Oryginalny artykuł naukowy (Original research paper)

prof. dr hab. inż. Łukasz Drobiec[1)*)]
ORCID: 0000-0001-9825-6343
mgr inż. Julia Blazy[1)]
ORCID: 0000-0001-9525-8650

Właściwości fibrobetonu określane w badaniach normowych – test wytrzymałości na ściskanie oraz test trzypunktowego zginania

Properties of FRC determined in standard tests – compressive strength and three – point bending test

DOI: 10.15199/33.2023.09.02

Streszczenie. Celem artykułu jest przedstawienie wyników badań próbek wykonanych z trzech mieszanek betonowych z dodatkiem włókien polimerowych. Stwierdzono, że na maksymalną wytrzymałość na ściskanie i rozciąganie przy zginaniu nie miał wpływu rodzaj i ilość włókien. Ich wpływ był widoczny po zarysowaniu się belek w teście trzypunktowego zginania. Określono i porównano resztkowe oraz równoważne wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu. Ponadto opisano zależności pomiędzy ugięciem oraz rozwarciem początku i końca nacięcia w zginanych belkach.
Słowa kluczowe: fibrobeton; włókna polimerowe; wytrzymałość na ściskanie; wytrzymałość równoważna; wytrzymałość resztkowa.

Abstract. The aim of the article was to present the results of testing three speciments made of polymer fiber reinforced concretes (FRC). It was found that the maximum compressive and flexural tensile strength was not affected by the type and amount of fibres. Their influence was visible after the cracking of the beams in the three – point bending test. Residual and equivalent flexural tensile strengths were calculated and compared. Finally, the dependencies between beam's deflection and crack mouth and tip opening displacement in the flexural tests were described.
Keywords: fiber reinforced concrete (FRC); polymer fibres; compressive strength; residual strength; equivalent strength.

Fibrobeton jest materiałem coraz częściej stosowanym w budownictwie i architekturze, przede wszystkim ze względu na mostkowanie zarysowań, brak kruchego zniszczenia oraz dużą wytrzymałość. Mimo wymienionych zalet wciąż budzi nieufność projektantów, a jego zakres zastosowania pozostaje dość ograniczony. Wątpliwości budzi często równomierność rozkładu włókien, ich wpływ na maksymalną wytrzymałość na rozciąganie oraz stosowanie zamiast zbrojenia tradycyjnego. W celu usystematyzowania wiedzy przeprowadzono wiele badań określających wpływ włókien stalowych na właściwości betonu. Istnieją również normy na badania fibrobetonów, np. PN-EN 14651 [1] i RILEM TC 162-TDF [2], ale dotyczą one przede wszystkim fibrobetonów z włóknami stalowymi. Znacznie mniej rozpoznany jest temat efektywności włókien syntetycznych. Nie istnieje też norma dotycząca badania tych włókien. Z drugiej strony, dzisiejszy świat jest bardzo mocno zorientowany na zrównoważony rozwój, zmniejszenie emisji CO_2 oraz odpowiedzialną produkcję i konsumpcję betonu. W związku z tym często wykorzystuje się inne materiały pucolanowe jako zamienniki cementu w celu zmniejszenia śladu węglowego. Jednym z nich jest metakaolin, który dodatkowo zmniejsza przepuszczalność chlorków, nasiąkliwość oraz poprawia odporność na siarczany i kwasy elementów betonowych [3]. Ponadto zwiększa on wytrzymałość betonu na ściskanie oraz rozciąganie przy zginaniu i rozłupywaniu [4].

Celem artykułu jest przedstawienie wyników testów trzypunktowego zginania (3PBT) belek wykonanych z trzech fibrobetonów z dodatkiem włókien polimerowych i metakaolinu. Podjęto próbę korelacji resztkowych i równoważnych wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu określanych odpowiednio wg normy [1, 2], ponieważ pomimo coraz liczniejszych badań fibrobetonów na zginanie, tylko w niewielu z nich znaduje się ich porównanie. Ponadto postanowiono sprawdzić zasadność stosowania norm [1, 2] do badania betonów z włóknami polimerowymi. Potwierdzono skuteczność zaproponowanych przez autorów nowatorskich wzorów do obliczania zależności pomiędzy ugięciem oraz rozwarciem początku i końca nacięcia w belce zginanej.

