

18. WYMIAROWANIE ZGINANYCH ELEMENTÓW FIBROBETONOWYCH Z WYKORZYSTANIEM WYTRZYMAŁOŚCI RESZTKOWYCH

1. WPROWADZENIE

Beton zwykły jest powszechnie stosowanym materiałem konstrukcyjnym. Pomimo dużych zalet, ma jednak pewną zasadniczą wadę. Jest kruchy oraz wykazuje bardzo małą wytrzymałość na rozciąganie. W celu poprawy tych cech dodaje się do mieszanki betonowej różnego rodzaju włókna, tworząc nowy materiał określany jako fibrobeton. Prace badawcze nad tym materiałem trwają już od ponad 30 lat, zarówno w kontekście cech fizycznych, jak i mechanicznych [5, 13, 18, 22]. Obszary zastosowań tego materiału to między innymi posadzki przemysłowe, płyty fundamentowe, nawierzchnie dróg czy lotnisk, tunele, mosty, konstrukcje narażone na wpływy sejsmiczne [5, 11, 18, 20]. Jednak stosowanie fibrobetonu do wykonywania elementów konstrukcyjnych wciąż należy do rzadkości. Wynika to z faktu, że badania nad zachowaniem się fibrobetonu w konstrukcjach budowlanych prowadzone są na mniejszą skalę, a ich początki datuje się na lata 90. ubiegłego stulecia [3, 7, 10]. Wciąż trwają prace nad udoskonaleniem przepisów normowych, umożliwiających bezpieczne projektowanie takich konstrukcji. Wynika to z trudności związanych z modelowaniem zachowania się fibrobetonu w warunkach rozciągania.

Dla projektanta konstrukcji budowlanych niezbędna jest normowo zdefiniowana właściwość określająca zdolność materiału do przenoszenia naprężeń rozciągających po zarysowaniu, podana przez producenta. W ciągu ostatnich 20 lat stworzono kilka propozycji ilościowego opisu zachowania się zarysowanego fibrobetonu w warunkach rozciągania [1, 2, 4, 9, 14, 16, 17]. Najbardziej rozpowszechniona metoda opisu tej właściwości przedstawiona jest w zaleceniach RILEM TC-162-TDF [17]. Metoda ta następnie została ujęta w normie europejskiej PN-EN 14651 [16] oraz w fib Model Code 2010 [12]. Polega ona na eksperymentalnym pomiarze relacji szerokości rozwarcia rysy (CMOD) i siły obciążającej beleczki w środku jej rozpiętości. Określona w wyniku badania relacja *CMOD-Siła* służy do zdefiniowania tzw. wytrzymałości resztkowych $f_{R,1}$, $f_{R,2}$, $f_{R,3}$ i $f_{R,4}$. Oznaczają one wartości naprężeń rozciągających w przekroju dla danych szerokości rozwarcia rysy CMOD, równych odpowiednio: 0,5, 1,5, 2,5, 3,5 mm. Wartości tych wytrzymałości stanowią podstawę do wymiarowania elementów konstrukcyjnych.

Celem publikacji jest prezentacja i ocena najnowszych metod obliczania zginanych przekrojów fibrobetonowych wg fib Model Code 2010 [12] i RILEM-162-TDF [17] oraz wskazanie możliwości zastosowania fibrokompozytu wykonanego z piasków odpadowych, o zawartości włókien równej 1,2%. Fibrokompozyt ten opracowano w Katedrze Konstrukcji Betonowych i Technologii Betonu Politechniki Koszalińskiej.

Celem była użycie zalegających hałd piasków pozostałych po hydroklastyfikacji kruszywa grubego. Do wykonania tego materiału użyto włókna haczykowane EKOMET o wymiarach 08x50 mm, w różnej ilości. Szeroki program badań cech fizyko-mechanicznych wykazał, iż może on stanowić zamiennik dla betonu zwykłego [6]. Dla objętościowej zawartości włókien stalowych, równej 1,2%, uzyskano duże wartości wytrzymałości na ściskanie, rozciąganie i wytrzymałości resztkowe, istotne z punktu widzenia projektowania konstrukcji budowlanych (tab. 1).

Tabela 1. Charakterystyczne wartości wytrzymałości fibrokompozytu na ściskanie, granicy proporcjonalności LOP oraz wytrzymałości resztkowe przy zawartości włókien równej 1,2%

Table 1. Characteristic values of compressive strength, limit of proportionality LOP and residual strength of fibre composite with 1,2% fibre content

Badana cecha	Wartości charakterystyczne, MPa	Odchylenie standardowe s , MPa	Współczynnik zmienności v , %
Wytrzymałość na ściskanie f_{ck}	56,13	4,13	7
Granica proporcjonalności LOP $f_{ct,L,k}$	5,24	0,67	11
Wytrzymałość resztkowa $f_{R,1,k}$	7,30	1,20	13
Wytrzymałość resztkowa $f_{R,2,k}$	6,68	1,29	15
Wytrzymałość resztkowa $f_{R,3,k}$	5,82	1,25	16
Wytrzymałość resztkowa $f_{R,4,k}$	5,07	1,16	17

Należy podkreślić, że materiał ten wg fib Model Code 2010 [12] oznacza się symbolem 7b. Cyfra "7" wskazuje na bardzo wysoką charakterystyczną wytrzymałość resztkową $f_{R,1,k}$. Litera "b" z kolei uzależniona jest od stosunku wytrzymałości resztkowych $f_{R,3,k}/f_{R,1,k}$. Charakteryzuje ona zdolność do przenoszenia naprężeń rozciągających po osiągnięciu szerokości rozwarcia rysy większych od $CMOD_1 = 0,5$ mm.

