

mgr inż. Julia Blazy^{1)*}

ORCID: 0000-0001-9525-8650

prof. dr hab. Łukasz Drobiec¹⁾

ORCID: 0000-0001-9825-6343

Charakterystyka porównawcza wytrzymałości betonu z dodatkiem włókien polimerowych

Comparative characteristics of polymer fiber reinforced concrete strength

DOI: 10.15199/33.2022.09.02

Streszczenie. Celem artykułu była analiza porównawcza wytrzymałości betonu z dodatkiem włókien polimerowych uzyskanych w badaniach jednoosiowego rozciągania, trzypunktowego zginania i rozłupywania Montevideo. Wykonano jedną mieszankę bez włókien i pięć mieszanek fibrobetonowych z 2 lub 3 kg/m³ włókien o różnej geometrii i formie. Stwierdzono, że dodanie włókien nie wpłynęło w istotny sposób na maksymalną wytrzymałość betonu na ściskanie, jednoosiowe rozciąganie, zginanie i rozłupywanie. Natomiast poprawie uległy siły i wytrzymałości resztkowe, energia pęknięcia i ciągliwość betonu. Obliczony współczynnik korelacji obciążenia ($k_{TRMV} = 1,5$) pozwolił na porównanie wyników testu rozłupywania Montevideo z testami trzypunktowego zginania przy szerokości rozwarcia rysy większej niż 1 mm. Test rozłupywania Montevideo może być prostszą i bardziej kompaktową metodą badawczą w porównaniu z testem trzypunktowego zginania.

Słowa kluczowe: fibrobeton; włókna polimerowe; test jednoosiowego rozciągania; test trzypunktowego zginania; test rozłupywania Montevideo.

Abstract. The aim of the article was a comparative analysis of concrete strength with the addition of polymer fibers subjected to three test methods: the uniaxial tensile test, the three-point bending test, and the Montevideo splitting tensile test. One mix without fibers and five fiber reinforced concrete mixes were made with 2 or 3 kg/m³ of polymer fibers of different geometry and form. It was found that the addition of fibers did not significantly affect the maximum compressive, uniaxial tensile, flexural, and splitting tensile strength of concrete. On the other hand, residual forces and strengths, fracture energy, and ductility of concrete were significantly improved. The calculated load correlation coefficient ($k_{TRMV} = 1.5$) allowed the correlation of the results of the Montevideo splitting tensile test with the three-point bending test for a crack mouth opening displacement greater than 1 mm. Overall, the Montevideo splitting test may be a simpler and more compact test method compared to the three-point bending test.

Keywords: fiber reinforced concrete; polymer fibers; uniaxial tensile test; three-point bending test; Montevideo splitting tensile test.

Sprostanie wymaganiom zrównoważonego rozwoju to jedno z najbardziej aktualnych wyzwań na świecie. Z tego powodu coraz większy nacisk kładzie się na optymalizację przemysłu betonów, który odpowiada za emisję 8 – 9% całkowitego CO₂ w atmosferze. Zmniejszenie śladu środowiskowego możliwe jest przez częściowe zastąpienie cementu innymi materiałami [1]. Inną możliwością jest wytwarzanie trwalszych konstrukcji o wydłużonej żywotności i mniejszych kosztach utrzymania. Jednym z materiałów, które mogą sprostać wyzwaniom wydłużonej trwałości i zwiększonej wytrzymałości, jest fibrobeton, czyli beton zbrojony włóknami polimerowymi (PFB) [2]. W związku z tym, że jest on droższy od zwykłego betonu, konieczne jest zbadanie jego zalet mechanicznych i zastanowienie się nad rozsądnym wykorzystaniem w konstrukcjach. Podstawową rolą włókien polimerowych jest zwiększenie odporności na zarysowania i przeciwdziałanie skurczowi. W tym celu włókna często wykorzystywane są jako sposób wzmocnienia posadzek przemysłowych [3, 4]. Projektowanie posadzek wymaga wiedzy na temat zachowania się fibrobetonu pod wpływem różnego rodzaju obciążeń. Wytrzymałość na rozciąganie jest bezpośrednio określana dzięki testowi jednoosiowego rozciągania (TJOR). Badanie to musi być prze-

