

mgr inż. Julia Blazy^{1*)}

ORCID: 0000-0001-9525-8650

prof. dr hab. inż. Łukasz Drobiec¹⁾

ORCID: 0000-0001-9825-6343

Zastosowanie wyników badań na zginanie w projektowaniu fibrobetonowych posadzek na gruncie

The application of flexural test results in the design of FRC ground slabs

DOI: 10.15199/33.2024.01.02

Streszczenie. Artykuł przedstawia wyniki badań trzech fibrobetonów z dodatkiem włókien polimerowych. Wpływ rodzaju i ilości włókien był widoczny po zarysowaniu się belek. Na podstawie obliczonych wytrzymałości równoważnych, resztkowych, energii pęknięcia oraz ilorazów odporności na pęknięcie stwierdzono, że fibrobeton z największą ilością makrowłókien osiągał najlepsze wyniki. Porównano trzecią i czwartą edycję Raportu Technicznego 34 oraz uznano, iż dodatek włókien umożliwia zwiększenie nośności płyty na gruncie obciążonej w środku oraz na krawędzi.

Słowa kluczowe: fibrobeton; włókna polimerowe; test czteropunktowego zginania; posadzka na gruncie.

Abstract. The article presents the results of testing three polymer fiber reinforced concretes (FRC). The influence of fiber type and dosage became evident after cracking of beams. Based on the calculated equivalent and residual flexural tensile strengths, fracture energy, and toughness index, it was stated that FRC with the highest amount of macrofibers achieved the best results. The third and fourth editions of Technical Report 34 were compared and it was claimed that the fiber addition enables an increase in the load – carrying capacity of the ground slabs loaded at the centre and on the edge.

Keywords: fiber reinforced concrete; polymer fibers; four – point bending test; ground slab.

W budownictwie i architekturze coraz częściej stosuje się fibrobeton, m.in. ze względu na zwiększoną wytrzymałość, trwałość oraz mostkowanie rys [1]. Zakres jego zastosowań jest jednak wciąż dość ograniczony, ponieważ pomimo wielu badań na próbkach o małych gabarytach, istnieje niewiele testów na modelach wielkoskalowych. Ponadto nie ma przejrzystych procedur do projektowania elementów fibrobetonowych, szczególnie z włóknami niemetalicznymi. Jedną z pozycji zawierającą wytyczne do projektowania fibrobetonowych posadzek przemysłowych jest Raport Techniczny 34 (TR34). Uwzględnia on bowiem możliwość wykorzystania rezerw nośności wynikających z dodania włókien do betonu. Procedura obliczeniowa dopuszczalnych obciążeń punktowych działających na płytę na gruncie wykorzystuje teorię Meyerhofa. Zgodnie z trzecią edycją TR34 [2] wymagane było określenie wartości R_c (ilorazu odporności na pęknięcie) na podstawie testu czte-

ropunktowego zginania (4PBT). Natomiast aktualna, czwarta edycja TR34 [3], wykorzystuje wartości $f_{r,j}$ (resztkowe wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu) otrzymywane z testu trzypunktowego zginania (3PBT). Celem artykułu jest porównanie tych dwóch edycji, gdyż stare karty techniczne włókien i projekty wciąż operują wartościami R_c , natomiast nowe już wartościami $f_{r,j}$. Porównania dokonano na podstawie wyników testów 3PBT, opisanych szczegółowo w [4], i przedstawionych w tym artykule wyników testów 4PBT trzech fibrobetonów z dodatkiem włókien polimerowych.

Program badawczy

W ramach programu badawczego wykonano trzy fibrobetonu (nr 1 – 3) z dodatkiem mikro- i makrowłókien polimerowych (mikroPF i makroPF), różniących się rodzajem (tabela 1) i dozowaniem PF. Mieszanki wykonano na bazie cementu CEM II/A-V 42,5R i dodano metakaolin (MK) oraz superplastyfikator (SP) ze względu na przewidywane pogorszenie ich urabialności (tabela 2). Szczegółowy opis zastosowanych materiałów oraz włókien znaj-