2. WYMIAROWANIE ZGINANYCH ELEMENTÓW FIBROBETONOWYCH WG RILEM TC-162-TDF

Założenia do obliczeń fibrobetonowych przekrojów zginanych wg RILEM TC-162-TDF [17] są zgodne z założeniami przyjętymi w EC2 [15]. Przyjmuje się identyczny kształt bryły naprężeń w strefie ściskanej oraz identyczne odkształcenia graniczne w tej strefie. Wynika to oczywiście z uproszczenia, że pracę fibrobetonu w strefie ściskanej można modelować tak samo, jak pracę betonu zwykłego. W strefie rozciąganej natomiast fibrobeton zachowuje się zdecydowanie inaczej niż beton zwykły – jest w stanie przenosić naprężenia rozciągające. Na rysunku 1 przedstawiono zależność $\sigma-\epsilon$ przyjmowaną do wymiarowania przekrojów zginanych.

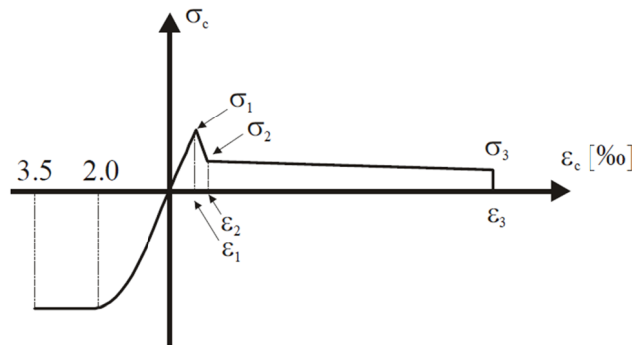
Strefę rozciąganą dzieli się na trzy podstrefy. W pierwszej z nich, ograniczonej osią obojętną i odkształceniem ϵ_1 , występuje część niezarysowana strefy rozciąganej. Naprężenia wzrastają liniowo do maksymalnej wartości równej σ_1 , która jest bezpośrednio związana z wytrzymałością fibrobetonu na rozciąganie przy zginaniu. Wartości naprężeń σ_1 oraz odkształceń ϵ_1 oblicza się ze wzorów:

$$\sigma_1 = 0,7 f_{ctm,fl} (1,6 - d), \text{ N/mm}^2 \quad (1)$$

$$\varepsilon_1 = \sigma_1 / E_c \quad (2)$$

gdzie:

- $f_{ctm,fl}$ – wytrzymałość na rozciąganie fibrobetonu przy zginaniu, N/mm^2 ,
 d – wysokość użyteczna przekroju, m,
 $E_c = 9500(f_{ctm})^{1/3}$ – moduł sprężystości fibrobetonu, N/mm^2 ,
 f_{cm} – średnia wytrzymałość fibrobetonu na ściskanie, N/mm^2 .



Rys. 1. Rozkład naprężeń i odkształceń w zginanym przekroju fibrobetonowym wg RILEM TC-162-TDF [17]

Fig. 1. The stress-strain distribution in fibre composite bending cross-section by RILEM TC-162-TDF [17]

Kolejna podstrefa, występująca w przedziale odkształceń ε_1 i ε_2 , to początek zarysowanej fibrobetonu, w której naprężenia maleją od wartości σ_1 do σ_2 . Wartość σ_2 , wynika bezpośrednio z wytrzymałości resztkowej $f_{R,1}$, odpowiadającej szerokości rozwarcia rysy $CMOD_1 = 0,5$ mm określonej wg PN-EN14651 [16]. Wartości naprężeń σ_2 oraz odkształceń ε_2 oblicza się ze wzorów:

$$\sigma_2 = 0,45 f_{R,1} \kappa_h, \text{ N/mm}^2 \quad (3)$$

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_1 + 0,01\% \quad (4)$$

gdzie:

- $f_{R,1}$ – wytrzymałość resztkowa fibrobetonu, N/mm^2 ,
 κ_h – współczynnik skali, -.

Następna podstrefa to również zarysowana strefa rozciągana, w której naprężenia zmieniają się od wartości σ_2 do σ_3 . Należy tu podkreślić, że naprężenia σ_3 odpowiadają odkształceniom ε_3 , które zawsze wynoszą 2,5%. Jest to dopuszczalne odkształcenie na poziomie środka ciężkości rozciąganych prętów zbrojenia konwencjonalnego. Wartość naprężeń σ_3 zależy od wytrzymałości resztkowej $f_{R,4}$, odpowiadającej szerokości rozwarcia rysy $CMOD$ równej 3,5 mm. Oblicza się ją ze wzoru:

$$\sigma_3 = 0,37 f_{R,4} \kappa_h \quad (5)$$

gdzie:

- $f_{R,4}$ – wytrzymałość resztkowa fibrobetonu, N/mm^2 .