[1)] Politechnika Śląska, Wydział Budownictwa
[*)] Adres do korespondencji:
lukasz.drobiec@polsl.pl

Program badań

Zaprojektowano i wykonano trzy fibrobetony (nr 1 – 3), z dodatkiem metakaolinu oraz mikro- i makrowłókien polimerowych (odpowiednio mikroPF i makroPF), różniące się rodzajem i zawartością tych włókien. Tabele 1 i 2 przedstawiają skład mieszanek fibrobetonowych oraz charakterystykę użytych włókien (długość l_f, średnica d_f, wytrzymałość na rozciąganie f_{ft} i moduł Younga E_f). Właściwości zastosowanego metakaolinu opisane są szczegółowo w [5].

Z każdej mieszanki wykonano sześć kostek o wymiarach 150 x 150 x 150 mm do testu ściskania oraz sześć belek o wymiarach 150 x 150 x 700 mm do testu 3PBT. Próbki przygotowano i przechowywano zgodnie z PN-EN 12390-1 [6] i PN-EN 12390-2 [7] aż do dnia testu. Ze względu na rodzaj zastosowanego cementu (największy przyrost wytrzymałości w początkowym etapie wiązania) i dodatek metakaolinu (wg [8] nie

Tabela 1. Skład mieszanek fibrobetonowych [kg/m³]
Table 1. Concrete mixture composition [kg/m³]

Skład	Fibrobeton		
	nr 1	nr 2	nr 3
CEM II/A-V 42,5 R	350	350	350
Piasek 0/2 mm	800	800	800
Żwir 2/8 mm + Żwir 8/16 mm	525 + 525	525 + 525	525 + 525
Woda	185	185	185
Superplastyfikator	4,6	4,6	4,2
Metakaolin	25	25	25
Włókna: Typ I + Typ II + Typ III	2,0 + 0,0 + 1,0	0,0 + 2,0 +1,0	0,0 + 2,5 + 0,5

Tabela 2. Charakterystyka włókien polimerowych
Table 2. Characteristics of polymer fibres

Typ I – makroPF	Typ II – makroPF	Typ III – mikroPF
kopolimer PE – PP	polipropylen	polipropylen
l_f = 42 mm przekrój = 70 x 1600 µm	l_f = 54 mm l_f/d_f = 70	l_f = 12 mm d_f = 0,018 mm
f_{ft} = 550 MPa	f_{ft} = 640 MPa	f_{ft} = 350 – 400 MPa
E_f = 2,8 – 4,0 GPa	E_f = 11 GPa	E_f nieznany

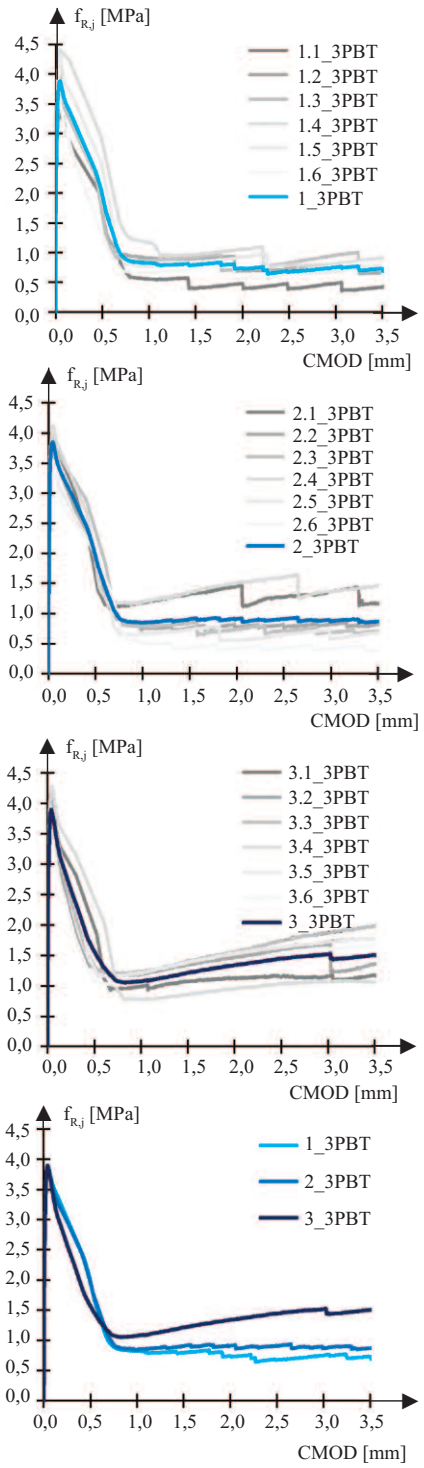
odnotowuje się znacznego zwiększenia wytrzymałości pomiędzy 28 a 56 dniem od zabetonowania) próbki przetestowano po 56 oraz 112 dniach. Wszystkie belki przeznaczone do testu 3PBT zostały nacięte w środku rozpiętości na szerokość 5 mm i głębokość 25 mm.