Tabela 1. Charakterystyka włókien polimerowych

Table 1. Characteristics of polymer fibers

Cecha/Typ	I – makroPF	II – makroPF	III – mikroPF
Długość [mm]	42	54	12
Wytrzymałość na rozciąganie [MPa]	550	640	350 – 400
Moduł Younga [GPa]	2,8 – 4,0	11	nieznany

duje się w [4 i 5]. Z każdej mieszanki wykonano po trzy belki o wymiarach 150 x 150 x 700 mm do testu 4PBT, który przeprowadzono po 112 dniach od zabetonowania wg normy EN 12390-5 [6] i JCI-SF4 [7] na stanowisku badawczym przedstawionym na fotografii. Czujniki przemieszczeń LVDT zainstalowano z dwóch stron próbki do pomiaru ugięcia belki (δ). Rozpiętość między podporami (I) wynosiła 450 mm. Belki były obciążane siłą (F), która przyrastała wraz z ugięciem (0,2 mm/min) do osiągnięcia $\delta = 5$ mm. Podczas testu 4PBT rejestrowano wykres $F - \delta$. Korzystając ze wzoru zawartego w [6], przekształcono go na zależność $f_{cr} - \delta$ oraz określono maksymalną wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu $f_{cf,max}$.

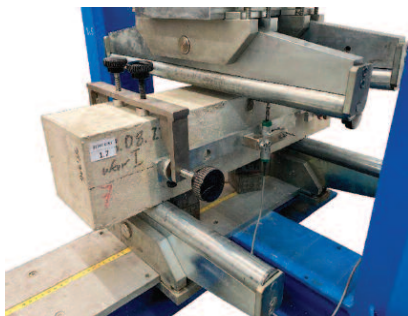
¹⁾ Politechnika Śląska, Wydział Budownictwa

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

Tabela 2. Skład mieszanek fibrobetonowych [kg/m³]

Table 2. FRC mixture composition [kg/m³]

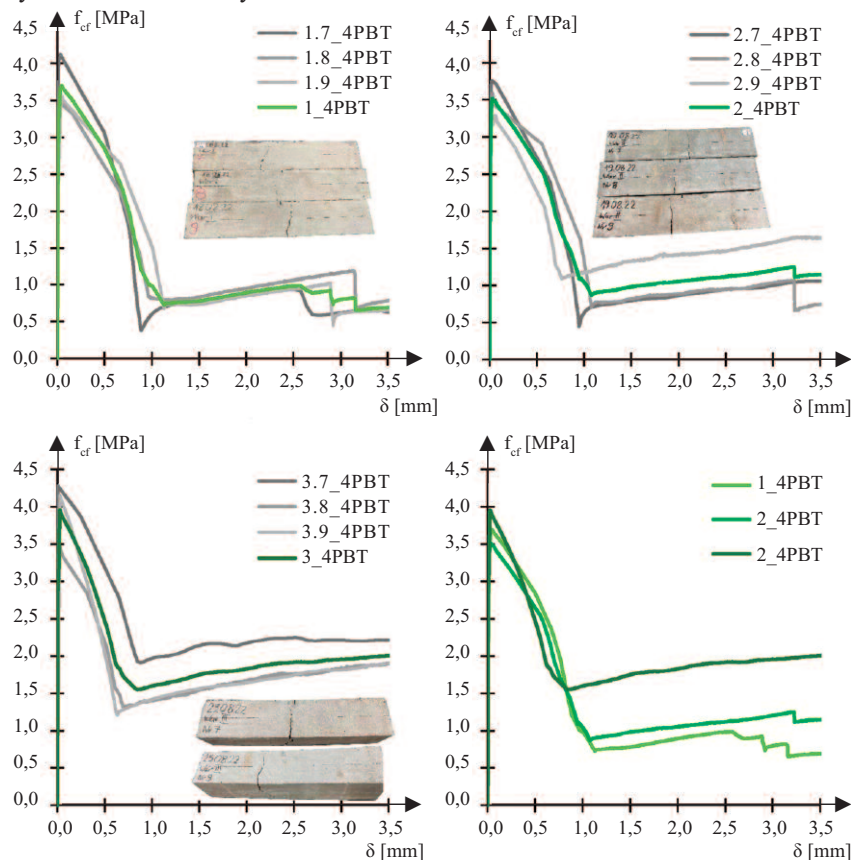
Fibrobeton/Skład	Cement	Piasek	Żwir	Woda	SP	MK	PF (typ I + II + III)
nr 1	350	800	1050	185	4,6	25	2 + 0 + 1
nr 2	350	800	1050	185	4,6	25	0 + 2 + 1
nr 3	350	800	1050	185	4,2	25	0 + 2,5 + 0,5