W metodzie tej uwzględniono efekt skali poprzez wprowadzenie współczynnika κ_h , który zmniejsza naprężenia σ_2 i σ_3 w elementach o większych rozmiarach. Współczynnik ten ustalono w sposób eksperymentalny i oblicza się go ze wzoru:

$$\kappa_h = 1,0 - 0,6 \cdot \frac{h - 12,5}{47,5} \quad (6)$$

gdzie:

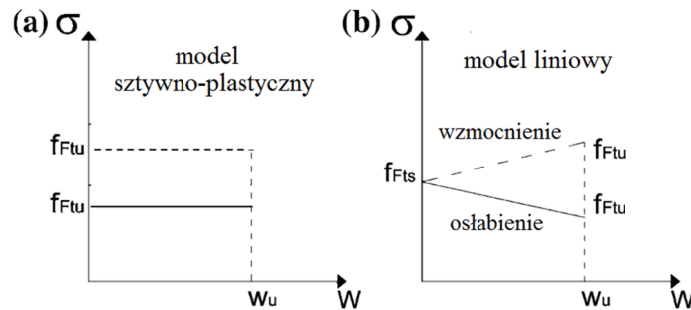
h – wysokość przekroju ograniczona przedziałem $12,5 \leq h \leq 60$, cm.

Wymiarowanie przekrojów zginanych wg RILEM TC-162-TDF [17] rozpoczyna się od obliczenia wartości naprężeń σ_1 , σ_2 , σ_3 i odkształceń ϵ_1 , ϵ_2 wg powyższych wzorów, na podstawie wytrzymałości fibrobetonu na rozciąganie przy zginaniu $f_{fcm,\eta}$ oraz wytrzymałości resztkowych f_{R1} i f_{R4} . Następnie z warunku równowagi sił poziomych w przekroju wyznacza się położenie osi obojętnej. Przyjmując graniczne odkształcenia równe 0,35% w najbardziej ściskanej krawędzi przekroju fibrobetonowego, można określić rozkład odkształceń w całym przekroju zginanym, przy założeniu, że odkształcenia rozciąganego zbrojenia konwencjonalnego nie mogą przekraczać 2,5%. Nośność na zginanie przekroju fibrobetonowego określa się z warunku równowagi momentów względem środka ciężkości bryły naprężeń ściskających.

3. WYMIAROWANIE ZGINANYCH ELEMENTÓW FIBROBETONOWYCH WG FIB MODEL CODE 2010

Wg fib Model Code 2010 [12] fibrobeton w strefie ściskanej zachowuje się tak samo, jak beton zwykły. Stosuje się tu te same wartości odkształceń granicznych oraz wytrzymałości na ściskanie, jak w normie EC2 [15]. Natomiast w strefie rozciąganej przyjmuje się, że fibrobeton jest w stanie przenieść naprężenia rozciągające. Podejście do modelowania strefy rozciąganej jest tu jednak trochę inne niż wynika z RILEM TC-162-TDF, aczkolwiek bazuje ono na wytrzymałościach resztkowych, określonych wg tej samej metodologii [16]. Wg fib Model Code 2010 pracę fibrobetonu w strefie rozciąganej można modelować w dwojaki sposób. Pierwszy sposób, zwany modelem sztywno-plastycznym, zakłada, że wartość naprężeń w zarysowanym przekroju fibrobetonowym jest stała i wynosi f_{Ftu} , bez względu na szerokość rozwarcia rysy (rys 2a). Drugi sposób, zwany modelem liniowym, zakłada, że wartość naprężeń rozciągających jest liniowo zależna od szerokości rozwarcia rysy i może być funkcją rosnącą (wzmocnienie przekroju), jak i malejącą (osłabienie przekroju) (rys 2b). Wartość f_{Fts} oznacza wytrzymałość resztkową odpowiednią dla obliczeń stanów granicznych użytkowalności, a f_{Ftu} wartość odpowiednią dla obliczeń stanów granicznych nośności. Na rysunku 2 wartość w_u jest szerokością rozwarcia rysy właściwą dla stanu granicznego nośności, natomiast szerokość rozwarcia rysy dla f_{Fts} jest równa zero.

Głównym mankamentem przedstawionych związków konstytutywnych jest fakt, że nie można ich w sposób bezpośredni zastosować do określenia naprężeń w zginanym przekroju fibrobetonowym. Naprężenia te określa się na podstawie związków σ - ϵ .



Rys. 2. Modele przyjmowane do opisu rozciąganej strefy zarysowanej zginanego przekroju fibro-betonowego wg fib Model Code 2010 [12]

Fig. 2. Models adopted to describe cracked bending tensile zone of fibre composite cross-section by fib Model Code 2010 [12]

Problem ten w fib Model Code 2010 [12] rozwiązano poprzez wprowadzenie tzw. długości charakterystycznej (l_{cs}), dzięki której możliwe jest określenie zależności pomiędzy odkształceniem ε a szerokością rozwarcia rysy w , zgodnie ze wzorem:

$$\varepsilon = w/l_{cs} \quad (7)$$

Natomiast wartość l_{cs} można wyznaczyć z zależności:

$$l_{cs} = \min\{s_{rm}, y\} \quad (8)$$

w której:

s_{rm} – średni rozstaw rys, mm,

y – odległość pomiędzy osią obojętną a najbardziej rozciąganą krawędzią przekroju, obliczoną dla charakterystycznej kombinacji obciążeń, przy założeniu braku wytrzymałości na rozciąganie fibrobetonu.