prowadzone w dobrze kontrolowanych warunkach, na idealnej próbce z wyeliminowaniem wszelkich mimośrodów. Drugą metodą proponowaną w wielu artykułach, ale także w Model Code 2010 [5] i Technical Report 34 [6] jest test trzypunktowego zginania (T3PZ). Jest to niewątpliwie metoda łatwiejsza i mniej czasochłonna niż poprzednia. Należy jednak zwrócić uwagę na znaczną ilość energii sprężystej, która magazynowana jest w belce. Trzeba również wspomnieć, że metoda ta pozwala tylko na pośrednie określenie wytrzymałości na rozciąganie. Podobnie jest w przypadku testu rozłupywania klinem (TRK), który został opisany przez Linsbauera i Tschegga w [7]. W TRK próbki są mniejsze niż w innych metodach, stąd łatwiejsze do przenoszenia przez pracowników laboratorium, a sam test stabilniejszy ze względu na mniejszą energię magazynowaną w próbce. W celu jeszcze większego uproszczenia TRK, Segura-Castillo i in. zaproponowali w [8] nową, nieco zmodyfikowaną metodę zwaną testem rozłupywania Montevideo (TRMV). Liczba nacięć w próbce została zminimalizowana do jednego, a badanie można przeprowadzić w standardowej maszynie wytrzymałościowej. Jedyną potrzebną dodatkowo częścią jest klin rozłupujący próbkę, ale o uproszczonym kształcie i mniejszych wymiarach w porównaniu z klinem z TRK. Ograniczona liczba badań TRMV sprawia jednak, że naukowcy wciąż nie mają wystarczającej wiedzy na temat tej metody badania betonu i potrzebne są dalsze analizy.


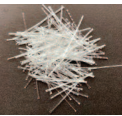

¹⁾ Politechnika Śląska; Wydział Budownictwa

^{*}) Adres do korespondencji: julia.blazy@polsl.pl

Plan badań

Materiały. Właściwości zastosowanych włókien przedstawiono w tabeli 1. Ponadto skład mieszanki referencyjnej i pięciu fibrobetonowych zestawiono w tabeli 2. Do wytworzenia mieszanki użyto wody z sieci wodociągowej oraz cementu portlandzkiego CEM I 42,5R, a współczynnik wody do cementu (w/c) wynosił 0,50. Drobne i grube kruszywo stanowił piasek i żwir o maksymalnej średnicy ziarna odpowiednio 2 i 8 mm. Do mieszanki dodano również superplastyfikator na bazie modyfikowanego polimeru akrylowego. Następnie dodano 0, 2 lub 3 kg/m^3 włókien polimerowych (PF). Zaprojektowany beton miał sprostać wymaganiom wydłużonej trwałości i zwiększonej wytrzymałości.

Tabela 1. Charakterystyka zastosowanych włókien polimerowych
Table 1. Characteristics of used polymer fiber

Charakterystyka włókien	PM	PD	FF ¹⁾
			
l_f – długość	54 mm	48 mm	54 mm/54 mm
d_f – średnica	0,45 mm	0,60 mm	0,45 mm/-
f_{ft} – wytrzymałość na rozciąganie	550 – 650 MPa	500 – 580 MPa	620 – 758 MPa
Materiał	kopolimer	polimer	95% kopolimer + 5% polipropylen
Forma	skręcone, multifilamentowe	monofilamentowe	skręcone, multifilamentowe/fibrylowane

¹⁾ mieszanka dwóch rodzajów włókien

Tabela 2. Skład mieszanki betonowej bez i z włóknami [kg/m^3]
Table 2. Composition of concrete mixture without and with fibers [kg/m^3]

Nazwa mieszanki	Rodzaj włókna	Woda	Cement	Piasek	Żwir	Superplastyfikator	Włókna
PC	–	200	400	673	1052	1,43	0,0
PM_3	PM	200	400	673	1052	1,43	3,0
PM_2	PM	200	400	673	1052	1,43	2,0
PD_3	PD	200	400	673	1052	1,43	3,0
PD_2	PD	200	400	673	1052	1,43	2,0
FF_2	FF	200	400	673	1052	1,43	2,0

Przygotowanie i charakterystyka mieszanki betonowej.

Do przygotowania mieszanki zastosowano planetarny mieszalnik obrotowy. Początkowo połowę ilości drobnego i grubego kruszywa mieszano przez 1 min. Następnie dodano ok. 50% cementu, a po 1 min wodę wraz z superplastyfikatorem i mieszano przez 2 min. Kolejno dodano pozostałą część kruszywa i cementu, mieszając przez 1 min. W przypadku PFB, włókna zostały dodane i mieszane przez 2 min.

W celu określenia konsystencji mieszanki betonowej przeprowadzono test opadu stożka w przypadku wszystkich typów mieszanek opisany w EN 12350-2 [9]. Dodatkowo wykonano test rozplywu stożka mieszanki bez włókien zgodnie z EN 12350-8 [10]. Wyniki badań przedstawiono w tabeli 3.

