

prof. dr hab. inż. Wiesława Głodkowska¹⁾

ORCID: 0000-0003-3719-5350

dr inż. Joanna Laskowska-Bury^{1)*}

ORCID: 0000-0002-0618-1370

dr inż. Marek Lehmann¹⁾

ORCID: 0000-0002-1314-3014

Wykorzystanie zdolności pochłaniania energii do wyznaczenia wytrzymałości resztkowych fibrokompozytów

Using the energy absorption capacity to determine the residual strength of fibrocomposites

DOI: 10.15199/33.2023.03.01

Streszczenie. W artykule omówiono sposób wyznaczania wytrzymałości resztkowych z wykorzystaniem zdolności pochłaniania energii przez fibrokompozyt. Badania przeprowadzono przez zginanie płyt o przekroju kwadratowym podpartych przegubowo na obwodzie. Określone w ten sposób wytrzymałości resztkowe cechują się znacznie mniejszym współczynnikiem zmienności niż wyznaczone wg PN-EN 14651:2007. Opisane badanie jest alternatywą dla 3-punktowego zginania belek i pozwala na wyznaczenie tej cechy z większą wiarygodnością.

Słowa kluczowe: fibrokompozyt; włókna stalowe; zdolność pochłaniania energii; wytrzymałości resztkowe.

Abstract. The article discusses the method of determining residual strength using the energy absorption capacity of fibrocomposite. The research was carried out by bending square-cross-section plates simply supported at the perimeter. The residual strengths determined in this way are characterized by a much lower coefficient of variation than those determined using the normative method according to PN-EN 14651:2007. The described test is an alternative to 3-point bending of beams and allows to determine this feature with greater reliability.

Keywords: fiber-reinforced composite; steel fibers; energy absorption ability; residual strength.

Fibrobetony, w porównaniu z betonem zwykłym, wykazują m.in. większą odporność na działanie obciążeń dynamicznych oraz wysokiej temperatury, a ponadto charakteryzują się większą trwałością, odpornością na ścieranie i mniejszym skurczem. Dodatek włókien ma jednak największy wpływ na wytrzymałość na rozciąganie [1 – 3], ponieważ powoduje przekształcenie kruchego betonu w materiał quasi-plastyczny, który charakteryzuje się możliwością redystrybucji naprężeń rozciągających po zarysowaniu na pobliskie włókna. W wyniku działania naprężeń niszczących nie ulega on więc nagłemu pęknięciu, ale zachowuje zdolność przenoszenia obciążeń. Jest to bez wątpienia najważniejsza cecha fibrobetonu decydująca o jego przydatności w konstrukcjach. Aby skutecznie ją wykorzystać w procesie projektowania, konieczna jest znajomość zachowania się zarysowanego elementu w warunkach rozcią-

gania. Właściwość ta jest definiowana przez wytrzymałości resztkowe [4]. Zalecenia zawarte w Model Code 2010 [5], dotyczące wymiarowania elementów fibrobetonowych, powiązane są z wytrzymałościami resztkowymi określonymi wg PN-EN 14651 [6] i metody RILEM (TC-162-TDF [7]). Niestety wytrzymałości resztkowe fibrobetonu uzyskane w wyniku zginania belek charakteryzują się dużym rozrzutem, wynoszącym nawet ponad 30% [8 – 11]. Dzieje się tak ze względu na małe obszary załamania powstające w belkach. Zmienność tej cechy jest na tyle duża, że przyjmowany w opracowaniach statystycznych rozkład normalny może w przypadku wytrzymałości resztkowych skutkować przeprojektowywaniem elementów o ponad 30%. Dużą zmienność wytrzymałości resztkowych przypisuje się nierównomiernemu rozmieszczeniu włókien wewnątrz mieszanki betonowej, a szczególnie w miejscu nacięcia badanych próbek na zginanie [12, 13].