Znając długość l_{cs} , można określić dopuszczalną szerokość rozwarcia rysy w_u dla stanu granicznego nośności, zgodnie ze wzorem:

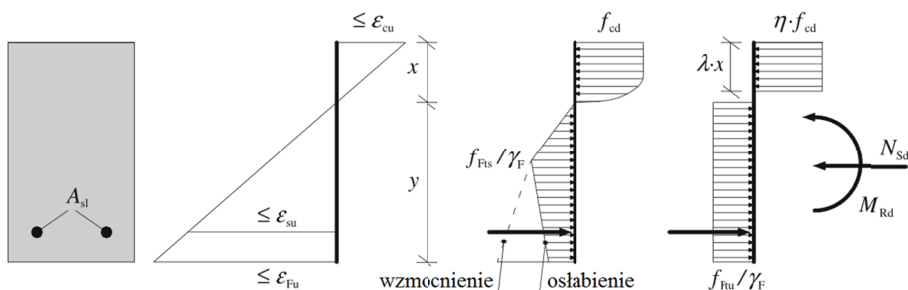
$$w_u = l_{cs} \cdot \varepsilon_{Fu} \quad (9)$$

w którym ε_{Fu} oznacza odkształcenie krawędzi rozciąganej przekroju i przyjmuje się je na poziomie 2% dla przekrojów zginanych. Obliczona wartość w_u nie powinna przekraczać 2,5 mm.

Nośność na zginanie przekrojów fibrobetonowych można określać na podstawie rozkładów naprężeń przedstawionych na rysunku 3. Stan graniczny nośności zostanie osiągnięty, jeżeli przynajmniej jeden z następujących warunków zostanie spełniony:

- odkształcenia ściskanej części ε_{cu} przekroju osiągną wartość 0,35%,
- odkształcenia stali zbrojeniowej ε_{su} osiągną wartość maksymalnych odkształceń dla zastosowanej stali,
- odkształcenia rozciąganej krawędzi przekroju ε_{Fu} osiągną wartość 2%.

Na rysunku 3 przedstawiono dwa alternatywne rozkłady naprężeń w przekroju zginanym. Rozkład przedstawiony z lewej strony (metoda dokładna) opiera się na modelu liniowym zależności σ - w , zaś rozkład z prawej (metoda uproszczona) na modelu sztywno-plastycznym.



Rys. 3. Rozkład odkształceń i naprężeń w zginanym przekroju fibrobetonowym wg fib Model Code 2010 [12]

Fig. 3. The stress-strain distribution in fibre composite bending cross-section by fib Model Code 2010 [12]

Metoda dokładna. W metodzie tej rozkład naprężeń rozciągających ma charakter liniowo zmienny w dwóch przedziałach. Konieczne jest określenie wartości naprężeń f_{Fts} i f_{Ftu} , które wyznacza się ze wzorów:

$$f_{Fts} = 0,45 \cdot f_{R1} \quad (10)$$

$$f_{Ftu} = f_{Fts} - \frac{w_u}{CMOD_3} (f_{Fts} - 0,5 \cdot f_{R3} + 0,2 \cdot f_{R1}) \geq 0 \quad (11)$$

w których:

$f_{R,1}, f_{R,3}$ – wytrzymałości resztkowe,
 $CMOD_3$ – szerokość rozwarcia rysy równa 2,5 mm.

Określić także należy wartość ϵ_{SLS} , czyli odkształcenia, przy których naprężenia rozciągające w betonie osiągną graniczną wartość równą f_{Fts} . Odkształcenia te wyznacza się ze wzoru:

$$\epsilon_{SLS} = CMOD_1 / l_{cs} \quad (12)$$

w którym:

$CMOD_1$ – szerokość rozwarcia rysy równa 0,5 mm.

Punktem wyjścia do obliczeń nośności zginanego przekroju fibrobetonowego jest obliczenie długości l_{cs} . Wartością tą na ogół jest średni rozstaw rys, którego obliczenie wymaga znajomości niewiadomej, na tym etapie analizy, wysokości strefy ściskanej. To z kolei powoduje konieczność stosowania obliczeń iteracyjnych bądź założeń upraszczających. Znając długość l_{cs} , można określić rozkład odkształceń i naprężeń w przekroju. Wysokość strefy ściskanej oblicza się z warunku równowagi sił poziomych. Należy pamiętać, że wartość odkształceń rozciąganej krawędzi przekroju nie może przekraczać 2%. Jeśli tak jest, to wówczas wysokość strefy ściskanej można określić na podstawie wykresu odkształceń, przyjmując na krawędzi rozciąganej odkształcenie równe 2%, a na krawędzi ściskanej 3,5% lub mniej. Warunek równowagi sił poziomych wymusza w tej sytuacji zmniejszenie odkształceń ściskanej krawędzi przekroju poniżej 0,35%. Ostatecznie nośność na zginanie przekroju fibrobetonowego określa się z warunku równowagi momentów względem środka ciężkości bryły naprężeń ściskających.

Metoda uproszczona. W metodzie tej zakłada się, że naprężenia na całej wysokości strefy rozciąganej osiągają stałą wartość równą f_{Ftu} , którą oblicza się ze wzoru:

$$f_{Ftu} = \frac{f_{R3}}{3} \quad (13)$$

Rozkład naprężeń w strefie rozciąganej, w odróżnieniu od metody dokładnej, nie zależy od szerokości rozwarcia rys oraz ich rozstawu, co znacznie upraszcza obliczenia. Położenie osi obojętnej wyznacza się z warunku równowagi sił poziomych, a nośność przekroju z warunku równowagi momentów względem środka ciężkości bryły naprężeń ściskających.

