

Ekonomiczny kompozyt cementowy EKC przygotowany z drobnego piasku kwarcowego i nominalnej ilości włókien PVA

An Economical Engineered Cementitious Composite (ECC) prepared with fine quarry sand and a nominal amount of PVA fibers

Fasih Ahmed Khan*, Sajjad Wali Khan, Imad Said, Shabir Hussain

Department of Civil Engineering, University of Engineering & Technology, Peshawar, Pakistan

*Corresponding author: Fasih Ahmed Khan, e-mail: fasihahmad@uetpeshawar.edu.pk

Streszczenie

Do produkcji konwencjonalnych kompozytów cementowych [KKC] zużywa się niewielką ilość drogiego, najdrobniejszego piasku kwarcowego [BDPK] o maksymalnej wielkości 250 μm , co negatywnie wpływa na skurcz przy wysychaniu, koszt i praktyczne zastosowanie KKC. W niniejszej pracy opracowano ekonomiczny kompozyt EKC. Wykorzystano zwykły piasek z piaskowni [PP], o niższym wskaźniku mialkości – WM = 2,2 i maksymalnej wielkości ziarna 2350 μm . Wielkość ziaren piasku z piaskowni była dziesięciokrotnie większa, a cena 30.-krotnie niższa niż BDPK. Doświadczalnie wykazano, że EKC, otrzymany z PP wykazuje zjawisko umocnienia odkształceniowego, z wieloma pęknięciami przed zniszczeniem. Sprawdzono również zachowanie się PP w różnych warunkach temperaturowych i stwierdzono niewielki spadek gęstości i wytrzymałości na ściskanie, do temperatury 200°C. Po przekroczeniu temperatury 200°C stwierdzono znaczny spadek wytrzymałości na ściskanie, spowodowany topnieniem włókien poliwinylowych PVA.

Słowa kluczowe: kompozyty cementowe, beton, narażenie na działanie ognia, naprężenie-odkształcenie, kompozyt, beton plastyczny

Summary

The production of conventional engineered cementitious composites - ECC consumes low-volume and expensive ultrafine silica sand [UFSS] – maximum size 250 μm , which negatively affecting dry shrinkage, cost and practical application of ECC. This study develops an economical ECC featuring ordinary quarry sand [QS] with a lower fineness modulus - FM = 2.2 and a maximum particle size of 2350 μm . The quarry sand particle size was ten times greater, and the price was 30 times lower than UFSS. The experimental finding was shown that ECC prepared with QS exhibited the strain hardening phenomenon, with multiple cracks produced, before failure. The performance of QS was also checked under different temperature regimes, and a minor decrease in the mass density and compressive strength was observed, up to 200°C. After 200°C, a significant decrease in compressive strength was found, due to the melting of the PVA fibers.

Keywords: engineered cementitious composites, concrete, fire exposure, stress-strain, composite, ductile concrete

1. Wprowadzenie

Wraz z pojawieniem się technologii stosowania włókien, badania nad poprawą kruchości betonu konwencjonalnego nabrały w ostatnich latach ogromnego znaczenia. Niekorzystne efekty związane z właściwościami konwencjonalnych betonów mogą być zmniejszone/wyeliminowane za pomocą bardzo plastycznych kompozytów cementowych [EKC], które stają się nowym zagadnieniem badawczym, w inżynierii materiałowej i lądowej (5).

1. Introduction

With the emergence of fiber technology, research on improving the brittleness of conventional concrete has gained immense importance, in the past few years (1–4). The adverse effect associated with the performance of conventional concretes can be reduced/eliminated with the help of highly ductile engineered cementitious composite material [ECC], an emerging research topic in the new era of material and civil engineering (5).

W ciągu ostatnich kilkudziesięciu lat opracowano zupełnie nową kategorię kompozytów cementowych wzmocnianych krótkimi włóknami, znanych jako EKC (6). EKC to wysokoplastyczny materiał kompozytowy wzmocniony włóknami, wprowadzony w latach 90. przez Li (7). Kompozyty EKC wykazują właściwości naprężająco-zmiękczone przy wydłużeniu względnym po inicjacji pęknięć, które poszerzają się wraz ze spadkiem nośności (2,8,9). Odształcenie przy rozciąganiu EKC może osiągnąć 3%–5%, trzy lub pięćset razy więcej w porównaniu z betonem konwencjonalnym (10,11). Dużą ciągliwość można uzyskać przez optymalizację parametrów mikrostrukturalnych matrycy EKC oraz zawartości włókien (12,13). W szczególności, kruszywa odgrywają kluczową rolę w matrycy, a tym samym mają znaczny wpływ na właściwości EKC. Mikromechaniczna filozofia projektowania EKC zakłada, że znaczna zawartość i większy rozmiar drobnego kruszywa, zwiększa odporność matrycy na pękanie, a tym samym zmniejsza tarcie międzyfazowe. Parametry te są korzystne w kontekście umocnienia przeciw odształceniom i stabilnego zachowania się pęknięć (14,15). W związku z tym przy wytwarzaniu standardowego EKC stosuje się najdrobniejszy piasek kwarcowy [BDPK], o maksymalnej wielkości ziarna 250 μm i stosunku kruszywa drobnego do spoiwa [kd/s], wynoszącym 0,36 (16,17).

Zastosowanie wypełniaczy w innych kompozytach z cementu prowadzi do oszczędności i znacznie wpływa na skurcz przy wysychaniu oraz na wytrzymałość. Jednak zastosowanie drogiego, drobnego piasku kwarcowego BDPK w tradycyjnym EKC, wywiera negatywny wpływ na skurcz, co ogranicza szerokie zastosowanie EKC (14). Kilku badaczy rozpoczęło zastępowanie BDPK grubszym kruszywem drobnociastym lub zwiększaniem jego zawartości. Sahmaran et al. (17) zaproponowali zastąpienie BDPK kruszonym piaskiem i żwirem, o maksymalnej wielkości 2380 μm i współczynnika kruszywo drobne do spoiwa [fa/b] równym 0,36. Ta wymiana w EKC nastąpiła bez zauważalnego zmniejszenia wytrzymałości na rozciąganie, natomiast wytrzymałość na ściskanie uległa zmniejszeniu (14). Badania przeprowadzone przez Sahmaran i Li (17, 18) opisały zastąpienie BDPK piaskiem o maksymalnej wielkości 1000 μm , przy współczynniku kd/s wynoszącym 0,55. Zastąpienie to nie zmniejsza wytrzymałości na ściskanie, ale pogarsza plastyczność EKC. (17,18). Badania przeprowadzone przez Li i Yang (19) na drobnych frakcjach betonu z recyklingu, o maksymalnym rozmiarze 2650 μm i fa/b = 0,22, jako substytutu BDPK wykazały, że zdolność do odształceń tego KKC wynosiła ponad 0,8%. Zhang i in. (20) opisali zastosowanie rozdrobnionej gumy jako zamiennika BDPK. Pomogło to zwiększyć plastyczność EKC przy zginaniu, ale negatywnie wpłynęło na jego właściwości mechaniczne, powodując spadek wytrzymałości na ściskanie o około 35%. Yu i in. (21) opisali wzrost współczynnika fa/b do 0,54 i przy takim stosunku uzyskano ogromne odształcenie – większe niż 8%, za pomocą włókien polietylenowych [PE]. Natomiast, w obecnych badaniach zastosowano BDPK, o maksymalnym rozmiarze 181 μm .

Poza włóknami polietylenowymi [PE], włókna z alkoholu poliwinylowego [PVA] w matrycy EKC, zaliczane są do włókien strukturalnych, odpowiedzialnych przede wszystkim za poprawę

In recent decades a brand new category of short fiber reinforced cementitious composites, known as ECC, has been developed (6). ECC is a fiber-reinforced-based high ductile composite material, introduced in the 1990s by V.C. Li (7). The ECC exhibits a tension softening behaviour upon tensile straining after the initiation of cracks that widened further with the decrease in the load capacity (2,8,9). ECC tensile strain can reach 3%–5%, three or five hundred times larger, compared to conventional concrete (10,11). High ductility can be achieved by optimizing the ECC matrix microstructural parameters and fiber content (12,13). Particularly, aggregates play a crucial role in the matrix and thus have a significant impact on ECC properties. The micromechanical design philosophy of ECC is supposing that the significant content and greater size of fine aggregate tends to increase the matrix fracture toughness and hence decrease the interfacial friction. These parameters are advantageous for strain hardening and steady crack behavior (14,15). Therefore, the batching of standard ECC utilizes ultrafine silica sand [UFSS] with a 250 μm maximum particle size and having a ratio of 0.36 for the fine aggregate/binder [fa/b] (16,17).

The use of fillers in other cement-based composites leads to cost savings and significantly impacts dry shrinkage and strength. However, the use of expensive and low-volume UFSS in traditional ECC stimulates a negative effect on shrinkage and therefore limits the widespread application of ECC (14). Several researchers have started to replace UFSS with coarser fine aggregate or increase its content. Sahmaran et al. stated a replacement of UFSS with crushed sand and gravel having a maximum size of 2380 μm and fa/b ratio of 0.36. This replacement in ECC occurred without any noticeable reduction in tensile strength, while compressive strength decreased (14). A study by Sahmaran and Li reported a replacement of UFSS with sand having a maximum size of 1000 μm , and the fa/b ratio was 0.55. This replacement does not weaken the compressive strength, but the ductility of ECC was compromised (17,18). The study on recycled concrete fines with a maximum size of 2650 μm and fa/b = 0.22, as a substitute for UFSS by Li and Yang indicated that the strain capacity of that ECC was greater than 0.8% (19). Zhang et al. reported using crumb rubber as the replacement for UFSS; this helped ECC increase flexural ductility, but negatively affected ECC's mechanical properties with approximately the 35% decrease in compressive strength (20). Yu et al. reported an increase in the fa/b ratio to 0.54, and with such a ratio, an enormous strain, greater than 8% was achieved with the help of polyethylene [PE] fibers. Still, UFSS was used in the current research with a max size of 181 μm (21).