Przygotowanie i przechowywanie próbek do badań. Wykonano 36 kostek do badania wytrzymałości na ściskanie, 18 belek do T3PZ oraz 6 próbek przeznaczonych do TJOR. Należy wspomnieć, że na obu końcach próbek zostały wprowadzone dwie warstwy strzemion (na $1/3$ i $2/3$ głębokości) w ce-

Tabela 3. Charakterystyka właściwości mieszanki betonowej
Table 3. Characteristic of fresh concrete mixture properties

Typ testu	PC	PM_3	PM_2	PD_3	PD_2	FF_2
Opad stożka [mm]	230 (S5)*	130 (S3)*	160 (S4)*	140 (S3)*	140 (S3)*	65 (S2)*
Rozpływ stożka [mm]	565 (SF1)*	–	–	–	–	–

* W nawiasach podano klasy konsystencji określone wg EN 12350-2 [9] w przypadku badania konsystencji metodą opadu stożka i wg EN 12350-8 [10] podczas badania konsystencji metodą rozplywu stożka.

lu wymuszenia zniszczenia próbek TJOR w przekroju środkowym. Następnie wszystkie próbki przykryto folią i systematycznie pielęgnowano wodą, aby zabezpieczyć je przed skurczem od wysychania. Rozformowanie nastąpiło 17 dnia, po czym próbki przechowywano w warunkach laboratoryjnych do dnia badania (36, 37 lub 38 dzień w zależności od serii betonu). W międzyczasie wykonano nacięcia w środku rozpiętości 18 belek. Miały one szerokość 5 mm i głębokość 25 mm zgodnie z EN 14651 [11]. Próbki do TRMV zostały uzyskane z naciętych belek, ale po ich wcześniejszym zbadaniu w T3PZ zgodnie z procedurą proponowaną w [8], a mianowicie z każdej belki wycięto jedną kostkę o wymiarach $150 \times 150 \times 150 \text{ mm}^3$ w pewnej odległości od miejsca powstania rysy i końcówki belki. Wykonano nacięcie o głębokości 25 mm i szerokości 5 mm, a więc identyczne jak w przypadku T3PZ, na tej samej powierzchni co w belkach. Łącznie wycięto 18 kostek (3 z każdego rodzaju betonu) w celu przeprowadzenia TRMV.

Metody badań

Test trzypunktowego zginania (T3PZ) wykonano zgodnie z normą EN 14651 [11]. Stanowisko badawcze wraz ze wszystkimi jego elementami i urządzeniami, m.in. liniowymi czujnikami przemieszczenia – LVDT i miernikami zaciskowymi przedstawiono na rysunku 1. Belki były swobodnie podparte, a rozpiętość pomiędzy podporami wynosiła 500 mm (l). Siła (F) została przyłożona w środku rozpiętości, a jej wzrost kontrolowany był przyrostem ugięcia (δ) 0,2 mm/min. Gdy $\delta = 5$ mm badanie zatrzymywano. Głównym celem T3PZ był pomiar zmiany F w stosunku do szerokości przemieszczenia końcówki rysy (CTOD) i szerokości rozwarcia rysy (CMOD). Dodatkowo, wykorzystując wzory (1) i (2) [11], obliczono granicę proporcjonalności $f_{ct,L}^f$ oraz wytrzymałość resztkową na rozciąganie przy zginaniu $f_{R,j}$. Szczegółowy opis tego badania i wyniki wpływu włókien na właściwości betonu przedstawiono w [2, 12, 13]. Należy również wspomnieć, że do dalszych analiz przyjęto średnią z trzech próbek przebadanych w ramach jednego typu betonu.

$$f_{ct,L}^f = 3F_L / 2bh_{sp}^2 \quad (1)$$

$$f_{R,j} = 3F_j / 2bh_{sp}^2 \quad (2)$$

gdzie:

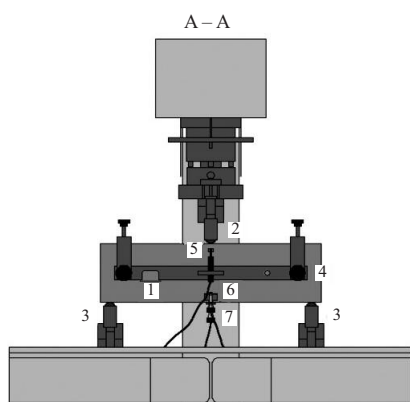
F_L – siła odpowiadająca granicy proporcjonalności [N];

F_j – siła odpowiadająca $CMOD_j$ ($j = 1, 2, 3, 4$) [N];

b – szerokość próbki 150 mm;

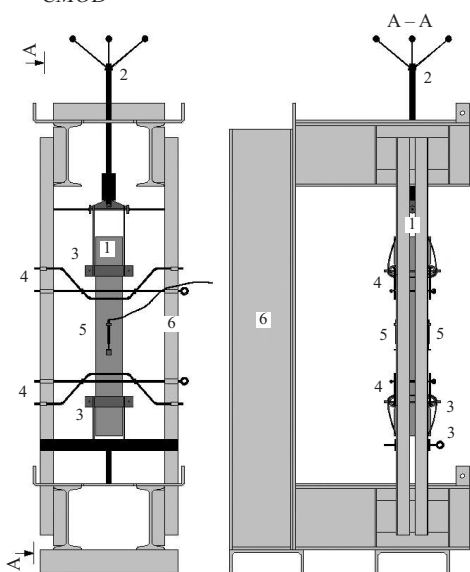
h_{sp} – odległość pomiędzy końcem nacięcia a górną powierzchnią próbki 125 mm.

