

Mechaniczne właściwości kompozytu cementowego z dodatkiem pyłu krzemionkowego

Mechanical properties of engineered cementitious composites developed with silica fume

N. Arivusudar*, S. Suresh Babu

Department of Civil Engineering, Adhiyamaan College of Engineering, Hosur, Krishnagiri, Tamilnadu-635109, India

*corresponding author: N. Arivusudar, e-mail: arivusudar.nagarajan@yahoo.com

Streszczenie

Inżynierski kompozyt cementowy jest rodzajem kompozytu z dodatkiem włókien o bardzo dobrych właściwościach, który wykazuje bardzo dobrą wytrzymałość na naprężenia, ściskanie i zginanie. Inżynierskie kompozyty cementowe są analogiczne do konwencjonalnego betonu zawierającego cement, piasek, popiół lotny, jednak bez grubego kruszywa. Są one bogate w cement, w związku z tym są dalekie od zrównoważonego rozwoju. Mechaniczne właściwości i trwałość inżynierskiego kompozytu cementowego są wzmacniane dodatkiem popiołów lotnych. Właściwości tego kompozytu są poprawiane przez optymalne zastępowanie cementu tym dodatkiem mineralnym, nawet do 40%. W pracy zbadano wpływ dodatku pyłu krzemionkowego zastępującego cement, obok popiołu lotnego, w inżynierskim kompozycie cementowym. Zbadano osiem różnych składów, które, poza normalnym składem, zawierały 10% do 70% dodatku pyłu krzemionkowego w odstępie co 10%, który zastępował cement. Dodatek pyłu krzemionkowego do inżynierskiego kompozytu cementowego znacznie poprawił właściwości mechaniczne tego spoiwa.

Słowa kluczowe: inżynierski kompozyt cementowy, pył krzemionkowy, wytrzymałość na ściskanie, wytrzymałość na zginanie, wytrzymałość na rozciąganie

Summary

Engineered Cementitious Composites are generally the ultra-high-performance fiber-reinforced composites, which have very good mechanical properties. Engineered Cementitious Composites are similar to normal conventional concrete with cement, fine sand, fly ash, but without coarse aggregate. Engineered Cementitious Composites have a high content of cement, which is causing this material to be far from the sustainability. The mechanical and durability properties of Engineered Cementitious Composites can be improved by the addition of fly ash. The properties of Engineered Cementitious Composites can be also improved by the partial replacement of cement by fly ash, up to 40%. In this study, an attempt is made to straighten the Engineered Cementitious Composites by the addition of silica fume, leaving the content of fly ash without changes. Eight different mix proportions are used in this investigation, which includes one conventional mix and mixes with the addition of 10% to 70% of silica fume with the distance of 10%. The addition of silica fume to Engineered Cementitious Composites is causing the remarkable improvement of the mechanical properties of these mixes.

Keywords: Engineered Cementitious Composites, Silica Fume, Compressive Strength, Direct Tensile Strength, Flexural Strength

1. Wprowadzenie

Beton jest z natury kruchym materiałem (1). Przyłożenie obciążenia w przypadku normalnych konstrukcji betonowych, gdy osiągnięto wytrzymałość na rozciąganie tego betonu, pojawi się wówczas duża ilość makroskopowych rys. Uszkodzenia betonu są wywołane naprężeniami spowodowanymi obciążeniami sejsmicznymi, pionowymi i przypadkowymi. Woda i inne ciecze wnikają do

1. Introduction

Concrete is a brittle material in nature (1). When the load is applied on normal concrete structure and the stress is reaching the tensile strength of this concrete, then the high amount of macroscopically visible cracks will be formed. The stress failures in concrete are due to seismic loads, construction and the accidental loads. Due to cracks formation, the water but also the chemical fluids can

betonu w związku z powstaniem rys, co wywołuje korozję stali zbrojeniowej, wewnątrz tego kompozytu. Opracowano specjalny rodzaj kompozytów cementowych zbrojonych włóknami o dużej odporności, znanych jako inżynierski kompozyt cementowy [IKC] (2), które stosuje się w strefie rozciągania w celu zmniejszenia rozstępu rys (3).

IKC jest specjalnym zbrojonym włóknami kompozytem cementowym (4,5). Oba rodzaje betonów: IKC i zbrojony włóknami kompozyt zawierają podobne materiały, a więc cement, piasek i włókna oraz niektóre domieszki chemiczne. Jednak w celu zapewnienia wyjątkowych właściwości IKC nie zawiera on grubego kruszywa (6-8). Beton zbrojony włóknami wykazuje wiązanie wrażliwe na naprężenia, podczas gdy IKC ma większe naprężenia na rozciąganie w trakcie twardnienia, które przypadają w zakresie od 3 do 7% dla tego samego udziału objętościowego włókien, przeciętnie około 2% lub mniej. Inżynierski kompozyt cementowy może wykazywać naprężenia około 500 – 600 razy większe od przeciętnego betonu (9-12). Występujące naprężenie rozciągające w IKC zależy od mikromechanicznego zaprojektowania (13). Metoda mieszania w przypadku IKC jest podobna do stosowanej dla zwykłego betonu.

2. Znaczenie badań

Mieszanka IKC zawiera zwykle dużo cementu, a także dodatek popiołu lotnego i inne dodatki mineralne (14). Natomiast stosowanie maksymalnego dodatku cementu będzie miało niekorzystny wpływ na środowisko, bowiem produkcja jednej tony cementu portlandzkiego powoduje emisję 0,8 tony dwutlenku węgla (15). Prowadzonych jest szereg badań związanych ze stosowaniem dużego udziału popiołu lotnego w IKC. Szczególny nacisk kładzie się na właściwości IKC związane z dodatkiem pyłów krzemionkowych (16,17, 18). Ten nowy skład mieszanki będzie przyjazny dla środowiska w związku ze zmniejszeniem niekorzystnego pod tym względem cementu, a także poprawia mechaniczne właściwości kompozytu.

