

Wytrzymałość kompozytów cementowych zbrojonych włóknami mieszanymi

Mechanical performance of hybrid engineered cementitious composites

Słowa kluczowe: beton inżynierski, kompozyty cementowe, układy hybrydowe, wytrzymałość na rozciąganie, wytrzymałość na zginanie

Keywords: ECC, cementitious composites, hybrid, direct tensile strength, flexural strength

1. Wstęp

Beton jest materiałem kruchym. W zwykłych konstrukcjach betonowych, gdy zastosowane obciążenie wywoła naprężenia równe wytrzymałości betonu na rozciąganie, powstają spękania. Przyczyną uszkodzeń są obciążenia pionowe, jak również obciążenia powodowane przez wstrząsy sejsmiczne. Powstałe spękania są przyczyną korozji stali zbrojeniowej w betonie w wyniku migracji do wnętrza wody, a szczególnie roztworów agresywnych. Aby zminimalizować szerokość pęknięcia w strefie naprężeń, opracowano kompozyty cementowe wzmocnione włóknami, zwane w tej pracy „inżynierskimi” [IKC]. Podczas odkształcenia niesprężystego mają one większą wytrzymałość końcową niż naprężenie, przy którym powstają pierwsze spękania (1). Zarówno IKC jak i beton zbrojony włóknami składają się z tych samych składników: piasku, cementu, włókien i domieszek chemicznych, z tą różnicą, że nie zawierają kruszywa grubego. Jego brak nadaje tym betonom specjalne właściwości. Beton zbrojony włóknami ma znaczną zdolność do odkształceń, jednak IKC wykazuje jeszcze większe wartości odkształceń przy rozciąganiu – od 3% do 7%, przy takim samym udziale objętościowym włókien, około 2% lub mniej. Zasadniczo, zdolność do odkształceń IKC jest około 500-600 razy większa, w porównaniu do betonu zwykłego (2-4). Wytrzymałość na rozciąganie IKC zależy od mechanicznych właściwości materiału (5). W betonach zwykłych, a także IKC stosuje się podobne metody mieszania. Głównym założeniem stosowania IKC jest poprawa wytrzymałości i plastyczności tego kompozytu (6).

Produkcja i stosowanie IKC jest opłacalne dzięki zmniejszonej zawartości zastosowanych włókien oraz dobrej wytrzymałości i plastyczności. IKC stosowane są jako warstwy ochronne, zwiększające odporność korozyjną konstrukcji betonowych. Innymi

1. Introduction

Concrete has brittle nature. Once the load is applied in normal concrete structures, a number of macroscopically visible cracks will be formed, when the stress reaches the tensile strength of concrete. The reason for the stress failures are vertical loads, seismic loads. The corrosion of steel reinforcements in concrete is due to the entry of water and other chemical agents through this macro visible cracks. To minimise the crack width, a high-performance fiber reinforced cementitious composites (HPFRCC) known as Engineered Cementitious Composites (ECC) has been developed and are used in tension zone to minimise the crack width. During inelastic deformation it has an ultimate strength higher than its first cracking strength with the formation of multiple cracks (1). The ECC and fiber reinforced concrete the materials used in ECC and fiber reinforced concrete are similar, which contains sand, cement, water, fibers and some chemical additives, however, for an unique property coarse aggregate is not included in ECC.

The fiber reinforced concrete have considerable strain capability, whereas ECC exhibits higher tensile strain value from 3% to 7% with same volume fraction around 2% or less. Generally, strain capacities of ECC is 500–600 times higher than normal concrete (2-4). The tensile strain in ECC depends on the micromechanical design (5). The ECC and normal conventional concrete have similar mixing procedure. The main objective of ECC is to improve toughness and ductility (6). ECC are cost-effective by a reduction in the usage of fibers and remarkable for strength and ductility characteristics. To increase the corrosive resistance of structures ECC are used as a shielding layer. Other goals of ECC include interior beam-column connection (7), expansion joints in highway pavements(8), rigid framed railway bridges (9), expansion joints in bridge decks (10) and RC slabs (11). Hybridization is defined

Autor do korespondencji: email:krajacivil@gmail.com

*Corresponding author, email:krajacivil@gmail.com

obszarami zastosowań tych kompozytów są wewnętrzne łączenia słupowo-kolumnowe (7), połączenia dylatacyjne nawierzchni autostradowych (8), sztywne ramy mostów kolejowych (9), złącza dylatacyjne płyt mostowych (10) i płyty żelbetowe (11).

Hybrydyzację definiuje się jako proces równoczesnego zastosowania dwóch lub więcej rodzajów włókien w mieszance betonowej (12). Wpływ wspólnego zastosowania różnego rodzaju włókien na wytrzymałość materiałów cementowych jest ciągłym przedmiotem badań (1, 13). Kompozyty hybrydowe wykazują efekt synergii - mają zwiększoną zdolność do odkształceń i większą wytrzymałość w porównaniu z kompozytami zawierającymi jeden rodzaj włókien (14-16).