Stanowisko badawcze do testu 4PBT
Testing set-up for 4PBT

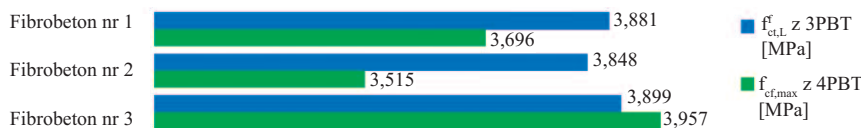
Wyniki badań

Na rysunku 1 przedstawiono zależność $f_{cf} - \delta$, gdzie w opisie próbek X_Y_4PBT X oznacza numer mieszanki (1 – 3), a Y numer badanej belki (7 – 9, nr 1 – 6 zostały zbadane w teście 3PBT [4]). Podobne zachowanie fibrobetonów w teście 4PBT i 3PBT potwierdziło poprawność przeprowadzonych badań. Fibrobetony nr 1 i 2 charak-



Rys. 1. Zależność $f_{cf} - \delta$ uzyskana z testów 4PBT
Fig. 1. $f_{cf} - \delta$ dependency obtained from 4PBT

teryzowały się bardzo podobnym przebiegiem wykresu $f_{cf} - \delta$. Było to związane z taką samą zawartością makroPF i mikroPF (odpowiednio 2 i 1 kg/m³). Po osiągnięciu $\delta = 1$ mm, fibrobeton nr 2 charakteryzował się nieco większą wytrzymałością, co było wynikiem większej długości oraz wytrzymałości na rozciąganie włókien dodanych do tej mieszanki (typ II) w porównaniu z włóknami użytymi w próbce fibrobetonu nr 1 (typ I). Zarówno fibrobeton 1, jak i 2 zachowywały się jak materiał quasi-plastyczny z osłabieniem (z ang. *softening behaviour*). Natomiast zwiększona ilość makroPF w nr 3 (2,5 kg/m³) spowodowała, że



Rys. 2. Maksymalna wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu w testach 3PBT i 4PBT
Fig. 2. Maximum flexural tensile strength from 3PBT and 4PBT

osiągał on największą wytrzymałość i charakteryzował się zachowaniem quasi-plastycznym ze wzmocnieniem, ale osłabionym (z ang. *soft – hardening behaviour*). Rysunek 2 przedstawia wartości $f_{cf,max}$ określone zgodnie z EN 12390-5 [6] w przypadku testu 4PBT oraz ich porównanie z $f_{ct,L}^f$, czyli maksymalną wytrzymałością na rozciąganie przy zginaniu określoną w testach 3PBT. Stwierdzono, że w teście 4PBT fibrobeton nr 3 osiągnął największą wartość $f_{cf,max}$: odpowiednio o 7 i 13% większą niż fibrobeton nr 1 i 2. Średnia wartość $f_{cf,max}$ w przypadku wszystkich mieszanek wynosiła 3,723 MPa. Porównując wyniki maksymalnej wytrzymałości z testów 3PBT i 4PBT stwierdzono, że różnice wynoszą 1 – 9% (rysunek 2). Wszystkie belki w teście 4PBT były uszkodzone przez quasi-pionową rysę występującą pomiędzy górnymi pod-

porami. Po zakończeniu badania belki nie pękały na pół, ale zachowały swoją integralność. Nagłe spadki na wykresach na rysunku 1, w fazie po zarysowaniu, świadczyły natomiast o wyciąganiu bądź zrywaniu się włókien w przekroju zarysowania.

Metoda wykonywania testów 4PBT spełnia wymagania normy JCI-SF4 [7], m.in. pod względem geometrii próbek, usytuowania podpór i obciążenia. Obliczono więc równoważną wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu f_{eq} , stosując wzór (1). Konieczna jest jednak znajomość wartości T_b , czyli pracy niezbędnej do uzyskania δ belki równego $1/150$ jej rozpiętości. Pracę tę obliczono w przypadku każdego fibrobetonu jako obszar pod uśrednionymi wykresami $F - \delta$ do wartości $\delta = 3$ mm (rysunek 3).

$$f_{eq} = \frac{T_b l}{\delta_b b h^2} \quad (1)$$

gdzie:

