E. Dinler, M. İpek, Cement Wapno Beton, 28(4) (2023), 238-254
doi: https://doi.org/10.32047/CWB.2023.28.4.3

cement wapno beton

Udarność betonu z proszków reaktywnych o zmniejszonej emisyjności i płyt z żelbetu

Impact resistance of sustainable reactive powder concrete and reinforced concrete slabs

Ebru Dinler[1], Metin İpek[1,*]

[1]Sakarya University of Applied Sciences, Department of Civil Engineering, Sakarya, Turkey

*Corresponding author: M. İpek, e-mail: metini@subu.edu.tr

Streszczenie

W niniejszym artykule zbadano zachowanie betonu z proszków reaktywnych o zmniejszonej emisyjności po badaniu udarności. Mieszanka betonu z proszków reaktywnych zawiera 10% żużla stalowniczego zastępującego cement CEM I 52.5 N oraz 4% odpadowych włókien. Wyprodukowano płyty żelbetowe i niezbrojone z betonu z proszków reaktywnych [SRPC]. Na płyty z żelbetu, wzmocnione siatką stalową, nałożono powtarzające się obciążenie uderzeniowe, spuszczając ciężar o stałej masie, aż do ich zniszczenia. Określono pierwsze zarysowania oraz uszkodzenia prowadzące do zniszczenia płyt, a uzyskane dane w obu przypadkach zostały przeanalizowane. Ustalono, jaka liczba upadków spowodowała pierwsze zarysowania i zniszczenie płyt. W doświadczeniu zarejestrowano dane przyspieszenia płyt w odniesieniu do czasu oraz wartości ugięcia w odniesieniu do czasu. Energia uderzeń płyt została oceniona według pierwszych zarysowań i zniszczenia. W rezultacie, w miarę zwiększenia zawartości włókien w płytach, wzrasta ich zdolność do absorpcji energii. Energia pękania płyt z włóknem i betonu zbrojonego osiągnęła 2094 dżuli w przypadku zniszczenia prowadzącego do zniszczenia i pochłonęła około 2 razy więcej energii niż płyty bez włókna i z żelbetu.

Słowa kluczowe: obciążenie uderzeniowe, płyta z betonu z proszków reaktywnych, płyta żelbetowa z proszków reaktywnych, żużel stalowy, włókno przemysłowe, włókno odpadowe

Summary

In this paper, the behavior of sustainable reactive powder concrete after the impact load test was examined. The sustainable reactive powder concrete mixture contains 10% steel slag substituting CEM I 52.5 N cement and 4% waste fibers. Reinforced and unreinforced concrete slabs were produced from sustainable reactive powder concrete [SRPC]. A repeat impact load was applied to the reinforced concrete slabs reinforced with steel reinforcement mesh by dropping a constant weight impact head until the slabs failed. The first crack damage and failure damage on the slabs were determined, and the data obtained in both cases were analyzed. It has been determined which number of falls caused the first crack damage and failure damage to the slabs. The acceleration data of the slabs with respect to time and the deflection values with respect to time were recorded in the experiment. The input energies of the slabs were evaluated according to the first crack damage and failure damage. As a result, as the fiber content in the slabs increases, the energy absorption capacity increases. The input energy of the fiber-doped and reinforced concrete slabs reached 2094 joules in the event of failure damage and absorbed about 2 times more energy than the non-fiber and reinforced concrete slabs.

Keywords: impact load, reactive powder concrete slab, reactive powder reinforced concrete slab, steel slag, industrial fiber, waste fiber

1. Wprowadzenie

Obciążenia udarowe i impulsowe, takie jak te spowodowane przez uderzenia pocisków i samolotów w obiekty jądrowe, pojazdy lub statki zderzające się z budynkami, mostami lub konstrukcjami morskimi, lub przez fale wybuchowe na schronach cywilnych i wojskowych, uderzenia fal na konstrukcjach portowych itp.,

1. Introduction

Impact and impulsive loads, such as those caused by missile and aircraft impact on nuclear containments, vehicles or ships in collision with buildings, bridges or offshore structures, or by blast waves on civilian and military shelters, wave slamming on harbor structures etc., play an increasingly more important role in civil