Test wytrzymałości na ściskanie przeprowadzono wg PN-EN 206 [9], zgodnie z którą naprężenie zwiększano z prędkością 0,5 MPa/s. **Test 3PBT** przeprowadzono wg norm [1] oraz [2] na stanowisku badawczym przedstawionym na fotografii. Czujniki przemieszczeń LVDT zainstalowano z dwóch stron próbki do pomiaru ugięcia belki (δ). W obszarze nacięcia zamontowano czujniki zaciskowe do rejestrowania przemieszczeń początku nacięcia (CMOD) i końca nacięcia (CTOD). Rozpiętość między podporami (l) wynosiła 500 mm. Próbki były obciążane siłą F ze stałym przyrostem δ równym 0,2 mm/min, aż do osiągnięcia ugięcia 5 mm. Podczas testu 3PBT rejestrowano wykresy F–CMOD, F–CTOD i F – δ. Korzystając ze wzorów zawartych w [1], wykresy F – CMOD przekształcono na $f_{R,j}$ – CMOD oraz określono granice proporcjonalności $f^{f}_{ct,L}$ i wytrzymałości resztkowe na rozciąganie przy zginaniu $f_{R,j}$.

Stanowisko badawcze w przypadku testu 3PBT
Testing set-up for 3PBT

Wyniki badań

Wytrzymałość na ściskanie (f_c) została określona po 56 i 112 dniach (dzień testów na zginanie) od zabetonowania. Za każdym razem badano trzy kostki. Średnie wartości w przypadku wszystkich trzech typów fibrobetonów przedstawiono w tabeli 3. W przypadku badań próbek z fibrobetonów nr 2 w 56 dniu, dwa wyniki zostały odrzucone ze względu na zbyt szybkie zniszczenie. Wytrzymałość na ściskanie wszystkich fibrobetonów po ośmiu tygodniach była prawie taka sama, niezależnie od typu i ilości użytych włókien. Po upływie następnych ośmiu tygodni f_c fibrobetonu nr 1, 2 i 3 zwiększyło się odpowiednio o 32, 27 i 23%. Na rysunku 1 przedstawiono zależność $f_{R,j}$ – CMOD, gdzie w opisie próbek X.Y_3PBT, X oznacza numer fibrobetonu (1 – 3), a Y numer badanej belki (1 – 6). Nagłe spadki na wykresach w fazie po zarysowaniu świadczyły o wyciąganiu bądź zrywaniu się włókien w przekroju zarysowania. Z rysunku 1 wynika również, że fibrobetony nr 1 i 2 charakte-



Rys. 1. Zależności $f_{R,j}$ – CMOD uzyskane z testów 3PBT
Fig. 1. $f_{R,j}$ – CMOD curves obtained from 3PBT

Tabela 3. Wyniki testów wytrzymałości na ściskanie
Table 3. Results of compressive strength tests

Dzień testów	Wytrzymałość na ściskanie f_c [MPa]		
	próbki z fibrobetonu nr 1	próbki z fibrobetonu nr 2	próbki z fibrobetonu nr 3
56 dzień	44,07 (1,69; 3,84)*	44,20 (-)*	44,90 (2,17; 4,82)*
112 dzień	58,29 (2,12; 3,64)*	56,06 (0,87; 1,55)*	55,34 (5,69; 10,29)*

* odpowiednio: odchylenie standardowe [MPa] oraz współczynnik zmienności [%]