Test jednoosiowego rozciągania (TJOR). Aparatura do TJOR została zaprojektowana na potrzeby tego badania i jest pokazana na rysunku 2. Próbki, większe niż zwykle stosowane w TJOR [14], zostały wyposażone w dwa czujniki



Rys. 1. Stanowisko badawcze testu trzypunktowego zginania: 1 – próbka; 2 – podpora ruchoma; 3 – podpora nieruchoma; 4 – sztywna rama do zainstalowania czujnika LVDT; 5 – czujnik LVDT do pomiaru δ ; 6 – miernik zaciskowy do pomiaru CTOD; 7 – miernik zaciskowy do pomiaru CMOD

Fig. 1. Set-up for three-point bending test: 1 – sample; 2 – loading roller; 3 – supporting roller; 4 – rigid frame to install LVDT sensor; 5 – LVDT to measure δ ; 6 – clip gauge to measure CTOD; 7 – clip gauge to measure CMOD



Rys. 2. Stanowisko badawcze testu jednoosiowego rozciągania: 1 – próbka; 2 – korbka do wywołania siły rozciągającej; 3 – drążek do zamocowania próbki; 4 – przęty zabezpieczające próbkę po zniszczeniu; 5 – czujnik LVDT do pomiaru w ; 6 – sztywna rama

Fig. 2. Set-up for uniaxial tensile test: 1 – sample; 2 – crank for application of the tensile force; 3 – pole to hold the sample; 4 – bars securing the sample after failure; 5 – LVDT sensor to measure w ; 6 – rigid frame

LVDT z obu stron do pomiaru szerokości rysy w . Zamocowano je w środkowym przekroju próbki, gdzie odległość pomiarowa wynosiła 100 mm. Siłę rozciągającą wywoływano manualnie, kręcąc specjalną korbą w górę. Celem badania było uzyskanie wykresu $F-w$ oraz maksymalnej wytrzymałości na rozciąganie betonu f_t zgodnie z wzorem (3).

$$f_t = F_t/bt \quad (3)$$

gdzie:

F_t – maksymalna siła rozciągająca [N];
 b – szerokość środkowego przekroju próbki 100 mm;
 t – głębokość środkowego przekroju próbki 100 mm.

Test rozłupywania

Montevideo przeprowadzono w standardowej maszynie wytrzymałościowej zgodnie z metodą zaproponowaną przez Segura-Castillo i in. w [8]. Najpierw próbka została umieszczona na stalowym pręcie na całej długości, aby umożliwić jej obrót podczas rozłupywania i powiększania się rysy. Następnie, pomiędzy górną belką a próbką umieszczono specjalnie zaprojektowany klin rozłupujący. Ponadto, w celu zmniejszenia tarcia pomiędzy betonową kostką a stalowym klinem zastosowano stalowe kątowniki, które zostały umieszczone po obu stronach nacięcia, zapewniając kontakt typu stal-stal. Na koniec zamontowano jeden czujnik LVDT z przodu i jeden z tyłu próbki

w miejscu wierzchołka nacięcia, aby zmierzyć CTOD. Po zakończeniu badania obliczono średnią wartość przemieszczeń z dwóch czujników. W celu skorelowania wyników z T3PZ i TRMV konieczne było uzyskanie krzywej $F-CMOD$ dla TRMV. W tym celu wykonano dodatkowe obliczenia, aby

z uzyskanych podczas badania wartości CTOD otrzymać odpowiadające wartości CMOD (wzór (4)) zgodnie z [8]. Ostatnia krzywa $F-CMOD$ w przypadku każdego typu betonu powstała na podstawie średniej z trzech badanych kostek.

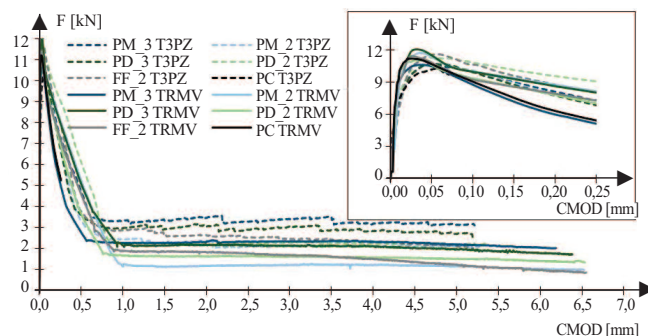
$$CMOD = CTOD (h/h_{sp}) \quad (4)$$

gdzie:

CMOD – szerokość rozwarcia rysy [mm];
 CTOD – szerokość przemieszczenia końcówki rysy [mm];
 h – wysokość próbki 150 mm;
 h_{sp} – odległość pomiędzy końcem nacięcia a górną powierzchnią próbki 125 mm.