odgrywają coraz ważniejszą rolę w inżynierii lądowej (1). Beton ultra wysokowartościowy [UWBC] jest ograniczony do betonu, który ma minimalną wytrzymałość na ściskanie 150 MPa z określonymi wymaganiami dotyczącymi trwałości, rozciągliwości i wytrzymałości. Włókna są zazwyczaj stosowane, aby uzyskać wymagane właściwości (2). UWBC to rodzaj betonu odpowiedni do stosowania w budowie konstrukcji wojskowych, jądrowych i przemysłowych z dużymi obciążeniami stałymi, ponieważ jest to beton z drobnym kruszywem, łatwy do kształtowania podczas wlewania do form w zastosowaniach prefabrykowanych i szybko zyskujący na wytrzymałości w młodym wieku. Bardzo ważne jest, aby dynamiczne obciążenia, które mogą wystąpić w przypadku wypadku lub wybuchu w bardzo krótkim czasie, były przyjmowane przez konstrukcję, a także występowało tłumienie energii. Zachowanie UWBC lub betonów z proszków reaktywnych [BPR] po obciążeniu uderzeniowym jest nieznane i nadal jest w trakcie badań. Badacze z Uniwersytetu Michigan w Ann Arbor, we współpracy z U.S. Army Engineer Research and Development Center [ERDC] w Vicksburg, MS, niedawno opracowali nowy kompozyt cementowy wzmacniany włóknem, nazywany betonem o dużej wytrzymałości i gęstości [WWG] (3). WWG ma wytrzymałość na ściskanie większą niż 150 MPa i ciągliwość większą niż 3% (3). UWBC o nazwie Cor-Tuf, z wytrzymałością na ściskanie po 90 dniach wynoszącą 237 MPa, został opracowany przez badaczy z U.S. Army Engineer Research and Development Center [ERDC] (4). Ranade i in. (5) porównali odporność na obciążenie uderzeniowe płyty WWG z dodatkiem włókna polietylenowego w ilości 2% objętościowo oraz płyty betonowej Cor-Tuf z dodatkiem włókna stalowego z haczykami w ilości 3,26% objętościowo. Płyta WWG wykonana była z betonu o wytrzymałości na ściskanie 166 MPa zać płyta betonowa Cor-Tuf wykonana była z betonu o wytrzymałości na ściskanie 201 MPa. Podczas gdy płyty WWG z włóknem polietylenowym wykazują ciągliwe zachowanie przy zginaniu z dobrze rozmieszczonymi wieloma drobnymi pęknięciami, płyty Cor-Tuf z włóknem stalowym z haczykami wykazują niejako kruche zachowanie przy zginaniu i ścinaniu, towarzyszące dużym, zlokalizowanym pęknięciom i nadmiernemu odpryskiwaniu.

Adnan i Kamil (6) swobodnie upuścili 5-kilogramową stalową kulę z wysokości 120 cm na trzy płyty BPR bez włókien o grubości 80 mm, 60 mm i 40 mm. Stwierdzono, że zwiększenie grubości płyty o 50% zwiększa jej zdolność do przenoszenia obciążenia uderzeniowego o 17,8% i statyczną zdolność przenoszenia obciążenia o 165,63%, a zwiększenie grubości płyty o 100% zwiększa zdolność do przenoszenia obciążenia uderzeniowego o 24,4% i statyczną zdolność przenoszenia obciążenia o 275%.

Misha i Sharma (7) wyprodukowali płyty z ultra wysokowartościowego betonu wzmacnianego włóknem [UHPFRC], używając dwóch różnych mikrowłókien o średnicy 0,20 mm i długości 6 mm oraz 13 mm w ilościach 0%, 2%, 3%, 4%, 6%, 8% i 10%. W doświadczeniu stalowy blok o masie 5,25 kg został upuszczony na płyty UHPFRC z wysokości 500 mm; zastosowano obciążenie uderzeniowe. Płyty UHPFRC zawierające 8% włókien objętościowo wykazały najlepsze właściwości wytrzymałościowe i ciągliwości.

engineering (1). Ultra high performance concretes [UHPCs] are limited to concrete that has a minimum specified compressive strength of 150 MPa with specified durability tensile ductility and toughness requirements; fibers are generally included to achieve specified requirements (2). UHPC is a type of concrete that is suitable for use in the construction of military structures, nuclear structures and industrial structures with high dead loads because it is a fine aggregate concrete, easy to shape when poured into molds in pre-cast applications, and fast gaining strength at early ages. It is of great importance that the dynamic loads that will occur in the event of an accident or explosion in a very short period of time are met by the structure, and energy damping is performed. The behavior of UHPC or reactive powder concretes [RPCs] after impact loading is unknown and is still under investigation today. Researchers at the University of Michigan, Ann Arbor, in collaboration with the U.S. Army Engineer Research and Development Center [ERDC], Vicksburg, MS, have recently developed a new fiber-reinforced cementitious composite called high-strength, high-density concrete [HSHDC] (3). HSHDC has a compressive strength greater than 150 MPa and a tensile ductility greater than 3% (3). The UHPC named Cor-Tuf, with a 90-day compressive strength of 237 MPa, was developed by researchers at the U.S. Army Engineer Research and Development Center [ERDC] (4). Ranade et al. (5) compared the impact load resistances of the HSHDC slab with polyethylene fiber additive at a rate of 2% by volume and the Cor-Tuf concrete slab with hooked steel fiber additive at a rate of 3.26% by volume. HSHDC slab made of concrete with a compressive strength of 166 MPa and the Cor-Tuf concrete slab made of concrete with a compressive strength of 201 MPa were compared. While the HSHDC with polyethylene fiber slabs exhibit ductile flexural behavior with well-distributed multiple fine cracks, the Cor-Tuf with Hook steel fiber slabs exhibit quasi-brittle flexural and shear failures accompanied by large localized cracks and excessive spalling.