Apart from polyethylene [PE] fibers, Poly Vinyl Alcohol [PVA] fibers in the ECC matrix are considered structural fibers, responsible primarily for improving tensile characteristics of the composite. The high tensile characteristics are due to the interaction of the PVA fibers and the ECC matrix developed at the interface (22). The ECC behaves distinctly; after first crack formation, the ECC exhibit strain hardening, unlike the FRC tension softening. This is due to the development of dense microcracks with crack width less than 100 microns, which improves the tensile strain of the ECC (23). A wide range of structural properties can be achieved by tailoring

wytrzymałości kompozytu. Duża wytrzymałość na rozciąganie wynika z interakcji włókien PVA i matrycy EKC, powstałej na styku (22). EKC zachowuje się inaczej; po pierwszym pęknięciu, EKC wykazuje wzmocnienie odkształceniowe, w przeciwieństwie do osłabienia przy rozciąganiu [OR]. Wynika to z propagacji gęstych mikropęknięć, o szerokości mniejszej niż 100 mikronów, co zwiększa odkształcenie EKC przy rozciąganiu (23). Szeroki zakres właściwości strukturalnych może być osiągnięty przez dostosowanie mieszanych składników (23). Ocena właściwości mechanicznych jest najbardziej pożądana w zastosowaniach konstrukcyjnych i projektowaniu kompozytów EKC. Korzystna ocena właściwości mechanicznych EKC jest uważana za konieczną, w przypadku gdy przyczyną zniszczenia jest kruchość zastosowanego materiału (23).

W celu efektywnego wykorzystania EKC jako materiału konstrukcyjnego, ciągliwość EKC musi zostać potwierdzona doświadczalnie, przez zastosowanie kilku dostępnych badań mechanicznych. Elastyczność materiału może być potwierdzona w obciążeniach ścinających, rozciągających, zginających i zmęczeniowych (8,24–27). Wpływ stosunku objętościowego włókien PVA na właściwości matrycy EKC, był badany przez wielu naukowców. Bhaumik Merchant & Ajay Gelot (28) stwierdzili 27% wzrost wytrzymałości na ściskanie betonu, dzięki zastosowaniu 1% włókien PVA. Wytrzymałość na ściskanie jest wprost proporcjonalna do objętości PVA w matrycy (29). Inne badania wykazały, że wzrost zawartości PVA powoduje stopniowy spadek wytrzymałości na ściskanie matrycy. Włączenie włókien PVA o frakcji objętościowej wynoszącej 1,2%, 1,3% i 1,4% spowodowało zmniejszenie wytrzymałości na ściskanie o 9,6%, 23,5% i 32,5%, w porównaniu z próbką kontrolną (9).

Inne badania wykazały, że kompozyt cementowy zawierający włókna PVA, miał korzystny wpływ na wytrzymałość na ściskanie, gdy zawartość włókien była zwiększona, pod warunkiem, że włókna były równomiernie rozmieszczone i odpowiednio zagęszczone. Stwierdzili oni, że stosunek wody do cementu w/c wynoszący 0,35 wpływa pozytywnie na wytrzymałość na ściskanie kompozytu wraz ze wzrostem zawartości włókien, w porównaniu z niskim stosunkiem w/c, wynoszącym 0,25 (30). Badania wykazały, że włączenie włókien PVA [lf pomiędzy 6-12 mm i $df=14\mu m$] o frakcji objętościowej 0,25%, wykazało wzrost wytrzymałości betonu na rozciąganie przy rozłupywaniu o 23% - dla $lf=6mm$ i 27%, dla $lf=12mm$. Wzmocnienie to malało jednak wraz ze wzrostem długości włókien [lf] i ich zawartości (31). W miejsce zwykłego cementu portlandzkiego zastosowano nowy kompozyt EKC, ze spoiwem cementowym o małym skurczu. Kompozyt o zawartości 1,7% PVA objętościowo, wykazywał lepszą odporność na odkształcenia niż kompozyt konwencjonalny (6). Odporność mieszanki EKC na odkształcenia przy rozciąganiu była siedmiokrotnie większa niż mieszanki tradycyjnej. Kim i in. (25), którzy badali właściwości na rozciąganie i rozproszenie włókien PVA w kompozytach EKC, uzyskanych przy zastosowaniu mielonego, granulowanego żużla wielkopieczowego wykazali, że ziarna żużla zapewniają lepsze warunki do dużego rozproszenia włókien i w konsekwencji zwiększają zdolność do rozciągania betonu. Z dotychczasowych badań wyni-

the mixed ingredients (23). Evaluation of mechanical properties is the most desirable in the structural applications and composite design of ECC. The favorable assessment of ECC mechanical properties is deemed necessary where the associated cause of failure is the brittle material used (23).

For efficient use of ECC as a structural material, the ductile nature of ECC must be formulated experimentally through several available mechanical testing procedures. The flexibility of material can be reflected in shear, tensile, flexure, and fatigue loading (8,24–27). The effect of the PVA fiber volume ratio on the properties of the ECC matrix has been studied by several researchers. Bhaumik Merchant & Ajay Gelot (28) reported a 27% increase in the compressive strength of concrete by incorporating 1% PVA fibers. The compressive strength is directly proportional to the volume of PVA in the matrix (29). Another study revealed that the increase in the PVA content causes a gradual decrease in the compressive strength of the matrix. The incorporation of the PVA fibers volume fraction equal to 1.2%, 1.3 %, and 1.4% showed a reduction in compressive strength by 9.6%, 23.5%, and 32.5% compared with the control sample(9). Another study reported that cementitious composite containing PVA fibers had a positive effect on the compressive strength when the content of fibers was increased, provided when the fibers were evenly dispersed and adequately compacted. They found that a composite with a water to cement [w/c] ratio of 0.35 positively affected the compressive strength with fiber content increased compared to a low w/c ratio of 0.25 (30). A study shows that the incorporation of PVA fiber [lf between 6-12 mm and $df=14\mu m$] having a volume fraction of 0.25 % showed an enhancement in the split tensile strength of the concrete by 23 % for $lf=6mm$ and 27% for $lf=12mm$. However, this enhancement decreased with the increase in fiber length [lf] and fiber content (31). A new composite of ECC with low shrinkage cement binder was used to replace ordinary Portland cement. The composite had 1.7 percent PVA by volume showed better strain capacity than the conventional composite (6). The ECC mix tensile strain capacity was seven times greater than the traditional mix. Kim et al. (25) the tensile and dispersion properties of PVA fibers of ECC produced with ground granulated furnace slag showed that the slag particles provide a higher driving force for high fibers dispersion and consequently increase the tensile straining capacity. The previous research shows that the properties of the ECC can be improved by playing with the size of the fine aggregate and the fibers content.

The objective of the present study is to validate the use of fine quarry sand [QS] with a nominal amount of PVA fibers to prepare an economical EEC while maintaining good mechanical properties, under different conditions. The present study introduces the preparation of this composite and a series of experiments characterizing its micromechanical properties, including tensile and compressive behavior, crack patterns, and material exposure to different temperature regimes.

ka, że właściwości EKC można poprawić przez zmianę wielkości kruszywa drobnego i zawartości włókien.

Celem niniejszej pracy jest walidacja zastosowania drobnziarnistego piasku z piaskowni [PP] z nominalną ilością włókien PVA do przygotowania ekonomicznego EKC, przy zachowaniu dobrych właściwości mechanicznych, w różnych warunkach. W niniejszej pracy przedstawiono metodę przygotowania tego kompozytu oraz przeprowadzono serię doświadczeń określających jego właściwości mikromechaniczne, w tym właściwości przy rozciąganiu, ścisaniu, właściwości pęknięć oraz ekspozycję materiału w różnych temperaturach.

Tablica 1 / Table 1

WŁAŚCIWOŚCI PRZEMYSŁOWEGO CEMENTU PORTLANDZKIEGO, STOSOWANEGO DO WYTWARZANIA BETONÓW ZWYKŁYCH/EKC

PROPERTIES OF ORDINARY PORTLAND CEMENT USED IN THE PRODUCTION OF CONCRETE/ECC

Property / Właściwość	ASTM C150 Ranges (36) Wymagania ASTM C150 (36)	Manufacturer / Producent Cherat Cement
Soundness Stalność objętości, mm	<10	2
Insoluble Residue Pozostałość nierozpuszczalna, %	0.75 [Max]	0
Loss on Ignition Straty prażenia, %	3 [Max]	2
MgO, %	6 [Max]	1
SO ₃ , %	3.5 [Max]	2

2. Program doświadczalny

2.1. Materiały i składy mieszanek

Zastosowano cement portlandzki jako materiał wiążący przy wytwarzaniu EKC. Właściwości materiału wiążącego podano w tablicy 1. Popiół lotny [FA] klasy F, zastosowano w celu poprawy wytrzymałości i urabialności mieszanek, a jego skład chemiczny podano w tablicy 2. W skład EKC wchodziła również woda pitna oraz domieszka redukująca zawartość wody [DRZW]. Zastosowano lokalnie dostępny PP, o maksymalnym rozmiarze ziaren 2360 µm. Ten maksymalny rozmiar oceniono za pomocą wielkości otworów sita, na którym zatrzymano 1% materiału. Wskaźnik młakości dla PP wynosił 2,2 i został określony jako piasek drobnziarnisty, wg normy ASTM. Krzywą gradacji i właściwości PP przedstawiono na rysunku 1 i w tablicy 3. Analizując właściwości różnych rodzajów włókien [tablica 4], do mieszanki EKC wybrano włókna PVA. Włókna PVA działają lepiej przy dłuższej propagacji

Tablica 3 / Table 3

WŁAŚCIWOŚCI PIASKU Z PIASKOWNI

QUARRY SAND PROPERTIES

Fineness Modulus / Wskaźnik młakości (32), -	2.2
Water Absorption / Absorpcja wody (38), %	1.7
Available Moisture / Dostępna wilgoć (38), %	1.1

2. Experimental program

2.1. Materials and mix proportions

The ordinary Portland cement [OPC] was used as a binding material for the preparation of the ECC. The properties of the binding material are listed in Table 1. Class F type fly ash [FA] was employed to improve the strength and workability of the mixture. The chemical properties are reported in Table 2. Portable clean water and high volume water reducer [HVWR] were also used in the ECC formation. The locally available QS was used with a maximum particle size of 2360 µm. This maximum size was evaluated

with the help of the hole size of the sieve, where 1% of the material was retained.