2. Znaczenie badań

IKC są kompozytami cementowymi o większej plastyczności (17). Zawierają umiarkowaną ilość krótkich włókien z poli(alkoholu winylowego) [PVA], rozproszonych przypadkowo w betonie. W porównaniu z kompozytem wykonanym z jednego rodzaju włókien mają dużą wytrzymałość na zginanie i rozciąganie oraz większą względną odporność na kruche pękanie (18-20). W celu zwiększenia wytrzymałości konstrukcji z betonów IKC, podjęto próby opracowania hybrydowego kompozytu cementowego, który zwiększałby wytrzymałość na rozciąganie i zginanie, oraz względną odporność na kruche pękanie (21-23). W wyniku występowania naprężeń, w istniejących konstrukcjach powstają spękania, w związku z czym podejmuje się próby naprawy pęknięć za pomocą odpowiednio zaprojektowanych IKC, które przedłużają żywotność konstrukcji. Wykonano pięć mieszanek. Trzy zawierały jeden rodzaj włókien o udziale objętościowym 2%, mianowicie, włókna z poli(alkoholu winylowego), włókna polipropylenowe, lub włókna stalowe. Kolejne dwie mieszanki składały się z włókien z poli(alkoholu winylowego) o udziale objętościowym 1%, zmieszanych z włóknami polipropylenowymi [PP] o udziale objętościowym 1% oraz z włókien polialkoholu winylowego o udziale objętościowym 1%, zmieszanych z włóknami stalowymi, także o udziale objętościowym 1%. Mieszanki te posłużyły do opracowania nowych IKC.

3. Materiały i badane mieszanki

W badanych IKC zastosowano popiół lotny klasy F i cement portlandzki [CEM I] klasy 53. Skład chemiczny popiołu lotnego i cementu portlandzkiego podano w tablicy 1. W celu wykonania kompozytów wzmocnianych włóknami stosowano włókna

as the process of adding two or more fibers to a mix (12). The hybridization effect of many fibers on the cementitious materials reinforcement were investigated recently (1, 13). The hybrid composite drives benefits from each of individual fibers and exhibits improved strain capacity and ultimate strength compared to the mono-fiber composites (14-16).

2. Research significance

ECC is a high-performance cementitious composite with good ductility behavior (17). ECC have average short random PVA fiber content. The hybrid ECC has high flexural strength, tensile strength, and relative toughness, when compared to mono-fiber based composite (18-20). In structural application, to increase the structural performance of ECC, an effort is made to develop a hybrid engineered cementitious composite with increased the tensile strength, flexural strength and relative toughness (21-23). Due to stress failures, the existing structures undergoes cracking in tension zone, an attempt is made to repair the cracks in tension zone by using proper ECC composition which will increase the life span of structures. For this study, five mix combinations like polyvinyl alcohol fibers of volume fraction 2% and polypropylene fibers of volume fraction 2% and steel fibers of volume fraction 2% and polyvinyl alcohol fibers of volume fraction 1% is hybridized with polypropylene fibers of volume fraction 1% and polyvinyl alcohol fibers of volume fraction 1% is hybridized with steel fibers of volume fraction 1% are used. These five mixes are used to develop a new HECC.

3. Materials and mix proportion

In this ECC, the class F fly ash and Ordinary Portland cement (OPC) of 53 grade are used and their chemical composition is shown in Table 1. In this study, the composite materials used are polyvinyl alcohol (PVA), polypropylene (PP) and steel fibres. The length, diameter, mechanical properties of the fibers, are shown in Table 2. A new fiber hybridization is developed in this study. The mix proportions of ECC are shown in the Table. 3. The high range water reducing agent was used in the mix, to maintain the desired consistent of fresh ECC.

In ECC mix, the reference ECC1 mix PVA fiber of volume fraction 2% is added and another reference ECC2 mix PP fiber of volume fraction 2% is added and in ECC3 mix, steel fiber of volume fraction 2% is added and in HECC1 mix, to improve strain hardening

Tablica 1 / Table 1

SKŁAD CHEMICZNY CEMENTU I POPIOŁU LOTNEGO, % mas.

CHEMICAL COMPOSITION OF CEMENT AND FLY ASH, mass %

Składnik / Component	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	Na ₂ O + K ₂ O Alkalis
Cement	63.71	22.3	4.51	3.39	1.77	2.59	1.73
Popiół lotny / Fly ash	5.31	55.37	29.74	7.88	1.48	0.22	n.d.