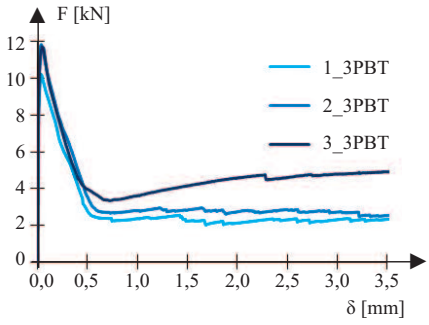
ryzowały się bardzo podobnym przebiegiem zależności $f_{R,j}$ – CMOD. Mogło to być związane z taką samą zawartością makroPF i mikroPF (odpowiednio 2 i 1 kg/m^3). Warto również zaznaczyć, że fibrobetony1 i 2, po osiągnięciu maksymalnej wytrzymałości, zachowały się jak materiał quasi-plastyczny z osłabieniem (z ang. *softening behaviour*).

Tabela 4 zawiera wartości wytrzymałości określanej zgodnie z [1]: $f^f_{ct,L}$ oraz $f_{R,1}$, $f_{R,2}$, $f_{R,3}$ i $f_{R,4}$ w przypadku CMOD odpowiednio 0,5; 1,5; 2,5 i 3,5 mm. Na jej podstawie stwierdzono, że w fazie po zarysowaniu fibrobeton nr 2 osiągnął odpowiednio lepsze wyniki o 14, 34 i 20% niż fibrobeton nr 1 w przypadku $f_{R,2}$, $f_{R,3}$ i $f_{R,4}$. Powodem może być większa f_{ft} oraz l_f włókna Typu II zastosowanego w fibrobetonie nr 2 w porównaniu z Typem I (tabela 2), dzięki czemu makropęknięcia były mostkowane efektywniej. Zwiększona ilość makroPF w fibrobetonie nr 3 spowodowała natomiast, że to właśnie te belki osiągnęły największe wartości $f_{R,2} – f_{R,4}$. Dodatkowo, zdolność przenoszenia obciążeń, przy zwiększającym się CMOD, wzrastała, zamiast maleć. Można zatem stwierdzić, że fibrobeton nr 3 jest materiałem quasi-plastycznym ze wzmocnieniem, ale osłabionym (z ang. *soft – hardening behaviour*). Porównanie maksymalnej wytrzymałości $f^f_{ct,L}$ wykazało, że **rodzaj** i ilość **włókien** nie miały istotnego wpływu na ich wartości. Średnia $f^f_{ct,L}$ wszystkich fibrobetonów wynosiła 3,876 MPa.

Tabela 4. Wyniki testów 3PBT: $f^f_{ct,L}$ oraz $f_{R,j}$
Table 4. Results of 3PBT: $f^f_{ct,L}$ and $f_{R,j}$

Nr próbki z fibrobetonu	$f^f_{ct,L}$ [MPa]	$f_{R,1}$ [MPa]	$f_{R,2}$ [MPa]	$f_{R,3}$ [MPa]	$f_{R,4}$ [MPa]
1	3,881	1,979	0,794	0,675	0,726
2	3,848	1,954	0,905	0,904	0,870
3	3,899	1,571	1,212	1,446	1,506

Norma PN-EN 14651 [1] proponuje określenie wytrzymałości resztkowych na rozciąganie przy zginaniu $f_{R,j}$, natomiast RILEM TC 162-TDF [2] opisuje metodę obliczania równoważnych wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu $f_{eq,2}$ – wzór (1) i $f_{eq,3}$ – wzór (2), gdy znany jest wykres F – δ. Na rysunku 2 przedstawiono wykresy F – δ uzyskane z badań próbek fibrobetonów nr 1 – 3, natomiast w tabeli 5 wyniki obliczeń wg [2].



Rys. 2. Zależności F – δ uzyskane z testów 3PBT
Fig. 2. F – δ plots obtained from 3PBT

$f_{eq,3}$ i $f_{R,4}$ możliwe było zdefiniowanie zależności liniowej (rysunek 3). Wyniki testów 3PBT opisanych przez nas w [10], wykonane na belkach o innym składzie i z dodatkiem innego rodzaju włókien, zostały wykorzystane do sprawdzenia wyznaczonej zależności (rysunek 3). W tabeli 6 przedstawiono wyniki obliczeń równoważnych oraz resztkowych wytrzymałości fibrobetonów z [10]. Symbole PM, PD i FF oznaczają rodzaj zastosowanych włókien, a liczba określa ilość włókien w kg/m^3.