The fineness modulus of QS was equal to 2.2, characterized as fine sand based on ASTM standard (32). The gradation curve and material properties of QS are shown in Fig. 1 and Table 3. By analyzing different fibers properties [Table 4], PVA fibers were selected for mix proportion of ECC. The PVA fibers perform better when longer crack propagation, leading to high tensile straining concrete production (33). The PVA fibers are further classified into different categories. The classification of the PVA fibers, their properties, and their applications are illustrated in Table 5. The high ductile series of PVA fibers are part of

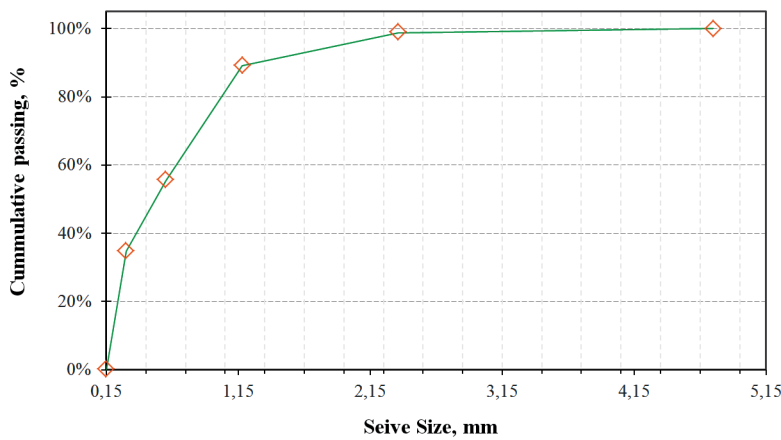
the REC type, the recently introduced fibers produced based on the micromechanics theory (26,33–35). In the current study, Kurarey Kuralon Fibers RECS 15 (Table 6) fibers were used.

Tablica 2 / Table 2

SKŁAD CHEMICZNY POPIOŁU LOTNEGO – KLASY F, STOSOWANEGO W PROCESIE WYTWARZANIA EKC

CHEMICAL COMPOSITION OF FLY ASH - CLASS F USED IN THE BATCHING OF ECC

Parameters Skład chemiczny	Content Zawartość, %	ASTM C618 Class F Fly Ash (37) Popiół lotny klasy F wg ASTM C618 (37)
CaO	9.6	-
SiO ₂	47.76	SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +FeO ₃ ≥ 70%
Al ₂ O ₃	28.88	
Fe ₂ O ₃	5.76	
MgO	2.44	-
SO ₃	1.84	5%
Na ₂ O _{eq}	0.16	-
Loss on ignition Straty prażenia	3.25	6%
Na ₂ O	0.08	-
K ₂ O	0.12	-
Moisture / Wilgoć	0.064	3%



Rys. 1. Krzywa uziarnienia piasku z piaskowni [PP]

Fig. 1. Gradation curve of quarry sand [QS]

Tablica 4 / Table 4

RÓŻNE WŁÓKNA KONSTRUKCYJNE DO PRODUKCJI KOMPOZYTÓW CEMENTOWYCH, O WYSOKIEJ WYTRZYMAŁOŚCI NA ROZCIĄGANIE (33)

DIFFERENT STRUCTURAL FIBERS ARE USED FOR THE PRODUCTION OF HIGH TENSILE CEMENTITIOUS COMPOSITES(33)

Fibre's type / Rodzaj włókna	Tensile strength Wytrzymałość na rozciąganie, MPa	Young's modulus Moduł Younga, GPa	Fiber elongation Wydłużenie włókna, %	Density Gęstość, g/cm³	Remarks / Uwagi
PVA	880-1600	25-40	6-10	1.30	-
PP	600	5	25	0.91	Floats in water / Unosi się na wodzie
Nylon Fiber / Włókno nylonowe	750-900	3.4-4.9	13-25	1.10	-
PE	250-700	1.4-2.2	10-15	0.95	-
High performance polyethylene fibers Włókna polietylenowe o dużej wydajności	2700	120	5	0.97	Expensive / Drogie
Steel fibers / Włókna stalowe	1200	200	3-4	7.85	Heavy, rust / Ciężkie, rdza
A.R. glass fibre / Włókna szklane typu AR	2200	80	0-4	2.78	Weak in alkali / Słabe w środowisku zasadowym
Asbestos / Azbest	620	160	-	2.55	Health Risky / Zagrożenie dla zdrowia

Tablica 5 / Table 5

KLASYFIKACJA I WŁAŚCIWOŚCI WŁÓKIEN PVA (33)

CLASSIFICATION AND PROPERTIES OF PVA FIBERS (33)

	Designation Oznaczenie	Diameter Średnica, mm	Tensile strength Wytrzymałość na rozciąganie, MPa	Young's modulus Moduł Younga, GPa	Fiber elongation Wydłużenie włókna, %	Application Zastosowanie
Standard Typowe	RM182	0.014	1600	37	7	Fiber Cement, Mortar Włókno, cement, zaprawa
	RF400	0.20	1000	30	7	Mortar, Concrete / Zaprawa, beton
	RF1000	0.31	1000	29	7	Mortar, Concrete / Zaprawa, beton
	RF4000	0.67	900	30	7	Concrete / Beton
Ductile Ciągliwe	REC7	0.026	1600	37	6	Fiber Cement, Mortar Włókno, cement, zaprawa
	REC15	0.040	1600	37	6	Mortar / Zaprawa
	REC100	0.10	1100	30	10	Mortar, Concrete / Zaprawa, beton

The ECC mix design was finalized with the help of different mix designs from the previous studies, as reported in Table 7. The trial was carried out for each mix, and amendments were carried out. The final mix design selected for the test is reported in Table 8.

2.2. Specimen Preparation

The preparation of the ECC specimens was carried out in a medium-size container with the help of a paddle mixer. All the ingredients of ECC: OPC, FA, and QS were dry mixed for at least two minutes. The quantity of water required for the ECC mix was divided into three equal parts; two parts of water were gradually added to the dry mix, and the HVWR was in the third part of the water. A uniform solution of HVWR in water was slowly added to the mix.

Tablica 6 / Table 6

WŁAŚCIWOŚCI WŁÓKIEN KURAREY KURALON RECS 15

KURAREY KURALON FIBERS RECS 15 PROPERTIES

Properties / Właściwości	Value Wartość
Fiber Diameter / Średnica włókna, μm	40
Length / Długość, mm	8
Density / Gęstość, g/cm^3	1.3
Tensile strength / Wytrzymałość na rozciąganie, MPa	1600
Elongation / Wydłużenie, %	6
Young's modulus / Moduł Younga, GPa	41

When a uniform mixture consistency was achieved, the fibers were added manually to get an even dispersion of the PVA fibers. In the end, all the materials were mixed quickly for at least 5 minutes. The freshly made ECC mortar mix [Fig. 2a] was then poured into the molds [Fig. 2b], and due to its self-compacting property, a few blows to the mold compacted the mixture in the desired shape. Demolding of the specimens were done on the second day, due to the retardation of the setting time by a high volume of fly ash and HVWR (47). After, demoulding the specimens [Fig. 2c] was fully submersed in curing tanks for 28 days. After which, all the samples were placed at room temperature, for seven days.

Tablica 7 / Table 7

POPZEDNIE PROPORCJE MIESZANKI EKC, STOSOWANE PRZEZ RÓŻNYCH AUTORÓW

PREVIOUS ECC MIX PROPORTION USED BY DIFFERENT AUTHORS

S/N	w/c	w/b	C	FA	S	W	HRWR	PVA fiber	
1	0.87	0.25	1	2.5	1.16	0.87	0.02	0.02	(39)
2	0.51	0.23	587	704.6	467.9	299.7	17.31	0.02	(40)
3	0.51	0.28	583	467	700	298	19	26	(41)
4	0.63	0.42	296.13	150	572.7	186	1.25		(28)
5	0.67	0.30	505	621	536	338	8.5	26	(42)
6	0.66	0.30	576	691	456	380	5.4	26	(43)
6	0.96	0.30	395	868	455	379	5.2	26	(43)
6	1.56	0.54	242	455	454	378	4.5	26	(43)
7	0.80	0.36	505	605	404	404	15	26	(44)
8	0.60	0.24	404	605	756	242	23		(6)
9	0.60	0.24	450	673	617	269	17	19	(6)
10	0.60	0.24	502	753	452	301	11	19	(6)
11	0.68	0.27	493	739	437	333	8	19	(6)
12	0.75	0.30	484	726	435	363	6	19	(6)
13	0.60	0.24	404	605	756	242	20	19	(6)
14	0.60	0.24	450	673	617	269	15	19	(6)
15	0.60	0.24	502	753	452	301	10	19	(6)
16	0.68	0.27	493	739	437	333	8	19	(6)
17	0.75	0.30	484	726	435	363	6	19	(6)
18	0.60	0.24	404	605	756	242	20	19	(6)
19	0.60	0.24	450	673	617	269	15	19	(6)
20	0.60	0.24	502	753	452	301	10	19	(6)
21	0.68	0.27	493	739	437	333	8	19	(6)
22	0.75	0.30	484	726	435	363	6	19	(6)
23	0.58	0.27	558	669	446	326	2.3	26	(45)
24	0.85	0.27	375	823	435	318	2	26	(45)
25	0.58	0.26	570	684	455	331	4.9	26	(45)
26	0.56	0.26	570	684	455	320	4.9	26	(45)
27	0.90	0.36	421	632	684	379	10.6	26	(46)
28	0.90	0.36	421	632	684	379	10.6	19.5	(46)
29	0.90	0.36	421	632	684	379	10.6	13	(46)
30	0.90	0.36	421	632	684	379	10.6	6.5	(46)

w/c = water to cement ratio, w/b = water to binder ratio, c = cement, FA = Fly Ash, S = sand, HVWR= High Volume Water Reducer