4. OBLICZENIOWA NOŚNOŚĆ NA ZGINANIE PŁYT WYKONANYCH Z FIBROKOMPozyTU NA BAZIE PIASKÓW ODPADOWYCH

W celu przedstawienia możliwości zastosowania wybranego fibrokompozytu do wykonywania elementów konstrukcyjnych przeprowadzono obliczenia nośności płyt na zginanie wg fib Model Code 2010 [12] i RILEM TC-162-TDF [17]. Przeanalizowano dwa przypadki. W pierwszym obliczano płyty o grubości h równej 200 mm. Zmiennymi były stopień zbrojenia konwencjonalnego (ρ) oraz średnica zastosowanych prętów (\emptyset). W drugim przypadku obliczano płyty o zmiennej grubości, przy stałym stopniu zbrojenia oraz takiej samej średnicy prętów zbrojeniowych. Do analizy przyjęto obliczeniowe wartości wytrzymałości resztkowych f_{R1} , f_{R3} i f_{R4} . Częściowy współczynnik bezpieczeństwa dla fibrobetonu wg fib Model Code 2010 [12] wynosi $\gamma_f = 1,5$. Ten sam współczynnik przyjęto do obliczeń metodą wg RILEM TC-162-TDF [17].

Przypadek 1. Dane do obliczeń oraz wyniki przedstawiono w tabeli 2 i na rysunku 4. Z przeprowadzonych obliczeń wynika, że im mniejszy stopień zbrojenia konwencjonalnego, tym większy jest wpływ włókien stalowych na nośność na zginanie przekroju płyty. Dla analizowanego przykładu przy stopniu zbrojenia równym 0,25% udział włókien stalowych przy przenoszeniu momentu zginającego jest porównywalny do momentu przenieszonego przez pręty stalowe. Wiąże się to jednak z dość dużą szerokością rozwarcia rysy, równą około 1mm. Jednakże wraz ze wzrostem stopnia zbrojenia konwencjonalnego zmniejsza się, zarówno szerokość rozwarcia rysy, jak i udział włókien stalowych przy przenoszeniu momentu zginającego. Przykładowo dla $\rho = 1\%$ przyrost nośności na zginanie wynosi od 13% do 18% w zależności od metody obliczeniowej i zastosowanej średnicy prętów zbrojeniowych, a szerokość rozwarcia rysy ponad 0,3 mm. Przykład ten wskazuje, że udział włókien stalowych przy przenoszeniu momentu zginającego zależy także od średnicy zastosowanych prętów (rys. 4). Im większa średnica zastosowanych prętów (przy niezmiennym stopniu zbrojenia), tym większy jest przyrost nośności na zginanie przekroju płyty.

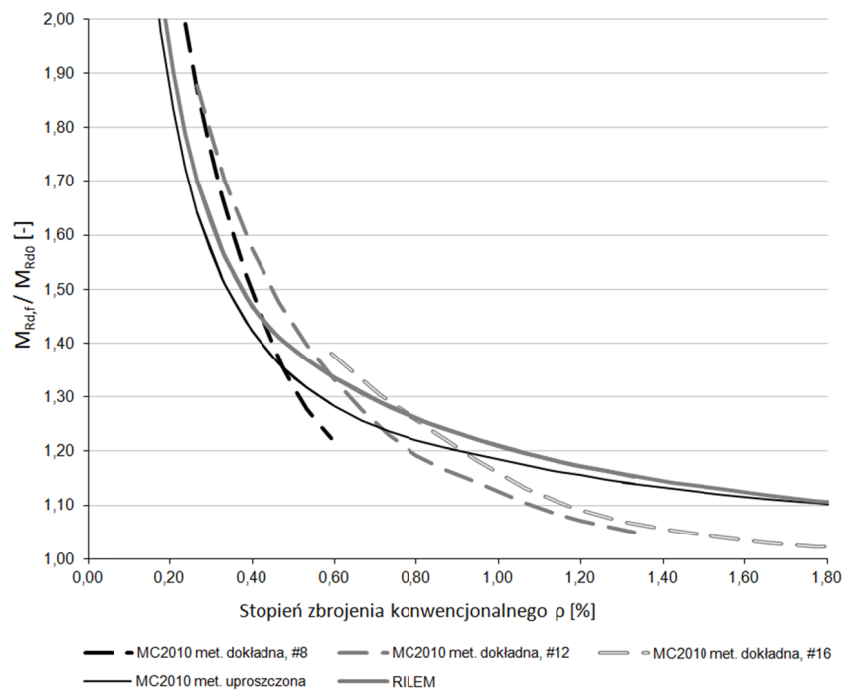
Tabela 2. Wybrane wyniki obliczeń nośności na zginanie płyty z fibrokompozytu o grubości 200 mm, o zmiennym stopniu zbrojenia konwencjonalnego i średnicy prętów zbrojeniowych

Table 2. Selected calculation results of the bending load capacity of fibre composite slabs having a thickness of 200 mm, with varying degrees of conventional reinforcement and diameter rebar

h	d	Ø	ρ	fib Model Code 2010				RILEM TC-162-TDF	
				$M_{Rd,f}^d$	$M_{Rd,f}^u$	$M_{Rd,f}^d/M_{Rd0}$	$M_{Rd,f}^u/M_{Rd0}$	$M_{Rd,f}$	$M_{Rd,f}/M_{Rd0}$
mm	mm	mm	%	kNm	kNm	-	-	kNm	-
200	170	8	0,12	42,24	36,71	2,86	2,49	38,27	2,59
200	170	8	0,35	69,53	64,35	1,60	1,48	66,48	1,53
200	170	8	0,59	87,43	91,99	1,22	1,29	95,8	1,34
200	170	12	0,27	61,7	53,98	1,88	1,64	55,9	1,70
200	170	12	0,73	107,74	108,4	1,23	1,24	112,42	1,28
200	170	12	1,33	160,77	174,57	1,05	1,14	176,58	1,15
200	170	16	0,59	98,81	91,99	1,38	1,29	95,8	1,34
200	170	16	1,18	150,54	158,76	1,10	1,15	161,52	1,17
200	170	16	1,77	202,23	218,34	1,02	1,10	219,26	1,11