W przeprowadzonych badaniach zastosowano dodatek od 10% do 70% w odstępach co 10%, pyłów krzemionkowych do mieszanki IKC, co rozszerza jej przydatność w różnych zastosowaniach.

3. Program badawczy

3.1. Materiały

W doświadczeniach stosowano cement portlandzki klasy 53 popiół lotny otrzymany z elektrowni Mettur i pył krzemionkowy. Skład chemiczny cementu i popiołu podano w tablicy 1. Dodawano 2% włókien poliwinylowych. Właściwości włókien podano w tablicy 2.

3.2. Skład i przygotowanie mieszanki

Opracowany skład mieszanki IKC z różnym dodatkiem pyłu krzemionkowego podano w tablicy 3. Mieszanka nazwana jako IKC została wybrana jako referencyjna, natomiast mieszanki

penetrate into the concrete which leads to the corrosion of steel reinforcements. A special type of high-performance fiber-reinforced cementitious composites, which is known as Engineered Cementitious Composites (ECC) has been developed (2) in order to minimize the crack width and this ECC are used in the construction tension zone (3).

ECC is a special type of improved high performance fiber reinforced cementitious composite [HPFRCC] (4,5). Both ECC and fiber reinforced concrete have similar materials, which contains cement, sand, water, fiber and some chemical admixtures. In order to maintain the unique properties of ECC, coarse aggregate is not added to the mix (6-8). The fiber reinforced concrete has the sensible strain hardening capability, whereas ECC exhibits higher tensile strain hardening value which ranges from 3% to 7% with same fiber volume fraction of typically around 2%, or less. Engineered Cementitious Composites exhibits strain capacities of about 500–600 times higher than normal concrete (9-12). Exhibition of tensile strain in ECC is depend on the micromechanical design(13). The mixing method for ECC is similar to the normal, conventional concrete.

2. Research significance

Generally the ECC mixes have the high content of cement and also of the fly ash as mineral additive (14). However, the usage of the cement maximum quantity will create environmental impact and the production of one tone of cement will release 0,8 tone of carbon dioxide (15). There are large numbers of researches ongoing, based on usage of high-volume fly ash in ECC mixes. In this work an attempt is made to improve the performance of ECC by addition of silica fume to the mix (16, 17, 18). This new combination will be eco-efficiency and sustainable, which avoids environmental impact due to cement and also improves the micromechanical parameters. In this study, 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60% and 70% of silica fumes are added to the ECC mix, which helps ECC in the various applications.

3. Experiments

3.1. Materials used

The ordinary Portland cement of grade 53, class F fly ash received from Mettur Thermal power plant and silica fume, are used in these investigations. The chemical analyses of cement and fly ash are shown in Table 1. In this investigation, PVA fiber of volume fraction 2% is used. The physical and mechanical properties of PVA fiber is shown in Table 2.

3.2. Mix Proportion and Preparation

Newly developed ECC mixes with addition of different percentage of silica fume, are shown in the Table.3. Mix designation as ECC is taken as a reference mix and mixes with 10%, to 70% with the distance of 10% addition of silica fume is called as ECC-SF1,

z dodatkiem pyłów krzemionkowych od 10% do 70% w odstępach co 10%, nazwano odpowiednio IKC-SF1, IKC-SF2, IKC-SF3, IKC-SF4, IKC-SF5, IKC-SF6, IKC-SF7. Dodatek popiołu lotnego był taki sam we wszystkich mieszankach. W celu poprawy właściwości świeżych IKC stosowano dodatek superplastyfikatora i domieszki zmniejszającej zawartość wody. Jako drobne kruszywo stosowano piasek rzeczny, o ciężarze właściwym, 2,7 odpowiadający strefie III według normy IS-383.

Tablica 1 / Table 1

SKŁAD CHEMICZNY CEMENTU I POPIOŁU LOTNEGO
CHEMICAL COMPOSITION OF CEMENT AND FLY ASH

	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	Alkalis
	%						
Cement	63.71	22.3	4.51	3.39	1.77	2.59	1.73
Fly ash / Popiół lotny	5.31	55.37	29.74	7.88	1.48	0.22	--

Tablica 2 / Table 2

PHYSICAL PROPERTIES OF PVA FIBERS

WŁAŚCIWOŚCI FIZYCZNE WŁÓKIEN PVA

Diameter Średnica, μm	Length Długość, mm	l/d ratio Stosunek l/d, -	Density Gęstość, g/cm ³	Nominal tensile strength Wytrzymałość na rozciąganie, MPa	Elongation at break Wydłużenie przy zerwaniu, %	Young's modulus Moduł Younga, MPa
38	12	307	1.31	1600	6	42.5

Tablica 3 / Table 3

SKŁAD MIESZANEK IKC

ECC MIX PROPORTION FOR VARIOUS MIXES

Mix ID Oznaczenie	Cement	Silica Fume Pył krzemionkowy	Fly ash Popiół lotny	Sand Piasek	Water/ Binder ratio Stosunek w/s	Super Plasticizer Superplastyfikator, %	PVA [*] Fiber Volume Fraction Udział objętościowy włókien, %
ECC	1	--	0.3	0.8	0.35	1	2
ECC-SF1	1	0.1	0.3	0.8	0.35	1	2
ECC-SF2	1	0.2	0.3	0.8	0.35	1	2
ECC-SF3	1	0.3	0.3	0.8	0.35	1	2
ECC-SF4	1	0.4	0.3	0.8	0.35	1	2
ECC-SF5	1	0.5	0.3	0.8	0.35	1	2
ECC-SF6	1	0.6	0.3	0.8	0.35	1	2
ECC-SF7	1	0.7	0.3	0.8	0.35	1	2

Mieszankę otrzymywano w ten sposób, że składniki: cement, popiół lotny, drobne kruszywo i pył krzemionkowy podawano do mieszarki i mieszano 3 minuty. Superplastyfikator z zasady wprowadza się razem z wodą zarobową, uprzednio starannie mieszając. Następnie mokry zestaw miesza się starannie przez 4–5 minut, po czym dodaje się powoli włókna do zaprawy, w celu uniknięcia zbrylania mieszanki i miesza się następnie 5–7 minut, w celu równomiernego rozprowadzenia włókien w mokrej mieszance. Mieszanki IKC miesza się w sposób ciągły przez 15 minut w celu uniknięcia efektu tiksotropowego w zaprawach, na co korzystnie wpływa maksymalne wydłużenie mieszania (18). Po odpowiednim zmieszaniu zaprawy IKC umieszcza się w formach dojrzewają przez 24 godziny. Następnie próbki wyjmują się z form i umieszcza się w wodzie na 28 dni. Po tym okresie przeprowadza się zaplanowane badania próbek.