Tablica 2 / Table 2

FIZYCZNE I MECHANICZNE WŁAŚCIWOŚCI WŁÓKIEN

PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF FIBERS

Włókna Fiber	Średnica Diameter μm	Długość Length mm	Stosunek L/D L/D ratio	Gęstość Density g/cm ³	Nominalna wytrzymałość na rozciąganie Nominal tensile strength, MPa	Wydłużenie przy zniszczeniu Elongation at failure %	Moduł Younga Young's modulus MPa
PVA	39	12	308	1.3	1600	6	42.5
PP	37	10	270	0.91	400	23	2.5
Stal Steel	300	12	40	7.9	2000	4.5	175

Tablica 3 / Table 3

SKŁAD MIESZANEK ECC

MIX PROPORTION OF ECC

Mieszanka Mix ID	Cement	Popiół lotny Fly ash	Piasek Sand	Stosunek Woda/Spoivo Water/Binder ratio	Superplastyfikator % mas. cementu Superplasticizer % by mass of cement	Włókna, % obj. Fibers, % by vol.		
						PVA	PP	Steel
ECC1	1	0.43	0.71	0.35	1	2		
ECC2	1	0.43	0.71	0.35	1		2	
ECC3	1	0.43	0.71	0.35	1			2
HECC1	1	0.43	0.71	0.35	1	1	1	
HECC2	1	0.43	0.71	0.35	1	1		1

z poli(alkoholu winylowego), polipropylenu i stalowe. Długość, średnica oraz właściwości mechaniczne włókien podano w tablicy 2. Sporządzono również mieszanki hybrydowe zawierające dwa rodzaje włókien. Składy betonów podano w tablicy 3. W celu utrzymania założonej konsystencji świeżej mieszanki stosowano superplastyfikator.

Mieszanki wzorcowe ECC1, ECC2 i ECC3 odpowiednio z dodatkiem włókien PVA, PP, stalowych wynoszącym 2% objętościowych. W celu poprawy zdolności do odkształceń materiału, w mieszance HECC1, zastosowano równocześnie włókna PVA i PP o udziale objętościowym po 1%. Kolejno w mieszance HECC2 zastosowano włókna PVA i stalowe o udziale objętościowym po 1%.

3.1. Przygotowanie próbek

Przygotowanie mieszanek rozpoczęto od zmieszania cementu, piasku i popiołu lotnego. Następnie do mieszaniny dodano wodę i mieszano przez 5 minut. Kolejno dodano włókna i mieszano do ich równomiernego rozproszenia w objętości mieszanki. Aby ograniczyć efekt tiksotropii należało wydłużyć czas mieszania mieszanki. Następnie mieszankę umieszczano w odpowiednich formach. Z uwagi na dobrą urabialność mieszanek nie stosowano wibrowania. Przygotowane próbki dojrzewały w temperaturze pokojowej przez 24 godziny. Następnie próbki wyjęto z form i włożono do wody, w której dojrzewały przez kolejne 27 dni. Po 28 dniach dojrzewania zbadano ich wytrzymałość.

capacity, PVA fiber and PP fiber of volume fraction 1% and 1% respectively is added and in HECC2 mix, PVA fiber and steel fiber of volume fraction 1% and 1% respectively is added.

3.1. Specimens preparation

In order to prepare the specimens, cement, sand and fly ash were mixed and then water was added to the mix and mixed for 5 minutes. Then fibers were added to cement paste and mixed until fibers were mixed evenly. In order to minimize the effect of thixotropy, the mixing time of the concrete mix is to be maximised. The concrete mixes are placed in their respective moulds, but are not vibrated as the mix is highly workable. Specimens are cured at room temperature for 24 hours. Then the specimens are demoulded and cured in water for 28 days. After 28 days, all the tests are performed.

3.2. Test methods

Uniaxial compression and elastic modulus tests

To find the compressive strength, the concrete cube of size 70.7x70.7x70.7 mm is tested at 3, 7, 14 and 28 days as per code IS 4031-Part 6 (24). The specimen is placed in the machine and load is applied until the specimen failure, as shown in the Fig. 1. The maximum load at the cube failure is taken as a compressive strength. To find the elastic modulus of ECC mix, the same procedure is followed for the specimen of size 100 mm diameter and 200 mm length.

3.2. Metody badań

Jednoosiowe ściskanie i moduł sprężystości

Wytrzymałość na ściskanie badano na kostkach betonowych o wymiarach 70,7 mm x 70,7 mm x 70,7 mm po 3, 7, 14 i 28 dniach dojrzewania zgodnie z normą IS 4031-część 6 (24). Próbki umieszczono w prasie i ścismano aż do jej zniszczenia, jak to pokazano na rysunku 1. Maksymalne obciążenie przy zniszczeniu próbki przyjmowano jako wytrzymałość na ściskanie. Aby określić moduł sprężystości betonów IKC, zastosowano tę samą metodę dla próbek walcowych o średnicy 100 mm i długości 200 mm.

