

prof. dr hab. inż. Tadeusz Urban¹⁾

ORCID: 0000-0001-7494-3747

dr inż. Michał Goldyn^{1)*}

ORCID: 0000-0002-7791-1940

dr inż. Łukasz Krawczyk¹⁾

ORCID: 0000-0002-0406-7750

Badanie wytrzymałości na rozciąganie fibrobetonu z mikrobrojeniem

Investigation on the tensile strength of concrete with microfibres

DOI: 10.15199/33.2023.09.01

Streszczenie. Celem pracy było określenie zależności pomiędzy wytrzymałością na rozciąganie betonu wysokowartościowego z mikrobrojeniem, zbadaną w różny sposób: przez rozciąganie bezpośrednie, rozłupywanie i zginanie. W przypadku bezpośredniego rozciągania wykorzystano próbki o niepryzmatycznym kształcie oraz zaprojektowane akcesorium do maszyny wytrzymałościowej. Stwierdzono, że wytrzymałość w przypadku rozciągania bezpośredniego stanowi 0,23 ÷ 0,31 wytrzymałości na rozłupywanie i 0,21 ÷ 0,30 wytrzymałości na zginanie.

Słowa kluczowe: wytrzymałość na rozciąganie; rozłupywanie; fibrobeton; beton wysokowartościowy.

Abstract. The aim of the investigations was to determine relation between the tensile strength of the high performance concrete with microfibres, tested in various ways: by direct tension, splitting and bending. Direct tension was realized using the non-prismatic specimens and the designed accessory for the testing machine. It was found that strength by direct tension is 0.23 ÷ 0.31 of the splitting strength and 0.21 ÷ 0.30 of the flexural strength.

Keywords: tensile strength; splitting; fiber reinforced concrete; ultra-high performance concrete.

Badanie betonu na rozciąganie bezpośrednie jest dość trudne i bardzo rzadko stosowane. W praktyce wykonuje się zwykle badania pośrednie, określając wytrzymałość na rozłupywanie lub zginanie. Nie dają one jednak tożsamyh wyników. Różnice zależą nie tylko od sposobu badania, ale również kształtu i wymiarów próbek. Najczęściej stosowane jest badanie przez rozłupywanie próbek walcowych lub sześciennych. Wytrzymałość oznaczona na próbkach sześciennych jest o ok. 10% większa niż na próbkach walcowych, natomiast wytrzymałość określona na próbkach sześciennych o boku 150 mm jest mniejsza niż na próbkach sześciennych o boku 100 mm [1]. Nie stwierdzono natomiast znacznego wpływu wymiaru próbki walcowej na mierzoną wytrzymałość na rozciąganie, prawdopodobnie z powodu dużej zmienności wyników.

Różnice występują także w przypadku oznaczania wytrzymałości na rozciąganie przez zginanie. Badania realizowane są w schemacie trój- i czteropunktowym, co determinuje rozkład momen-

tu zginającego. W konsekwencji wartości uzyskiwane w próbie czteropunktowego zginania są mniejsze. Zarówno w próbie rozłupywania, jak i zginania uzyskuje się jednak większą wytrzymałość na rozciąganie wobec jednoosiowego rozciągania.

Norma ACI 318-19 [2] wprowadza następujące zależności opisujące relację pomiędzy wytrzymałością na ściskanie i rozciąganie, uzyskiwaną w różnych badaniach:

$$\bullet f_{ct} = 0,34\sqrt{f_c} \text{ [MPa]} \quad (1)$$

– rozciąganie osiowe;

$$\bullet f_{ct,sp} = 0,49\sqrt{f_c} \text{ [MPa]} \quad (2)$$

– badanie przez rozłupywanie;

$$\bullet f_{ct,fl} = 0,85\sqrt{f_c} \text{ [MPa]} \quad (3)$$

– badanie przez zginanie.