ECC-SF2, ECC-SF3, ECC-SF4, ECC-SF5, ECC-SF6, ECC-SF7 respectively. However, the same volume of fly ash in the all the mixes were applied. In order to improve the performance of fresh ECC, the superplasticizer SP420, as a water reducing agent was used. Sand from river bed is used as fine aggregate of specific gravity 2.70 and conforming to zone-III as per IS-383 code guideline.

In order to mix the materials, cement, fly ash, fine aggregate and silica fume are to be inserted initially in the mixer machine and mixed for 3 minutes. Superplasticizer should not be added separately to the ECC mix, it should be mixed with water precisely and then this water is added to the dry mix, which was already mixed. Then this wet mortar is mixed for another 4-5 minutes evenly. Next PVA fibers is added to the cement mortar slowly, in order to reduce the balling effect in ECC mix and mix for another 5-7 minutes for



Rys. 1. Próbką sześcienną w trakcie badania wytrzymałości

Fig. 1. ECC Cube Specimen under Compression Test

the fiber uniformly distribute in the wet mix. The ECC mixes are allowed to mix continuously for 15 minutes to avoid the thixotropic effect of the mixes, which will be removed when mixing time is to be maximized (18). After the ECC mixes will be mixed properly, they ECC will be placed in the molds and cured for 24 hours. Then the specimens will be demoulded and cured in water for 28 days. After 28 days of curing, the respective tests will be carried out on all specimens.

3.3. Test methods

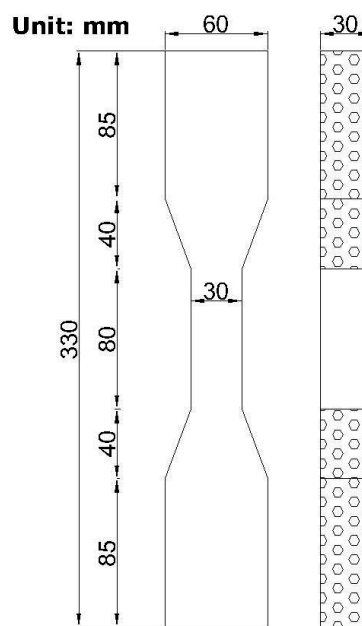
3.3.1. Compression strength

In order to determine the compressive strength, ECC cubes of the size 70.7 mm x 70.7 mm x 70.7 mm were used. These tests were carried out after 28 days of specimens water curing. For these tests the compression testing machine for cube specimens was applied. The specimen is placed in the testing machine, and load is applied until the specimen collapse. The maximum load, in which the specimen fails, is taken as a compressive load.



Rys. 2. Pomiar wytrzymałości na rozciąganie z zastosowaniem próbki w kształcie psiej kości

Fig. 2. Direct Tensile Test and Dog Bone Specimen Details



3.3. Metody badań

3.3.1. Wytrzymałość na ściskanie

W celu oznaczenia wytrzymałości na ściskanie stosuje się próbki sześciennie o wymiarach 70,7 x 10³ mm. Tę wytrzymałość bada się po 28 dniach dojrzewania próbek w wodzie. W tym celu próbki umieszcza się w maszynie wytrzymałościowej i zwiększa obciążenie, aż do ich zniszczenia. Maksymalne obciążenie powodujące zniszczenie próbek przyjmuje się jako wytrzymałość.

3.3.2. Direct tensile test

The Dog bone specimens of the size 350x60x30mm is used to determine the tensile strength of ECC. These specimens of gauge length 80 mm and cross section of 30mm thick and 30mm width were used to find stress strain relation. The dog bone specimen details and test setup for dog bone under direct tensile load, is shown in Fig. 2. Dog bone specimen is placed inside the test setup, and then the setup is placed in the 100 tonne capacity servo controlled universal testing machine.

3.3.2. Bezpośrenie badania wytrzymałości na rozciąganie

Stosowano „kość z psiej nogi” o wymiarach 350x60x30 mm w celu oznaczenia wytrzymałości na rozciąganie. Próbkę kości z IKC o wymiarach: długość 80 mm, przekroju poprzecznym o wymiarach 30 x 30 mm, w celu oznaczenia zależności naprężenie – odkształcenie, dojrzewa 28 dni. Próbkę psiej kości jest pokazana na rysunku 2. Psią kość umieszcza się w urządzeniu badawczym, o 100 tonach obciążenia, z serwosterowaniem.

3.3.3. Badanie modułu sprężystości

Do pomiaru modułu sprężystości mieszanki IKC stosowano próbki walcowe o wymiarach: 150 mm średnicy i 300 mm długości. Próbkę umieszcza się w maszynie do badania wytrzymałości na ściskanie, a miernik stopnia sprężenia jest umieszczony na próbce betonu, z przyrządem pomiarowym o długości 200 mm i tarcza z podziałką znajduje się w walcu. Obciążenie mierzy maszyna do badania wytrzymałości na ściskanie, a zmiany długości walca mierzy się za pomocą miernika sprężenia.