Trzy-punktowe badanie zginania

W celu określenia wytrzymałości na zginanie wykonano badanie trzy-punktowego zginania na próbkach o wymiarach 25 mm x 60 mm x 350 mm. Do przeprowadzenia badań stosowano prasę Zwick / Roell Z100 o sile nacisku 100 kN. Próbkę umieszczono na dwóch równoległych trzpieniach podtrzymujących. Obciążenie przykładane jest w punkcie środkowym belek, a ugięcie mierzone jest za pomocą czujnika optycznego.

Jednoosiowe rozciąganie

Pomiar wytrzymałości na rozciąganie po 28 dniach dojrzewania prowadzono na próbkach o wymiarach 350 x 60 x 30 mm. Pomiaru stosunku naprężeń rozciągających wykonano na próbkach o długości 80 mm i przekroju o wysokości i szerokości 30 mm. W celu pomiaru odkształcenia próbki na obu jej końcach umieszczono czujnik przemieszczeń liniowych o układzie różnicowym z przesunym rdzeniem [LVDT].

4. Wyniki i dyskusja

4.1. Wytrzymałość na ściskanie

Podana wytrzymałość na ściskanie każdej z pięciu mieszanek IKC po 3, 7, 21 i 28 dniach dojrzewania, jest średnią wartością z trzech pomiarów [rysunek 2]. Wytrzymałość na ściskanie dla wszystkich próbek po 3 dniach dojrzewania mieści się w zakresie między 9,1 - 10,5 MPa, po 7 dniach między 27,7 - 31 MPa, po 14 dniach między 37,5 - 48,5 MPa, a po 28 dniach między 47,8 - 54,1 MPa. W każdym przypadku największą wytrzymałość ma próbka ECC3 [rysunek 2]. Na podstawie uzyskanych wyników można stwierdzić, że występuje znaczna poprawa wytrzymałości, dzięki dodatkowi włókien stalowych i kombinacji PVA i włókien stalowych (HECC2). Typowy obraz zniszczonych kostek ECC przedstawiono na rysunku 1.

4.2. Wytrzymałość na rozciąganie

Obecnie, zastosowanie materiałów IKC jest powszechne, dlatego konieczne jest zrozumienie roli jaką betony IKC odgrywają w konstrukcjach. Betony IKC były początkowo stosowane jako materiały naprawcze, później zaś ze względu na dużą wytrzymałość na rozciąganie, utrudnioną propagację spękań oraz dużą wytrzy-

Three points bending test

The three points bending test is conducted on the prism specimen of the size 25x60x350 mm to find out the flexural performance of prism specimen. Zwick/Roell Z100 universal testing machine of capacity 100 kN is used for the bending tests. The specimen is placed on two parallel supporting pins. The load is applied in the middle of specimen by means of deflection control machine and deflection is measured by using optical video sensor.

Uniaxial tensile test

The dog bone specimen of the size 350x60x30 mm is used to measure the tensile strength of specimens after 28 days of curing. Specimen of the length 80 mm and cross section of 30 mm thick and 30 mm width is used to measure stress strain relation. To measure strain in the specimen LVDT is placed at both ends of the specimen.

4. Results and discussion

4.1. Compressive strength

To derive the compressive strength of the ECC mixes for 3, 7, 21 and 28 days of curing, five different mixes are tested and average values from three specimens are taken. The compressive strength after 3 days of curing for all mixes is in the range 9.1 - 10.5 MPa, the highest is for ECC3 [Fig. 2]. The compressive strength for all mixes after 7 days of curing are in the range 27.7 - 31 MPa, the highest is also for ECC3. The compressive strength, after 14 days of curing for all mixes are in the range of 37.5 - 48.5 MPa, the best for ECC3. The compressive strength of all mixes after 28 days of curing is in the range 47.8 - 54.1 MPa, the highest also for ECC3 [Fig. 2]. From these results, it can be stated that there is a prominent achievement in strength due to the presence of steel and combination of PVA and steel fibres. The typical failure pattern of ECC cubes under uniaxial compression test is shown in Fig. 1.

4.2. Direct tensile strength

Now-a-days, the usage of ECC materials in structural applications are extensive and it is necessary to understand the role of ECC in structural applications. ECC were initially used for repair applications and later due to tensile strain hardening, cracks mitigation, modulus rupture nature, it is used in structural component. After 7 days of curing, the tensile strength of ECC for all mixes are in the range 1.2 - 2.1 MPa, the best for ECC3 [Fig. 3]. The tensile strength of ECC for all mixes after 14 days of curing are in the range 2.3 - 4.2 MPa, the best for ECC3. The tensile strength of ECC for all mixes after 28 days of curing are in the range 4.6 - 7.2 MPa, the highest for ECC3. The tensile strength of ECC was very small for 3 days of curing hence they are neglected. As per recommendation of Victor Li (24) the ultimate tensile strength of ECC mix should be around 4-12 MPa after 28 days curing and the direct tensile strength of all ECC mixes are within this range. The failure pattern of ECC is shown in Fig. 3.