Adnan and Kamil (6) freely dropped a 5 kg steel ball from a height of 120 cm onto three fibreless RPC slabs of 80 mm, 60 mm and 40 mm thickness. It was found that increasing the slab thickness by 50% increased the impact loading capacity by 17.8% and the static loading capacity by 165.63%, and increasing the slab thickness by 100% increased the impact loading capacity by 24.4% and the static loading capacity by 275%.

Misha and Sharma (7) produced Ultra-high performance fiber-reinforced concrete [UHPFRC] slabs using two different micro fibers with a diameter of 0.20 mm and a length of 6 mm and 13 mm at the rates of 0%, 2%, 3%, 4%, 6%, 8% and 10%. In the experiment, a solid steel block with a mass of 5.25 kg was dropped onto the UHPFRC slabs from a height of 500 mm and an impact load was applied. UHPFRC slabs containing 8% fiber volume showed the best strength and ductility properties.

Othman and Marzouk (8,9) said that the total impact energy of UHPFRC plate containing 3% fibers was found to be double the capacity of UHPFRC plate containing 2% fibers and 18 times the capacity of normal strength concrete plate.

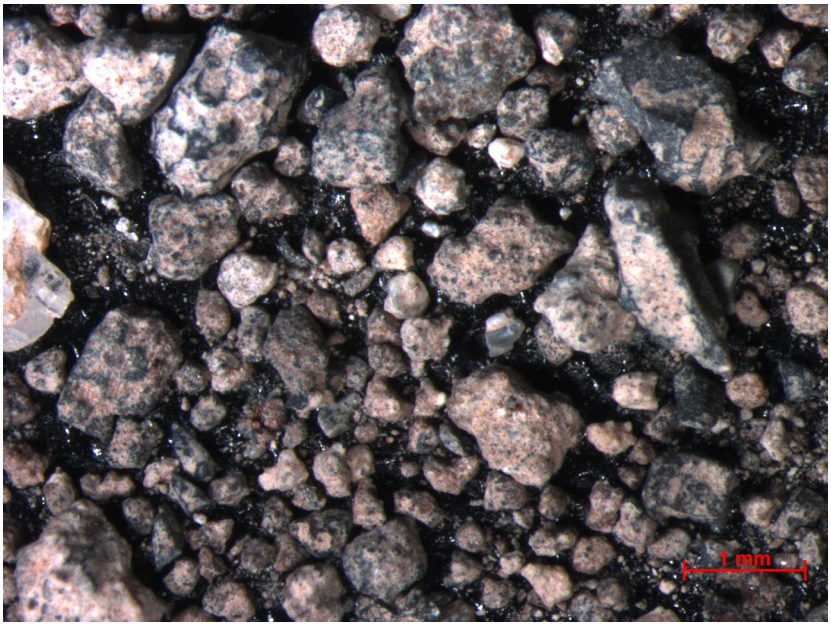
Othman i Marzouk (8,9) stwierdzili, że całkowita zdolność pochłaniania energii uderzenia płyty UHPFRC zawierającej 3% włókien była dwukrotnie większa niż zdolność płyty UHPFRC zawierającej 2% włókien i 18 razy większa niż zdolność płyty z betonu o normalnej wytrzymałości.

2. Badania doświadczalne

Celem tego badania jest wyprodukowanie zrównoważonego betonu z proszków reaktywnych [WBFRC] poprzez zastąpienie SS cementem CEM I 52.5 N oraz zbadanie zachowania dynamicznego płyt betonowych WBFRC i płyt z betonu zbrojonego pod obciążeniem uderzeniowym.

2.1. Materiały

Do produkcji WBFRC wykorzystano: cement CEM I 52.5 N, SS, kruszywo kwarcowe [QA], SF, superplastyfikator, wodę, włókno przemysłowe i włókno odpadowe. W badaniach użyto niemagnetycznego żużla stalowniczego [SS] o uziarnieniu 0-10 mm z pieca tlenowego huty żelaza i stali Kardemir Karabük w Turcji [rys. 1]. SS spełnia normę TS-EN 13242+A1 (10). SS zastępujący cement CEM I 52.5 N został zmielony i przesiany przez sito o wielkości oczka 63 µm.