3.3.4. Badanie wytrzymałości na zginanie

Do badania wytrzymałości na zginanie stosuje się próbkę graniastosłupową o wymiarach 25x60x350 mm z IKC. Pomiaru wykonuje się uniwersalną maszyną Zwick/Roell Z100, o mocy 100 kN. Próbkę graniastosłupową umieszcza się na dwóch równoległych podporach. Siła obciążająca jest przyłożona w połowie graniastosłupowych próbek za pomocą maszyny kontrolującej zginanie i odgięcie jest mierzone przez optyczny czujnik.

4. Wyniki i dyskusja

4.1. Wytrzymałość na ściskanie

Wyniki pomiarów wytrzymałości na ściskanie próbek IKC pokazano na rysunku 3. Pomiaru wykonywano na kostkach, a kontynuowano aż do ich zniszczenia. Obraz zniszczonej kostki IKC pokazano na rysunku 4. Badano trzy próbki w przypadku każdej mieszanki i wynikiem była średnia.

Wytrzymałość na ściskanie była następująca: 51,2 MPa, 52,9 MPa, 54,6 MPa, 54,5 MPa, 55,2MPa, 53.8 MPa, 53.6 MPa i 53,9 MPa odpowiednio dla mieszanin: IKC, IKC-SF1, IKC-SF2, IKC-SF3, IKC-SF4, IKC-SF5, IKC-SF6, IKC-SF7. Uzyskane wyniki wykazują, że mieszanka IKC-SF4 ma największą wytrzymałość. Wytrzymałość mieszanek spada po przekroczeniu 40% dodatku pyłu krzemionkowego.

4.2. Wytrzymałość na rozciąganie

Do pomiaru wytrzymałości na rozciąganie próbek IKC zastosowano uniwersal-

3.3.3. Modulus of elasticity test

The cylinder specimen of size 150 mm in diameter and 300 mm in length is used to determine the modulus of elasticity of ECC mixes. The specimen is placed in the compression testing machine, compressometer is placed on the concrete specimen with a gauge length of 200 mm, and the dial gauge is placed in the cylinder. The load is measured in the compression testing machine, and change in length of the cylinder is measured using compressometer.

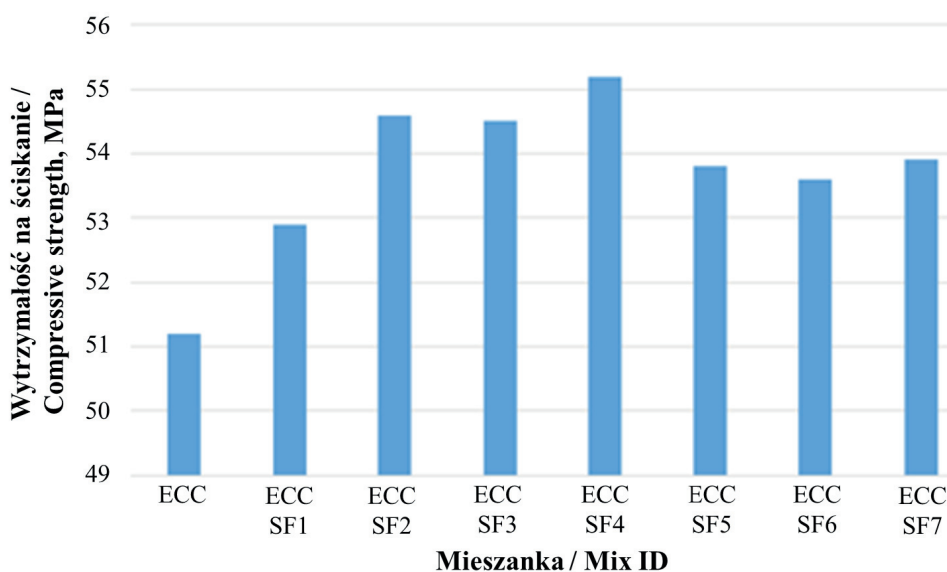
3.3.4. Flexural strength test

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

4. Result and discussion

4.1. Compressive strength

The compressive strength test results of ECC specimens are shown in Fig. 3. The test is conducted on cube specimen until the specimen fails. The failure pattern of ECC cube specimen is shown in Fig. 4. To find the compressive strength, three specimens per mix are tested and the average compressive strength value is taken. Compressive strength was 51.2 MPa, 52.9 MPa, 54.6 MPa, 54.5 MPa, 55.2MPa, 53.8 MPa, 53.6 MPa and 53.9 MPa for mixes ECC, ECC-SF1, ECC-SF2, ECC-SF3, ECC-SF4, ECC-SF5, ECC-SF6, ECC-SF7 respectively. From the test results, it is found that the strength of ECC-SF4 mix has the highest strength, than all other mixes. It is establish that the strength of ECC-SF4 mix is 7.5% higher than the conventional ECC mix. The strength of



Rys. 3. Wytrzymałość na ściskanie próbek IKC

Fig. 3. Compressive strength results of ECC specimens



Rys. 4. Typowy obraz zniszczowej próbki IKC

Fig. 4. Typical failure pattern of ECC

na maszynę wytrzymałościową. Wyniki przedstawiono na rys. 5. Zgodnie z Wytycznymi Victora [Victor Guidelines], materiał można uznać za IKC, jeśli po 28 dniach dojrzewania osiąga maksymalną wytrzymałość na rozciąganie w zakresie od 4 do 12 MPa. W tym badaniu IKC: ECC, ECC-SF, ECC-SF2, ECC-SF3, ECC-SF4, ECC-SF5, ECC-SF6, ECC-SF7 mają wytrzymałość na rozciąganie odpowiednio 5,46 MPa, 6,95 MPa, 6,86 MPa, 7,21 MPa, 7,96 MPa, 8,15 MPa, 6,98 MPa i 6,86 MPa. Sposób zniszczenia próbek przedstawiono na rys. 6. Analizę regresji wytrzymałości na ściskanie względem wytrzymałości na rozciąganie przedstawiono na rys. 7. Z wyników badań wynika, że wytrzymałość mieszanki ECC-SF5 jest większa niż wytrzymałość pozostałych kompozytów. Wytrzymałość mieszanki ECC-SF5 jest o 39,5% większa niż wzorcowej mieszanki ECC. Wytrzymałość kompozytu zmniejsza się, gdy dodatek pyłu krzemionkowego jest większy niż 50%.