Autorzy [3] proponują następujące funkcje opisujące relację pomiędzy wytrzymałością na rozciąganie i ściskanie betonów zwykłych o wytrzymałości 20 ÷ 55 MPa:

$$\blacksquare f_{ct} = 0,8(f_c/10)^{2/3} \text{ [MPa]} \quad (4)$$

– jednoosiowe rozciąganie;

$$\blacksquare f_{ct,sp} = 1,2(f_c/10)^{2/3} \text{ [MPa]} \quad (5)$$

– badanie przez rozłupywanie;

$$\blacksquare f_{ct,fl} = 2,1(f_c/10)^{2/3} \text{ [MPa]} \quad (6)$$

– badanie przez zginanie.

Oznacza to, że wytrzymałość przy rozciąganiu osiowym wynosi $f_{ct} \approx 0,7f_{ct,sp}$ (rozłupywanie) i $f_{ct} \approx 0,4f_{ct,fl}$ (zginanie). Zgodnie z PN-EN 1992-1-1 [4] relacja

pomiędzy wytrzymałością betonu przy osiowym rozciąganiu i rozłupywaniu $f_{ct} = 0,9f_{ct,sp}$. Pozostawienie takiej zależności ma uzasadnienie w rzeczywistej pracy konstrukcji, w której zwykle występuje złożony stan naprężeń, podobnie jak w próbie rozłupywania. W przypadku próby zginania równoważną wytrzymałość przy osiowym rozciąganiu uzależnia się także od wymiaru próbki (wysokości przekroju h), stosując następującą zależność:

$$f_{ct} = \frac{1}{\max\{1,6 - h/1000; 1,0\}} f_{ct,fl} \quad (7)$$

Ocena wytrzymałości betonu na rozciąganie jest tematem nadal aktualnym, o czym świadczą liczne prace prezentujące autorskie podejścia do tego zagadnienia [5 ÷ 9].

Podejmując badania własne, autorzy mieli na celu ustalenie relacji pomiędzy wytrzymałością na rozciąganie betonu wysokowartościowego zbrojonego mikrowłóknami stalowymi w zależności od sposobu badania.

Własne badania doświadczalne

Program badań. W badaniach wykorzystano beton wysokowartościowy (seria UHPC A), zawierający dodatkowo mikrobrojenie w formie prostych włókien stalowych (seria UHPC B)

¹⁾ Politechnika Łódzka, Wydział Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska

^{*} Adres do korespondencji: michal.goldyn@p.lodz.pl

lub sinusoidalnych (seria UHPC C). Stosowano włókna proste o długości $l_f = 12,5$ mm i średnicy $d_f = 0,175$ mm (smukłość $\lambda_f = 71$) wykonane ze stali o wytrzymałości na rozciąganie $f_u = 2800$ MPa (dane producenta), a także włókna sinusoidalne o długości $l_f = 15,5$ mm i średnicy $d_f = 0,30$ mm (smukłość $\lambda_f = 52$).

Wszystkie badane betony wykonano na cemencie portlandzkim CEM I 42,5R. Stosowano również dodatki w postaci popiołu lotnego i mikrokrzemionki, uzyskując równoważny współczynnik $w/(c + k \cdot d) \approx 0,22$. Jako kruszywo użyto drobnego piasku kwarcowego frakcji $0 \div 1,2$ mm. Zawartość włókien stalowych w zarobach B i C była jednakowa i wynosiła 2,5% objętości mieszanki (~ 195 kg/m³). W celu zachowania urabialności mieszanki (konsystencji płynnego miodu), ze względu na ograniczoną ilość wody zarobowej i znaczną zawartość włókien stalowych, konieczne było zastosowanie superplastyfikatora w ilości ok. 4% masy cementu.

Ze względu na wielkość kruszywa zastosowanego w betonie, badania cech wytrzymałościowych przeprowadzono na próbkach o małych wymiarach. **Wytrzymałość na ściskanie** określano na walcach o średnicy 70 mm i wysokości 140 mm (f_c) oraz kostkach o boku 100 mm ($f_{c,cube}$). **Wytrzymałość na rozciąganie przez rozłupywanie** ($f_{ct,sp}$) badano na kostkach o boku 100 mm, natomiast **wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu** ($f_{ct,fl}$) na beleczkach o przekroju 100 x 100 mm i długości 500 mm, naciętych w połowie długości na ok. 1/6 wysokości przekroju, tj. 17 mm. **Wytrzymałość na rozciąganie bezpośrednie** badano na specjalnie przygotowanych do tego celu próbkach o nieprzystycznym przekroju, przewężonych w części środkowej.