h – wysokość przekroju, mm
 d – wysokość użyteczna przekroju, mm
 Ø – średnica prętów zbrojeniowych, mm
 ρ – stopień zbrojenia konwencjonalnego, %
 $M_{Rd,f}^d$ – nośność na zginanie przekroju fibrokompozytowego obliczona metodą dokładną wg fib Model Code 2010, kNm
 $M_{Rd,f}^u$ – nośność na zginanie przekroju fibrokompozytowego obliczona metodą uproszczoną wg fib Model Code 2010, kNm
 M_{Rd0} – nośność na zginanie przekroju bez dodatku włókien stalowych wg EC2, kNm
 $M_{Rd,f}$ – nośność na zginanie przekroju fibrokompozytowego obliczona wg rekomendacji RILEM TC-162-TDF, kNm

Większa średnica prętów to także większa szerokość rozwarcia rys. Powyższe spostrzeżenia wynikają z obliczeń metodą dokładną wg fib Model Code 2010 [12]. Metoda uproszczona, a także metoda wg RILEM TC-162-TDF [17] nie uwzględnia wpływu szerokości rozwarcia rysy (a przez to średnicy zastosowanych prętów) na nośność na zginanie przekroju fibrokompozytowego (rys. 4). Warto także podkreślić różnicę uzyskanych wyników obliczeń metodą dokładną i uproszczoną wg fib Model Code 2010 [12]. Przy niewielkich stopniach zbrojenia konwencjonalnego uzyskuje się większe wartości stosunku $M_{Rd,f}^d/M_{Rd0}$ metodą dokładną. Dla stopni zbrojenia większych od 1% sytuacja jest odwrotna. Przy $\rho = 1,8\%$ metoda dokładna wykazuje zaledwie 2% przyrost nośności, a uproszczona aż 10%. Porównując wyniki obliczeń metodą uproszczoną wg fib Model Code 2010 [12] oraz metodą wg RILEM TC-162-TDF [17] można stwierdzić, że rezultaty obliczeń tymi metodami są zbliżone, aczkolwiek nośność obliczona wg RILEM TC-162-TDF [17] jest o kilka procent większa. Różnica ta jednak maleje wraz ze wzrostem stopnia zbrojenia konwencjonalnego i dla $\rho = 1,8\%$ jest nieistotna.



Rys. 4. Stosunek nośności na zginanie wg fib Model Code 2010 [12] i RILEM TC-162-TDF [17] płyty fibrokompozytowej gr. 200 mm do nośności płyty bez włókien stalowych w zależności od stopnia zbrojenia konwencjonalnego

Fig. 4. The ratio of the bending load capacity of fibre composite slab having thickness of 200 mm and the bending load capacity of slab without steel fibers depending on the degree of conventional reinforcement by fib Model Code 2010 [12] and RILEM TC-162-TDF [17]

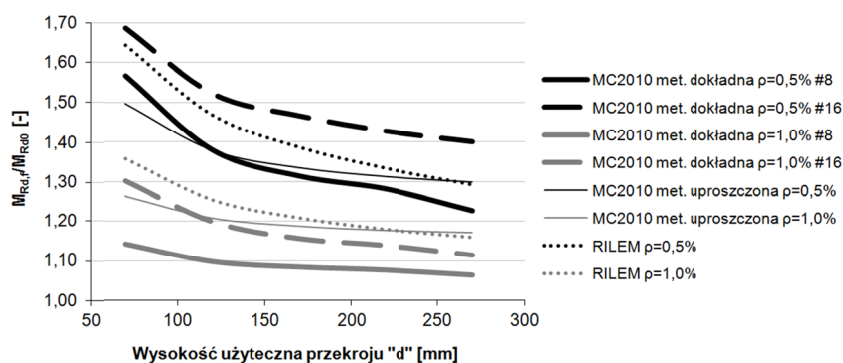
Przypadek 2. Przedmiotem analizy jest nośność na zginanie przekrojów płyty o zmiennej wysokości, przy dwóch stopniach zbrojenia: 0,5% i 1% oraz dwóch średnicach prętów $\varnothing 8$ oraz $\varnothing 16$ (tab. 3). Przeprowadzone obliczenia wykazały, że wraz ze wzrostem grubości obliczanych elementów udział włókien stalowych przy przenoszeniu momentu zginającego maleje (rys. 5). Obliczone metodą dokładną wg fib Model Code 2010 [12] wartości stosunku $M_{Rd,f}/M_{Rd0}$ maleją najszybciej w porównaniu z pozostałymi metodami. Na rysunku 5. widać także znacznie większy przyrost nośności na zginanie w elementach o stopniu zbrojenia $\rho = 0,5\%$ (kolor czarny). Zaobserwowano, że nośności obliczone metodą dokładną i uproszczoną są zbliżone dla płyt o stopniu zbrojenia konwencjonalnego $\rho = 0,5\%$ i średnicy prętów $\varnothing 8$ mm. Dla średnicy $\varnothing 16$ mm wartości stosunku $M_{Rd,f}/M_{Rd0}$ obliczone metodą dokładną są większe. Z kolei dla płyt o stopniu zbrojenia $\rho = 1\%$ nośności na zginanie płyt obliczone metodą dokładną i uproszczoną są podobne przy średnicy zastosowanych prętów równej $\varnothing 16$. Wyniki obliczeń metodą wg RILEM TC-162-TDF [17], w odniesieniu do metody uproszczonej wg fib Model Code 2010 [12], są zbliżone szczególnie w przypadku płyt o grubości około 250 mm. Przy niewielkich grubościach płyt rzędu 100 mm, dla stopnia zbrojenia $\rho = 0,5\%$, nośność na zginanie płyty obliczona metodą wg RILEM TC-162-TDF [17] jest większa o ok. 10% w stosunku do nośności obliczonej metodą uproszczoną wg fib Model Code 2010 [12]. W przypadku gdy stopień zbrojenia $\rho = 1\%$, różnica ta jest mniejsza i wynosi ok. 7%.