Tabela 5. Wyniki testów 3PBT: $D^f_{BZ,j}$ oraz $f_{eq,j}$ wraz z porównaniem do $f_{R,j}$
Table 5. Results of 3PBT: $D^f_{BZ,j}$ and $f_{eq,j}$ with comparison to $f_{R,j}$

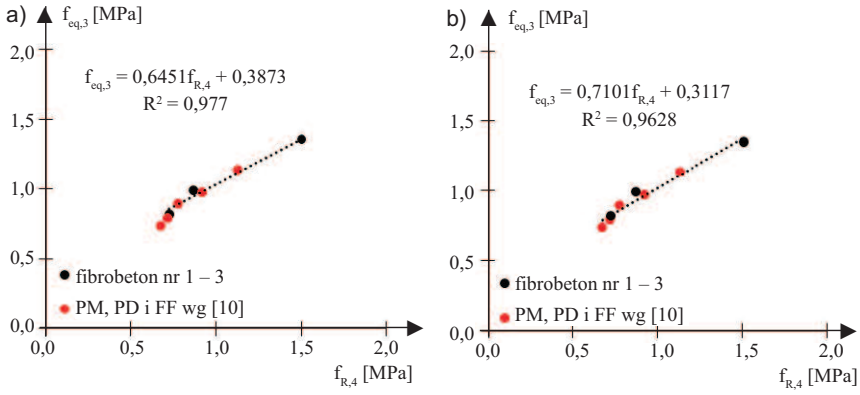
Nr próbki z fibrobetonu	$D^f_{BZ,2}$ [Nm]	$D^f_{BZ,3}$ [Nm]	$f_{eq,2}$ [MPa]	$f_{eq,3}$ [MPa]	$f_{eq,2}/f_{R,1}$ [%]	$f_{eq,3}/f_{R,4}$ [%]
1	1,825	6,402	1,168	0,819	59	113
2	2,167	7,758	1,387	0,993	71	114
3	2,126	10,550	1,361	1,350	87	90

$$f_{eq,2} = (3/2) \cdot (D^f_{BZ,2}/0,5) \cdot (l/bh^2_{sp}) \quad (1)$$
$$f_{eq,3} = (3/2) \cdot (D^f_{BZ,3}/2,5) \cdot (l/bh^2_{sp}) \quad (2)$$

gdzie:
$f_{eq,2}$ i $f_{eq,3}$ – równoważne wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu [N/mm^2];
$D^f_{BZ,2}$ i $D^f_{BZ,3}$ – pola powierzchni pod wykresem F – δ [Nmm], określane zgodnie z [2];
l – rozpiętość belki pomiędzy dolnymi podporami [mm] = 500 mm;
b – szerokość belki [mm] = 150 mm;
h_{sp} – wysokość belki pomniejszona o wysokość nacięcia [mm] = 125 mm.

Porównując wytrzymałości resztkowe $f_{R,1}$ oraz $f_{R,4}$ z równoważnymi $f_{eq,2}$ oraz $f_{eq,3}$ stwierdzono, że nie są one jednakowe: $f_{eq,2}$ było zawsze mniejsze od $f_{R,1}$ o 13 – 41% w zależności od badanego fibrobetonu, natomiast wartość $f_{R,4}$ tylko w przypadku fibrobetonu nr 3 była większa od $f_{eq,3}$, podczas gdy $f_{eq,3}$ pozostałych fibrobetonów było korzystniejsze o ok. 13,5% od $f_{R,4}$. W przypadku Wyniki opisane w [10] dobrze pokrywają się z zależnością pomiędzy $f_{R,4}$ a $f_{eq,3}$ zaproponowaną na podstawie fibrobetonów nr 1, 2 i 3.