Rys. 1. Schemat zniszczenia betonu ECC

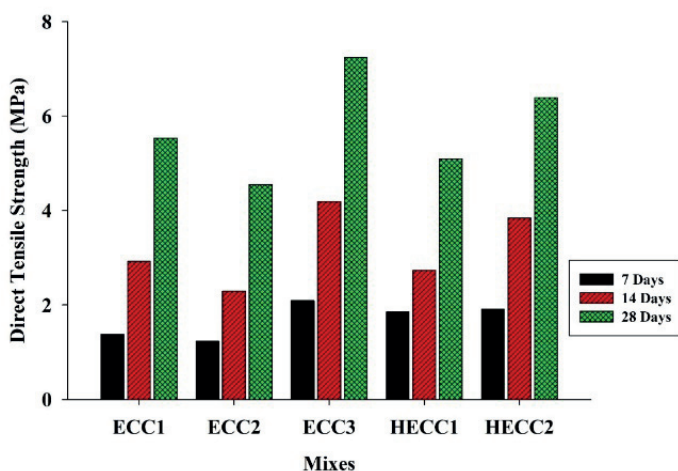
Fig. 1. Failure pattern of IKC

małość na zginanie, znalazły one zastosowanie w elementach konstrukcyjnych.

Po 7 dniach dojrzewania wytrzymałości na rozciąganie betonów IKC dla wszystkich mieszanek mieszczą się w zakresie 1,2 - 2,1 MPa, po 14 dniach w zakresie 2,3 - 4,2 MPa, a po 28 dniach w zakresie 4,6 - 7,2 MPa [rys. 4]. Niezależnie od czasu dojrzewania największe wartości wytrzymałości na rozciąganie zmierzono dla próbki IKC3. Ze względu na bardzo małą wytrzymałość na rozciąganie betonów IKC po 3 dniach dojrzewania, wyniki te nie są prezentowane. Według Victora Li (24) wytrzymałość na rozciąganie mieszanki IKC po 28 dniach powinna zawierać się w przedziale 4-12 MPa. Otrzymane wyniki wytrzymałości na rozciąganie wszystkich mieszanek IKC mieszczą się w podanym zakresie. Schemat zniszczenia betonu IKC przedstawiono na rysunku 3.

4.3. Wytrzymałość na zginanie

Zachowanie się betonu IKC w trakcie zginania przypomina zachowanie materiału o właściwościach plastycznych. Wytrzymałość na zginanie dla wszystkich mieszanek po 7 dniach dojrzewania mieści się w zakresie 5,30 - 6,86 MPa przy czym największe wartości



Rys. 4. Wytrzymałość na rozciąganie betonów IKC

Fig. 4. Direct tensile strength of the EEC mixes

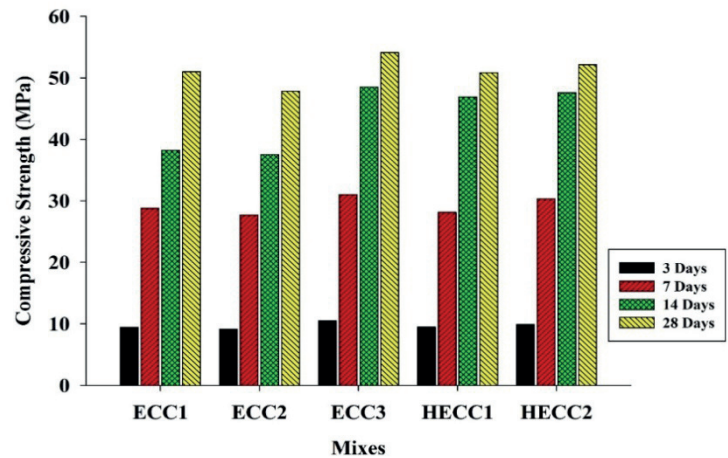


Fig. 2. Compressive strength of ECC mixes

Rys. 2. Wytrzymałość na ściskanie betonów IKC



Fig. 3. Failure pattern of ECC after tensile strength measurement

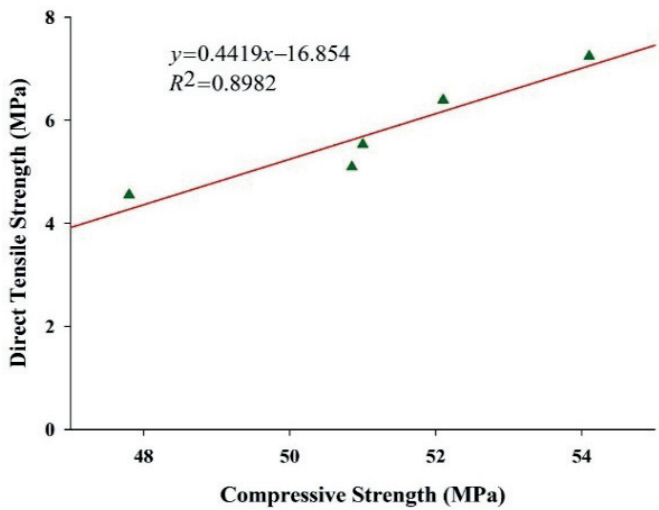
Rys. 3. Schemat zniszczenia betonu IKC po pomiarze wytrzymałości na rozciąganie