W celu zachowania osiowości obciążenia próbek i zapewnienia możliwości swobodnego obrotu zostały one połączone z zaciskami maszyny wytrzymałościowej z pomocą cięgien (zawiesi) zaczepionych na stalowych rolkach (fotografia 1). W trakcie badania dokonywano bezkontaktowego pomiaru odkształceń na powierzchni próbek za pomocą systemu cyfrowej korelacji obrazów GOM Aramis.

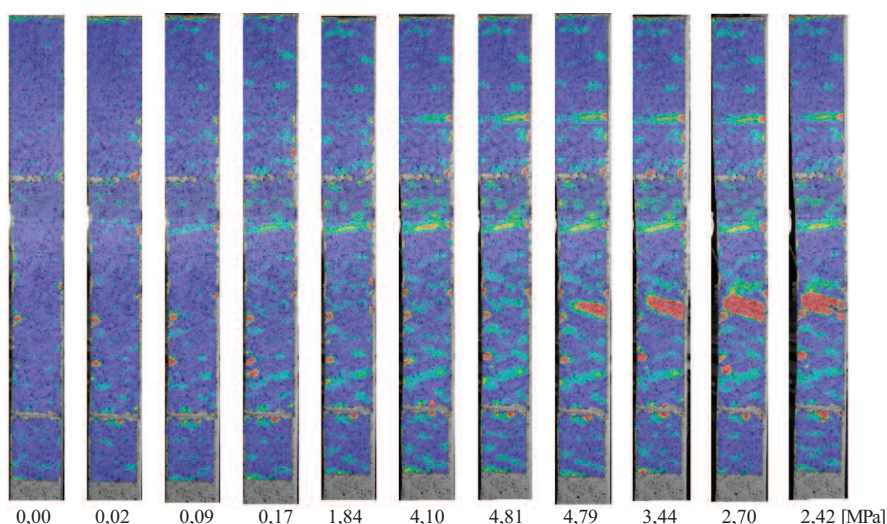


Fot. 1. Stanowisko badawcze w trakcie próby osiowego rozciągania
Photo 1. Test setup during axial tension test

Badanie wytrzymałości przy osiowym rozciąganiu. Zbadano sześć elementów w celu określenia nośności betonu na bezpośrednie rozciąganie. Badanie było sterowane przyrostem przemieszczenia. Pozwalało to zaobserwować zachowanie próbki przed i po przyłożeniu siły maksymalnej. W celu wyeliminowania mimośrodków wykorzystano liny stalowe oraz specjalnie wykonstruowane akcesoria. W przypadku dwóch próbek (UHPC B-K1 i UHPC C-S2) stwierdzono odmienne zachowanie i noś-

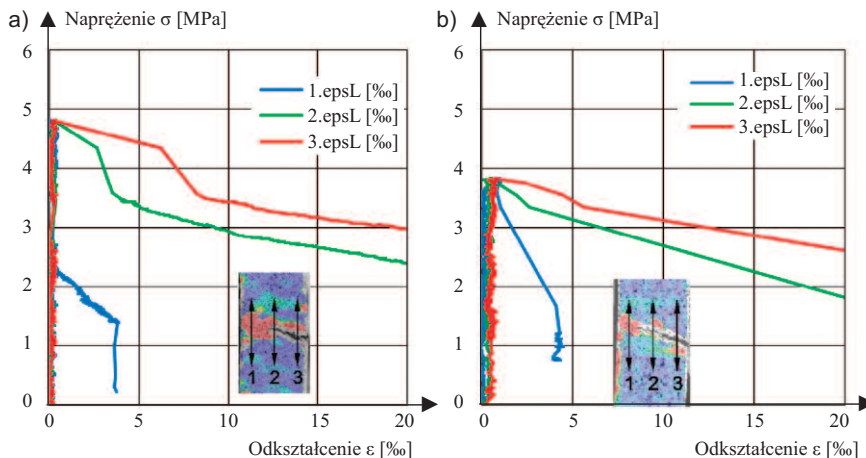
ność elementów. Ze względu na dużą podatność w pierwszej fazie badania, brak wyraźnego zmniejszenia sztywności w trakcie przykładania obciążenia i małą nośność można przypuszczać, że elementy najprawdopodobniej uległy zarysowaniu przed badaniem. Zjawisko to mogło wystąpić na skutek skurczu. Wyniki uzyskane w tych dwóch próbach uznano za niemiarodajne. W trakcie badania elementów najpierw zauważono zwiększone odkształcenia w kilku miejscach w kierunku prostopadłym do osi próbki, które można utożsamiać z mikrorysami. Wraz ze zwiększaniem obciążenia jedna z rys stawała się wyraźnie dominująca i w jej przekroju dochodziło do zniszczenia (fotografia 2).