Norma [1] zawiera wzór do określenia zależności między δ a CMOD. Należy jednak zaznaczyć, że dotyczy ona betonów z dodatkiem włókien metalicznych nie dłuższych niż 60 mm oraz betonów zbrojonych kombinacją włókien metalicznych i innych. Postanowiono więc sprawdzić, na podstawie przeprowadzonych badań fibrobetonów nr 1 – 3, czy wzór ten można zastosować przez analogię do betonów z włóknami polimerowymi. Zdefiniowano średnią zależność między δ a CMOD szesnastu próbek (dwie belki nie zostały wzięte pod uwagę, ponieważ stalowa rama, na której zamontowano czujniki LVDT,

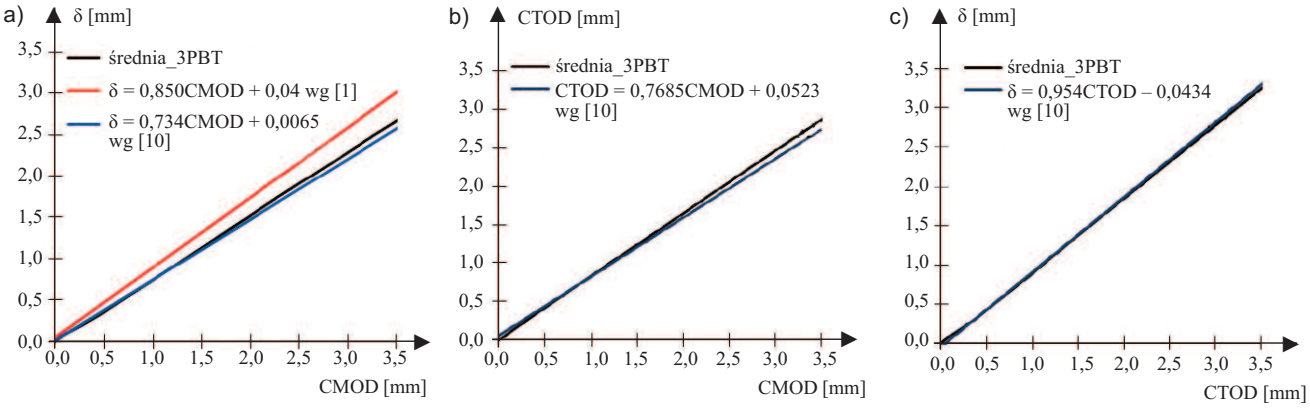


Rys. 3. Zależność między $f_{R,4}$ a $f_{eq,3}$ określona na podstawie wyników: a) fibrobetonów nr 1 – 3; b) fibrobetonów nr 1 – 3 oraz PM, PD i FF z [10]
Fig. 3. Relationship between $f_{R,4}$ and $f_{eg,3}$ determined on the basis of results from: a) fibre reinforced concretes 1 – 3; b) fiber reinforced concretes 1 – 3 and PM, PD, and FF from [10]

Tabela 6. Wyniki testów 3PBT belek PM, PD oraz FF z [10]
Table 6. Results of 3PBT of beams PM, PD, and FF from [10]

Typ	$f_{eq,2}$ [MPa]	$f_{eq,3}$ [MPa]	$f_{R,1}$ [MPa]	$f_{R,4}$ [MPa]	$f_{eq,2}/f_{R,1}$ [%]	$f_{eq,3}/f_{R,4}$ [%]
PM_3	1,346	1,134	1,518	1,129	89	100
PM_2	0,852	0,735	1,068	0,677	80	109
PD_3	1,042	0,974	1,159	0,920	90	106
PD_2	1,091	0,793	1,696	0,719	55	110
FF_2	1,130	0,896	1,211	0,778	93	115

przesunęła się na początku badania). Na podstawie wyników przedstawionych na rysunku 4a stwierdzono znaczną różnicę między wykresem CMOD – δ uzyskanym podczas badań a wzorem z [1]. Oznacza to, że wzór ten nie powinien być stosowany w przypadku fibrobetonów z dodatkiem włókien polimerowych. Znacznie bardziej wiarygodne wartości uzyskano w przypadku równania zaproponowanego w [10] (rysunek 4a). Na podstawie badań przeprowadzonych na próbkach fibrobetonów z dodatkiem włókien polimerowych różniących się składem i rodzajem włókien potwierdzono poprawność i skuteczność tego wzoru. Porównanie wykonano także w przypadku innych zależności zaproponowanych w pracy [10]. Związek między CMOD a CTOD został określony wzorem widocznym na rysunku 4b, a następnie porównany ze średnią z osiemnastu próbek z badań fibrobetonów nr 1 – 3. Wyniki analizy pokazały, że wzór zaproponowany w [10] może być skutecznie wykorzystywany do obliczeń CTOD za pomocą CMOD i odwrotnie. Podobnie jest z zależnością pomiędzy CTOD a δ z [10] (rysunek 4c). Średnią z badań obliczono na podstawie szesnastu próbek fibrobetonów nr 1 – 3 (dwie próbki wyeliminowano z wymienionego wcześniej powodu).