Duże wartości współczynników zmienności wytrzymałości resztkowych uzyskiwane w badaniach własnych [14] oraz podawane w pracach innych badaczy skłó-

niły nas do przeprowadzenia badań rozbudowanych o analizę centralnie zginanych płyt kwadratowych podpartych swobodnie na obwodzie. Uwzględniając, że metoda badania płyt wg PN-EN 14488-5 [15] i belek PN-EN 14651 [6] oraz kształt wykresów zależności siła obciążająca-ugięcie ($F - \delta$) są do siebie zbliżone, założono, że badanie zdolności pochłaniania energii może być jednocześnie wykorzystywane do określania wytrzymałości resztkowych, charakteryzujących się znacznie mniejszym współczynnikiem zmienności niż w przypadku belek. Zdolność pochłaniania energii przez materiał jest obok wytrzymałości resztkowych ważną cechą określającą jego plastyczność. Właściwość tę wykorzystuje się przy projektowaniu konstrukcji z fibrobetonu, w których w wyniku działania dużych obciążeń mogłyby powstawać znaczne odkształcenia.

Metoda badań i elementy próbnego

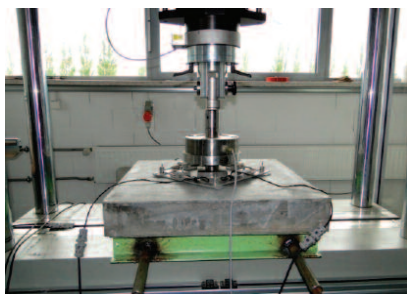
Elementy próbne wykonano z drobno-kruszywowego kompozytu cementowego z dodatkiem włókien stalowych w ilości 1,2% (94 kg/m³), licząc do ob-

¹⁾ Politechnika Koszalińska, Wydział Inżynierii Lądowej, Geodezji i Środowiska

^{*} Adres do korespondencji:

joanna.laskowska-bury@tu.koszalin.pl

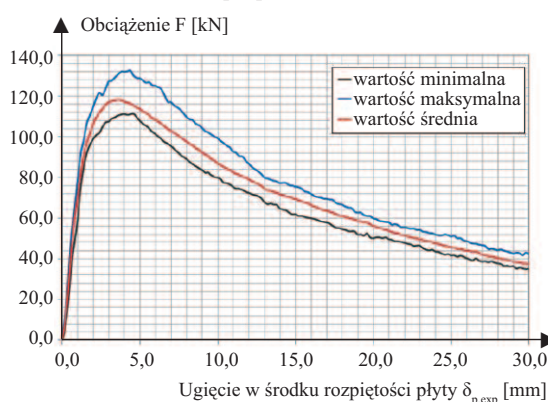
jętości kompozytu. Do wykonania elementów próbnych zastosowano piasek pochodzenia polodowcowego pozyskany po procesie hydroklastyfikacji (granulacja do 4 mm) w ilości 1570 kg/m³; cement portlandzki CEM II/A-V 42,5R (420 kg/m³); pył krzemionkowy (21 kg/m³); superplastyfikator (16,8 kg/m³) oraz wodę z wodociągu miejskiego (160 kg/m³). Zbrojenie rozproszone stanowiły włókna stalowe o smukłości $\lambda = l/d = 62,5$ ($l = 50$ mm, $d = 0,8$ mm). Zawartość włókien została ustalona na podstawie wyników wcześniejszych badań kompozytów z zawartością włókien 0 – 2,5%. Zastosowany w badaniach fibrokompozyt zastrzeżony jest patentem nr 239641. Warunki wykonania próbek, ich pielęgnacji i właściwości mechaniczno-fizyczne drobnokruszywowego fibrokompozytu omówiono w [3, 16]. Celem badań doświadczalnych było wykazanie, że znając zdolność pochłaniania energii przez materiał, można wyznaczyć wytrzymałości resztkowe przy małym współczynniku zmienności tej cechy. Badanie zdolności pochłaniania energii fibrokompozytu przeprowadzono wg PN-EN 14488-5 [15] na zginanych płytach o wymiarach 100 x 600 x 600 mm obciążonych osiowo. Płytę (zbadano 6 płyt) po 30 dniach od chwili zaformowania obciążano w sposób ciągły, tak aby następował kontrolowany przyrost jej ugięcia o $1 \pm 0,1$ mm/min. Koniec badania następował, gdy ugięcie płyty w środku jej rozpiętości osiągało wartość 30 mm. Przyrost obciążenia, ugięcia oraz przemieszczeń na górnej i dolnej powierzchni płyty rejestrowano przy użyciu systemu akwizycji danych SAD 256 (fotografia). Dokładność czujników indukcyjnych użytych w badaniach wynosiła 1 mV/V.