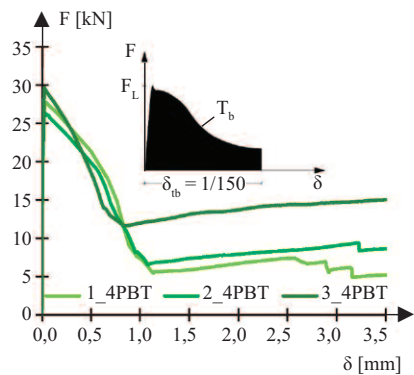
f_{eq} – równoważna wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu [N/mm²];

T_b – praca potrzebna do ugięcia belki równego $1/150$ rozpiętości l [Nmm];

l – rozpiętość pomiędzy podporami dolnymi [mm] = 450 mm;

δ_b – ugięcie równe $1/150$ rozpiętości l [mm] = 3 mm;

b, h – szerokość i wysokość belki [mm] = 150 mm.



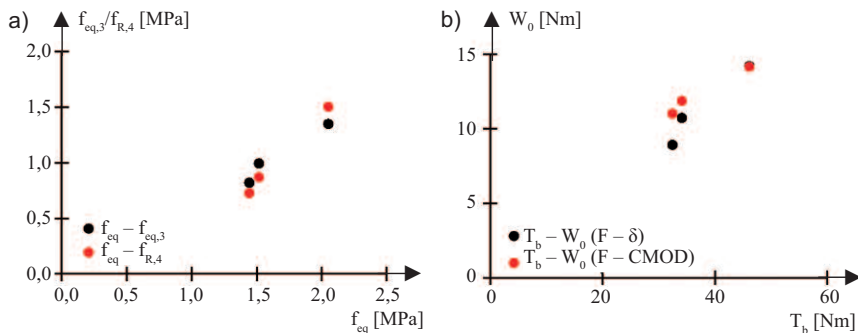
Rys. 3. Wykresy $F - \delta$ z testów 4PBT wraz ze sposobem obliczania T_b
Fig. 3. $F - \delta$ plots from 4PBT together with the calculation method of T_b

Z obliczeń wynika, że fibrobeton nr 1 charakteryzuje najmniejsze f_{eq} , a w przypadku nr 2 i 3 uzyskano wartości odpowiednio o 5 i 42% większe (tabela 3). Podobne wartości uzyskał w badaniach Glinicki [8]: f_{eq} próbek z 2 i 3 kg/m³ makrowłókien syntetycznych wynosiło 1,30 i 1,87 MPa. Dzięki porównaniu wartości f_{eq} z resztkową ($f_{R,4}$) i równoważną ($f_{eq,3}$) wytrzymałością obliczoną w [4] wg norm [9] i [10], w testach 3PBT stwierdzono, że wartości te nie są jednakowe (tabela 3) i w związku z tym określono zależności między nimi (rysunek 4a). W tabeli 3 zestawiono również wyniki obliczeń energii pęknięcia W_0 z testów 3PBT [4]. Sposób obliczania W_0 przedstawiono na rysunku 5. Podobnie jak w teście 4PBT, największą energię pęknięcia uzyskał fibrobeton nr 3, następnie nr 2, a na końcu nr 1 (tabela 3). Zależność pomiędzy testami 3PBT i 4PBT przedstawiono również w przypadku energii pęknięcia (rysunek 4b). Należy również podkreślić, iż wytrzymałość f_{eq} wykorzystywana jest do określania ilorazu odporności na pęknięcie R_c (wzór (2)). Współczynnik ten stosowany jest podczas projektowania posadzek przemysłowych w trzeciej edycji TR34 [2] w celu uwzględnienia rezerw nośności wynikających z dodania włókien do mieszanki. Wpływ ten brany jest pod uwagę podczas obliczania dodatniego momentu