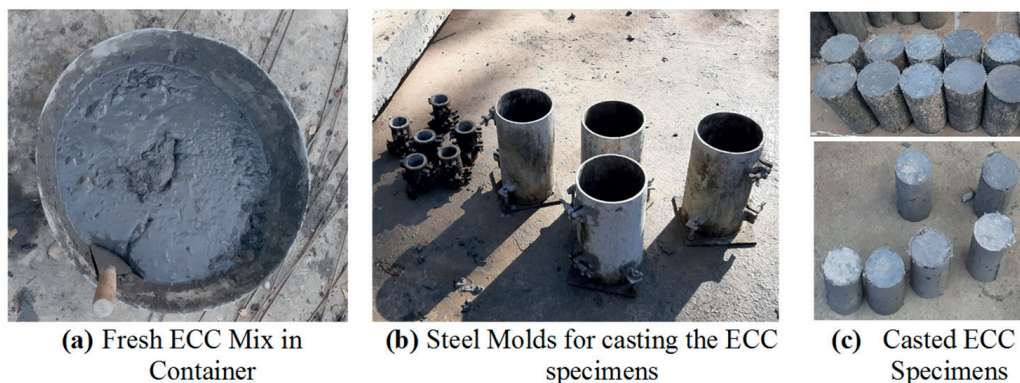
w/c = wskaźnik wodno-cementowy, w/b = wskaźnik wodno-spoiwowy, c = cement, FA = popiół lotny, S = piasek, HVWR = domieszka zmniejszająca zawartość wody

Tablica 8 / Table 8

SKŁAD MIESZANKI EKC ZASTOSOWANE W OBECNYCH BADANIACH

MIX PROPORTION OF ECC USED IN THE CURRENT RESEARCH

ECC mix design for 1 m ³					
Cement, kg	Sand / Piasek, kg	Fly ash / Popiół lotny, kg	Water / Woda, kg	HVWR*, kg	PVA, kg
583	467	700	523	32	19
*S-P-430 was used having a dosage of 2.5 kg per 100 kg of binding material / Zastosowano S-P-430 w dawce 2,5 kg na 100 kg materiału wiążącego					



Rys. 2. EKC świeża mieszanka (a), formy (b), zaformowane próbki (c)

Fig. 2. ECC fresh mix (a), moulds (b), cast specimens (c)

pęknięć, co prowadzi do produkcji betonu o dużej odporności na odkształcenia, przy rozciąganiu (33). Włókna PVA dzieli się dalej na różne kategorie. Klasyfikację włókien PVA, ich właściwości i zastosowania przedstawiono w tablicy 5. Seria włókien PVA o dużej plastyczności należy do typu REC, czyli ostatnio wprowadzonych włókien, produkowanych w oparciu o mikromechanikę (26,33–35). W obecnym badaniu zastosowano włókna Kurarey Kuralon RECS 15 (tablica 6).

Projekt mieszanki EKC został opracowany za pomocą różnych projektów mieszanek z poprzednich badań, jak to podano w tablicy 7. Próby zostały przeprowadzone dla każdej mieszanki, a następnie wprowadzano poprawki. Ostateczny projekt mieszanki, wybranej do badania, przedstawiono w tablicy 8.

2.2. Przygotowanie próbek

Do przygotowania próbek EKC stosowano średniej wielkości zbiornik, a do mieszania mieszadło łopatkowe. Wszystkie składniki EKC: cement, popiół lotny i PP mieszano na sucho, przez co najmniej dwie minuty. Ilość wody wymagana dla mieszanki EKC została podzielona na trzy równe części; dwie części wody były stopniowo dodawane do suchej mieszanki, a DZZW znajdowała się w trzeciej części wody. Do mieszanki powoli dodawano roztwór wody i HVWR. Po uzyskaniu jednolitej konsystencji mieszaniny, włókna dodawano ręcznie, aby uzyskać równomierne rozproszenie włókien PVA. Na koniec wszystkie materiały były szybko mieszane, przez co najmniej 5 minut. Świeżo przygotowana mieszanka zaprawy EKC [rys. 2a] została następnie wlane do form [rys. 2b], a dzięki jej właściwościom samozagęszczającym, kilka uderzeń

2.3. Mechanical properties tests

2.3.1. Compressive strength test

For the evaluation of compressive strength, small cylinders with a diameter of 50.8 mm [2 inches] and a length of 101.6 mm [4 inches] were cast and tested with the help of a universal testing machine [UTM]. The test of all cylinders was carried out according to ASTM C39 (48).

2.3.2. Split tensile test

For the evaluation of the split tensile strength, two different sets of the cylinder were cast. One has a standard size of 152.4 mm [6 inches] diameter and 304.8 mm [12 inches], and the other had a diameter of 50.8 mm [2 inches] and a length of 101.6 mm [4 inches]. They were cast and tested with the help of a universal testing machine. The split tensile value was calculated using the following equation (49):

$$T = 2P/\pi ld \quad (1)$$

where:

T - splitting tensile strength, MPa,

P - applied load, N,

l - length, mm

d - diameter of the specimen, mm.

The value of split tensile strength is lower, usually more than the direct tensile value, and lower than the the modulus of rupture



(a) Digital dial gauge for lateral deformation measurement installed on standard Cylinder specimen.



(b) Data logger setup for data acquiring from the UTM and digital dial gauge for lateral deformation measurement

Rys. 3. Szczegóły stanowiska do badania jednoosiowego naprężenia-odkształcenia

Fig. 3. Uniaxial Compressive Stress-Strain Setup details

w formę spowodowało zagęszczenie mieszanki w pożądanym kształcie. Rozformowywanie próbek przeprowadzono w drugim dniu, ze względu na opóźnienie czasu wiązania przez dużą ilość popiołu lotnego i HVWR (47). Po rozformowaniu próbki [rys. 2c] zostały całkowicie zanurzone w zbiornikach do twardnienia przez 28 dni. Następnie wszystkie próbki umieszczono w temperaturze pokojowej, na siedem dni.

2.3. Badania właściwości mechanicznych

2.3.1. Badanie wytrzymałości na ściskanie

Do oceny wytrzymałości na ściskanie odlano małe walce o średnicy 50,8 mm [2 cale] i długości 101,6 mm [4 cale], które poddano badaniom uniwersalnej maszynie wytrzymałościowej. Badania wszystkich cylindrów przeprowadzono zgodnie z normą ASTM C39 (48).

2.3.2. Próba rozciągania przy rozłupywaniu

Do oceny wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu odlano dwa różne zestawy walców. Pierwszy miał standardową średnicę 152,4 mm [6 cali] i 304,8 mm [12 cali], a drugi miał średnicę 50,8 mm [2 cale] i długość 101,6 mm [4 cale]. Walce zostały odlane i były następnie badane za pomocą uniwersalnej maszyny wytrzymałościowej. Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu obliczano za pomocą następującego wzoru (49).

$$T = 2P/\pi ld \quad (1)$$

gdzie:

T- wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu (MPa),

P - zastosowane obciążenie (N),

l - długość (mm)

d - średnica (mm) próbki.

[flexural strength]. These values are helpful in the calculation of the reinforcement development length.

2.3.3. Stress-strain behavior

The uniaxial compressive stress-strain curve was calculated with the help of a straining frame, made for a cylinder with a diameter of 152.4 mm [6 inches] and 304.8 mm [12 inches]. The experimental setup is shown in Fig. 3.

2.3.4. Effect of elevated temperature on ECCs density and compressive strength

At various temperature ranges, the performance of ECC was investigated by casting cubes having dimensions of 50.8 mm x 50.8 mm x 50.8 mm [2 inches x 2 inches x 2 inches] and exposed to a series of temperatures, i.e., 200°C, 400°C, and 600°C. This temperature range was based on the melting temperature of PVA fibers, which is 230°C (11). The specimens were exposed to each temperature regime for two hours, after which each specimens mass was measured, and compressive strength was evaluated.

3. Results and discussion

3.1. Compressive strength

The ECC mix resulted in average compressive strength of 31.4 MPa [Table 9]. Sixteen specimens were tested; the data had a standard error of 0.43 and a standard deviation of 1.72. The sample showed multiple cracking before failure [Fig. 4], and the inner section of the ECC showed an even distribution of the fibers concrete matrix. The specimens' failure was more ductile as multiple cracks appear, instead of a single large one. As can be noted, the strength of all specimens exceeds 28 MPa. Hence, the substitution of UFSS by QS is good enough from the point of compressive strength.

Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu jest niższa, zwykle większa niż wartość wytrzymałości na rozciąganie bezpośrednie oraz niższa wytrzymałość na zginanie. Wartości te są pomocne przy obliczaniu długości rozwinięcia zbrojenia.

2.3.3. Odkształcalność

Jednoosiową krzywą naprężenie-odkształcenie wyznaczono za pomocą ramy z czujnikiem odkształcenia, wykonanej dla walca o średnicy 152,4 mm [6 cali] i 04,8 mm [12 cali]. Stanowisko doświadczalne pokazano na rysunku 3.