Stanowisko do badania zdolności pochłaniania energii fibrokompozytu
The stand for testing the energy absorption capacity of the fiber composite

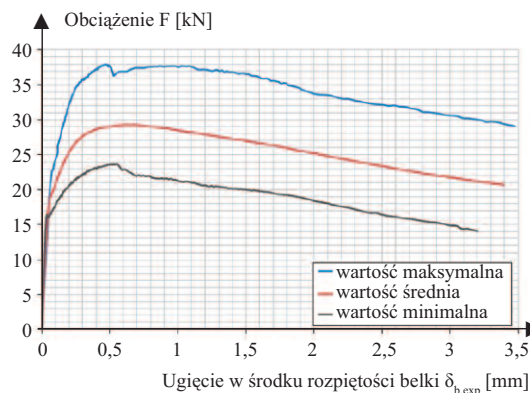
Wyniki badań

Badanie płyt pozwoliło na sporządzenie wykresu zależności siły obciążającej F i ugięcia $\delta_{p,exp}$ mierzonego w środku rozpiętości płyty (rysunek 1). Zaobserwowano, że przebieg zależności $F - \delta$ w badaniu belek jest zbliżony (rysunek 2) do uzyskanego w badaniu płyt [3, 17]. Zależność pomiędzy siłą F a ugięciem płyty $\delta_{p,exp}$ w środku jej rozpiętości porównano z zaproponowanym przez Khaloo and Afshari [18] rów-



Rys. 1. Zależność obciążenie – ugięcie $F - \delta_{p,exp}$ płyt badanego fibrokompozytu [17]

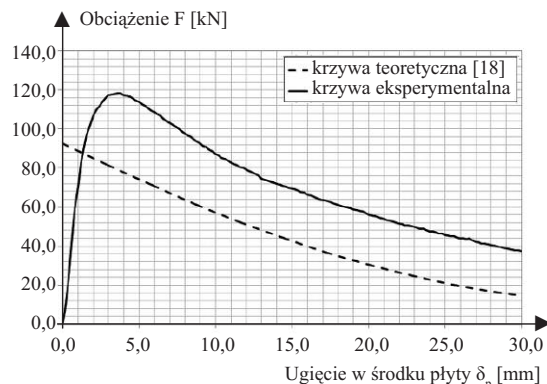
Fig. 1. The load-deflection relation ($F - \delta_{p,exp}$) for bent slabs made from the fiber composite used in the study [17]



Rys. 2. Zależność pomiędzy ugięciem belki $\delta_{b,exp}$ a siłą obciążającą F [3]

Fig. 2. The relationship between the beam deflection $\delta_{b,exp}$ and the loading force F [3]

naniem opisującym zależność siła-ugięcie. Interpretację graficzną wartości uzyskanych w eksperymencie oraz obliczonych wg [18] przedstawiono na rysunku 3, z którego wynika, że objęty badaniami fibrokompozyt wykazuje większą zdolność przenoszenia obciążenia od zdolności wyznaczonej analitycznie



Rys. 3. Porównanie teoretycznej wg [18] i eksperymentalnej zależności $F - \delta_p$

Fig. 3. The theoretical according to [18] and the experimental load-deflection relation $F - \delta_p$