Rys. 1. Analiza mikroskopowa żużla stalowniczego [0-10 mm]

Fig. 1. Microscopic analysis of steel slag [0-10 mm]

Kruszywo kwarcowe o trzech różnych uziarnieniach: 0-100 µm, 100-300 µm i 300-600 µm zostały użyte jako kruszywo drobne. SF to produkt firmy Elkem z Norwegii o kodzie 968-U. Właściwości chemiczne cementu CEM I 52.5 N, SS [0-63 µm], QA i SF są przedstawione w tablicy 1, a właściwości fizyczne w tablicy 2.

Krzywe granulometryczne QA [0-100 µm, 100-300 µm i 300-600 µm] oraz SS [0-10 mm] pokazano na rys. 2.

Dodatkiem superplastyfikującym używanym w eksperymencie był MasterGleniumAce 3460 produkowany przez BASF. W WBFRC użyto 3% włókna przemysłowego i 4% włókna odpadowego objętościowo. Liczba włókien na jednostkę objętości przy zastosowaniu 4% włókna odpadowego i 3% włókna przemysłowego jest mniej więcej taka sama. Jako włókno przemysłowe użyto stalowego włókna wysokowęglowego Dramix Mark OL 6/0.12. Włókno przemysłowe ma średnicę 0,12 mm, długość 6 mm i jego powierzchnia jest pokryta mosiądzem. Jako włókno odpadowe użyto węglowy drut stalowy o średnicy 0,37 mm z odpadów firmy Çokyaşar Rope. Odpadowe druty zostały przycięte na długość 6 mm i przygotowane do użycia. Druty odpadowe są produkowane zgodnie z normą TS EN 10270-1+A1 (11). Struktura geometryczna i właściwości techniczne włókna przemysłowego i włókna odpadowego są podane na rys. 3 i w tablicy 3.

Do płyt z betonu zbrojonego użyto zbrojenia z prętów żebrowanych B500A Q o średnicy 6 mm, produkowanego przez firmę Ayes Çelik i zgodnego z normą TS EN ISO 15630-1 (12). Właściwości mechaniczne zbrojenia z prętów żebrowanych typu B500A Q188/188 są podane w tablicy 4.

Tablica 1 / Table 1

CHEMICAL COMPOSITION OF CEM I 52.5 N, SS, QA AND SF [%]

SKŁAD CHEMICZNY CEM I 52,5N, ŻUŻLA STALOWNICZEGO, KRUSZYWA KWARCOWEGO ORAZ PYŁU KRZEMIONKOWEGO

	CEM I 52.5 N	SS [0-63 µm]	QA	SF
SiO_2	20.4	12.25	99.50	96
Al_2O_3	4.53	3.23	0.01	0.70
Fe_2O_3	3.81	12.40	0.01	0.25
CaO	64.51	47.19	-	0.50
MgO	1.36	5.70	-	0.60
SO_3	2.50	1.34	-	0.50
Cl-	0.0064	-	-	0.10
Na_2O	-	0.05	-	0.25
P_2O_5	-	0.54	-	0.10
TiO_2	-	0.34	0.07	-
C	-	-	-	1.5
K_2O	-	0.02	-	0.85
Cr_2O_3	-	0.05	-	-
Mn_3O_4	-	4.04	-	-
V_2O_5	-	0.32	-	-
SrO	-	0.01	-	-
ZnO	-	0.00	-	-
BaO	-	0.03	-	-
CuO	-	0.00	-	-
Na_2O+0,658 K_2O	0.46	-	0.37	-
Straty prażenia Loss on ignition	1.63	-	0.40	1.50
Pozostałość nierozpuszczalna Insoluble residue	0.31	-	-	-

Tablica 2 / Table 2

WŁAŚCIWOŚCI FIZYCZNE CEMENTU CEM I 52,5N, ŻUŻLA STALOWNICZEGO, KRUSZYWA KWARCOWEGO ORAZ PYŁU KRZEMIONKOWEGO

PHYSICAL PROPERTIES OF CEM I 52.5 N, SS, QA AND SF (%)

	CEM I 52.5 N	SS	QA [0-100 μm]	QA [100-300 **μm**]	QA [300-600 μm]	SF
Color	Szary / Grey	Brązowy Brown	Biały / White	Biały / White	Biały / White	Szary Grey
Gęstość / Density, g/cm^3	3.20	2.89	2.70	2.61	2.61	2.26
Wodożądność / Water demand, %	29.6	-	-	-	-	-
Czas początku wiązania / Initial setting time, min	125	-	-	-	-	-
Czas końca wiązania / Final setting time, min	150	-	-	-	-	-
Stałość objętości / Soundness, mm	1	-	-	-	-	-
Powierzchnia właściwa / Specific surface, cm^2/g	3783	1274	2142	219	81	200000
WIlgotność / Moisture content, %	-	2.09	0.08	0.067	0.036	-