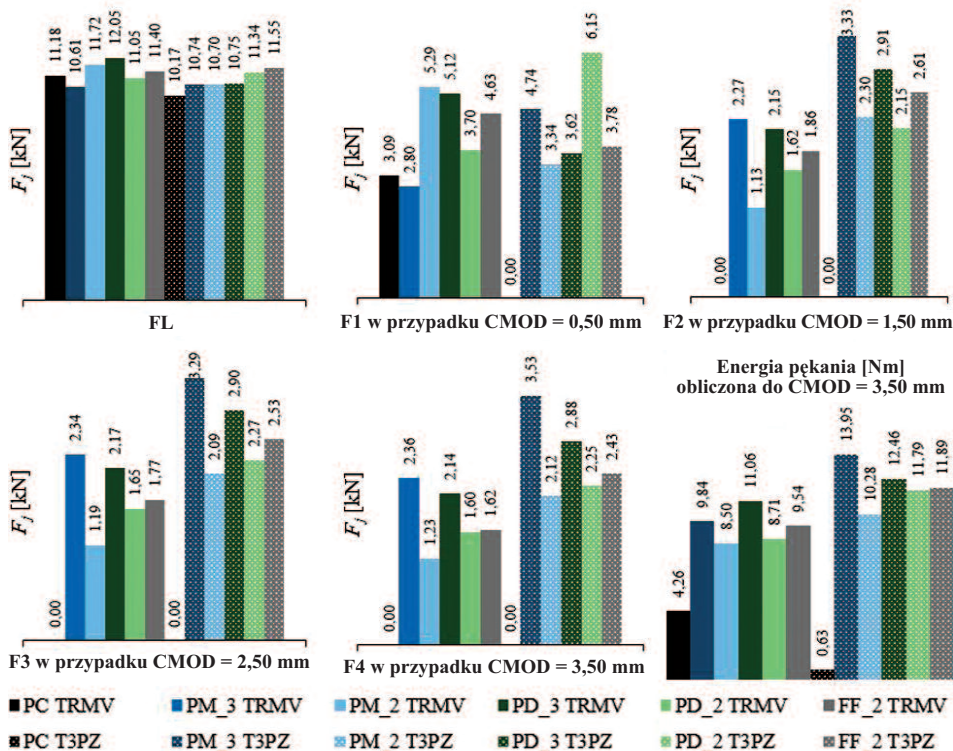
Analiza wyników badań

Średnia wytrzymałość na ściskanie f_c wszystkich próbek wyniosła 59,8 MPa. Wartości odchylenia standardowego $STD = 2,3$ MPa i współczynnika zmienności $COV = 3,8\%$ były na tyle małe, że dodatek PF nie miał wpływu na f_c . Krzywe $F-CMOD$ otrzymane w testach T3PZ i TRMV przedstawiono na rysunku 3, z którego wynika, że T3PZ i TRMV wykazywały podobne zależności. Beton PM_3 miał największe wartości sił resztkowych $F_2 - F_4$, kolejny był beton PD_3 również zawierający 3 kg/m³ włókien polimerowych (rysunek 4). Spośród betonów z 2 kg/m³ włókien najlepsze wyni-



Rys. 3. Wykresy $F-CMOD$ otrzymane w T3PZ i TRMV
 Fig. 3. $F-CMOD$ charts obtained for T3PZ and TRMV

ki obserwowano najczęściej w przypadku FF_2. Efekt ten mógł być skutkiem hybrydowego charakteru betonu, ponieważ włókna FF zawierały dwa rodzaje włókien, jak opisano w tabeli 1. Po zarysowaniu i widocznym nagłym spadku siły zarówno w T3PZ, jak i TRMV, wartości F przenoszone przez PM_2 i PD_2 ustabilizowały się, podczas gdy w przypadku FF_2 widoczny był ciągły spadek. W odniesieniu do F_1 wydaje się, że wartość w przypadku PM_3 w TRMV była niedoszacowana, natomiast PM_2 w TRMV i PD_2 w T3PZ była zawyżona. Te niezgodności mogły wynikać z faktu, że po pojawieniu się pęknięcia siła gwałtownie się zmniejszyła i nie udało się zarejestrować wystarczającej liczby pomiarów. W badaniach siła resztkowa F_1 , odpowiadająca $CMOD = 0,50$ mm, była zawsze zlokalizowana w momencie tego gwałtownego spadku. Analizując siły maksymalne, które doprowadziły do zarysowania próbek, stwierdzono, że w T3PZ w wyniku dodania PF, F_L zwiększyło się o 5 – 14% (tabela 4). W przypadku TRMV, pozytywny wpływ włókien polimerowych nie był aż tak wyraźnie widoczny. W przypadku PM_3 i PD_2 odnotowano nieznaczny spadek, szacowany na odpowiednio 5 i 1%, natomiast dla PM_2, PD_3 i FF_2 wzrost o odpowiednio 5, 8 i 2% w porównaniu z betonem bez włókien. Nieza-