2.3.4. Wpływ wysokiej temperatury na gęstość i wytrzymałość na ściskanie EKC

W różnych zakresach temperatur, wydajność EKC badano odlewając kostki o wymiarach 50,8 mm x 50,8 mm x 50,8 mm [2 cale x 2 cale x 2 cale] i wystawiając je na działanie szeregu temperatur, tj. 200°C, 400°C i 600°C. Ten zakres temperatur ustalono na podstawie temperatury topnienia włókien PVA, która wynosi 230°C (11). Próbkę poddawano działaniu każdego reżimu temperaturowego przez dwie godziny, po czym mierzono masę każdej próbki i oceniano wytrzymałość na ściskanie.

3. Wyniki i dyskusja

3.1. Wytrzymałość na ściskanie

W mieszance EKC uzyskano średnią wytrzymałość na ściskanie 31,4 MPa (tablica 9). Przeprowadzono badania szesnastu próbek, a uzyskane dane charakteryzowały się błędem standardowym 0,43

Tablica 9 / Table 9

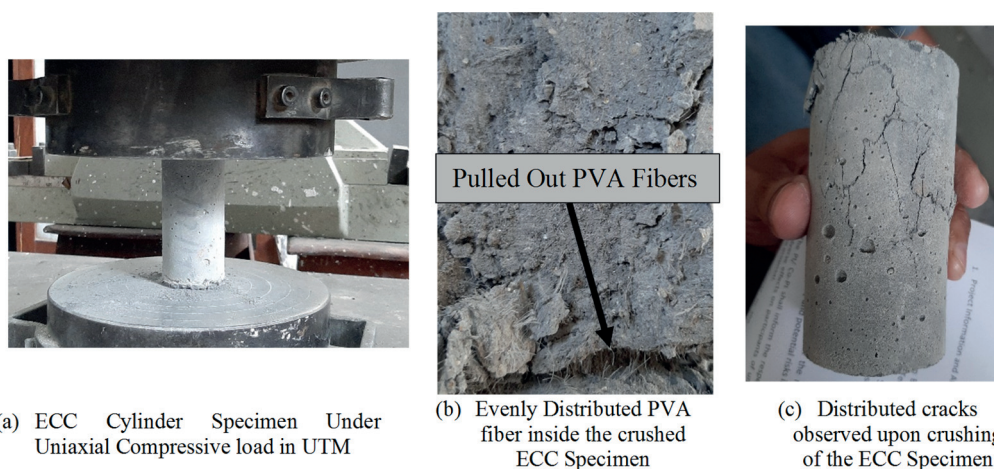
WYTRZYMAŁOŚĆ NA ŚCISKANIE WALCA EKC O ŚREDNICY 50,8 MM [2 CALE] I DŁUGOŚCI 101,6 MM [4 CALE]

COMPRESSIVE STRENGTH OF ECC CYLINDER HAVING DIAMETER 50.8 MM [2 INCHES] AND LENGTH OF 101.6 MM [4 INCHES]

S/N	Cylinder contact area Powierzchnia styku walca, mm ²	Load Obciążanie, N	Compressive strength Wytrzymałość na ściskanie, MPa
1	2025.802	61200.7	30.2
2		64143	31.7
3		59239.1	29.2
4		60710.3	30.0
5		60710.3	30.0
6		58552.6	28.9
7		64192.1	31.7
8		63740.9	31.5
9		64192.1	31.7
10		63740.9	31.5
11		72724.8	35.9
12		67173.6	33.2
13		64167.5	31.7
14		61298.8	30.3
15		66595	32.9
16		65516.1	32.3
Average compressive strength Średnia wytrzymałość na ściskanie			31.4

3.2. Split tensile strength

The split tensile strength showed an average value of 2.8 MPa [Table 10]. The split tensile strength data set has a standard error of 0.072 and a standard deviation of 0.17. Compared to the conventional concrete samples, the ECC specimens remained intact even after completing the test [Figure 5]. The propagation of cracks in the ECC sample was controlled by the bridging action of PVA fibers (50).



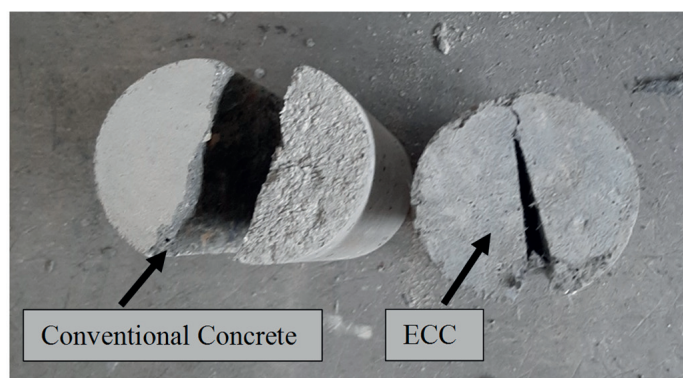
Rys. 4. Próba jednoosiowego ściskania próbek przed i po badaniu

Fig. 4. Uniaxial compressive test specimens before and after the test

S/N	Diameter & length / Średnica i długość, mm	Load / Obciążenie, N	Split tensile strength Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu, MPa
1	Diameter / Średnica=152.4 Length / Długość=304.8	206160	2.83
2		218224	2.99
3		183406	2.51
4	Diameter / Średnica =50.8 Length / Dług=101.6	23539	2.90
5		21577	2.66
6		21577	2.66
		Average / Średnia	2.8



(a) ECC Specimen after performance of Split tensile Test



(b) Comparison of standard concrete with ECC Specimen

Rys. 5. Próbkę EKC poddane badania wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu po wykonaniu badania

Fig. 5. ECC Split Tensile Specimens After the performance of the test

i odchyleniem standardowym 1,72. Próbkę wykazała wielokrotne pęknięcia przed zniszczeniem (rys. 4), a wewnętrzna strefa EKC wykazała równomierne rozmieszczenie włókien w matrycy betonowej. Zniszczenie próbek wskazało na większą plastyczność, ponieważ pojawiło się wiele pęknięć, zamiast jednego dużego. Jak można zauważyć, wytrzymałość wszystkich próbek przekracza 28 MPa. W związku z tym, zastąpienie BDPK przez PP daje wystarczająco dobre wyniki z punktu widzenia wytrzymałości na ściskanie.

3.2. Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu

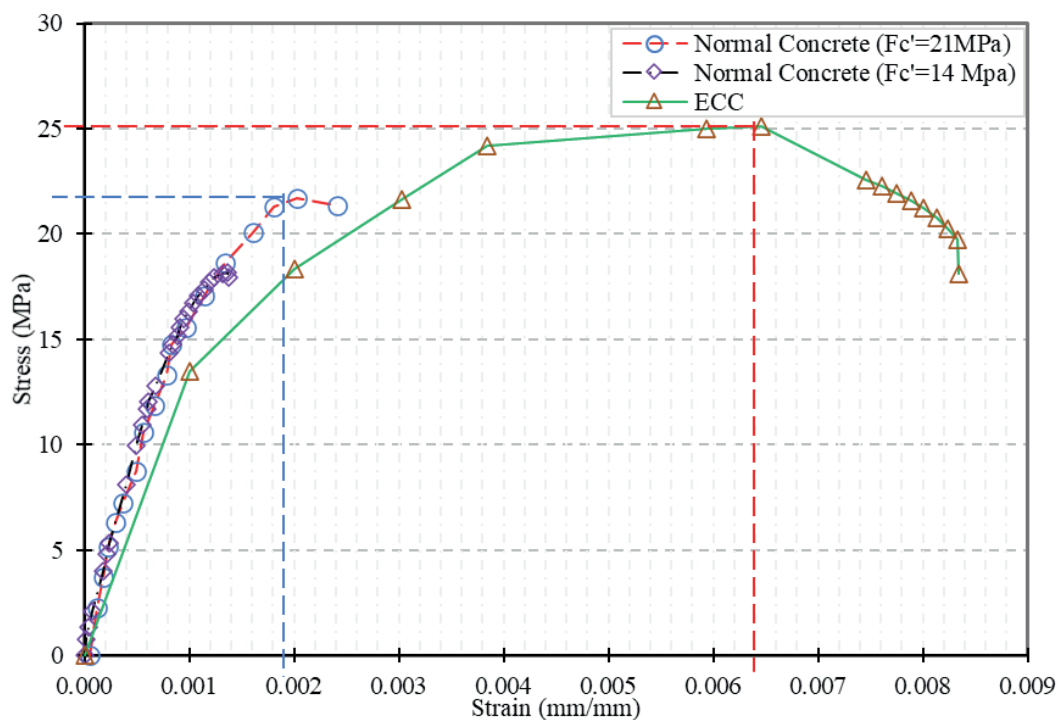
Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu osiągnęła średnią 2,8 MPa [tablica 10]. Zestaw danych dotyczących wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu charakteryzuje się błędem standardowym wynoszącym 0,072 i odchyleniem standardowym 0,17. W porównaniu do próbek z betonu konwencjonalnego, próbki EKC pozostały nienaruszone, nawet po zakończeniu badania [rys. 5]. Propagacja pęknięć w próbce EKC była kontrolowana przez działanie mostkujące włókien PVA (50).

3.3. Odkształcalność

Wykres średnich wartości naprężenie-odkształcenie przedstawiono na rysunku 6. Materiał EKC wykazywał liniową tendencję do około

3.3. Stress-strain behavior

The average stress-strain plot is shown in Figure 6; the ECC material showed a linear trend up to approximately 14 MPa with a corresponding strain value of 0.001, multiple cracking starting at this stage. During the testing process, these cracks started to get dense between 14 MPa and 24 MPa stress levels, and the strain value reached 0.001 to 0.003 (Fig. 7). The bilinear trend observed during this level may be due to the bridging action of PVA fibers (50). Compared to conventional concrete, the ultimate stress level of concrete was at 0.002 strain level, after which a sudden failure was observed. However, the ECC 0.003 strain still performed better compared to the concrete. The ultimate strain of ECC was 0.006, which was approximately 200 percent greater than the conventional concrete. These values were achieved with the incorporation of fine QS instead of UFSS, which are still encouraging. It should be noted that this strain was achieved with the help of the 1.5% of PVA fiber content, which is minimum compared to previous authors reported in Table 7. The elastic modulus of ECC was less in comparison to concrete; this was attributed to the absence of coarse aggregate from the ECC mix.