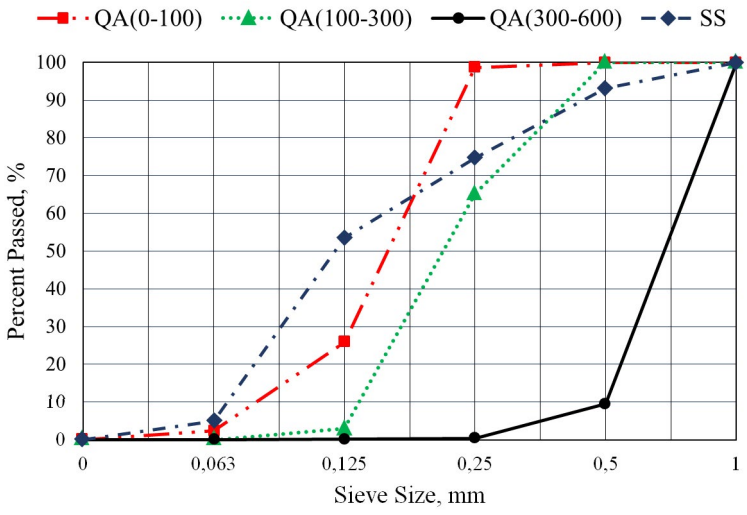
2.2. Metody

2.2.1. Mieszanki WBFRC bez włókien

Składy mieszanek WBFRC bez włókien są podane w tablicy 5. SS został zmielony i przesiany przez sito o wielkości 63 μm i użyty w stosunku 0% [SS0], 10% [SS10], 20% [SS20] i 30% [SS30] zamiast cementu CEM I 52.5 N. Przy obliczaniu składu mieszanki kruszyw wybrano stosunek masy kruszyw podobny do tych użytych w badaniu Metina i in. (13). QA o wielkości 0-100 μm w stosunku 42%, QA 100-300 μm w stosunku 29% i QA 300-600 μm w stosunku 29% użyto w mieszance WBFRC bez włókien. Próbki WBFRC bez włókien były poddane obróbce niskoprężnej w temperaturze 90°C przez trzy dni, a następnie utwardzane w wodzie w temperaturze 20°C przez 7 i 56 dni. Wytrzymałość na ściskanie zbadano dla każdej z mieszanek dla trzech próbek o rozmiarach 100x100x100 mm (14).

2.2.2. Mieszanki WBFRC

Największą wytrzymałości na ściskanie w mieszankach WBFRC bez włókien uzyskano przy użyciu SS o wielkości 63 μm w ilości 10% zamiast cementu CEM I 52.5 N. Z tego powodu mieszanka



Rys. 2. Uziarnienie kruszyw i żużla stalowniczego [0-10 mm]

Fig. 2. Aggregates and SS [0-10 mm] grading

2. Experimental

The aim of this study is to produce sustainable reactive powder concrete [SRPC] by substituting SS into CEM I 52.5 N cement and to investigate the dynamic behavior of SRPC concrete and reinforced concrete slabs under the impact load.