Wybrane wyniki pokazano na rysunku 1 w postaci zależności naprężeń od odkształceń mierzonych na bazach o długości 4 cm obejmujących rysę decydującą o zniszczeniu. Odczytów dokonywano na trzech bazach rozmieszczonych równomiernie na szerokości elementu. Odczyty mają różne wartości. Próbką w końcowej części badania uległa widocznemu wygięciu (fotografia 3). Należy zatem stwierdzić, że pomimo dołożenia wszelkich starań, w celu wyeliminowania mimośrodków badania, próbka nie była poddana osiowemu rozciąganiu, co wynika z występowania mimośrodków materiałowych, które uznać należy za immanentną cechę fibrobetonu [10].



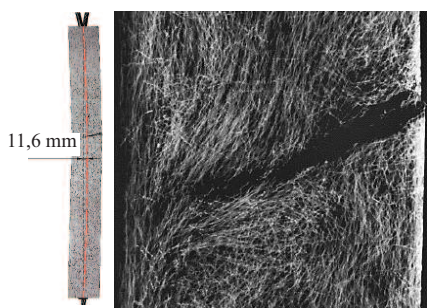
Fot. 2. Rozwój odkształceń na powierzchni próbki UHPC B/S3 w trakcie badania (podano średnie naprężenia rozciągające)

Photo 2. Development of strains on the surface of UHPC B/S3 specimen during the test (average tensile stresses were given)



Rys. 1. Charakterystyka naprężenie-odkształcenie: a) fibrobeton z włóknami prostymi (UHPC B); b) fibrobeton z włóknami sinusoidalnymi (UHPC C)

Fig. 1. Stress-strain characteristics: a) fibre reinforced concrete with straight fibres (UHPC B); b) fibre reinforced concrete with sinusoidal fibres (UHPC C)



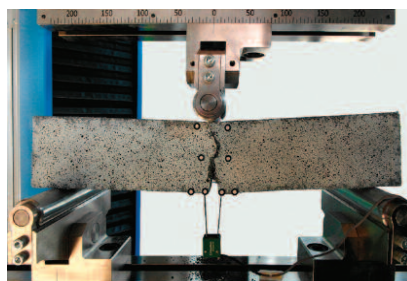
Fot. 3. Rozciągana próbka w fazie zniszczenia i jej zdjęcie rentgenowskie w sąsiedztwie rysy niszczącej

Photo 3. Tensioned specimen in the destruction phase and its X-ray image in the vicinity of the destructive crack

Stwierdzono różnice w zachowaniu pomiędzy próbkami z betonów B i C. Dotyczą one naprężeń maksymalnych uzyskanych w trakcie badania elementów z włóknami prostymi ($f_{ctm} = 4,85$ MPa) i sinusoidalnymi ($f_{ctm} = 3,86$ MPa). Kolejną różnicą jest kształt krzywej opadającej. Naprężenia w elemencie z włóknami sinusoidalnymi zmniejszają się w sposób proporcjonalny, natomiast w przypadku próbki z włóknami prostymi można zaobserwować nagłe zmniejszenie wartości naprężeń (przy odkształceniach ok. 2‰). Po tej zmianie nośność rezydualna kształtowała się na podobnym poziomie, co oznacza większą redukcję nośności w przypadku elementu z włóknami prostymi niż sinusoidalnymi.