4.3. Moduł sprężystości

Moduły sprężystości kompozytów ECC, ECC-SF1, ECC-SF2, ECC-SF3, ECC-SF4, ECC-SF5, ECC-SF6, ECC-SF7 przedstawiono na rys. 8. Wartości modułów dla kompozytów IKC: ECC, ECC-SF1, ECC-SF2, ECC-SF3, ECC-SF4, ECC-SF5, ECC-SF6, ECC-SF7 po 28 dniach twardnienia wynoszą odpowiednio: 23,36 GPa, 24,1 GPa, 24,6 GPa, 24,98 GPa, 25,69 GPa, 25,12 GPa, 24,69 GPa i 23,8 GPa. Analizę regresji wytrzymałości na ściskanie w funkcji modułu sprężystości przedstawiono na rys. 9. Z wyników badań wynika, że moduł sprężystości mieszanki ECC-SF4 jest największy spośród badanych kompozytów.

the mixes is decreasing when the addition of silica fume is exceeding 40%.

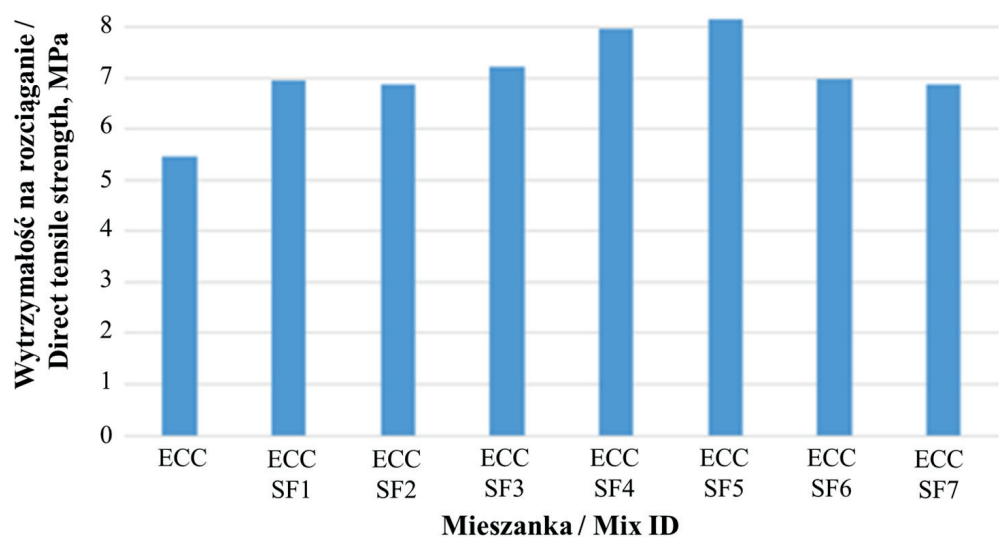
4.2. Direct tensile strength

For the direct tensile strength of ECC specimens measurement the UTM machine was used. The direct tensile strength results for all specimens are shown in Fig. 5. According to Victor Guidelines a mix is said to be ECC, if it should attain the ultimate tensile strength between 4 to 12 MPa, after 28 days of curing. In this study, ECC mixes: ECC, ECC-SF, ECC-SF2, ECC-SF3, ECC-SF4, ECC-SF5, ECC-SF6, ECC-SF7 exhibits ultimate tensile strength of 5.46 MPa, 6.95 MPa, 6.86 MPa, 7.21MPa, 7.96MPa, 8.15MPa, 6.98MP and 6.86MPa respectively. The failure pattern of the specimen is shown in Fig. 6. The regression analysis of compressive strength vs direct tensile strength is shown in Fig. 7. From the test results,

it is found that the strength of ECC-SF5 mix has higher strength than the all other mixes. It is found that ECC-SF5 mix strength is 39.5% higher than the conventional ECC mix. The strength of the mix decreases, when the silica fume addition exceeds 50%.

4.3. Modulus of elasticity

The determined modulus of elasticity of mixes ECC, ECC-SF1, ECC-SF2, ECC-SF3, ECC-SF4, ECC-SF5, ECC-SF6, ECC-SF7 is shown in Fig. 8. The modulus values for ECC mixes ECC, ECC-SF1, ECC-SF2, ECC-SF3, ECC-SF4, ECC-SF5, ECC-SF6, ECC-SF7 after 28 days of curing are: 23.36 GPa, 24.1 GPa, 24.6 GPa, 24.98 GPa, 25.69 GPa, 25.12 GPa, 24.69 GPa and 23.8 GPa respectively. The regression analysis of compressive strength vs modulus of elasticity is shown in Fig. 9. From the test results, it is found that the modulus of ECC-SF4 mix is higher than



Rys. 5. Wytrzymałość na rozciąganie próbek IKC

Fig. 5. Direct tensile strength results of ECC specimens



Rys. 6. Typowy obraz zniszczenia próbki w kształcie „psiej kości”

Fig. 6. Typical failure crack in Dog Bone specimen

Moduł sprężystości kompozytu ECC-SF4 jest o 9,5% większy niż wzorcowego kompozytu ECC. Moduł sprężystości kompozytów spada, gdy dodatek pyłu krzemionkowego jest większy niż 40%.

4.4. Wytrzymałość na zginanie

Wyniki badań wytrzymałości na zginanie wszystkich próbek przedstawiono na Rys. 10. W tym badaniu wytrzymałość kompozytów: ECC, ECC-SF1, ECC-SF2, ECC-SF3, ECC-SF4, ECC-SF5, ECC-SF6, ECC-SF7 wyniosła odpowiednio 21,95 MPa, 22,23 MPa, 22,56 MPa, 22,28 MPa, 24,69 MPa, 25,12 MPa, 24,9 MPa

modulus of all other mixes. It is found that the modulus of ECC-SF4 mix is 9.5% higher than for the reference ECC mix. The modulus of elasticity of the mixes is decreasing when the silica fume addition is higher than 40%.