4.3. Flexural strength

The flexural performance of ECC imitates the ductile behaviour of the mix. The flexural strength for all mixes after 7 days of curing are in the range 5.30 - 6.86 MPa, the highest for ECC3. The flexural strength after 14 days curing for all mixes are in the range 14.7 - 21.4 MPa, the best for HECC2, but the difference with ECC3 is negligible [Fig. 6]. After 28 days of curing, the flexural strength for all mixes are in the range 18.4 - 24.3 MPa, the highest for HECC2, but the difference with ECC3 is negligible, as in the case of the strength after 14 days [Fig. 6].

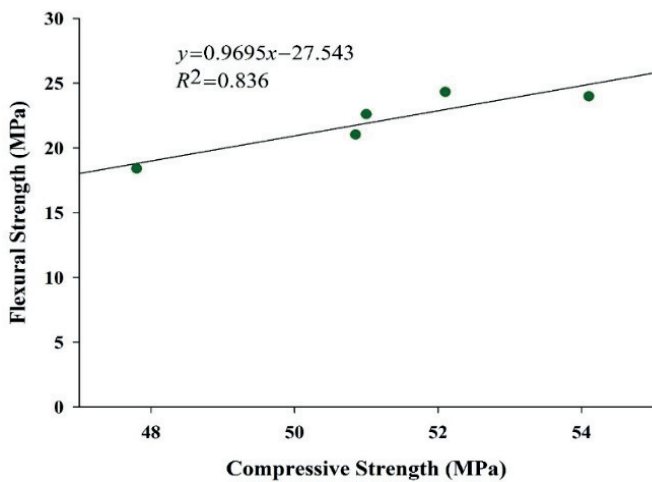
4.4. The modulus of elasticity

The Young's modulus for all mixes after 3 days of curing are in the range 9.1 - 10.2 MPa, the highest for ECC3 [Fig. 8]. The Young's modulus for all mixes after 7 days curing is in the range 17.9 - 19.7 MPa, the best for ECC3, but the differences are relatively low. The modulus of elasticity after 14 days of curing is for all mixes in the



Rys. 5. Analiza regresji zależności między wytrzymałością na ściskanie, a wytrzymałością na rozciąganie

Fig. 5. Regression analysis of compressive strength vs tensile strength



Rys. 7. Analiza regresji zależności między wytrzymałością na ściskanie, a wytrzymałością na zginanie

Fig. 7. Regression analysis of compressive strength vs flexural strength

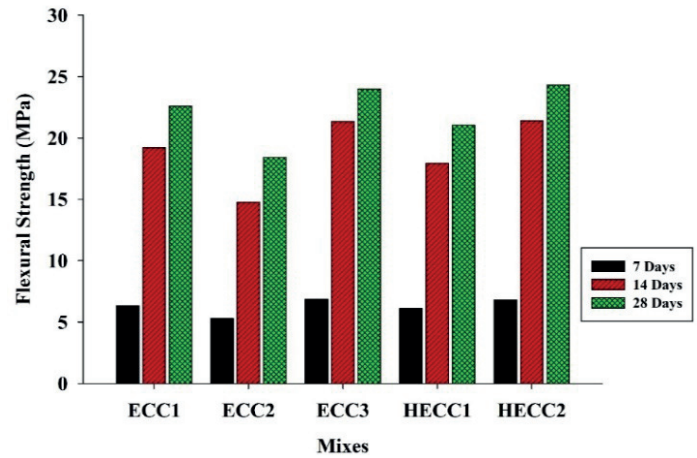
uzyskano dla IKC3 [rysunek 6]. Po 14 dniach wytrzymałość na zginanie mieści się w przedziale 14,7 - 21,4 MPa, a po 28 dniach w zakresie 18,4 - 24,3 MPa. Zarówno po 14 jak i 28 dniach największą wytrzymałość na zginanie ma beton HECC2. Różnica wytrzymałości między HECC2, a IKC3 jest niewielka [rysunek 6].

4.4. Moduł sprężystości

Moduł Younga dla wszystkich mieszanek po 3 dniach dojrzewania mieści się w zakresie 9,1 - 10,2 MPa, po 7 dniach w przedziale 17,9 - 19,7 MPa, po 14 dniach w przedziale 20,7 - 22,9 MPa, a po 28 dniach w przedziale 23,8 - 26,1 MPa. Niezależnie od czasu dojrzewania próbek największy moduł sprężystości ma kompozyt IKC3.