Badanie wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu wykonano zgodnie z PN-EN 14651:2005+A1:2007 [11] w maszynie wytrzymałościowej umożliwiającej sterowanie przemieszczeniem. Badano

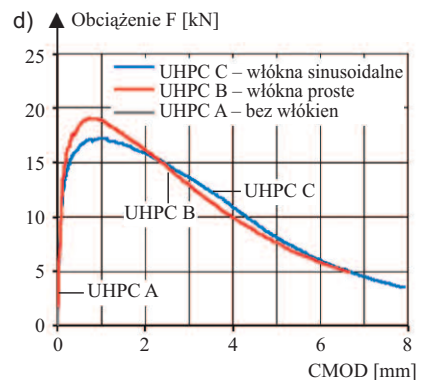
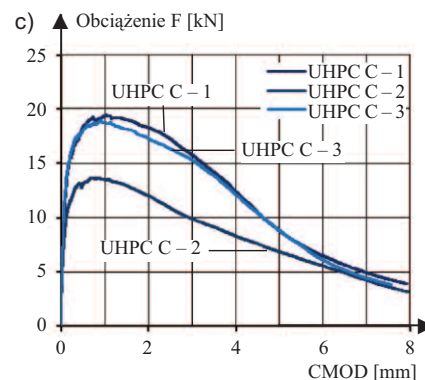
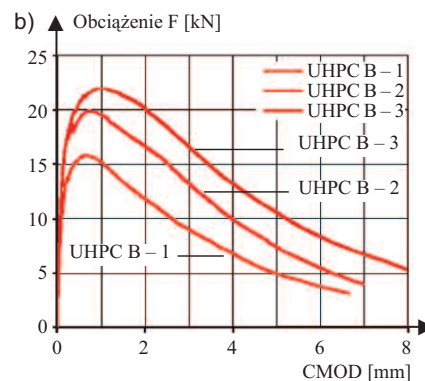
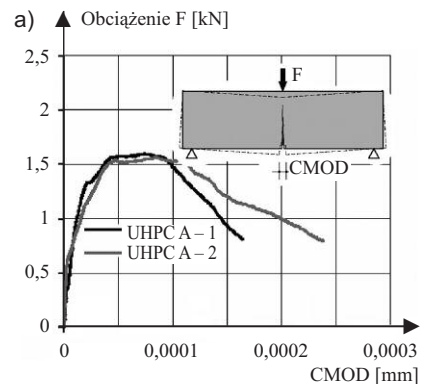
beleczyki o przekroju 100 x 100 mm i długości 500 mm, nacięte w połowie długości na głębokość ok. 1/6 wysokości przekroju (ok. 17 mm), w celu zainicjowania w tym miejscu rysy od zginania (fotografia 4). Obciążenie zadawano w środku rozpiętości beleczek, tj. w odległości 225 mm od osi podpór (schemat trójpunktowy), dobierając tempo jego zwiększania w taki sposób, aby zachować stały w czasie przyrost szerokości szczeliny, wyrażonej jako CMOD (Crack Mouth Opening Displacement). Zmianę szerokości nacięcia kontrolowano przy użyciu ekstensometru nasadowego (dynamicznego).



Fot. 4. Beleczyka z fibrobetonu w trakcie próby zginania

Photo 4. Fibre reinforced concrete specimen during flexural test

Na rysunku 2 pokazano uzyskane zależności obciążenie – CMOD, charakteryzujące elementy z betonu bez zbrojenia rozproszonego (rysunek 2a) oraz z fibrobetonu (rysunki 2b i c). Wartości sił F_i i odpowiadające im naprężenia rozciągające w przekroju $f_{R,i}$ odnoszące się do charakterystycznych poziomów CMOD zgodnie z [12], zestawiono w tabeli 1.