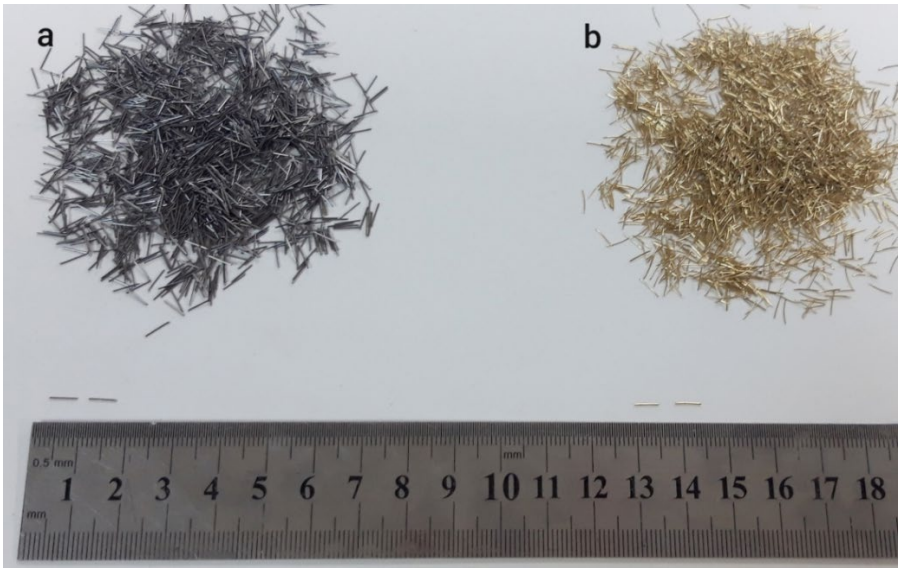
2.1. Materials

CEM I 52.5 N cement, SS, quartz aggregates [QAs], SF, super-plasticizer, water, industrial fiber and waste fiber were used in SRPC. Non-magnetic 0-10 mm SS from the basic oxygen furnace of Kardemir Karabük Iron and Steel Factory in Turkey was used in the experiment [Fig. 1]. The SS conforms to TS-EN 13242+A1 Standard (10). The SS to be substituted for CEM I 52.5 N cement was ground and sieved through a 63 μm sieve.

QA in three different sizes: 0-100 μm, 100-300 μm and 300-600 μm were used as fine aggregates. SF is a product of Elkem company in Norway with the code 968-U. The chemical properties of CEM I 52.5 N cement, SS [0-63 μm], QA and SF are shown in Table 1, and the physical properties are shown in Table 2.

Granulometry curves of QAs [0-100 μm, 100-300 μm and 300-600 μm] and SS [0-10 mm] are given in Fig. 2.

MasterGleniumAce 3460 admixture produced by BASF was used as a superplasticizer in the experiment. In SRPC, 3% industrial fiber and 4% waste fiber by volume were used. The number of fibers per unit volume of 4% waste fiber and 3% industrial fiber is approximately the same. Dramix Mark OL 6/0.12 high carbon steel fiber was used as industrial fiber. The industrial fiber has a diameter of 0.12 mm, a length of 6 mm and its surface is covered with brass. High carbon steel wire with a diameter of 0.37 mm was used as waste fiber from Çokyaşar Rope Company waste. The waste wires were cut to a length of 6 mm and made ready for use. Waste wires are produced in accordance with TS EN 10270-1+A1 Standard (11). The geometrical structure and technical properties of industrial fiber and waste fiber are given in Fig. 3 and Table 3.



Rys. 3. (a) Włókna odpadowe, (b) włókna przemysłowe

Fig. 3. (a) Waste fiber, (b) Industrial fiber

SS10 została użyta jako mieszanka referencyjna 2 w mieszankach WBFRC. Próbki referencyjne 1 i 2 zostały wyprodukowane z WBFRC bez dodatków włókien, mieszanka N1 z dodatkiem 3% włókna przemysłowego, a mieszanka N2 z dodatkiem 4% włókna odpadowego. Ze względu na to, że średnica włókna odpadowego jest większa niż średnica włókna przemysłowego, liczba włókien odpadowych na jednostkę objętości jest mniejsza. Liczba włókien na jednostkę objętości według stosunku włókien i mieszanki WBFRC jest podana w tablicy 6. Próbki WBFRC były poddane obróbce parowej w temperaturze 90°C przez trzy dni, a następnie utwardzane wodą w temperaturze 20°C przez 28 dni. Trzy próbki o wymiarach 100 x 100 x 100 mm z każdej mieszanki zostały zbadane pod kątem wytrzymałości na ściskanie, a jedna belka o wymiarach 50×50×300 mm została poddana w teście zginania trójpunktowego (14,15).

Tablica 3 / Table 3

WŁAŚCIWOŚCI TECHNICZNE WŁÓKIEN STALOWYCH

TECHNICAL PROPERTIES OF THE STEEL FIBERS

Rodzaj włókien / Fiber Type	Długość / Lenght [L], mm	Średnica / Diameter [d], mm	Smukłość / Aspect ratio [L/d]	Wytrzymałość na rozciąganie Tensile strength, MPa
Włókna przemysłowe Industrial fiber	6	0.12	50	2600
Włókna odpadowe Waste fiber	6	0.37	16.22	1912

2.2.3. Płyty zbrojone i niezbrojone

W badaniu wyprodukowano dwie płyty WBFRC i dwie płyty z betonu zbrojonego WBFRC o wymiarach 50 × 50 × 5 cm. Charakterystyka konstrukcyjna płyt WBFRC jest przedstawiona w tabeli 7, a rys. 4 pokazuje obraz odlewania płyty z betonu zbrojonego WBFRC. Głębokość pokrywy betonowej wynosiła 3 cm, a grubość samego betonu 5 cm. Wszystkie płyty były poddane obróbce parowej w temperaturze 90 °C przez trzy dni, a następnie twardniejące

B500A Q-type ribbed steel mesh reinforcement with a diameter of 6 mm, produced by Ayes Çelik Company and in accordance with TS EN ISO 15630-1 standard, was used in the reinforced concrete slabs (12). The mechanical properties of B500A Q188/188-type ribbed steel mesh reinforcement are given in Table 4.