Rys. 4. Wartości sił charakterystycznych i energii pęknięcia w przypadku T3PZ i TRMV
 Fig. 4. Values of characteristic forces and fracture energy for T3PZ i TRMV

leżnie od tego różnice F_L pomiędzy poszczególnymi próbkami były na tyle niewielkie (STD = 0,5 kN i COV = 4,5% zarówno w T3PZ, jak i TRMV), że dodanie włókien nie miało istotnego wpływu na maksymalną wytrzymałość na rozciąganie, co również widoczne jest na rysunku 3.

W przypadku energii pęknięcia, którą obliczono do CMOD = 3,50 mm, zaobserwowano podobne zależności w wynikach T3PZ i TRMV (rysunek 4) – betony z 3 kg/m³ włókien polimerowych miały największą energię pęknięcia, ok. 20 i 2,4 razy większą niż beton PC w przypadku odpowiednio T3PZ i TRMV. Spośród próbek z 2 kg/m³ włókien najlepsze wyniki uzyskał beton FF_2. Analiza wykazała znaczny wpływ obecności włókien i ich zwiększonej zawartości na wzrost energii pęknięcia i ciągliwości betonu. Należy podkreślić, że w przypadku każdej próbki w badaniu zginania i rozłupywania powstało tylko jedno zarysowanie, zaczynające się od nacięcia, które następnie propagowało w górę dla T3PZ i w dół dla TRMV. Co więcej, pomimo kontynuowania T3PZ i TRMV, aż do osiągnięcia CMOD równego odpowiednio ok. 5,0 i 6,5 mm, próbki PFB zachowały swoją integralność, podczas gdy próbki PC pękły na pół wzdłuż rysy. Inaczej było w TJOR, gdzie zarówno próbki PFB, jak i PC uległy całkowitemu pęknięciu (kruche zniszczenie) i niemożliwe było uzyskanie wykresu F-w. Wyniki TJOR przedstawiono w tabeli 4. W przeciwieństwie do T3PZ, nie wszystkie betony PFB zwiększyły swoją wytrzymałość w TJOR w porównaniu z betonem bez włókien. Natomiast, podobnie jak w przypadku T3PZ z próbek z 2 kg/m³ włókien, beton FF_2 uzyskał najlepszy wynik. Należy wspomnieć, że próbki betonów PM_3, PD_3, PD_2 i FF_2 w TJOR pękły w pobliżu miejsca, gdzie

kończyły się strzemiona, a więc poza mierzonym obszarem.

Analizę korelacji wykonano tylko w przypadku T3PZ i TRMV, gdyż wyniki f_t w TJOR były niejednoznaczne, ponieważ wystąpiło kruche zniszczenie i nie było możliwości zarejestrowania krzywych F-w. T3PZ jest metodą standaryzowaną zgodną z [11], dlatego też wyniki z TRMV powiązano z wynikami testu na zginanie współczynnikiem korelacji obciążenia k_{TRMV} wg wzoru 5).

$$k_{TRMV} = F^{T3PZ}/F^{TRMV} \quad (5)$$

gdzie: F^{T3PZ} – siła w T3PZ [kN]; F^{TRMV} – siła w TRMV [kN].

Obliczenia współczynnika k_{TRMV} w przypadku poszczególnych wartości CMOD przedstawiono na rysunku 5. Wynika z nich, że współczynnik ustabilizował się, gdy CMOD osiągnęło wartość ok. 1,0 mm. Wcześniej k_{TRMV} wahał się, natomiast

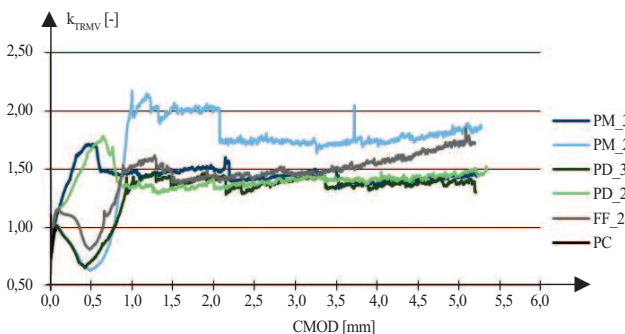
Tabela 4. Maksymalna wytrzymałość w przypadku T3PZ i TJOR