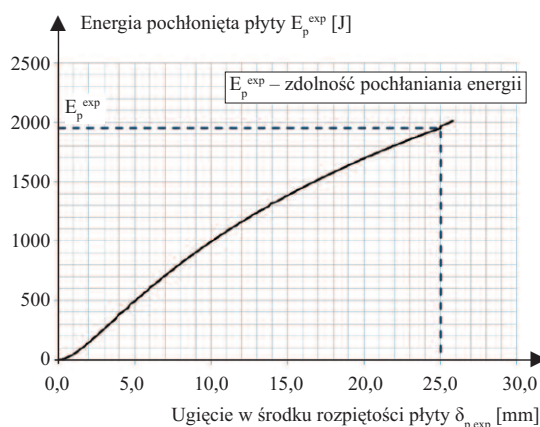
wg [18]. Uzyskana eksperymentalna wartość siły jest w przypadku poszczególnych wartości ugięcia średnio o 35% większa od wartości teoretycznych. Na podstawie otrzymanych wyników badań określono zdolność pochłaniania energii E_p^{exp} przez płyty (tabela 1). PN-EN 14488-5 [15] definiuje ją jako pole powierzchni pod krzywą $F - \delta_p$ pomiędzy wartościami ugięcia δ_p wynoszącymi odpowiednio 0 i 25 mm. Uzyskany współczynnik zmienności zdolności pochłaniania energii wynosi 6%, odchylenie standardowe 113 MP, wartość minimalna cechy 1818J, a przedział ufności $1815 \div 2075$ J.

Energię pochłoniętą przez fibrokompozyt w przypadku poszczególnych wartości ugięcia wyznaczono na podstawie wartości średniej z wykresu $F - \delta_{p,exp}$ jako pole powierzchni pod krzywą (rysunek 1). Zależność pomiędzy energią E_p^{exp} pochłoniętą przez płytę a ugięciem $\delta_{p,exp}$ w środku rozpiętości płyty pokazano na rysunku 4. Takie przedstawienie wyników badań pozwala w prosty sposób odczytać zdolność pochłaniania energii fibrokompozytu w przypadku ugięcia 25 mm oraz energię pochłoniętą przez materiał przy wybranej wartości ugięcia, bez konieczności każdorazowego całkowania wykresu $F - \delta_{p,exp}$.

Tabela 1. Wyniki badania zdolności pochłaniania energii przez płyty [17]

Table 1. Test results of energy absorption capacity for plates [17]

| Numer próbki | Maksymalna siła F_{max} [kN] | Ugięcie δ_p dla F_{max} [mm] | Energia E_p^{exp} dla F_{max} [J] | Zdolność pochłaniania energii F_p^{exp} [J] |
|-----------------|--------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---|
| P1 | 111,1 | 4,4 | 450 | 2084 |
| P2 | 121,4 | 3,0 | 280 | 1822 |
| P3 | 116,2 | 3,6 | 330 | 1924 |
| P4 | 132,6 | 4,4 | 470 | 2102 |
| P5 | 119,4 | 3,4 | 310 | 1818 |
| P6 | 116,3 | 3,8 | 340 | 1923 |
| Wartość średnia | 119,5 | 3,77 | 360 | 1945 |



Rys. 4. Zależność energii E_p^{exp} od ugięcia w środku płyty $\delta_{p,exp}$ dla badanego fibrokompozytu

Fig. 4. The relation of the energy E_p^{exp} of the deflection in the center of the plate $\delta_{p,exp}$ for the tested fiber composite

Wyznaczenie wytrzymałości reszkowych fibrokompozytu

Metoda badania płyt kwadratowych wg PN-EN 14488-5 [15] oraz sposób określania wytrzymałości reszkowych podany w PN-EN 14651 [6] polegają na badaniu elementów zginanych. Otrzymywane w rezultacie tych badań

Tabela 2. Szerokości CMOD oraz odpowiadające im ugięcia belki δ_b , $\delta_{b,exp}$ i energii zginania E_b^{exp} [3]

Table 2. The CMOD and the corresponding beam deflection values δ_b , $\delta_{b,exp}$ and bending energy E_b^{exp} [3]

| Szerokość rysy [mm] | Ugięcie wg [6] [mm] | Ugięcie eksperymentalne [mm] | Energia zginania [J] |
|---------------------|--|------------------------------|----------------------|
| CMOD | $\delta_b = 0,85 \cdot \text{CMOD} + 0,04$ | $\delta_{b,exp}$ | E_b^{exp} |
| 0,5 | 0,47 | 0,48 | 11,3 |
| 1,5 | 1,32 | 1,34 | 35,6 |
| 2,5 | 2,17 | 2,17 | 58,3 |
| 3,5 | 3,02 | 2,99 | 72,4 |

zależności siły F i ugięcia δ (rysunki 1 i 2) są zbliżone, co wskazuje, że badanie zdolności pochłaniania energii wg [14] może zostać wykorzystane do wyznaczania wytrzymałości reszkowych. Powiązano zatem wytrzymałości reszkowe $f_{R,p}$ wyznaczone dla poszczególnych wartości CMOD, z ugięciem belki $\delta_{b,exp}$ oraz z energią pochłoniętą przez belkę podczas zginania E_b^{exp} [17]. Energię belki E_b^{exp} w przypadku odpowiednich wartości CMOD (tabela 2) wyznaczono na podstawie zależności obciążenie – ugięcie