2.2. Methods

2.2.1. Non-fibrous SRPC mixtures

The material components of the non-fibrous SRPC mixtures are given in Table 5. SS was ground and sieved through 63 µm size sieve and used in the ratio of 0%[(SS0], 10% [SS10], 20% [SS20] and 30% [SS30] instead of CEM I 52.5 N cement. When calculating the aggregate mix ratio, an aggregate mix ratio similar to the aggregate mix ratio in the study by Metin et al. was selected (13). 0-100 µm QA with a ratio of 42%, 100-300 µm QA with a ratio of 29% and 300-600 µm QA with a ratio of 29% were used in the non-fibrous SRPC mixture. Non-fibrous SRPC specimens were steam-cured at 90°C for three days and then water-cured at 20°C for 7 and 56 days. Three samples produced from each mixture with a size of 100 x100x100 mm were tested for compressive strength (14).

2.2.2. SRPC mixtures

The highest compressive strength value in non-fibrous SRPC mixtures was obtained by using SS with a size of 63 µm at a rate of 10% instead of CEM I 52.5 N cement. For this reason, the SS10 mixture was used as the Reference 2 mixture in SRPC mixtures. Reference 1 and Reference 2 samples were produced from SRPC without fiber additives, N1 sample with 3% industrial fiber additive, and N2 sample with 4% waste fiber additive. Since the waste fiber

Tablica 4 / Table 4

WŁAŚCIWOŚCI MECHANICZNE ZBROJENIA Z ŻEBROWANEJ SIATKI STALOWEJ TYPU B500A Q

MECHANICAL PROPERTIES OF B500A Q-TYPE RIBBED STEEL MESH REINFORCEMENT

Wytrzymałość na rozciąganie Tensile strength, MPa	Wydłużenie / Elongation, %
Min. 637	Min 0.47
Max. 646	Max. 0.65

Tablica 5 / Table 5

SKŁAD NIEZBROJONEGO BETONU SRPC

COMPOSITION OF NON-FIBROUS SRPC MIXTURES

Składnik / Compound	Zawartość / Content kg/m^3			
	Ref.1	SS10	SS20	SS30
Cement	900	810	720	630
SS[0-63 μm]	-	90	180	270
SF	270	270	270	270
Woda / Water	216	216	216	216
Upłynniacz / Superplasticizer	27	27	27	27
QA(0-100 μm)	399	399	399	399
QA(100-300 **μm**)	276	276	276	276
QA(300-600 **μm**)	276	276	276	276
w/c	0.24			
w/s / w/b	0.18			

Tablica 6 / Table 6

SKŁAD MIESZANEK SRPC

COMPOSITION OF SRPC MIXTURES

Składnik / Compound	Zawartość / Content kg/m^3			
	Ref. 1	Ref.2	N1	N2
Cement	900	810	785.7	777.6
SS	-	90	87.3	86.4
SF	270	270	262	259
Woda / Water	216	216	210	208
Upłynniacz / Superplasticizer	27	27	27	26
QA (0-100 mm)	399	399	387	384
QA (100-300 mm)	276	276	267	265
QA (300-600 mm)	276	276	267	265
Włókna stalowe / Steel fiber	-	-	234	312
Liczba włókien w mieszance Number of steel fiber in SRPC mixtures, 1/m^3	-	-	68182	65917
w/c		0.24		
w/s / w/b		0.18		

w wodzie w temperaturze 20 °C przez 25 dni. Płyty były suszone w naturalnych warunkach atmosferycznych przez trzy dni.

2.2.4. Próba udarności

Stanowisko pomiarowe przygotowano w oparciu o informacje publikowane w literaturze (16,17). W teście powtarzającego się

diameter is larger than the industrial fiber diameter, the number of waste fibers per unit volume is less for the same amount of fiber. The number of fibers per unit volume according to the fiber ratio and the mixtures of SRPC is given in Table 6. SRPC specimens were steam-cured at 90°C for three days and then water-cured at 20°C for 28 days. Three 100 x 100 x 100 mm specimens of each mix were tested for compressive strength, and one 50×50×300 mm prismatic three-point bending test was tested (14,15).

2.2.3. Concrete and reinforced concrete slabs

In the study, two SRPC slabs and two reinforced SRPC slabs with dimensions of 50 × 50 × 5 cm were manufactured. The design characteristics of the SRPC slabs are shown in Table 7. Fig. 4 shows an image of the SRPC reinforced concrete slab casting. The depth of concrete cover thickness was 3 cm and the concrete thickness was 5 cm. All slabs were steam-cured at 90°C for three days and then water-cured at 20 °C for 25 days. The slabs were dried under natural weather conditions for three days.