Table 4. Maximum strength for T3PZ and TJOR

Wytrzymałość/typ betonu	PC	PM_3	PM_2	PD_3	PD_2	FF_2
f_{ctL} [MPa]	3,26	3,44 (106%)*	3,42 (105%)*	3,44 (106%)*	3,63 (111%)*	3,69 (114%)*
f_t [MPa]	3,16	3,33 (106%)*	2,79 (88%)*	2,83 (90%)*	2,77 (88%)*	3,24 (103%)*

* w nawiasach zmiana wytrzymałości w porównaniu z betonem bez włókien

w [8] konsekwentnie wzrastał do CMOD = 2,0 mm. W związku z tym wymagane są dalsze analizy w przypadku niewielkich wartości CMOD. Biorąc pod uwagę większe wartości CMOD, k_{TRMV} prawie wszystkich betonów PFB (oprócz PM_2) wynosiło ok. 1,5, w przeciwieństwie do [9], gdzie by-



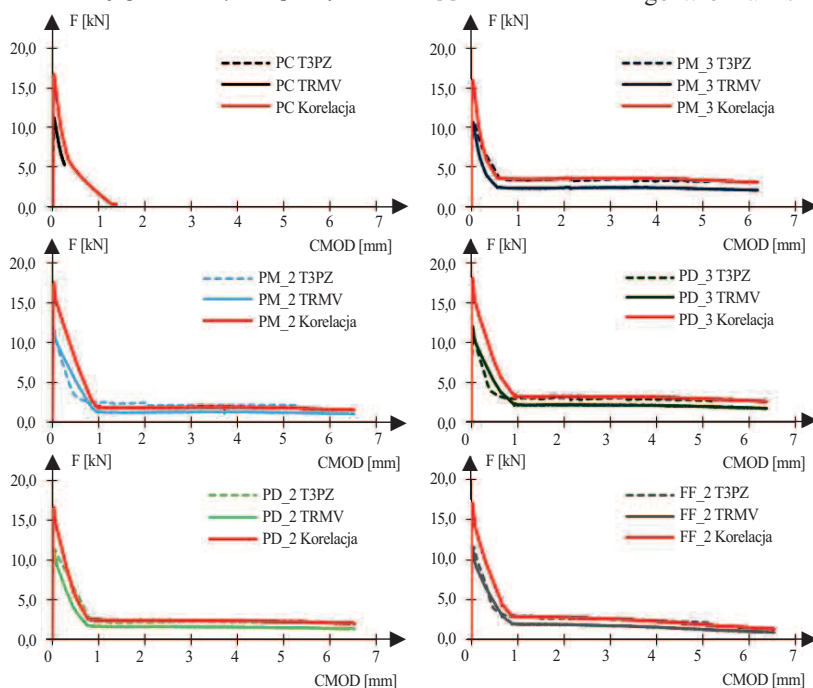
Rys. 5. Zależność k_{TRMV} – CMOD
 Fig. 5. Dependence k_{TRMV} – CMOD

ło równe 2,5. Trzeba jednak zwrócić uwagę na fakt, że w [8] wykonywano badania betonu z włóknami stalowymi, a nie polimerowymi. Rysunek 6 przedstawia krzywe F-CMOD dla T3PZ, TRMV i skorelowanego TRMV przy $k_{TRMV} = 1,5$. Warto zauważyć, że analizowana siła była siłą pionową działającą na klin w TRMV. Natomiast siłę rozłupującą F_r można było obliczyć za pomocą wzoru (6).

$$F_r = F^{TRMV} (\cos \alpha - \mu \sin \alpha) / 2 (\sin \alpha + \mu \cos \alpha) = F^{TRMV} k_\mu \quad (6)$$

gdzie:

F_r – siła rozłupująca w TRMV [kN]; α – kąt nachylenia boku klina w stosunku do jego osi 15°; μ – współczynnik tarcia [-].



Rys. 6. Krzywe F-CMOD betonów otrzymane w testach T3PZ, TRMV i skorelowanego TRMV ($k_{TRMV} = 1,5$)

Fig. 6. F-CMOD curves obtained in tests for T3PZ, TRMV and correlated TRMV ($k_{TRMV} = 1.5$)