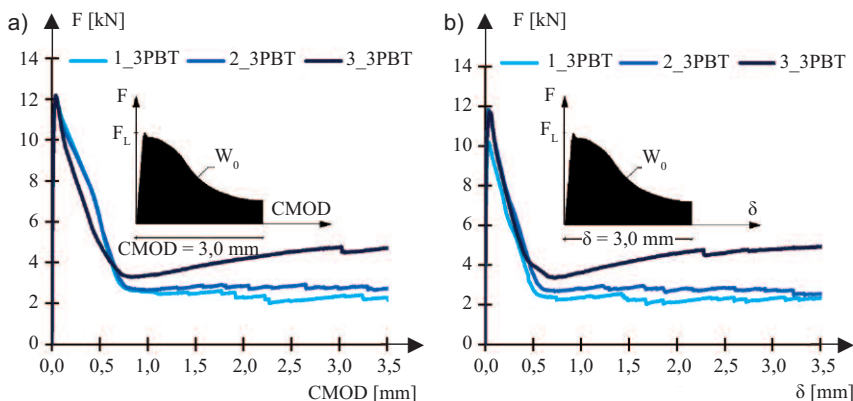
Tabela 3. Wytrzymałość resztkowa, równoważna i energia pęknięcia w testach 3PBT i 4PBT

Table 3. Residual, equivalent strength and fracture energy from 3PBT and 4PBT

Fibrobeton nr	T_b [Nm]	f_{eq} [MPa]	$f_{eq,3}$ [MPa]	$f_{R,4}$ [MPa]	$W_0(F - \delta)$ [Nm]	$W_0(F - CMOD)$ [Nm]
1	32,457	1,443	0,819	0,726	8,918	10,990
2	34,144	1,518	0,993	0,870	10,726	11,861
3	46,169	2,052	1,350	1,506	14,190	14,144



Rys. 4. Zależność między: a) $f_{eq,3} - f_{R,4}$ oraz $f_{eq} - f_{R,4}$; b) $T_b - W_0$
Fig. 4. Dependency between: a) $f_{eq,3} - f_{R,4}$ and $f_{eq} - f_{R,4}$; b) $T_b - W_0$



Rys. 5. Wykresy uzyskane z testów 3PBT wraz ze sposobem określania W_0 z wykresu: a) $F - CMOD$; b) $F - \delta$
Fig. 5. Plots obtained from 3PBT tests together with the method of determining W_0 from the plot: a) $F - CMOD$; b) $F - \delta$

zginającego M_p (wzór (3)), pod warunkiem że $R_c \geq 30\%$. W obliczeniach R_c jako wartość $f_{ctm,fl}$ przyjęto wyznaczoną eksperymentalnie wartość $f_{cf,max}$ z testu 4PBT. Wartości R_c wynosiły w przypadku fibrobetonu nr 1, 2 i 3 odpowiednio 39%, 43% i 52%. Najkorzystniejsze wyniki, ze względu na nośność elementu konstrukcyjnego, zostałyby zatem osiągnięte w przypadku zastosowania fibrobetonu nr 3. Niemniej jednak najnowsza, czwarta edycja TR34 [3] sugeruje wykonanie testu 3PBT i zamiast ilorazu R_c obliczenie naprężeń σ_{r1} i σ_{r4} , równych odpowiednio $0,45f_{R,1}$ i $0,37f_{R,4}$ (wzór (4)). Chcąc porównać te dwie edycje, obliczono współczynniki $TR34_3$ (3 edycja) i $TR34_4$ (4 edycja). Wartości f_{eq} i $f_{R,4}$ są podane w tabeli 3, natomiast wartości $f_{R,1}$ wynosiły w przypadku fibrobetonu nr 1, 2

i 3 odpowiednio 1,979; 1,954 i 1,571 MPa. Z rysunku 6 można wywnioskować, że M_p byłoby o 8–20% mniejsze w przypadku obliczeń wg edycji czwartej.

$$R_c = 100 \cdot \frac{f_{eq}}{f_{ctm,fl}} \quad (2)$$

gdzie:

R_c – iloraz odporności na pęknięcie [%];
 f_{eq} – równoważna wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu [N/mm²];
 $f_{ctm,fl}$ – średnia wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu [N/mm²].

$$M_p = \frac{f_{ctk,fl}}{\gamma_c} \cdot R_c \cdot \frac{h^2}{6} = \frac{h^2}{\gamma_c} \cdot \frac{f_{eq}}{6} = \frac{h^2}{\gamma_c} \cdot TR34_3 \quad (3)$$

$$M_p = (h^2/\gamma_c) \cdot (0,29\sigma_{r4} + 0,16\sigma_{r1}) = (h^2/\gamma_c) \cdot (0,29 \cdot 0,37f_{R,4} + 0,16 \cdot 0,45f_{R,1}) = (h^2/\gamma_c) \cdot TR34_4 \quad (4)$$