Rys. 2. Zależności obciążenie – CMOD z badania zginania trójpunktowego: a) UHPC A; b) UHPC B; c) UHPC C; d) porównanie wartości średnich charakteryzujących poszczególne serie

Fig. 2. Load-CMOD relationships resulting from three point bending test: a) UHPC A; b) UHPC B; c) UHPC C; d) comparison between mean values of each series

Tabela 1. Charakterystyka badanych betonów przy zginaniu
Table 1. Characteristics of concretes tested in bending

UHPC	Statystyka	F_{1L}	f_{ctL}	F_{1R}	f_{R1}	F_2	f_{R2}	F_3	f_{R3}	F_4	f_{R4}	F_{max}	$f_{ct,fl}$
		[kN]	[MPa]	[kN]	[MPa]	[kN]	[MPa]	[kN]	[MPa]	[kN]	[MPa]	[kN]	[MPa]
		CMOD = 0,05 mm		CMOD = 0,5 mm		CMOD = 1,5 mm		CMOD = 2,5 mm		CMOD = 3,5 mm			
A	\bar{X}											1,58	1,51
B	\bar{X}	8,45	7,97	18,52	17,48	17,56	16,55	14,64	13,79	11,42	10,76	19,31	18,22
	σ	1,08	0,81	2,17	1,67	3,25	2,75	3,32	2,88	2,84	2,49	2,58	2,05
C	\bar{X}	7,81	7,36	16,52	15,55	16,71	15,73	14,82	13,96	12,40	11,68	17,33	16,31
	σ	0,92	0,93	2,40	2,32	2,69	2,58	2,81	2,68	2,32	2,23	2,62	2,52

 \bar{X} – wartość średnia w danej serii; σ – odchylenie standardowe

W przypadku próbek z niezbrojonego betonu wysokowartościowego osiągnięcie siły niszczącej następowało przy zmianie szerokości rozwarcia szczeliny o mniej niż 0,0001 mm. Zniszczenie było gwałtowne. Zastosowanie mikrowłókien stalowych diametralnie zmieniło zachowanie betonu, który stał się materiałem ciągliwym. W żadnym z badanych fibrobetonów nie stwierdzono wzmocnienia po przekroczeniu maksymalnego obciążenia. Korzystny wpływ włókien uwidocznił się wyraźnie przy sile maksymalnej F_{max} , większej ok. dwunasto- i jedenastokrotnie, odpowiednio w przypadku fibrobetonów UHPC B i UHPC C. Siły te rejestrowano po zarysowaniu próbek, przy CMOD 0,7 ÷ 1,0 mm. Nośność rezydualna rejestrowana przy CMOD równym 6 mm stanowiła od ok. 25% do nawet ponad 40% maksymalnej siły uzyskanej w trakcie badania.

Badanie wytrzymałości przy rozłupywaniu przeprowadzono zgodnie z normą [1], używając próbek sześciennych o wymiarze boku $b = 100$ mm (zgodnie z załącznikiem A). Zastosowano podkładki z twardej płyty pilśniowej, zgodnej z wymaganiami [1]. Obciążenie przykładano w sposób zapewniający stały przyrost naprężenia, wynoszący ok. 0,05 MPa/s. Próbkę wykonaną z betonu bez włókien (UHPC A) uległy rozłupaniu na dwie części. W przypadku pozostałych próbek pojawienie się pierwszej rysy nie wyznaczało zniszczenia. Maksymalne obciążenie osiągnęto przy ryśce dochodzącej do kilku dziesiątych milimetra. Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu obliczono na podstawie maksymalnej siły zareje-

strowanej w trakcie badania (F_n) ze wzoru (8):

$$f_{ct} = (2 \cdot F_n) / (\pi \cdot b^2) \quad (8)$$

Podsumowanie

W tabeli 2 zestawiono wyniki badań betonów. Dodatek włókien stalowych nie wpłynął na wytrzymałość na ściskanie. Wytrzymałość oznaczona na próbkach walcowych była zbliżona i wynosiła ok. 90 MPa. Jedynie w przypadku kostek sześciennych uzyskano o ok. 20% większe naprężenia przy zniszczeniu. Znaczną różnicę stwierdzono natomiast w odniesieniu do wytrzymałości na rozciąganie przez rozłupywanie. W przypadku obu badanych fibrobetonów była ona niemal sześciokrotnie większa. Porównując wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu różnica ta okazała się jeszcze większa i sięgała 970 ÷ 1100%. Uzyskane wyniki są zgodne z rezultatami wcześniejszych badań opisanych w literaturze.