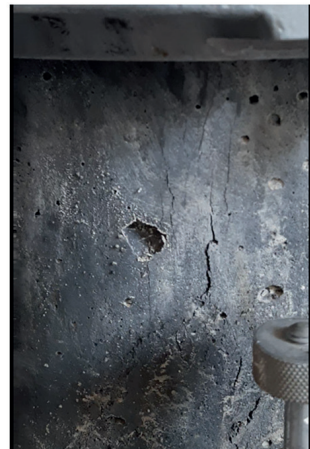


Rys. 6. Jednoosiowa zależność naprężenie-odkształcenie EKC w porównaniu z próbkami betonu konwencjonalnego

Fig. 6. Uniaxial stress-strain relation of ECC in comparison with conventional concrete specimens



(a) The ECC cylinder before the testing



(b) Multiple cracking phenomena was observed upon the failure of the specimen

Rys. 7. Próbką EKC przy naprężaniu walca i zjawiskiem wielokrotnego pęknięcia

Fig. 7. ECC Specimen with cylinder strainer and multiple cracking Phenomena

14 MPa przy odpowiadającej wartości odkształcenia 0,001, na tym etapie rozpoczynało się wielokrotne pęknięcie. Podczas procesu badań, pęknięcia te zaczęły się zagęszczać pomiędzy poziomami naprężeń 14 MPa i 24 MPa, a wartość odkształcenia wynosiła od 0,001 do 0,003 [rys. 7]. Obserwowany na tym poziomie kierunek bilinearny może być spowodowany działaniem mostkującym włókien PVA (50). W porównaniu z betonem konwencjonalnym, poziom naprężenia granicznego betonu występował przy poziomie odkształcenia 0,002, po którym obserwowano nagłe zniszczenie. Jednak odkształcenie EKC 0,003 nadal wypadło lepiej w porównaniu do betonu zwykłego. Odkształcenie graniczne dla EKC

3.4. ECC performance under fire

3.4.1. Fire effect on the density

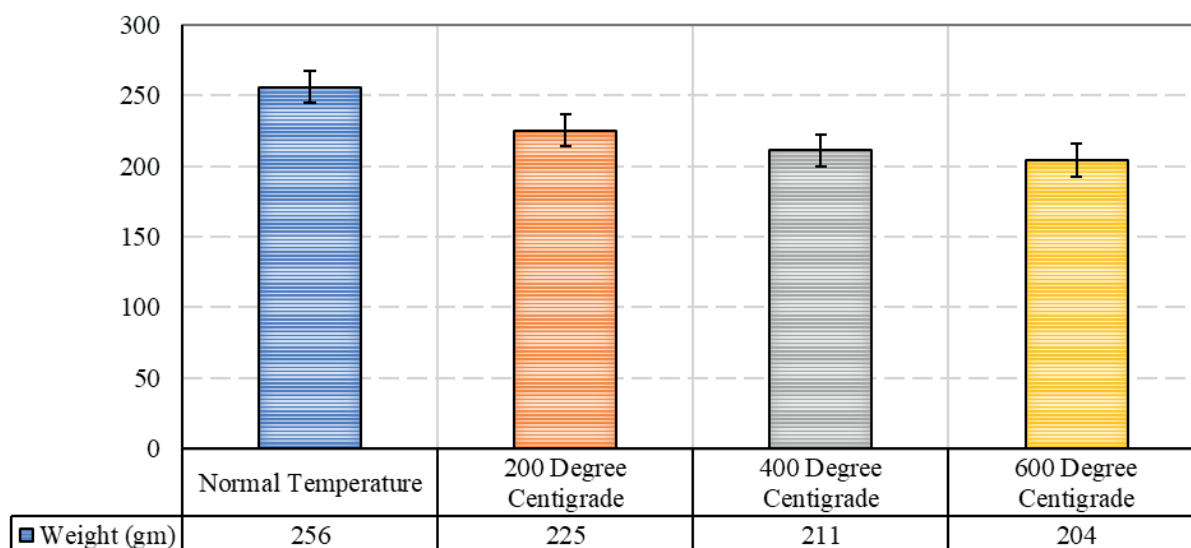
The samples of ECC were exposed to different fire levels for two hours and then their mass was measured, after cooling. A loss in the mass of the ECC cubes was observed with an increase in temperature – Fig. 8. ECC cubes specimens have a dimension of 50.8 mm x 50.8 mm x 50.8 mm [2 inches x 2 inches x 2 inches] and an average mass of 256 grams, before exposure to fire. Specimens were heated for two hours at 200°C, an average decrease

Tablica 11 / Table 11

GĘSTOŚĆ MASOWA PRÓBEK EKC W RÓŻNYCH TEMPERATURACH

MASS DENSITY OF THE ECC SPECIMENS AT DIFFERENT TEMPERATURE LEVELS

Temperature	Mass / Masa, g	Volume / Objętość, mm ³	Density / Gęstość, kg/m ³	Average density Średnia gęstość, kg/m ³
Normal temperature Normalna temperatura	246	131096.512	1876.5	1953
	258	131096.512	1968.0	
	264	131096.512	2013.8	
	256	131096.512	1952.8	
200°C	228	131096.512	1739.2	1719
	235	131096.512	1792.6	
	213	131096.512	1624.8	
	225	131096.512	1718.8	
400°C	216	131096.512	1647.6	1610
	206	131096.512	1571.4	
	211	131096.512	1609.5	
	211	131096.512	1609.5	
600°C	198	131096.512	1510.3	1559
	204	131096.512	1556.1	
	211	131096.512	1609.5	
	204	131096.512	1558.6	



Rys. 8. Pomiar masy próbek EKC po poddaniu ich działaniu różnych poziomów temperatury przez 2 godziny

Fig. 8. ECC Specimens mass measurement after exposing it to the different levels of temperature for 2 hour

wynosiło 0,006, co stanowiło około 200% więcej niż w przypadku betonu konwencjonalnego. Wartości te zostały osiągnięte przy zastosowaniu drobnoziarnistego PP zamiast BDPK, i są nadal zachęcające. Należy zaznaczyć, że odkształcenie to uzyskano za pomocą 1,5% zawartości włókien PVA, co jest wartością minimalną, w porównaniu do poprzednich autorów podanych w tablicy 7. Moduł sprężystości EKC był mniejszy w porównaniu z betonem, co wynikało z braku kruszywa grubego w mieszance EKC.

of 12% in density was observed, and this decrease in the density was approximately 20% when the samples were heated at 600°C, for two hours. The density of ECC specimens with a different level of fire exposure is reported in Table 11. A density decrease can be attributed to the loss in the ignition and the melting of the PVA fiber above 230°C, which is the melting point of the PVA fibers (11).

3.4.2. Fire effect on the compressive strength

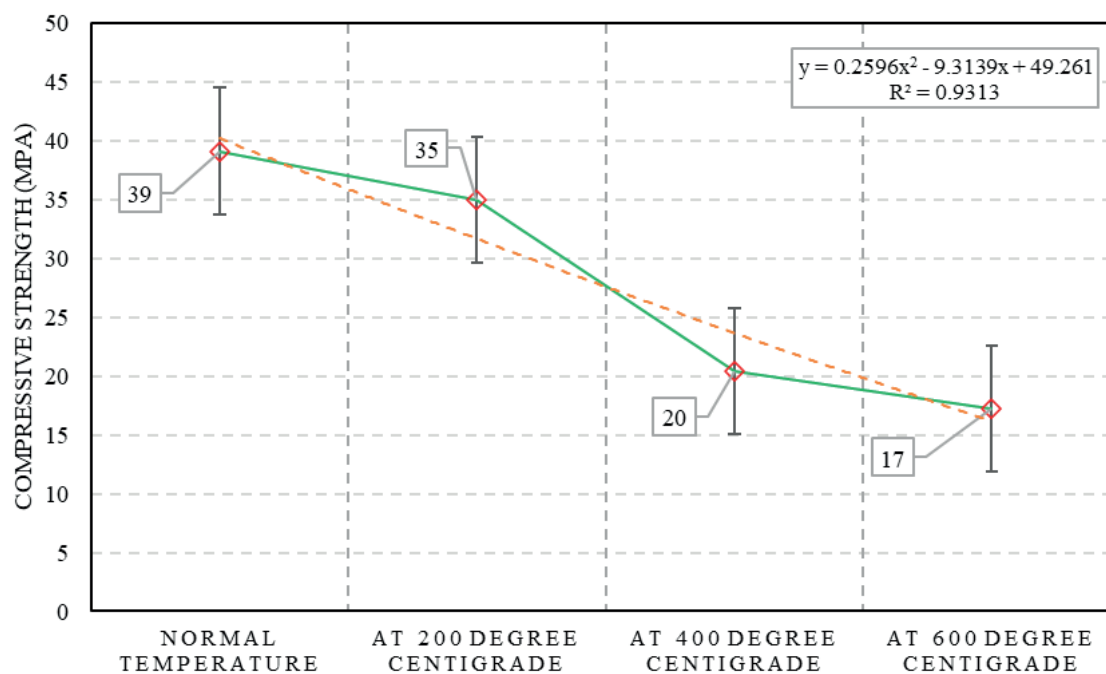
The compressive strength of the cube specimen at room temperature was calculated equal to 39 MPa, which showed a gradual decrease in compressive strength with increasing temperature.