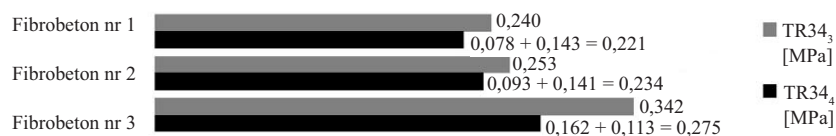
gdzie:

M_p – dodatni moment zginający [Nm/m];
 $f_{ctk,fl}$ – charakterystyczna wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu [N/mm²];
 γ_c – materiałowy, częściowy współczynnik bezpieczeństwa [-], w przypadku fibrobetonu = 1,5;

h – grubość płyty [mm];

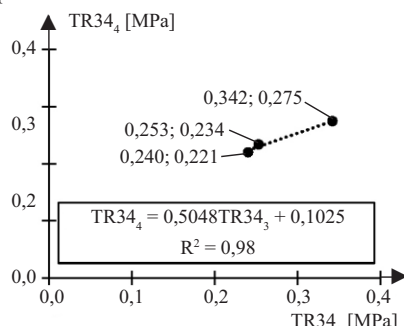
σ_{r1} i σ_{r4} – naprężenia w punkcie charakterystycznym odpowiadające $f_{R,1}$ i $f_{R,4}$ [N/mm²];

$f_{R,1}$ i $f_{R,4}$ – resztkowe wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu odpowiadające CMOD = 0,5 i 3,5 mm [N/mm²].



Rys. 6. Wyniki obliczeń M_p wg [2, 3]
Fig. 6. Results of M_p according to [2, 3]

Zaproponowana na rysunku 7 zależność liniowa służy powiązaniu uzyskanych wyników pomiędzy edycjami TR34. Muszą jednak zostać wykonane dalsze badania, aby potwierdzić tę korelację. Porównanie edycji TR34 ma na celu umożliwienie projektowania konstrukcji fibrobetonowych niezależnie od tego, z którymi kartami technicznymi i projektami będą się stykali projektanci: starymi, bazującymi na współczynniku R_c i 3 edycji TR34 czy nowymi z podanymi wartościami $f_{R,j}$ wymaganymi w czwartej edycji TR34. Mając na uwadze również fakt, że obowiązuje edycja czwarta, korelacja umożliwi im przeliczenie danych podawanych w starszych materiałach producentów włókien.



Rys. 7. Zależność między $TR34_3$ – $TR34_4$
Fig. 7. Dependency between $TR34_3$ – $TR34_4$

Podczas badań sprawdzono również wpływ dodatku włókien na dopuszczalne obciążenia punktowe działające na posadzkę przemysłową. Analizy obliczeniowe wykonano zgodnie z aktualnie obowiązującą czwartą edycją TR34. Procedury tam zawarte bazują na teorii Meyerhofa i obliczają nośność płyty na zginanie. W ramach artykułu nie przeprowadzono analiz związanych z nośnością płyty na przebicie. Do obliczeń przyjęto posadzkę o grubości 150 mm wykonaną z mieszanki bez włókien oraz z fibrobetonu nr 1, 2 i 3 o klasie betonu C30/37. Jako maksymalną wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu wszystkich badanych belek przyjęto uśrednioną wartość z testów 3PBT równą 3,876 MPa [4]. W przypadku fibrobetonów założono ob-

liczone z badań resztkowe wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu $f_{R,1}$ i $f_{R,4}$, natomiast w przypadku płyty bez włókien przyjęto ich wartość jako 0 MPa. Moduł reakcji podłoża $E_{v,2}$ założono równy 80 MPa (odpowiada podbudowie z piasku dobrze zagęszczonego). W celu obliczenia wartości charakterystycznych przyjęto również, że stempel przekazujący punktowe obciążenie na płytę ma średnicę 150 mm i grubość 20 mm. Współczynniki materiałowe betonu i fibrobetonu wynosiły 1,0 w celu obliczenia wartości charakterystycznych.

Z tabeli 4 wynika, że dodatek włókien polimerowych korzystnie wpływa na nośność giętą płyty obciążonej na środku i na krawędzi. W obliczeniach naroża nie uwzględnia się wpływu włókien, dlatego też nie stwierdzono wzrostu dopuszczalnych obciążeń. Zwiększenie nośności na środku oraz krawędzi płyty wyniosło odpowiednio 34 – 43% oraz 15 – 19% w zależności od zastosowanego fibrobetonu w porównaniu z płytą bez włókien.