$\delta_{b,exp}$ jako pole powierzchni pod krzywą $F - \delta_{b,exp}$ (rysunek 2). Wykres $F - \delta_{b,exp}$ nie odbiega swoim kształtem i przebiegiem od wykresu obrazującego zależność $F - \text{CMOD}$ [3], co potwierdzają wyniki przeprowadzonych obliczeń zaprezentowane w tabeli 2. Dowodzą one, że podana w normie PN-EN 14651 [6] zależność wiążąca ugięcie belki δ_b i szerokość rozwarcia rysy CMOD bardzo dobrze odzwierciedla wyniki badań własnych. Może być

Tabela 3. Wartości energii zginania płyt E_p i belek E_b oraz ugięcia płyt δ_p i belek δ_b obliczone na podstawie zaproponowanej procedury

Table 3. Values of the bending energy of the plates E_p and beams E_b and deflection of the plates δ_p and beams δ_b calculated on the basis of the proposed procedure

| Ugięcie płyty δ_p [mm] | Energia zginania płyty E_p^{exp} [J] | Energia zginania belki [J] | | Ugięcie belki δ_b [mm]/CMOD [mm] | Siła F_j [kN] |
|-------------------------------|--|----------------------------|-------------|---|-----------------|
| | | E_b | E_b^{exp} | | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | |
| 3,5 | 343,6 | 13,1 | 11,3 | 0,47 / 0,5 | 27,8 |
| 10 | 977,4 | 37,1 | 35,6 | 1,32 / 1,5 | 28,1 |
| 15 | 1384,4 | 52,6 | 58,3 | 2,17 / 2,5 | 24,2 |
| 21 | 1762,8 | 67,5 | 72,4 | 3,02 / 3,5 | 22,4 |

ona zatem wykorzystywana do dalszych analiz. Znając eksperymentalną wartość energii pochłoniętej przy zginaniu przez płytę E_p^{exp} w odniesieniu do ugięcia, z wykorzystaniem energii zginania belki E_b^{exp} w przypadku CMOD równych odpowiednio 0,5; 1,5; 2,5 oraz 3,5 mm (tabela 2), wyznaczono autorską zależność teoretyczną pomiędzy tymi energiami, a mianowicie:

$$E_b = 0,038 \cdot E_p^{exp} \quad (1)$$

Kolejnym krokiem iteracji było znalezienie takich wartości ugięcia płyty δ_p , w przypadku których po podstawieniu do wzoru (1) uzyskano teoretyczne wartości energii zginania belek δ_b zbliżone do wartości eksperymentalnych E_b^{exp} , reprezentujących szerokość rozwarcia rysy CMOD = 0,5; 1,5; 2,5; 3,5 mm (tabela 2). W przypadku tych wartości wyznacza się wytrzymałości reszkowe $f_{R,j}$ wg PN-EN 14651 [6]. Ustalono, że poszukiwanymi wartościami ugięcia są odpowiednio: $\delta_p = 3,5; 10; 15; 21$ mm (tabela 3, kol. 1). Opisana wzorem (1) zależność umożliwia zatem wyznaczenie wartości teoretycznej energii zginania belki E_b (tabela 3, kol. 3) przy wyznaczonej z eksperymentu energii pochłoniętej przy zginaniu przez płytę E_p^{exp} (por. tabela 3, kol. 2). Z tabeli 3, kol. 3 wynika, że eksperymentalne E_b^{exp} i analityczne E_b wartości energii zginania belki są zbliżone. Różnice między tymi wartościami są statystycznie nieistotne. Znając teoretyczne wartości energii zginania belki E_b wyznaczono średnie wartości sił F_j (tabela 3, kol. 5), w przypadku ugięcia belki δ_b reprezentującego szerokość rozwarcia rysy CMOD = 0,5; 1,5; 2,5; 3,5 mm (tabela 3,