Tablica 12 / Table 12

WYTRZYMAŁOŚĆ NA ŚCISKANIE PRÓBEK EKC W RÓŻNYCH TEMPERATURACH

COMPRESSIVE STRENGTH OF ECC SPECIMEN AT DIFFERENT TEMPERATURES

Temperature Temperatura	Load Obciążenie, N	Cube area Powierzchnia kostki, mm ²	Compressive strength Wytrzymałość na ściskanie, MPa	Average compressive strength Średnia wytrzymałość na ściskanie, MPa
Normal temperature Normalna temperatura	102197	2581	39.60	39.0
	96214		37.28	
	104551		40.51	
	100100		38.78	
200°C	90722		35.15	35.0
	94253		36.52	
	85622		33.17	
	90252		34.97	
400°C	51490		19.95	20.4
	55512		21.51	
	50902		19.72	
	52902		20.49	
600°C	45999		17.82	17.3
	39820		15.43	
	47763		18.50	
	44763		17.34	



Rys. 9. Zmienność wytrzymałości na ściskanie w zależności od zmian temperatury

Fig. 9. Compressive strength variation to the temperature changes

3.4. Wpływ temperatury na EKC

3.4.1. Wpływ ognia na gęstość

Próbki EKC poddano działaniu ognia o różnym natężeniu przez dwie godziny, a następnie zmierzono ich masę po ochłodzeniu.

Table 12 reports the average compressive strength at a different level of exposure to fire. When the samples were heated at 200°C for two hours, a smaller decrease of 10% was observed, the response of the sample was still ductile and the PVA fibers were in action. A significant decrease of 48% and 56% at 400°C and 600°C. The response of the specimen was brittle and melting of the PVA

Zaobserwowano ubytek masy kostek EKC wraz ze wzrostem temperatury [rys. 8]. Próbkki kostek EKC mają wymiary 50,8 mm x 50,8 mm x 50,8 mm [2 cale x 2 cale x 2 cale] i średnią masę 256 gramów przed wystawieniem na działanie ognia. Próbkki ogrzewano przez dwie godziny w temperaturze 200°C, co spowodowało średni spadek gęstości o 12%, a spadek ten wynosił około 20% przy ogrzewaniu próbek w temperaturze 600°C, przez dwie godziny. Gęstość próbek EKC o różnym poziomie narażenia ogniowego podano w tablicy 11. Spadek gęstości można przypisać stratą prażenia i topnieniu włókien PVA w temperaturze powyżej 230°C, która jest temperaturą topnienia włókien PVA (11).

3.4.2. Wpływ ognia na wytrzymałość na ściskanie

Wytrzymałość na ściskanie próbki sześcienniej w temperaturze pokojowej obliczono jako 39 MPa, co wykazało stopniowy spadek wytrzymałości na ściskanie, wraz ze wzrostem temperatury. W tablicy 12 podano średnią wytrzymałość na ściskanie przy różnym poziomie ekspozycji ogniowej. Gdy próbki ogrzewano w temperaturze 200°C przez dwie godziny, zaobserwowano mniejszy spadek o 10%, odpowiedź próbki była nadal plastyczna, a włókna PVA pozostawały sprawne. Znaczący spadek o 48% i 56% zaszedł w temperaturach 400°C i 600°C. Odpowiedź próbki wykazała kruchość i zaobserwowano topienie się włókien PVA. Stwierdzono, że spadek wytrzymałości na ściskanie ma tendencję liniową i obserwuje się stały spadek wytrzymałości na ściskanie, wraz ze wzrostem temperatury ogrzewania (rys. 9).

4. Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań eksperymentalnych próbek EKC z dodatkiem drobnego PP i 1,5% włókien PVA wyciągnięto następujące wnioski:

1. Przy zachowaniu tych samych właściwości mechanicznych, zastąpienie BDPK przez PP może obniżyć koszty i poprawić ekonomikę wykorzystania EKC.
2. Przy zastosowaniu PP i 1,5% włókien PVA wytrzymałość wszystkich próbek przekracza 28 MPa. W związku z tym, zastąpienie BDPK przez PP daje wystarczająco dobre wyniki, z punktu widzenia wytrzymałości na ściskanie. Ze względu na to, że docelowa wytrzymałość zaprojektowanej mieszanki wynosiła 21 MPa, mieszanka wypadła dobrze.
3. Podczas próby wytrzymałości na ściskanie przy jednoosiowym obciążeniu zaobserwowano, że przy zawartości 1,5% włókien PVA, próbka nadal może wykazywać niewielkie zjawiska gęstego pęknięcia.
4. Średnia wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu uzyskana dla próbki EKC wynosiła 2,8 MPa, co stanowiło 10% wytrzymałości na ściskanie. Tendencja ta jest podobna do betonu konwencjonalnego, ale w EKC propagacja pęknięć próbek była inna, a rozszczepienie próbki ostatecznie nie wystąpiło. Próbka uległa odkształceniu, ale włókna uchroniły pozostały fragment przed rozszczepieniem.

fibers was observed. The decrease of the compressive strength was noted to have a linear trend, and a constant decrease in compressive strength with heating temperature was observed [Fig. 9].

4. Conclusions

The following conclusions are drawn based on the experimental study on the ECC specimens prepared with fine QS and 1.5% of PVA fibers:

1. On maintaining the same mechanical properties, replacing UFSS with QS can save costs and improve the economy of ECC usage.
2. With the use of QS and 1.5% PVA fibers, the strength of all specimens exceeds 28 MPa. Hence, the substitution of UFSS by QS is good enough from the point of compressive strength. As the targeted strength of the mix design was 21 MPa still the mixture performed well.
3. During the uniaxial compressive strength test, it was observed that with 1.5% PVA fibers content, the specimen was still able to show small dense cracking phenomena.
4. The average split tensile strength achieved with the ECC specimen was 2.8 MPa, equal to 10 percent of the compressive strength. This trend is similar to conventional concrete, but in ECC, the specimens cracks propagation was different, and splitting the sample did not occur ultimately. The specimen was de-shaped, but the fibers retained the remaining section from splitting.
5. The stress-strain curve of ECC compared to concrete could reach strain 0.0064, which is approximately 200 percent greater than for conventional concrete.
6. The elastic modulus of ECC (slope of the stress-strain curve) was less compared to that of concrete; this was attributed to the absence of coarse aggregate from the ECC mix.
7. The PVA fiber in the ECC matrix remains in action after heating the samples at 200 degrees centigrade for two hours, as the bridging action of these fibers was observed up to these temperatures.
8. Heating more than 200°C resulted in a more brittle behaviour, as most fibers melted during the heating process.
9. The mass density and compressive strength of the ECC decrease with the increase in its exposure to the temperature. The decrease was due to the ignition loss of the material and the melting of the PVA fibers in the concrete matrix.

Acknowledgments

The authors would like to express their gratitude to Higher Education Commission (HEC), Pakistan, for funding the National Research Program for Universities. This paper's opinions, findings, and conclusions are the authors opinions and do not necessarily reflect sponsors views.

5. Krzywa naprężenie-odkształcenie EKC w porównaniu do betonu może osiągnąć odkształcenie 0,0064, co stanowi około 200% więcej niż dla konwencjonalnego betonu.
6. Moduł sprężystości EKC [nachylenie krzywej naprężenie-odkształcenie] był mniejszy w porównaniu z betonem, co wynikało z braku kruszywa grubego w mieszance EKC.
7. Włókna PVA w matrycy EKC pozostają sprawne po ogrzewaniu próbek w temperaturze 200 stopni Celsjusza przez dwie godziny, ponieważ do tych temperatur zaobserwowano działanie mostkujące tych włókien.
8. Ogrzewanie powyżej 200°C spowodowało większą kruchość, ponieważ większość włókien stopiła się podczas procesu ogrzewania.
9. Gęstość i wytrzymałość na ściskanie kompozytu EKC zmniejsza się wraz ze wzrostem jego ekspozycji na temperaturę. Spadek ten wynikał z ubytku na skutek strat prażenia materiału i topnienia włókien PVA w matrycy cementowej.

Declaration of competing interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have influenced the work reported in this paper.

Podziękowania

Autorzy pragną wyrazić swoją wdzięczność Higher Education Commission [HEC], Pakistan, za finansowanie Narodowego Programu Badań dla Uniwersytetów. Opinie, ustalenia i wnioski zawarte w niniejszym opracowaniu są opiniami autorów i nie muszą odzwierciedlać poglądów sponsorów.

Deklaracja dotycząca konfliktu interesów

Autorzy deklarują, że nie mają żadnych znanych im konkurencyjnych interesów finansowych ani osobistych powiązań, które mogłyby wpłynąć na pracę przedstawioną w niniejszym artykule.