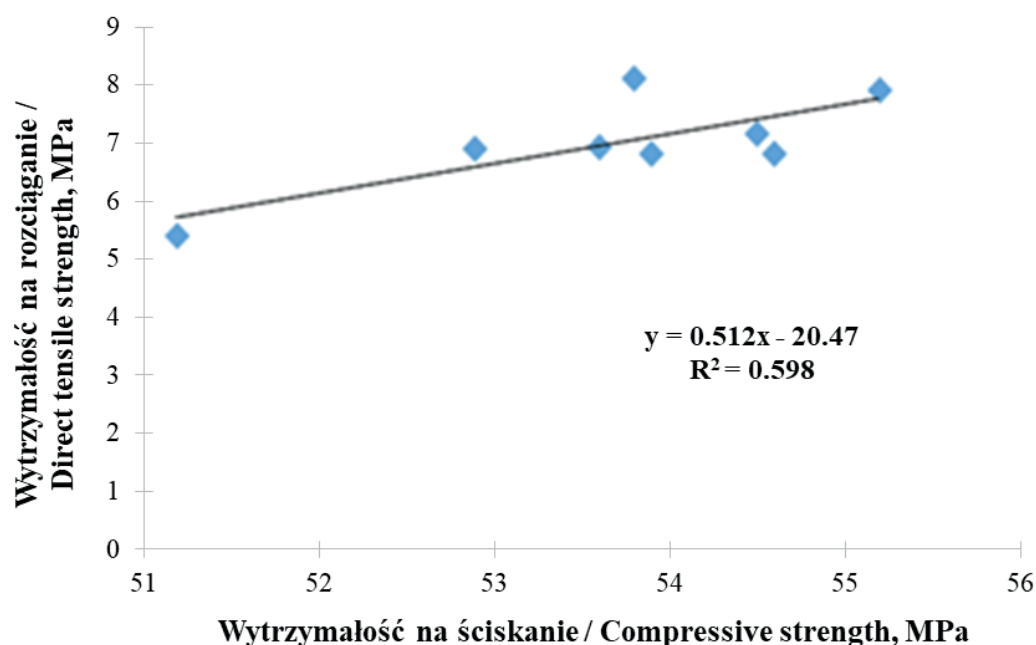
4.4. Flexural strength tests

The flexural strength results of all specimens are shown in Fig. 10. In this study, ECC mixes ECC, ECC-SF1, ECC-SF2, ECC-SF3, ECC-SF4, ECC-SF5, ECC-SF6, ECC-SF7 exhibits ultimate flexural strength of 21.95 MPa, 22.23 MPa, 22.56 MPa, 22.28 MPa, 24.69MPa, 25.12MPa, 24.9MPa and 24.6MPa respectively. The regression analysis of compressive strength vs flexural strength is shown in Fig. 11. As it is evident from this Fig. there is no correlation between compression strength and tensile strength. This lack of correlation is caused by the fiber reinforcement of specimens. From the test results, it was found that ECC-SF4 mix has a higher strength than all other mixes. The ECC-SF4 mix has 13.5% higher strength than the conventional ECC mix. The strength of the mixes is decreasing when silica fume addition is higher than 50%.

5. Conclusion

Based on the results of experiments, the following conclusions can be drawn:

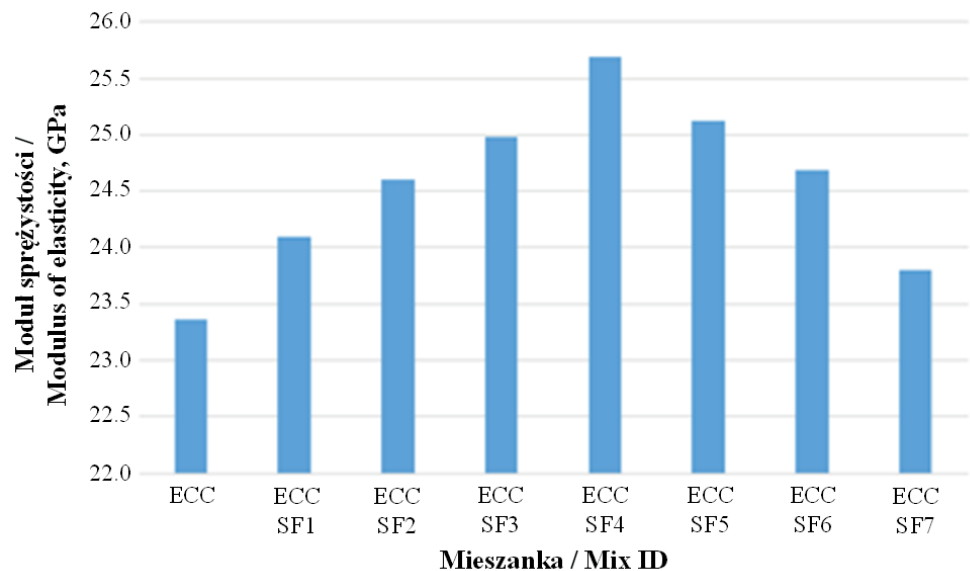
- Generally, Engineered Cementitious Composites have good strength compared to normal concrete. The addition of silica fume to the ECC mix gives the notable increase of mechanical properties. All the mechanical properties of mix ECC-SF4 containing 40% of silica fume shows better performance than other mixes. However, the mechanical properties of all ECC mixes are decreasing, if the addition of silica fume is higher than 40%.
- The ECC mix shows notable increase in tensile strength



Rys. 7. Analiza regresji związku wytrzymałości na ściskanie z wytrzymałością na rozciąganie