Współczynnik tarcia μ w przypadku kontaktu stal-stal został oszacowany testem dwustronnego rozłupywania klinem i był równy 0,06. Dodatkowo Pimentel i Nunes [15], stosując tę wartość μ , uzyskali w swoich testach zadowalające wyniki, potwierdzając tym samym zasadność użycia tej wartości współczynnika przy kontakcie stal-stal. Z tych powodów w obecnych badaniach również użyto $\mu = 0,06$. W rezultacie współczynnik k_μ we wzorze (6) wyniósł 1,5, a F_r można było obliczyć z uproszczonego wzoru (7). Zaobserwowano, że k_{TRMV} i k_μ są równe. Potrzebne są jednak dalsze badania, aby wyciągnąć jednoznaczne wnioski. Dodatkowo, rozbieżność tego wyniku w przypadku próbki PM_2 wymaga wykonania dodatkowych testów.

$$F_r F = 1,5 \cdot F^{TRMV} \quad (7)$$

Wnioski

Najistotniejsze wnioski z przeprowadzonych badań są następujące:

- badane włókna polimerowe nie wpływają istotnie na maksymalną wytrzymałość betonu na ściskanie, jednoosiowe rozciąganie, zginanie i rozłupywanie, ale mają one

bardzo korzystny wpływ na siły i wytrzymałość resztkową, energię pęknięcia i ciągliwość betonu;

- obliczony współczynnik korelacji obciążenia ($k_{TRMV} = 1,5$) pozwala na powiązanie wyników testu rozłupywania Montevideo z testami trzypunktowego zginania przy szerokości rozwarcia rysy większej niż 1 mm;

- test rozłupywania Montevideo może być prostszą i bardziej kompaktową metodą badawczą od testu trzypunktowego zginania, a ponadto test ten dostarcza przydatnych informacji na temat właściwości mechanicznych betonu zbrojonego włóknami. Nadal jednak potrzebne są dalsze badania,

szczególnie betonów z różną zawartością włókien z innego materiału, o innej formie i geometrii;

- mniejsze próbki stosowane w teście rozłupywania Montevideo pozwalają na oszczędność materiału.

Literatura

- [1] Chorzepa MG, Masud M. Performance of multiscale, including nanoscale, fibres in concrete. *Emerging Materials Research*. 2017; doi: 10.1680/jemmr.16.00020.
- [2] Blazy J, Drobiec Ł, Wolka P. Flexural tensile strength of concrete with synthetic fibers. *Materials*. 2021; doi: 10.3390/ma14164428.
- [3] Maj M, Ubysz A. Cracking of composite fiber reinforced concrete foundation slabs due to shrinkage. *Materials Today: Proceedings*. 2021; doi: 10.1016/j.matpr.2020.10.155.
- [4] Altoubat SA, Roesler JR, Lange DA, Rieder K. Simplified method for concrete pavement design with discrete structural fibers. *Construction and Building Materials*. 2008; doi: 10.1016/j.conbuildmat.2006.08.008.
- [5] International Federation for Structural Concrete, „Model Code 2010, Final draft-Volume 1”. 2013.
- [6] Louch K, Day R, Hulett T, Woods N, Eddy D, Simpson D. Technical Report 34. Concrete industrial ground floors. A guide to design and construction, 4. wyd., t. 29, nr 1. Camberley: The Concrete Society, 2016.
- [7] Linsbauer HN, Tschegg EK. Fracture energy determination of concrete with cube shaped specimens”. *Zementund Beton*. 1986; t. 31: 38 – 40.
- [8] Segura-Castillo Monte LR, de Figueiredo AD. Characterisation of the tensile constitutive behaviour of fibre-reinforced concrete: A new configuration for the Wedge Splitting Test. *Construction and Building Materials*. 2018; doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.10.101.
- [9] EN 12350-2:2019-07. Testing fresh concrete – Part 2: Slump test. 2019.
- [10] EN 12350-8:2012. Testing fresh concrete – Part 8: Self-compacting concrete – slump-flow test. 2012.
- [11] EN 14651+A1:2007 Test method for metallic fibre concrete – Measuring the flexural tensile strength (limit of proportionality (LOP), residual). 2007.
- [12] Blazy J, Drobiec Ł. Wpływ włókien polipropylenowych na ściskanie i rozciąganie betonu w świetle PN-EN 206-1 i PN-EN 14651. *Inżynieria i Budownictwo*. 2021.
- [13] Blazy J, Drobiec Ł. Analiza wyników badań fibrobetonu z włóknami polimerowymi. *Inżynieria i Budownictwo*. 2021; t. 9 – 10: 477 – 481.
- [14] Park G, Park G, Park J, Lee N, Kim S. Residual Tensile Properties and Explosive Spalling of High-Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites Exposed to Thermal Damage. *Materials*. 2021; doi: doi.org/10.3390/ma14071608.
- [15] Pimentel M, Nunes S. On the Double-Edge Wedge-Splitting Test for the Characterisation of HPRFC in uniaxial Tension. *HiPerMat 2016: Ultra-High Performance Concrete and High Performance Construction Materials*, nr 1, ss. 1–8, 2016.

Przyjęto do druku: 08.09.2022 r.