Tabela 3. Wybrane wyniki obliczeń nośności na zginanie płyt z fibrokompozytu o grubościach od 100 do 300 mm

Table 3. Selected calculation results of the bending load capacity fibre composite slabs with thicknesses of 100 to 300 mm

h	d	Ø	ρ	fib Model Code 2010				RILEM TC-162-TDF	
				$M_{Rd,f}^d$	$M_{Rd,f}^u$	$M_{Rd,f}^d/M_{Rd0}$	$M_{Rd,f}^u/M_{Rd0}$	$M_{Rd,f}$	$M_{Rd,f}/M_{Rd0}$
mm	mm	mm	%	kNm	kNm	-	-	kNm	-
100	70	8	0,50	16,25	15,52	1,57	1,50	17,05	1,64
200	170	8	0,50	80,34	81,62	1,31	1,33	84,83	1,39
300	270	8	0,50	189,19	200,27	1,23	1,30	199,40	1,29
100	70	16	0,50	17,50	15,52	1,69	1,50	17,05	1,64
200	170	16	0,50	88,60	80,93	1,47	1,34	84,09	1,39
300	270	16	0,50	214,33	199,17	1,40	1,30	198,20	1,29
100	70	8	1,00	22,74	25,17	1,14	1,26	27,04	1,36
200	170	8	1,00	127,84	140,01	1,08	1,19	142,55	1,21
300	270	8	1,00	314,70	346,20	1,06	1,17	342,96	1,16
100	70	16	1,00	25,90	25,15	1,30	1,26	27,01	1,36
200	170	16	1,00	136,03	138,88	1,16	1,18	142,21	1,21
300	270	16	1,00	330,14	344,56	1,11	1,16	343,43	1,16

Oznaczenia jak w tabeli 2



Rys. 5. Stosunek nośności na zginanie wg fib Model Code 2010 [12] płyty fibrokompozytowej do nośności płyty bez dodatku włókien w zależności od wysokości użytecznej

Fig. 5. The ratio of the bending load capacity of fibre composite slab to the bending load capacity of slab without fibers by fib Model Code 2010 [12], depending on effective depth

Porównując metody wymiarowania fibrobetonowych przekrojów zginanych, należy podkreślić, iż metody wg fib Model Code 2010 [12] są metodami najnowszymi. W dostępnych źródłach nie znaleziono w ostatnich latach publikacji dotyczących eksperymentalnej weryfikacji metody wg fib Model Code 2010 [12]. Zgodność wyników obliczeń nośności przekrojów zginanych wg RILEM TC-162-TDF [17] z wynikami badań eksperymentalnych jest kontrowersyjna [8]. Jako jedną z przyczyn tego faktu uznaje się duży rozrzut wyników badania wytrzymałości resztkowych. Problem ten wymaga osobnej, dalszej wnikliwej analizy teoretyczno-badawczej. Przy obecnym stanie wiedzy w tym zakresie trudno jest ocenić, która z metod najtrafniej opisuje nośność zginanych przekrojów fibrobetonowych.

W trakcie analizy wyników obliczeń nasuwają się wnioski, istotne z punktu widzenia praktycznych zastosowań. Przede wszystkim stosowanie przedstawionego fibro-

kompozytu w obszarach występowania znacznych momentów zginających, powodujących konieczność stosowania stopnia zbrojenia konwencjonalnego powyżej 1%, jest niecelowe. W takich przekrojach udział włókien stalowych przy przenoszeniu momentu jest kilkuprocentowy. Jednak w innych przekrojach tej samej konstrukcji, w których momenty zginające osiągają mniejsze wartości, zastąpienie betonu zwykłego fibrokompozytem może istotnie przyczynić się do redukcji zbrojenia konwencjonalnego. Materiał ten w tym kontekście najbardziej nadawałby się do wykonywania słabo obciążonych cienkich elementów statycznie niewyznaczalnych, jak np. płyty stropowe wieloprzęsłowe o niewielkich rozpiętościach. Zbrojenie konwencjonalne takich elementów powinno składać się z prętów o możliwie największej średnicy.

5. PODSUMOWANIE

Podstawowym celem niniejszej publikacji jest pokazanie możliwości zastosowania fibrokompozytu wykonanego z piasków odpadowych, o objętościowej zawartości włókien równej 1,2%, do wykonywania zginanych elementów konstrukcyjnych. Na podstawie wyników badań wytrzymałości resztkowych wykonano obliczenia nośności na zginanie wybranych płyt najczęściej stosowanymi metodami, tj. wg fib Model Code 2010 [12] oraz RILEM TC-162-TDF [17]. Uzyskane w wyniku obliczeń nośności na zginanie płyt fibrokompozytowych posłużyły do określenia wpływu włókien stalowych na nośność na zginanie, a także umożliwiły porównanie i ocenę przedstawionych metod.