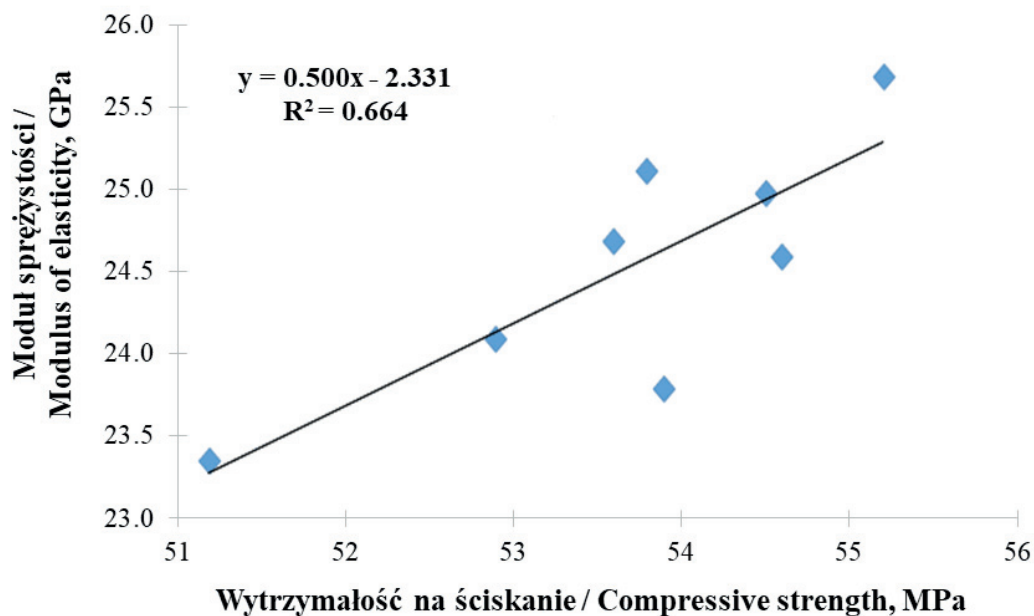
Fig. 7. Regression analysis of compressive strength vs direct tensile strength

i 24,6 MPa. Analiza regresji wytrzymałości na ściskanie względem wytrzymałości na rozciąganie przedstawiono na rys. 11. Jak widać na tym rysunku, nie ma korelacji między wytrzymałością na ściskanie a wytrzymałością na rozciąganie. Ten brak korelacji jest spowodowany obecnością zbrojenia w postaci włókien PVA. Na podstawie wyników badań stwierdzono, że mieszanka ECC-SF4 ma największą wytrzymałość spośród wszystkich badanych kompozytów. Kompozyt ECC-SF4 ma o 13,5% większą wytrzymałość na zginanie niż materiał wzorcowy ECC. Wytrzymałość mieszanek spada, gdy dodatek pyłu krzemionkowego jest większy niż 50%.



Rys. 8. Moduł elastyczności próbek IKC

Fig. 8. Modulus of elasticity of ECC specimens



Rys. 9. Analiza regresji związku pomiędzy wytrzymałością na ściskanie i modułem sztywności

Fig. 9. Regression analysis of compressive strength vs modulus of elasticity

5. Wnioski

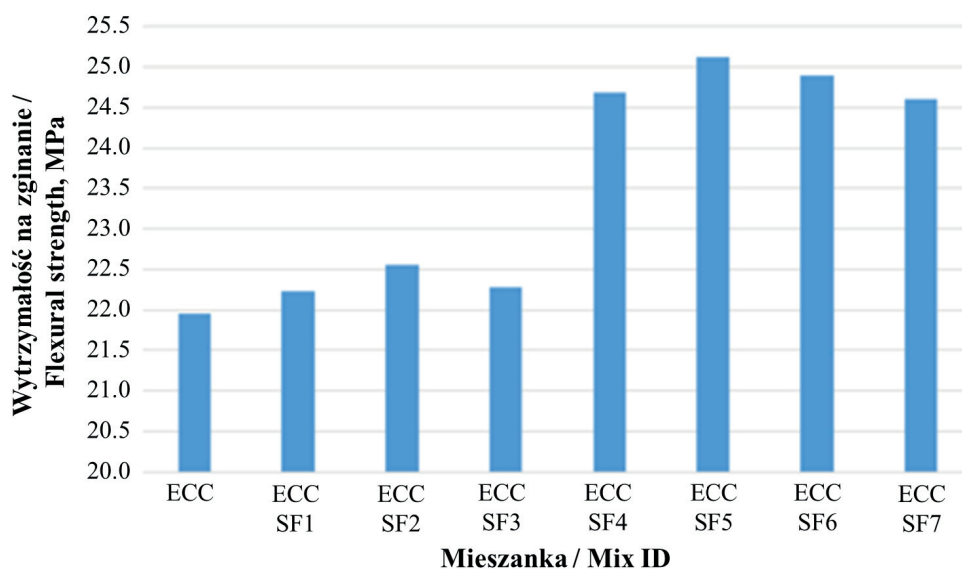
Na podstawie uzyskanych wyników badań można wyciągnąć następujące wnioski:

- Generalnie, inżynierskie kompozyty cementowe [IKC] mają lepszą wytrzymałość w porównaniu do betonu zwykłego. Dodatek pyłu krzemionkowego do mieszanki IKC powoduje znaczną poprawę właściwości mechanicznych. Kompozyt ECC-SF4 zawierający 40% pyłu krzemionkowego wykazuje najlepsze właściwości spośród badanych w pracy IKC. Zwiększenie

comparing with all conventional concrete due to the fiber bridging the cracks, within the mix. This notable increase in tensile strength is due to the presence of PVA fiber in the ECC mix.