Tabela 2. Zestawienie wyników badań
Table 2. Summary of test results

Seria	f_{cm} [MPa]	$f_{cm,cube}$ [MPa]	$f_{cm}/f_{cm,cube}$	f_{ctm} [MPa]	$f_{ctm,sp}$ [MPa]	$f_{ctm}/f_{ctm,sp}$	$f_{ctm,fl}$ [MPa]	$f_{ctm}/f_{ctm,fl}$
UHPC A	88,8	82,7	1,07	–	2,80	–	1,52	–
UHPC B	92,2	99,5	0,93	3,86	16,6	0,23	18,2	0,24
UHPC C	88,0	96,0	0,92	4,85	15,8	0,31	16,3	0,27

Porównując wyniki uzyskane w przypadku fibrobetonów (UHPC B i UHPC C) stwierdzono istotne różnice między wytrzymałością na rozciąganie określoną w sposób pośredni (rozłupywanie i zginanie) i bezpośrednio w próbie osiowego rozciągania. Wytrzymałość przy rozciąganiu osiowym f_{ct} stanowiła średnio jedynie 20 ÷ 30% wytrzymałości uzyskanej w próbie rozłupywania $f_{ct,sp}$ i przy zginaniu $f_{ct,fl}$. Uzyskane relacje $f_{ct}/f_{ct,sp}$ i $f_{ct}/f_{ct,fl}$ istotnie odbiegają od wartości zalecanych przez

normę PN-EN 1992-1-1 [4], które w odniesieniu do próbek stosowanych w prezentowanych badaniach wynosiłyby odpowiednio 0,9 i 0,66.

Ze względu na pilotażowy charakter zaprezentowanych badań, uzyskanych zależności pomiędzy wytrzymałościami betonu oznaczonymi w różny sposób nie można na tym etapie traktować jako uniwersalnych. Konieczne są dalsze badania eksperymentalne, które pozwolą zweryfikować otrzymane relacje.

Literatura

- [1] PN-EN 12390-6:2011, 2011, Badania betonu – Część 6: Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu próbek do badań.
- [2] ACI 318-19, 2019, Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-19) and Commentary (ACI 318R-19).
- [3] Kim JJ, Taha MR. Experimental and Numerical Evaluation of Direct Tension Test for Cylindrical Concrete Specimens, *Adv in Civ Eng*. 2014, <https://doi.org/10.1155/2014/156926>.
- [4] PN-EN 1992-1-1:2008, 2008, Eurokod 2 – Projektowanie konstrukcji z betonu – Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków.
- [5] Seruga A, Kaźmierczak S, Kanciruk A. Wytrzymałość na rozciąganie osiowe betonu napowietrzonego, *Dni Betonu* 2008.
- [6] Resan SF, Chassib SM, Zemam SK, Madhi MJ. New approach of concrete tensile strength test, *Case Stud. Constr. Mater.* 2020, <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2020.e00347>.
- [7] Park SH, Kim DJ, Ryu GS, Koh KT. Tensile behavior of Ultra High Performance Hybrid Fiber Reinforced Concrete Cement & Concrete Composites. 2012; 172 – 184.
- [8] Yoo DY, Kim S, Kim JJ, Chun B. An experimental study on pullout and tensile behavior of ultra-high performance concrete reinforced with various steel fibers. *Construction and Building Materials*. 2019; 46 – 61.

[9] Markovic I. High-performance hybrid-fibre concrete: Development and utilisation, doktorat Delft University. 2006.

[10] Huang H, Gao X, Li L, Hui Wang. Improvement effect of steel fiber orientation control on mechanical performance of UHPC. *Construction and Building Materials*. 2018; 709 – 721.

[11] PN-EN 14651:2005+A1:2007 Metoda badania betonu zbrojonego włóknem stalowym – Pomiar wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu (granica proporcjonalności LOP).

[12] fib Model Code 2010, 2012, Model Code 2010. Final draft.

Przyjęto do druku: 24.08.2023 r.