Tabela 4. Dopuszczalne obciążenia punktowe działające na płytę na gruncie wg [3]
Table 4. Permissible point loads acting on the ground slab according to [3]

Fibro-beton nr	Środek płyty [kN]	Krawędź płyty [kN]	Naroże płyty [kN]
Bez włókien	195 (100%)	119 (100%)	72 (100%)
1	262 (134%)	137 (115%)	72 (100%)
2	266 (136%)	138 (116%)	72 (100%)
3	278 (143%)	142 (119%)	72 (100%)

Wnioski

W artykule przedstawiono wyniki testów 4PBT trzech fibrobetonów z dodatkiem włókien polimerowych. Wyniki wytrzymałości maksymalnych na rozciąganie przy zginaniu z testów 3PBT i 4PBT różniły się od 1 do 9%. Wpływ rodzaju i ilości włókien był najlepiej widoczny po zarysowaniu się belek, gdyż dopiero wtedy włókna zaczynają mostkować pęknięcia. Fibrobeton nr 1 i 2 miały podobną wytrzymałość do momentu osiągnięcia δ równego 1 mm. Następnie, ze względu na większą wytrzymałość na rozciąganie

oraz długość makrowłókien, fibrocon nr 2 osiągał nieco większą wytrzymałość. Najlepiej zachowywał się fibrocon nr 3 ze względu na największą zawartość makrowłókien. Podobne wnioski wyciągnięto w wyniku analizy energii pęknięcia oraz ilorazów odporności na pęknięcie. Dodatkowo, trzecia i czwarta edycja TR34 zostały ze sobą porównane. Wykonane porównania mają być pomocą dla projektantów konstrukcji fibrobetonowych, gdyż stare karty techniczne włókien wciąż operują wartościami R_c (test 4PBT) wykorzystywanymi w 3 edycji TR34, natomiast nowe już wartościami $f_{R,j}$ (test 3PBT) wg wytycznych 4 edycji TR34. W wyniku obliczenia dopuszczalnych obciążeń punktowych działających na płytę stwierdzono, że dodatek włókien umożliwia zwiększenie nośności płyty na gruncie obciążonej na środku oraz na krawędzi.

Literatura

[1] A. Mohajerani i in. Amazing types, properties, and applications of fibres in construction materials. Materials. 2019; t. 12, nr 16, s. 2513. DOI: 10.3390/ma12162513.

[2] The Concrete Society, Technical Report 34. Concrete industrial ground floors. A guide to design and construction, 3. wyd. The Concrete Society, 2003.

[3] The Concrete Society, Technical Report 34. Concrete industrial ground floors. A guide to design and construction, 4. wyd. The Concrete Society, 2016.

[4] Drobiec Ł., Blazy J. Właściwości fibrobetonu określone w badaniach normowych – test wytrzymałości na ściskanie oraz test trzypunktowego zginania. Materiały Budowlane. 2023. DOI: 10.15199/33.2023.09.02.

[5] Blazy J., Drobiec Ł., Wolka P. Projektowanie fibrobetonowych posadzek przemysłowych według trzeciej i czwartej edycji Technical Report 34, w Monografie technologii betonu: XII Konferencja Dni Betonu, Wisła, 9 – 11 października 2023, ss. 1091–1104.

[6] EN 12390-5:2009. Testing hardened concrete – Part 5: Flexural strength of test specimens.

[7] JSCE-SF4. Methods of tests for flexural strength and flexural toughness of fiber reinforced concrete. 1984.

[8] Glinicki M.A. Badania właściwości fibrobetonu z makrowłóknami syntetycznymi, przeznaczanego na podłogi przemysłowe. Cement Wapno Beton. 2008; t. 13/75, nr 4: 184 – 195,.

[9] EN 14651+A1:2007. Test method for metallic fibre concrete – Measuring the flexural tensile strength (limit of proportionality (LOP), residual). 2007.

[10] 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.

Publikacja wspierana w ramach programu Inicjatywa Doskonałości – Uczelnia Badawcza realizowanego na Politechnice Śląskiej, 2023 r.

Przyjęto do druku: 20.11.2023 r.