Fibrokompozyt wykonany z piasków odpadowych o objętościowej zawartości włókien równej 1,2% może być traktowany jako zamiennik dla betonu zwykłego, przy wykonywaniu zginanych elementów konstrukcyjnych. W pewnego rodzaju konstrukcjach mógłby on istotnie przyczynić się do redukcji zbrojenia konwencjonalnego. Podkreślić jednak należy konieczność przeprowadzenia badań zginanych elementów konstrukcyjnych w skali naturalnej, w celu weryfikacji i ewentualnej modyfikacji przedstawionych metod.

LITERATURA

- [1] ASTM C1609-05. Standard test method for flexural performance of fiber-reinforced concrete (using beam with third-point loading).
- [2] Bencardino F., 2013. Mechanical parameters and post-cracking behaviour of HPFRC according to three-point and four-point bending test. *Advances in Civil Engineering*, Rende, Italy.
- [3] di Prisco M., Plizzari G., Vandewalle L., 2009. Fibre reinforced concrete: new design perspectives. *Materials and Structures*, 42, Milan, Italy, 1261-1281.
- [4] Giaccio G., Tobes J.M., Zerbino R., 2007. Use of small beams to obtain design parameters of fibre reinforced concrete. *Cement and Concrete Composites* 30, La Plata, Argentina, 297-306.
- [5] Glinicki M.A., 2010. Beton ze zbrojeniem strukturalnym. XXV Ogólnopolskie Warsztaty Pracy Projektanta Konstrukcji, Szczyrk.
- [6] Głodkowska W., Laskowska-Bury J., Kobaka J., 2013. Wpływ włókien stalowych na kształtowanie właściwości kompozytu drobnokruszywowego. *Materiały Budowlane* 9, 28-30.
- [7] Gouveia N.D., Fernandes N.A.G., Faria D.M.V., Ramos A.M.P., Lucio V.J.G., 2014. SFRC flat slabs punching behaviour – Experimental research. *Composites: Part B*. 63, Lisboa, Portugal, 161-171.

- [8] Jansson A., Gylltoft K., 2008. Design methods for fibre-reinforced concrete: a state-of-the-art review. Ingemar Lofgren. Thomas Concrete Group AB Goteborg, Sweden.
- [9] Japan Society of Civil Engineering. 1984. JCI-SF4, Methods of tests for flexural strength and flexural toughness of fiber reinforced concrete. Japanese Concrete Institute, 45-56.
- [10] Kelpsa S., Augonis M., Dauksys M., Augonis A., 2014. Analysis of crack width calculation of steel fibre and ordinary reinforced concrete flexural members. Journal of sustainable architecture and civil engineering 1(6), Kaunas, Lithuania.
- [11] Michels J., Waldmann D., Maas S., Zurbes A., 2011. Steel fibers as only reinforcement for flat slab construction – Experimental investigation and design. Construction and Building Materials 26, Luxembourg. 26, 145-155.
- [12] Model Code 2010. First complete draft. Bulletin 55. International Federation for Structural Concrete (fib). Lausanne, Switzerland.
- [13] Pająk M., Ponikiewski T., 2013. Flexural behavior of self-compacting concrete reinforced with different types of steel fibers. Construction and Building Materials 47, Gliwice, 397-408.
- [14] Parmentier B., Vandewalle L., van Rickstal F., 2008. Evaluation of scatter of the postpeak behaviour of fibre reinforced concrete in bending: A step towards reliability. RILEM Publications SARL 8, 133-143.
- [15] PN-EN 1992-1-1. Eurokod 2. Projektowanie konstrukcji z betonu. Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków.
- [16] PN-EN 14651:2007. Metody badania betonu zbrojonego włóknem stalowym. Pomiary wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu (granica proporcjonalności LOP, wytrzymałość resztkowa).
- [17] RILEM TC162-TDF. 2003. Test and design methods for steel fibre reinforced concrete. Materials and Structures. 36, 560-567.
- [18] Shah A.A., Ribakov Y. 2011. Recent trends in steel fibered high-strength concrete. Materials and Design 32, Riyadh, Saudi Arabia, 4122-4151.
- [19] Soulioti D.V., Barkoula N.M., Paipetis A., Matikas T.E., 2011. Effects of fibre geometry and volume fraction on the flexural behaviour of steel-fibre reinforced concrete. Strain 47, Ioannina, Greece, 535-541.
- [20] Tepfers R., 2010. Fiber-reinforced concretes with a high fiber volume fraction - a look in future. Mechanics of Composite Materials 46, Goteborg, Sweden, 3.
- [21] Zhang J., Stang H., 1997. Applications of stress crack width relationship in predicting the flexural behavior of fibre-reinforced concrete. Cement and Concrete Research 28(3), Lyngby, Denmark, 439-452.
- [22] Zollo R.F., 1996. Fiber-reinforced Concrete: on Overview after 30 Years of Development. Cement and Concrete Composites 19, Miami, USA, 107-122.

DESIGNING OF STEEL FIBER REINFORCED CONCRETE ELEMENTS IN BENDING USING RESIDUAL STRENGTHS

Summary. The paper presents possibilities of applying steel fibre reinforced concrete made of waste aggregate, with fiber content equal to 1.2%, to produce bending structural elements. The characteristic residual strengths determined in accordance with PN-EN 14651 of the composite enabled the calculation of flexural capacity of selected slabs. Calculations were made according to the latest international methods fib Model Code 2010 and RILEM TC162-TDF. Selected computational methods have been evaluated and the effect of steel fibers on the bending load capacity has been discussed.