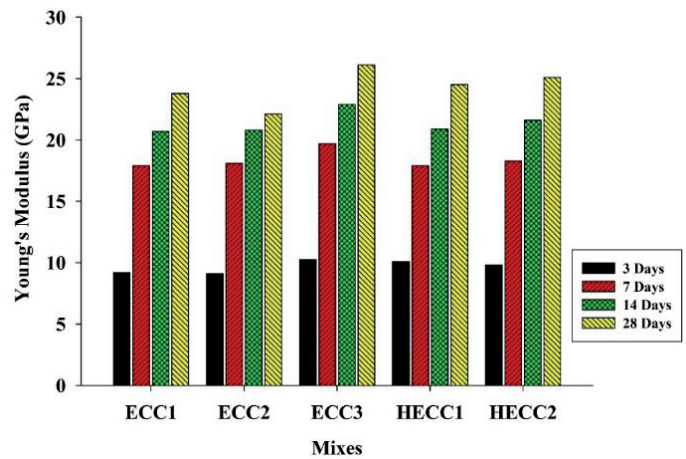
5. Wnioski

Właściwości mechaniczne kompozytu cementowego wzmocnionego włóknami mieszanymi [HIKC] badano na przykładzie dwóch



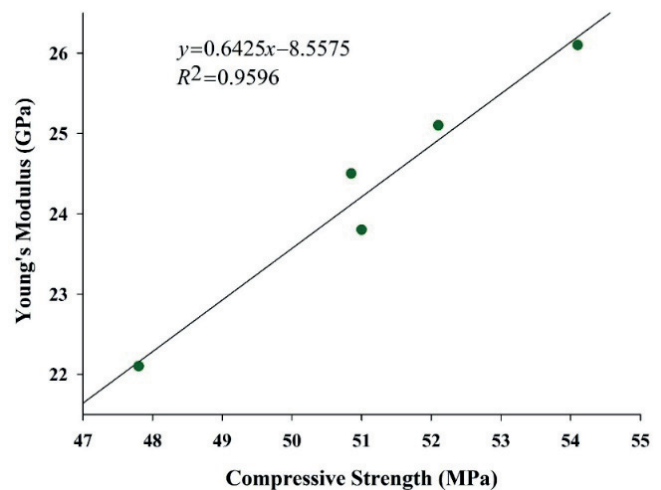
Rys. 6. Wytrzymałość na zginanie betonów ECC

Fig. 6. Flexural strength of the IKC mixes



Rys. 8. Moduł Younga betonów ECC

Fig. 8. Young's Modulus of IKCmixes



Rys. 9. Analiza regresji zależności między wytrzymałością na ściskanie i modułem Younga

Fig. 9. Regression Analysis of compressive strength vs Young's modulus

kompozytów cementowych, z których każdy zawierał dwa rodzaje włókien: HIKC1 1% PVA i 1% PP, a HIKC2 1% PVA i 1% włókien stalowych. Stwierdzono, że HIKC1 i HIKC2 wykazują większą wytrzymałość na ściskanie, na rozciąganie, moduł Younga i wytrzymałość na zginanie w porównaniu ze wzorcowymi IKC1 i IKC2, natomiast IKC3 ma lepsze właściwości mechaniczne w porównaniu ze wszystkimi badanymi mieszankami.

Należy również zauważyć, że spośród dwóch hybrydowych kompozytów cementowych, HIKC1 wykazuje większą wytrzymałość na ściskanie, wytrzymałość na rozciąganie, moduł Younga i wytrzymałość na zginanie w porównaniu z HIKC2.

Ważnym i wartym podkreślenia jest to, że włókna we wszystkich mieszankach [trzech mieszankach IKC i dwóch mieszankach HIKC] były równomiernie rozmieszczone. We wszystkich próbkach zanotowano tak zwane mostkowanie włókien w miejscu występowania pęknięć.

