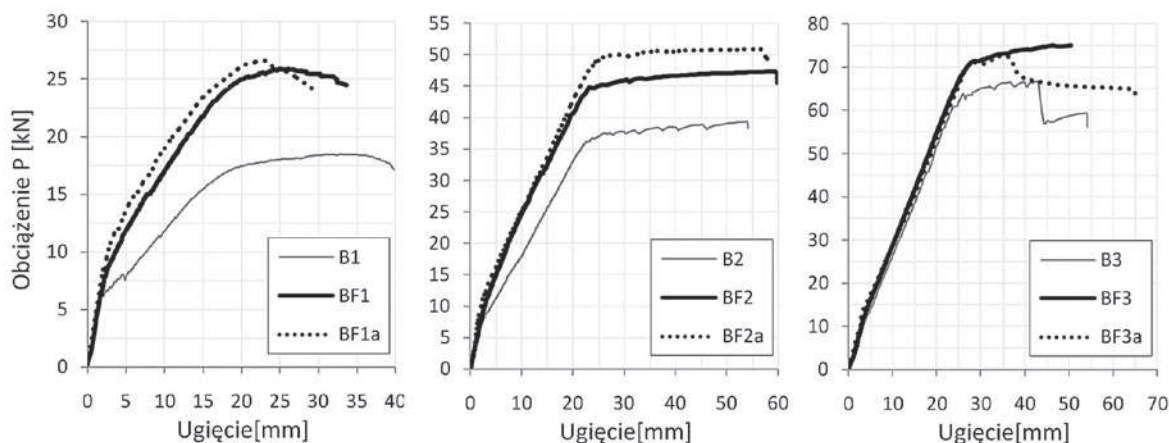

Rys. 4. Zależność obciążenie-ugięcie badanych belek

Tabela 4. Doświadczalne i teoretyczne wartości nośności na zginanie

Oznaczenie belek	$M_{u, exp}$	RILEM	$M_{u, pre}$		RILEM	$M_{u, pre}/M_{u, exp}$	
			MC2010 (model bilinearny)	MC2010 (model uproszczony)		MC2010 (model bilinearny)	MC2010 (model uproszczony)
			[kNm]				
B1	9,60	9,69	9,61	9,28	1,01	1,00	0,97
BF1	13,33	15,56	19,5	16,79	1,17	1,46	1,26
BF1a	13,70	1,14	1,42	1,23			
B2	20,03	20,96	21,01	21,05	1,05	1,05	1,05
BF2	24,06	29,46	31,09	28,53	1,22	1,29	1,19
BF2a	25,85	1,14	1,20	1,10			
B3	33,76	31,94	31,96	32,04	0,95	0,95	0,95
BF3	38,67	40,79	41,47	39,5	1,05	1,07	1,02
BF3a	36,73	1,11	1,13	1,08			
Średnia [-]					1,09	1,18	1,09
Wskaźnik zmienności v [%]					8	16	10

W kontekście nośności na zginanie sytuacja wygląda analogicznie. Wpływ włókien stalowych na nośność jest najbardziej wyraźny dla belek o najmniejszym stopniu zbrojenia konwencjonalnego. Maksymalna siła obciążająca belki BF1 i BF1a (por. tab. 1) była większa od maksymalnej siły obciążającej belkę B1 o odpowiednio 40% i 44%. W przypadku belek zbrojonych prętami #12 nośność belek BF2 i BF2a była większa od nośności belki B2 o odpowiednio 20% i 29%. Dla belek z dodatkiem włókien stalowych zbrojonych prętami #16 przyrosty nośności wynosiły odpowiednio 15% i 9% w stosunku do belki bez włókien. Zerwanie prętów rozciąganych przed zakończeniem badania miało miejsce jedynie w belkach B1, BF1 i BF1a. W belkach zbrojonych prętami #12 nie zaobserwowano ani zerwania prętów rozciąganych, ani zmiężdżenia strefy ściskanej. Natomiast w przypadku belek serii 3, zbrojonych prętami #16, zniszczenie elementu B3 oraz BF3a nastąpiło wskutek zmiężdżenia strefy ściskanej. Sytuacja ta zobrazowana jest na rysunku 4 w postaci załamania się krzywych siła-ugięcie chwilę po uplastycznieniu zbrojenia rozciąganego.

Nośność na zginanie belek obliczano zgodnie z RILEM TC 162-TDF [7] oraz FIB Model Code 2010 [8] (model bilinearny i uproszczony), w oparciu o uzyskane z badań średnie wartości wytrzymałości resztkowych. Wyniki obliczeń zestawiono w tabeli 4.