Rys. 4. Zależność między: a) CMOD a δ; b) CMOD a CTOD; c) CTOD a δ
Fig. 4. Relationship between: a) CMOD and δ; b) CMOD and CTOD; c) CTOD and δ

Wnioski

W artykule przedstawiono wyniki testów wytrzymałości na ściskanie i trzypunktowe zginanie próbek wykonanych z trzech fibrobetonów z dodatkiem włókien polimerowych. Fibrobetony nr 1 i 2 różniły się jedynie rodzajem dodanych makrowłókien, natomiast ich ilość oraz zawartość i typ mikrowłókien były takie same. W fibrobetonie nr 3 użyto takich samych makro- i mikrowłókien jak w nr 2, ale w innych proporcjach. Stwierdzono, że na maksymalną wytrzymałość na ściskanie i rozciąganie przy zginaniu nie miał wpływu rodzaj i ilość włókien. Wpływ włókien był natomiast widoczny po zarysowaniu się belek w teście zginania. Fibrobetony nr 1 i 2, do momentu osiągnięcia CMOD równego 1 mm, miały podobną wytrzymałość. Następnie, ze względu na większą wytrzymałość oraz długość makrowłókien, fibrobeton nr 2 osiągał nieco większą wartość wytrzymałości resztkowych. Najlepiej zachowywały się próbki z fibrobetonu nr 3 ze względu na największą ilość makrowłókien. Zdefiniowano również zależność liniową pomiędzy resztkową $f_{R,4}$ (wg PN-EN 14651) a równoważną $f_{eq,3}$ wytrzymałością na rozciąganie przy zginaniu (wg RILEM TC 162-TDF). Ponadto potwierdzono skuteczność zaproponowanych wcześniej przez nas wzorów do obliczania zależności między ugięciem oraz rozwarciem początku i końca nacięcia w belce w teście trzypunktowego zginania.

Literatura

[1] PN-EN 14651+A1:2007 Metoda badania betonu zbrojonego włóknem stalowym – Pomiary wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu (granica proporcjonalności LOP).

[2] RILEM TC 162-TDF Test and design methods for steel fibre reinforced concrete, final recommendations. Materials and Structures. 2002; t. 35, nr 9: 579 – 582.

[3] Chandak MA, Pawade PY. Influence of Metakaolin in Concrete Mixture: A Review. The International Journal of Engineering and Science. 2018; ss. 37 – 41.

[4] Sabir BB, Wild S, Bai J. Metakaolin and calcined clays as pozzolans for concrete: a review. Cement & Concrete Composites. 2001; 23: 441 – 454.

[5] ASTRA Technologia Betonu Astra MK-40. Karta danych technicznych. https://astra-polska.com/wp-content/uploads/2020/11/karta-techniczna-MK40-1-2.pdf (udostępniono sie. 14, 2023).

[6] PN-EN 12390-1:2021-12 Badania betonu – Część 1: Kształt, wymiary i inne wymagania dotyczące próbek i form.

[7] PN-EN 12390-2:2019-07 Badania betonu – Część 2: Wykonywanie i pielęgnacja próbek do badań wytrzymałościowych.

[8] Kadri EH, Kenai S, Ezziane K, Siddique R, De Schutter G. Influence of metakaolin and silica fume on the heat of hydration and compressive strength development of mortar. Applied Clay Science. 2011,DOI: 10.1016/j.clay. 2011.06.008.

[9] PN-EN 206+A2: 2021-08 Beton – Wymagania, właściwości użytkowe, produkcja i zgodność.

[10] Blazy J, Drobiec Ł, Wolka P. Flexural tensile strength of concrete with synthetic fibers. Materials. 2021; DOI: 10.3390/ma14164428.

Publikacja wspierana w ramach rektorskiego grantu projakościowego. Politechnika Śląska, numer grantu 03/020/RGJ22/0131.

Przyjęto do druku: 20.09.2023 r.