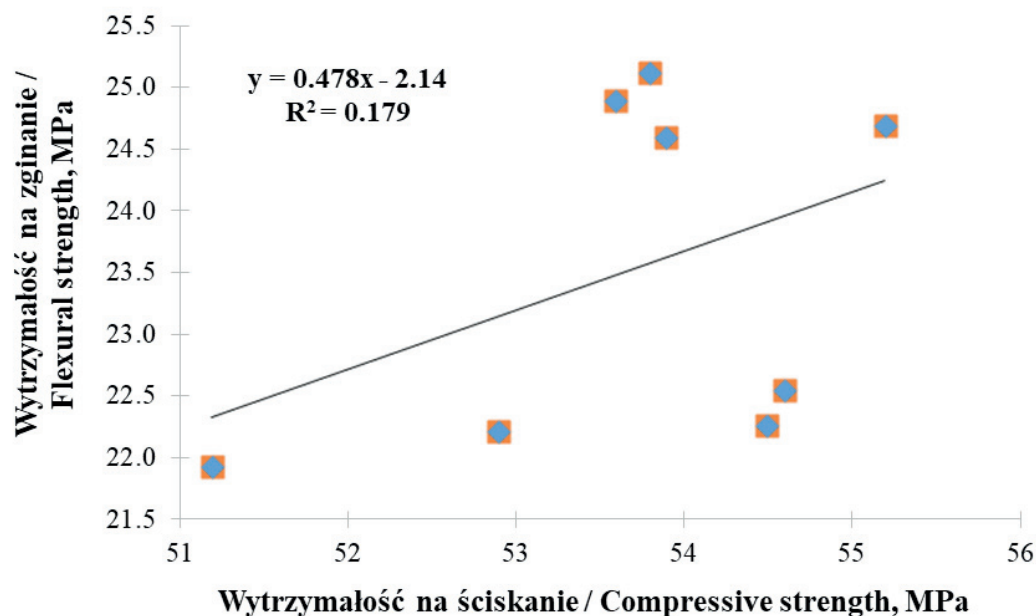
dotadku pyłu krzemionkowego powyżej 40% powoduje pogorszenia właściwości mechanicznych IKC.

- Kompozyty IKC posiadają znacznie większą wytrzymałość na rozciąganie w porównaniu z tradycyjnym betonem, ze względu na mostkowanie pęknięć matrycy przez włókna. Ten znaczny wzrost wytrzymałości na rozciąganie kompozytów badanych w niniejszej pracy wynika z zastosowania włókien PVA.



Rys. 10. Wytrzymałość na zginanie próbek IKC

Fig. 10. Flexural strength results of ECC specimens



Rys. 11. Analiza regresji związku wytrzymałości na ściskanie z wytrzymałością na zginanie

Fig. 11. Regression analysis of compressive strength vs flexural strength

Literatura / References

1. M. Kotsovos, Concrete. A brittle fracturing material. *Matériaux et Constructions* **17**(2), 107-115 (1984).
2. V.C. Li, On Engineered Cementitious Composites (ECC) A Review of the Material and Its Applications. *J. Adv. Concr. Techn.* **3**, 215-230 (2003).
3. V.C. Li, Advances in ECC research, *ACI Spec. Public.* **206**, 373-400 (2002).
4. A. Krishnaraja, S. Kandasamy, Flexural performance of engineered cementitious composite layered reinforced concrete beams. *Arch. Civ. Eng.* **63**(4), 173-189 (2017).

5. A.R. Krishnaraja, S. Kandasamy, Mechanical Properties of Engineered Cementitious Composites. *Int. J. Chem. Tech. Res.* **10** (8), 341-347 (2017).
6. E.O. Garcez, *Investigação do comportamento de Engineered Cementitious Composites reforçados com fibras de polipropileno como material para recapeamento de pavimentos*, PhD thesis, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (2009).
7. J.K. Kim, Tensile and fiber dispersion performance of ECC (engineered cementitious composites) produced with ground granulated blast furnace slag. *Cem. Concr. Res.* **37**(7), 1096-1105 (2007).
8. A.S. Krishnaraja, S. Anandakumar, M. Jegan, Mechanical performance of hybrid engineered cementitious composites, *Cement Wapno Beton*, **23**(6), 479-486 (2018).
9. S.F.U. Ahmeda, M. Maalej, Tensile strain hardening behaviour of hybrid steel-polyethylene fibre reinforced cementitious composites. *Constr. Build. Mater.* **23**(1), 96-106 (2009).
10. Y.Y. Kim, H.-J. Kong, V.C. Li, Design of engineered cementitious composite suitable for wet-mixture shotcreting. *Mater. J.* **100**(6), 511-518 (2003).
11. V.C. Li, Engineered cementitious composites (ECC) material, structural, and durability performance. in E.G. Nawy (ed.) *Concrete Construction Engineering Handbook*, CRC Press, 2008.
12. 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. Mater.* **40**, 473-480 (2013).
13. A.R. Krishnaraja, S. Kandasamy, Flexural Performance of Hybrid Engineered Cementitious Composite Layered Reinforced Concrete Beams. *Period. Polytech. Civ. Eng.* **62**(4), 921-929 (2018).
14. E.H. Yang, Y. Yang, V.C. Li, Use of high volumes of fly ash to improve ECC mechanical properties and material greenness. *ACI Mater. J.* **104**(6), 620-628 (2007).
15. O. Kayali, Effect of high volume fly ash on mechanical properties of fiber reinforced concrete. *Mater. Struct.* **37**(5), 318-327 (2004).
16. Z. Chen, Y. Yang, Y. Yao, Impact properties of engineered cementitious composites with high volume fly ash using SHPB test. *J. Wuhan Univ. Techn. Mat. Sci. Ed.* **27**(3), ,pp. 590-596 (2012).
17. A.S. Krishnaraja, S. Kandasamy, M. Kowsalya, Influence of polymeric and non-polymeric fibers in hybrid engineered cementitious composites. *Rev. Romana Mater.* **48**(4), 507 (2018).
18. L. Krishnaraj, P. T. Ravichandran, Characterisation of ultra-fine fly ash as sustainable cementitious material for masonry construction, *Ain Shams Eng. J.*, Article In Press (2020). doi: 10.1016/j.asej.2020.07.008.