kol. 4), wykorzystując zależność fizyczną opisaną wzorem (2), że energia jest magazynowana pracą:

$$E_b = F_j \cdot \delta_b \quad (2)$$

Wytrzymałości resztkowe fibrokompozytu $f_{R,j}$ obliczono wg wzoru [9]:

$$f_{R,j} = (3 \cdot F_j \cdot l) / (2 \cdot b \cdot h_{sp}^2) \quad (3)$$

Wartości wytrzymałości resztkowych, $f_{R,j}$ wyznaczone z wykorzystaniem zdolności pochłaniania energii oraz na podstawie badań belek wg normy PN-EN 14651 [6], zestawiono w tabeli 4. Wartości wytrzymałości $f_{R,j}$ obliczone z wykorzystaniem zdolności pochłaniania energii są bardzo zbliżone do uzyskanych w badaniach belek zaprezentowanych w [17], a różnice są statystycznie nieistotne. Uzyskane wartości mieszczą się w poszczególnych przedziałach ufności wyznaczonych w przypadku poziomu istotności $\alpha = 0,05$. Badania płyt pozwalają na uzyskanie wytrzymałości $f_{R,j}$ fibrokompozytu o znacznie mniejszym współczynniku zmienności ($v = 1 - 6\%$) niż w wyniku zginania belek ($v = 13 - 17\%$).

Tabela 4. Zestawienie wytrzymałości resztkowych $f_{R,j}$ fibrokompozytu wyznaczonych z wykorzystaniem zdolności pochłaniania energii oraz w badaniu belek wg normy PN-EN 14651

Table 4. The compare of residual strengths $f_{R,j}$ of the fiber composite determined using the energy absorption capacity and in the beam test according to PN-EN 14651

| $f_{R,j}$ [MPa] | Wartości uzyskane w badaniach własnych oraz wg [6] | | | | Wartości obliczone wg propozycji własnej | | |
|-----------------|--|---------|-------|-------------------------|--|---------|-------|
| | średnia [MPa] | s [MPa] | v [%] | przedział ufności [MPa] | średnia [MPa] | s [MPa] | v [%] |
| f_{R1} | 9,27 | 1,2 | 13 | 8,82 ÷ 9,74 | 8,89 | 0,5 | 5 |
| f_{R2} | 8,80 | 1,29 | 15 | 8,30 ÷ 9,28 | 9,00 | 0,1 | 1 |
| f_{R3} | 7,87 | 1,25 | 15 | 7,39 ÷ 8,34 | 7,76 | 0,4 | 5 |
| f_{R4} | 6,98 | 1,16 | 17 | 6,53 ÷ 7,42 | 7,16 | 0,5 | 6 |

Podsumowanie

Badania centralnie zginanych płyt kwadratowych podpartych swobodnie na obwodzie wykazały, że wyniki tych badań charakteryzują się znacznie mniejszym współczynnikiem zmienności w porównaniu z wynikami belek zginanych. Różnica ta wynika z faktu, iż w badaniach belek z fibrokompozytu w zakresie pozasprężystym, na małej powierzchni ich przełomu tylko nieznaczna ilość włókien jest aktywna podczas zniszczenia. Zjawisko

to w znacznie mniejszym stopniu występuje w przypadku płyt czy elementów pełnowymiarowych. Nasza propozycja polega na powiązaniu energii pochłoniętej przez belkę podczas zginania, przy ugięciu odpowiadającym szerokości rysy CMOD, kiedy wyznacza się wytrzymałości resztkowe z energią pochłanianą przez płytę przy ekwiwalentnych ugięciach. Na podstawie ustalonej energii pochłaniania w belce określa się wartość obciążenia odpowiadającego kolejnym energiom, a następnie wytrzymałości resztkowe. Przedstawione w artykule ich badanie z wykorzystaniem centralnie zginanych płyt kwadratowych, opartych swobodnie na obwodzie, jest alternatywą dla 3-punktowego zginania belki. Zaproponowany sposób prowadzenia badania, w tym kształt próbki, ma na celu bardziej realistyczne modelowanie dwuosowego zginania niż w przypadku belek. Mamy jednak świadomość, że przedstawiona metoda, bazująca na zdolności pochłaniania energii przez fibrokompozyt, nie jest doskonała. Planowane są dalsze prace nad udoskonaleniem tej metody,

m.in. przez wprowadzenie odpowiednich współczynników ułatwiających opisaną procedurę.