Literatura / References

1. Z.Q. Shi, D.D. Chung, Carbon fiber-reinforced concrete for traffic monitoring and weighing in motion. *Cem. Concr. Res.* **29**(3), 435-9 (1999). [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(98\)00204-X](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(98)00204-X)
2. K. Yu, L. Li, J. Yu, J. Xiao, J. Ye, Y. Wang, Feasibility of using ultra-high ductility cementitious composites for concrete structures without steel rebar. *Eng. Struct.* **170**, 11-20 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.05.037>
3. P.S. Song, J.C. Wu, S. Hwang, B.C. Sheu, Statistical analysis of impact strength and strength reliability of steel-polypropylene hybrid fiber-reinforced concrete. *Constr. Build. Mater.* **19**(1),1-9 (2005). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2004.05.002>
4. N. Banthia, M. Sappakittipakorn, Toughness enhancement in steel fiber reinforced concrete through fiber hybridization. *Cem. Concr. Res.* **37**(9),1366-72 (2007). <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.05.005>
5. B. Gencturk, F. Hosseini, Evaluation of reinforced concrete and reinforced engineered cementitious composite (ECC) members and structures using small-scale testing. *Canad. J. Civ. Eng.* **42**(3),164-77 (2015). <https://doi.org/10.1139/cjce-2013-0445>

6. X. Guan, Y. Li, T. Liu, C. Zhang, H. Li, J. Ou, An economical ultra-high ductile engineered cementitious composite with large amount of coarse river sand. *Constr. Build. Mater.* **201**,461-72 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.207>
7. V.C. Li, Engineered cementitious composites (ECC)-tailored composites through micromechanical modeling.
8. V.C. Li, S. Wang, C. Wu, Tensile strain-hardening behavior of polyvinyl alcohol engineered cementitious composite (PVA-ECC). *Mater. J.* **98**(6),483-92 (2001).
9. A. Demir, İ.B. Topçu, H. Kuşan, Modeling of some properties of the crushed tile concretes exposed to elevated temperatures. *Constr. Build. Mater.* **25**(4),1883-9 (2011). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.11.071>
10. K.T. Soe, Y.X. Zhang, L.C. Zhang, Impact resistance of hybrid-fiber engineered cementitious composite panels. *Comp. Struct.* **104**, 320-30 (2013). <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2013.01.029>
11. J. Yu, J. Lin, Z. Zhang, V.C. Li, Mechanical performance of ECC with high-volume fly ash after sub-elevated temperatures. *Constr Build Mater.* **99**, 82–9 (2015). <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.09.002>
12. V.C. Li, C.K.Y. Leung, SteadyState and Multiple Cracking of Short Random Fiber Composites. *J Eng Mech.* **118**(11), 2246–64 (1992). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(1992\)118:11\(2246\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(1992)118:11(2246))
13. M. Maalej, S.T. Quek, S.F. Ahmed, J. Zhang, V.W. Lin, K.S. Leong, Review of potential structural applications of hybrid fiber Engineered Cementitious Composites. *Constr. Build. Mater.* **36**, 216-27 (2012). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.010>
14. M. Sahmaran, M. Lachemi, K.M. Hossain, R. Ranade, V.C. Li, Influence of aggregate type and size on ductility and mechanical properties of engineered cementitious composites. *ACI Mater. J.* **106**(3), 308 (2009).
15. V.C. Li, D.K. Mishra, H.C. Wu, Matrix design for pseudo-strain-hardening fibre reinforced cementitious composites. *Mater. Struct.* **28**(10), 586-95 (1995). <https://doi.org/10.1007/BF02473191>
16. V.C. Li, Integrated structures and materials design. *Mater Struct Constr.* **40**(4), 387–96 (2007).
17. M. Sahmaran, M. Li, V.C. Li, Transport properties of engineered cementitious composites under chloride exposure. *ACI Mater. J.* **104**(6),604-11(2007).
18. M. Sahmaran, H.E. Yücel, S. Demirhan, M.T. Arýk, V.C. Li, Combined effect of aggregate and mineral admixtures on tensile ductility of engineered cementitious composites. *ACI Mater. J.* **109**(6):627 (2012).
19. J. Li, E.H. Yang, Macroscopic and microstructural properties of engineered cementitious composites incorporating recycled concrete fines. *Cem. Concr. Compos.* **78**,33–42 (2017). <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2016.12.013>
20. Z. Zhang, H. Ma, S. Qian, Investigation on properties of ECC incorporating crumb rubber of different sizes. *J. Adv. Concr. Techn.* **13**(5), 241-51 (2015). <https://doi.org/10.3151/jact.13.241>
21. K. Yu, Y. Wang, J. Yu, S.A. Xu, strain-hardening cementitious composites with the tensile capacity up to 8%. *Constr. Build. Mater.* **137**,410-9 (2017). <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.01.060>
22. M. Di Prisco, G. Plizzari, L. Vandewalle, Fibre reinforced concrete: new design perspectives. *Mater. Struct.* **42**(9),1261-81 (2009). <https://doi.org/10.1617/s11527-009-9529-4>
23. Q. Jin, V.C. Li, Structural and durability assessment of ECC/concrete dual-layer system for tall wind turbine towers. *Eng Struct.* **196**, 109338 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109338>
24. G. Fischer, H. Fukuyama, C.V. V, Effect of matrix ductility on the performance of reinforced ECC column members under reversed cyclic loading conditions. In: Proceedings of the JCI international Workshop on Ductile Fiber Reinforced Cementitious Composites (DFRCC)- Application and Evaluation. 269–78 (2002).
25. D. Kim, A.E. Naaman, S. El-Tawil, Comparative flexural behavior of four fiber reinforced cementitious composites. *Cem Concr Compos.* **30**(10), 917–28 (2008). <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2008.08.002>
26. T. Kanda, V.C. Li, Interface property and apparent strength of high-strength hydrophilic fiber in cement matrix. *J. Mater. Civ. Eng.* **10**(1), 5-13 (1998). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(1998\)10:1\(5\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(1998)10:1(5))
27. G. Yıldırım, Ö.K. Keskin, S.B. Keskin, M. Şahmaran, M. Lachemi, A review of intrinsic self-healing capability of engineered cementitious composites: Recovery of transport and mechanical properties. *Constr. Build. Mater.* **101**, 10-21 (2015). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.018>
28. B. Merchant, A. Gelot, Evaluation of engineering cementitious composites (ECC) with different percentage of fibers. *Int J of Eng Res Technol.* **4**, 40-3 (2015).
29. J. Choi, G. Zi, S. Hino, K. Yamaguchi, S. Kim, Influence of fiber reinforcement on strength and toughness of all-lightweight concrete. *Constr Build Mater.* **69**, 381–9 (2014). <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.07.074>
30. H.N. Atahan, B.Y. Pekmezci, E.Y. Tuncce, Behavior of PVA fiber-reinforced cementitious composites under static and impact flexural effects. *J. Mater. Civ. Eng.* **25**(10), 1438-45 (2013). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000691](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000691)
31. A. Noushini, B. Samali, K. Vessalas, Effect of polyvinyl alcohol (PVA) fibre on dynamic and material properties of fibre reinforced concrete. *Constr Build Mater.* **49**, 374–83 (2013). <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.08.035>
32. ASTM C136 / C136M – 19, Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates. ASTM Int West Conshohocken,USA. (2019)
33. T. Horikoshi, A. Ogawa, T. Saito, H. Hoshiro, G. Fischer, V. Li, Properties of polyvinyl alcohol fiber as reinforcing materials for cementitious composites. In Proceedings of the International RILEM Workshop on High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites in Structural Applications 2006 (pp. 145-153).
34. T. Kanda, V.C. Li, Practical design criteria for saturated pseudo strain hardening behavior in ECC. *J. Adv. Concr. Techn.* **4**(1), 59-72 (2006). <https://doi.org/10.3151/jact.4.59>
35. G. Yıldırım, M. Şahmaran, Ö. Anıl, Engineered cementitious composites-based concrete. Eco-Efficient Repair and Rehabilitation of Concrete Infrastructures. 387-427 (2018). <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102181-1.00015-0>
36. ASTM C150/C150M – 19a, Standard specification for portland cement. ASTM Int West Conshohocken,USA. (2019)
37. ASTM C618 – 19, Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use. ASTM Int West Conshohocken,USA. (2019)
38. ASTM C128-15, Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate. ASTM Int West Conshohocken,USA. (2015)
39. F. Hosseini, B. Gencturk, S.L. Pour, Seismic behavior of 3d ECC beam-column joints in special moment resisting frame. in: Eleventh US National Conference on Earthquake Engineering Integrating Science, Engineering & Policy, Los Angeles, California 2018 Jun 25 (pp. 25-29).
40. V.R. Chethan, M. Ramegowda, H.E. Manohara, Engineered Cementitious Composites-a Review. *Int Res J Eng Technol.* **2**(5),144–9 (2015).

41. S. Wang, V.C. Li, Tailoring of pre-existing flaws in ECC matrix for saturated strain hardening. In: V.C. Li et al. (eds), *Fracture Mechanics of Concrete Structures*, 2004.
42. S. Müller, V. Mechtcherine, Fatigue behaviour of strain-hardening cement-based composites (SHCC). *Cem Concr Res.* **92**, 75–83 (2017). <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2016.11.003>
43. E. Özbay, O. Karahan, M. Lachemi, K.M. Hossain, C.D. Atis, Dual effectiveness of freezing–thawing and sulfate attack on high-volume slag-incorporated ECC. *Composites B.* **45**(1), 1384–90 (2013). <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.07.038>
44. M. da Silva Magalhães, R.D. Toledo Filho, E.D. Fairbairn, Thermal stability of PVA fiber strain hardening cement-based composites. *Constr. Build. Mater.* **94**, 437–47 (2015). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.039>
45. M. Şahmaran, V.C. Li, Engineered Cementitious Composites. *Transp Res Rec J Transp Res. Board.* **2164**:1–8 (2010). <http://trrjournalonline.trb.org/doi/10.3141/2164-01>
46. L. Bai, J. Yu, M. Zhang, T. Zhou, Experimental study on the bond behavior between H-shaped steel and engineered cementitious composites. *Constr Build Mater.* **196**, 214–32 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.117>
47. M.S. Mohammed, S.A. Mohamed, M.A. Johari, Influence of superplasticizer compatibility on the setting time, strength and stiffening characteristics of concrete. *Adv. Appl. Sci.* **1**(2), 30 (2016). <https://doi.org/10.11648/j.aas.20160102.12>
48. ASTM C39/C39M–18, Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. ASTM Int West Conshohocken, USA. (2018)
49. ASTM C496. ASTM C496 / C496M-17, Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens, ASTM Int West Conshohocken, USA. (2017)
50. H. Toutanji, B. Xu, J. Gilbert, T. Lavin, Properties of poly (vinyl alcohol) fiber reinforced high-performance organic aggregate cementitious material: converting brittle to plastic. *Constr. Build. Mater.* **24**(1), 1–10 (2010). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.08.023>