References / Literatura

1. V. C. Li, Advances in ECC research, ACI Special Publications. **206**, 373-400 (2002).
2. V. C. Li, On engineered cementitious composites (ECC), Journal of advanced concrete technology. **1**, 3, 215-230 (2003).
3. E. Silva, J. Coelho, J. Bordado, Strength improvement of mortar composites reinforced with newly hybrid-blended fibres: Influence of fibres geometry and morphology, Constr. Build. Mat. **40**, 473-480 (2013).
4. S. Ahmed, M. Maalej, Tensile strain hardening behaviour of hybrid steel-polyethylene fibre reinforced cementitious composites, Constr. Build. Mat. **23**, 1, 96-106 (2009).
5. V. C. Li, Engineered Cementitious Composites (ECC), Material, Structural, and Durability Performance, 2008.
6. Y. Y. Kim, H.-J. Kong, V.C. Li, Design of engineered cementitious composite suitable for wet-mixture shotcreting, Materials Journal, **100**, 6,511-518 (2003).
7. S. Qudah, M. Maalej, Application of Engineered Cementitious Composites (ECC) in interior beam-column connections for enhanced seismic resistance, Engineering Structures, **69**, 235-245 (2014).
8. S. Qian et al., Life cycle analysis of pavement overlays made with Engineered Cementitious Composites, Cem. Concr. Comp., **35**, 1, 78-88 (2013).
9. R. Zhang et al., Application of PP-ECC in beam-column joint connections of rigid-framed railway bridges to reduce transverse reinforcements, Engineering Structures, **86**, 146-156 (2015).
10. M. D. Lepech, V. C. Li, Application of ECC for bridge deck link slabs, Materials and Structures. **42**, 9,1185 (2009).
11. H. M. E.-D. Afefy, M. H. Mahmoud, Structural performance of RC slabs provided by pre-cast ECC strips in tension cover zone, Constr. Build. Mat., **65**, 103-113 (2014).
12. H. Kasagani, C. Rao, The influence of hybrid glass fibres addition on stress-strain behaviour of concrete, Cement Wapno Beton, **21**, 361-372 (2016).
13. X. R. Cai, B. Q. Fu, S. L. Xu, The apparent density, tensile properties and drying shrinkage of ultra high toughness cementitious composites, Advanced Materials Research, **261-263**, 223-227 (2011).

range 20.7 - 22.9 MPa, the best for ECC3 [Fig. 8]. After 28 days of curing, the Young's modulus for all mixes is in the range 23.8 - 26.1 MPa, the highest for ECC3, as usual.

5. Conclusions

The mechanical properties of a new hybrid engineered cementitious composite (HECC) was experimentally investigated with two hybrid engineered cementitious composites with 1% PVA and 1% PP (HECC1) then 1% PVA and 1% steel fibre (HECC2). It is found that HECC1 and HECC2 exhibits high compressive strength, tensile strength, Young's modulus and flexural strength compared to ECC1 and ECC2, however, ECC3 exhibits high compressive strength, tensile strength, Young's modulus and flexural strength, compared to all remaining mixes.

It is also noted that among two hybrid cementitious composites HECC1 exhibits high compressive strength, tensile strength, Young's modulus and flexural strength, compared to HECC2.

It is very important and should be underlined that the fibres were distributed uniformly in all mixes i.e. three ECC mixes and two HECC mixes. The bridging of fibres was seen in the cracks of ECC and HECC specimens.

14. S. F. Ahmed, M. Maalej, P. Paramasivam, Analytical model for tensile strain hardening and multiple cracking behavior of hybrid fiber-engineered cementitious composites, *J. of Materials in Civil Engineering*, **19**, 7,527-539 (2007).
15. S. F. U. Ahmed, H. Mihashi, Strain hardening behavior of lightweight hybrid polyvinyl alcohol (PVA) fiber reinforced cement composites, *Mat. Struct.*, **44**, 6,1179-1191 (2011).
16. L. S. Lawler, D. Zampini S. P. Shah, Microfiber and macrofiber hybrid fiber-reinforced concrete, *J. of Materials in Civil Engineering*. **17**, 5,595-604 (2005).
17. H. R. Pakravan, M. Latifi, M. Jamshidi, Ductility improvement of cementitious composites reinforced with polyvinyl alcohol-polypropylene hybrid fibers, *J. of Industrial Textiles*. **45**, 5,637-651 (2016).
18. W. Yao, J. Li, K. Wu, Mechanical properties of hybrid fiber-reinforced concrete at low fiber volume fraction, *Cem. Concr. Res.*, **33**, 1, 27-30 (2003).
19. A. R. Krishnaraja, S. Kandasamy, Flexural Performance of Hybrid Engineered Cementitious Composite Layered Reinforced Concrete Beams, *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, (2018), <https://doi.org/10.3311/PPci.11748>.
20. A. R. Krishnaraja, S. Kandasamy, Flexural Performance of Engineered Cementitious Compositelayered Reinforced Concrete Beams, *Archives of Civil Engineering*, **63**, 4, 173-189 (2017).
21. S. H. Said, H. A. Razak, I. Othman, Flexural behavior of engineered cementitious composite (ECC) slabs with polyvinyl alcohol fibers, *Constr. Build. Mat.*, **75**, 176-188 (2015).
22. Chang-Geun Cho, Hyeon-Jin Lim, Bang-Yeon Lee, Yeol Choi, Experiments and performances of strain-hardening fiber low cementitious composites, *Advances in Mechanical Engineering*. **7**, 1-7 (2015).
23. A. Krishnaraja, S. Kandasamy, Mechanical Properties of Engineered Cementitious Composites, *International Journal of ChemTech Research*, **10**, 8, 314-347 (2017).
24. V. Li, Engineered Cementitious Composites (ECC) Material, Structural, and Durability Performance, *Concrete Construction Engineering Handbook*, Chapter 24, 2008.