Literatura

[1] Tiberti G, Germano F, Mudadu A, Plizzari GA. An overview of the flexural post-cracking behavior of steel fiber reinforced concrete. *Struct Concr.* 2017; 19: 695 – 718.
 [2] Buratti N, Ferracuti B, Savoia M. Concrete crack reduction in tunnel linings by steel fibre-reinforced concretes. *Constr Build Mater.* 2013; 44: 249 – 259.

[3] Głodkowska W. Waste Sand Fiber Composite: Models of Description of Properties and Application. *Annu. Set The Environ Prot.* 2018; 20: 291.
 [4] Giaccio G, Tobes JM, Zerbino R. Use of small beams to obtain design parameters of fibre reinforced concrete. *Cem Concr Comp.* 2008; 30: 297 – 306.
 [5] Model Code 2010. In Final draft, fib Bulletin 66, v. 2, 2012. Comité Euro-International du Béton – Fédération International e de la Précontrainte: Paris; 2010.
 [6] PN-EN 14651:2005 + A1:2007. Test Method for Metallic Fibred Concrete – Measuring the Flexural Tensile Strength (Limit or Proportionality (LOP), Residual).
 [7] RILEM TC 162-TDF. Test and design methods for steel fibre reinforced concrete, σ - ϵ design method. *Mater Struct.* 2003; 36: 560 – 567.
 [8] Yoo DY, Lee JH, Yoon YS. Effect of fiber content on mechanical and fracture properties of ultrahigh performance fiber reinforced cementitious composites. *Com Struct* 2013; 106: 742 – 753.
 [9] Lee JH. Influence of concrete strength combined with fiber content in the residual flexural strengths of fiber reinforced concrete. *Compos Struct.* 2017; 168: 216 – 225.
 [10] Zamanzadeh Z, Laurenco L, Barros J. Recycled steel fiber reinforced concrete failing in bending and in shear. *Constr Build Mater.* 2015; 85: 195 – 207.
 [11] Choi WCh, Jung KY, Jang SJ, Yun HD. The Influence of Steel Fiber Tensile Strengths and Aspect Ratios on the Fracture Properties of High-Strength Concrete. *Materials.* 2019; 12: 2105.
 [12] Centonze G, Leone M, Aiello MA. Steel fibers from waste tires as reinforcement in concrete: a mechanical characterization. *Constr Build Mater.* 2012; 36: 46 – 57.
 [13] Buratti N, Mazzotti C, Savoia M. Post-cracking behaviour of steel and macro synthetic fiber-reinforced concretes. *Constr Build Mater.* 2011; 25: 2713 – 2722.
 [14] Głodkowska W, Ziarkiewicz M, Lehmann M. Residual strength of fibre composite based on waste sand. *Materiały Budowlane.* 2015; 5: 75 – 77.
 [15] PN-EN 14488-5: 2008. Testing sprayed concrete – Part 5: Determination of energy absorption capacity of fibre reinforced slab specimens.
 [16] Lehmann M, Głodkowska W. Shear Capacity and Behaviour of Bending Reinforced Concrete Beams Made of Steel Fibre-Reinforced Waste Sand Concrete. *Materials.* 2021; 14: 2996.
 [17] Laskowska-Bury J. Wybrane cechy fizyko-mechaniczne fibrokompozytu wytworzonego na bazie kruszywa odpadowego. Rozprawa doktorska. Koszalin; 2017.
 [18] Khaloo AR, Afshari M. Flexural behaviour of small steel fibre reinforced concrete slabs. *Cem Concr Comp.* 2005; 27: 141 – 149.

Przyjęto do druku: 17.02.2023 r.