Analiza wyników zamieszczonych w tabeli 4 wykazała, że zgodność wartości obliczonych z eksperymentalnymi jest bardzo dobra w przypadku belek bez włókien stalowych. Obliczeniowe nośności na zginanie ($M_{u, pre}$) belek z włóknami są jednak znacznie większe niż nośności doświadczalne. Stosunek momentów $M_{u, pre}/M_{u, exp}$ zawiera się w przedziale od 1,05 do 1,17 w przypadku metody RILEM [8] oraz od 1,07 do 1,46 dla metody MC2010 (model bilinearny) [8]. Nośność elementów obliczona metodą uproszczoną wg Model Code 2010, jak można było oczekiwać, jest mniejsza niż uzyskana metodą dokładną. Jednak obliczeniowe wartości nośności belek są większe, średnio o 9%, od wartości eksperymentalnych.

5. Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonej analizy wyników badań i obliczeń sformułowano poniższe wnioski.

- Kompozyt cementowy na bazie piasków odpadowych bez dodatku włókien zachowuje się jak beton zwykły w zginanych elementach ze zbrojeniem konwencjonalnym. Rezultaty obliczeń nośności takich elementów wg RILEM i Model Code 2010 są w pełni satysfakcjonujące.
- Dodatek włókien stalowych w istotny sposób poprawia nośność na zginanie elementów wykonanych z kompozytu SFRWSC, dzięki czemu możliwa jest redukcja zbrojenia konwencjonalnego.
- W przypadku elementów wykonanych z kompozytu SFRWSC momenty zginające obliczone wg metody RILEM i Model Code 2010 są większe od wartości eksperymentalnych. Uzyskane wyniki wskazują na konieczność dokonania korekty tych metod w celu ich zastosowania do wymiarowania zginanych elementów wykonanych z kompozytu SFRWSC.
- Składnikiem kompozytu SFRWSC są piaski odpadowe, co stanowi ważny aspekt ekologiczny. Możliwość wykorzystania piasków, jako pełnowartościowego kruszywa do wytwarzania materiału konstrukcyjnego w skali przemysłowej, rozwiązałaby w dużej mierze problem zagospodarowania zalegających hałd w rejonie Pomorza w Polsce, czy piasków występujących w dużych ilościach na Bliskim Wschodzie czy też w Północnej Afryce. Duże zasoby kruszyw drobnych w tych regionach mogą stać się bogactwem, a tym samym podstawowym składnikiem materiałów przeznaczonych do wytwarzania elementów konstrukcyjnych.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Głodkowska W., Laskowska-Bury J., Piaski odpadowe jako wartościowe kruszywo do wytwarzania fibrokompozytów, Rocznik Ochrona Środowiska, 17/2015, str. 507–525
- [2] Głodkowska W., Kobaka J., The model of brittle matrix composites for distribution of steel fibres. Journal of Civil Engineering and Management, tom 18, 1/2012, str. 145–150
- [3] Laskowska-Bury J., Wybrane cechy fizykomechaniczne fibrokompozytu wytworzonego na bazie kruszywa odpadowego, rozprawa doktorska, Politechnika Koszalińska, 2017
- [4] Głodkowska W., Lehmann M., Ziarkiewicz M., Wytrzymałości resztkowe fibrokompozytu na bazie piasków odpadowych, Materiały Budowlane 493, 9/2013, str. 28–30
- [5] Domski J., Long-term Study on Fibre Reinforced Fine Aggregate Concrete Beams Based on Waste Sand. Annual Set The Environmental Protection 17/2015, str. 188–199
- [6] Meda A., Minelli F., Plizzari G.A., Flexural behaviour of RC beams in fibre reinforced concrete. Composites: Part B, 43, 2930–2937, 2012
- [7] RILEM TC 162-TDF. Test and design methods for steel fibre reinforced concrete – sigma-epsilon design method: final recommendation. Materials and Structure 36/2003, str. 560–567
- [8] FIB Model Code 2010. Paryż, Francja: Comité euro-international du béton – Fédération internationale de la précontrainte, 2010
- [9] PN-EN 14651:2007. Metoda badania betonu zbrojonego włóknem stalowym. Pomiary wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu (granica proporcjonalności LOP)
- [10] PN-EN 12390-3:2011/AC: 2012. Badania betonu. Część 3: Wytrzymałość na ściskanie próbek do badań