2.2.4. Impact load test

Different experimental setups in the literature were taken as an example for the drop-weight test experimental setup designed by the authors (16,17). In the repeated impact load test, impact is applied to the slab without changing the weight of the impact drop weight until the slabs failure damage. The data obtained at the moment of the first crack on the slabs and the failure damage on the slabs were analyzed. In impact tests, the impact load was applied by the free fall of a drop weight from 2 m and 3 m height [Fig. 5].

Impact loads were applied to the center of slabs. The free fall of a drop weight with a size of 10 × 10 × 42 cm and a mass of 13.34 kg was used in the experiment. A rubber pad of 10 x 10 x 0.4 was is attached under the free fall weight for the distributing impact load and the preventing local fracture. The impact table was designed with dimensions of 55 x 55 x 47 cm and its interior was empty for truly measure slabs's maximum deflection. The steel impact table was fixed to steel on the floor by welding. SRPC slabs are fixed at all four corners on impact table by using joiner clamps. The accelerations occurred in SRPC slabs due to impact loading were measured from two different points, which are at the left and right of the axis of symmetry, using piezotronics accelerometers [Fig. 6].

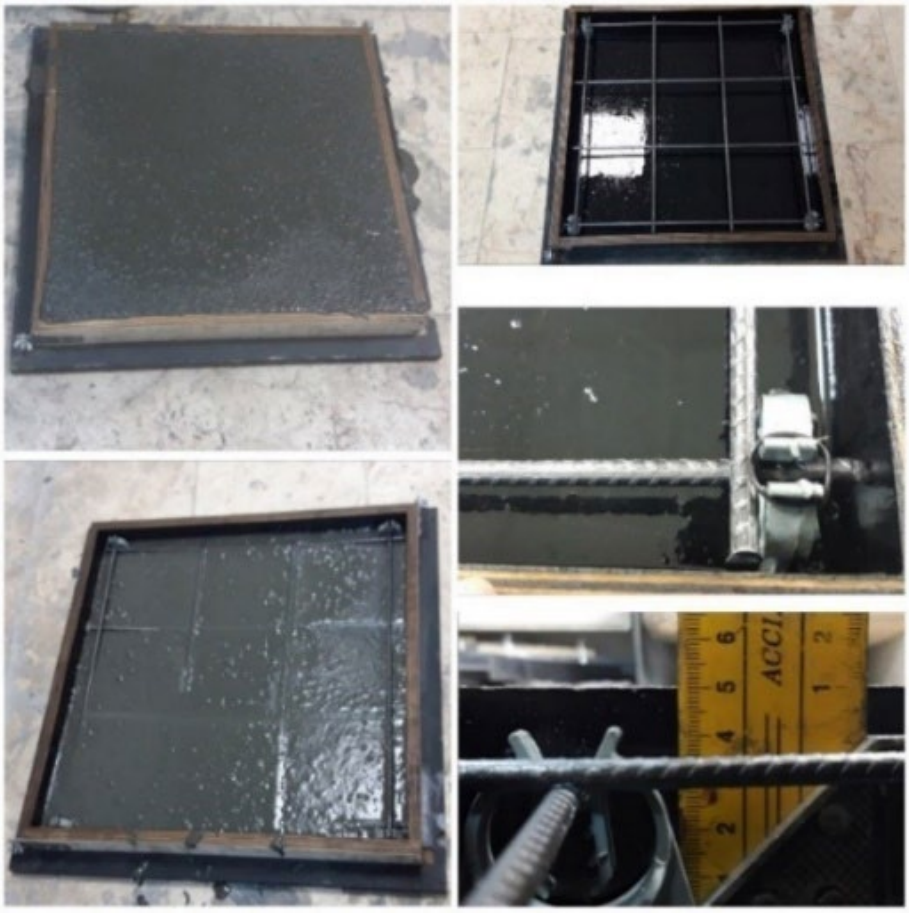
Two PCB Piezotronics 350C04 model accelerometers, of which the measurement range was ±5,000 g, were used for acceleration measurements. The brass apparatus was used to accurately me-

Tablica 7 / Table 7

ZAŁOŻENIA PROJEKTOWE PŁYT BETONOWYCH

THE DESIGN CHARACTERISTICS OF THE SLABS

Płyta / Slab	Masa płyty Slab mass, kg	Rodzaj mieszanki SRPC mix	Udział włókien Fiber ratio, %	Średnica/długość włókien Fiber diameter/length, mm	Siatka zbrojeniowa Mesh reinforcement [B500A]
S1	30.34	N1	3%	0.12/6	-
S2	30.34	N2	4%	0.37/6	-
S3	31.28	N1	3%	0.12/6	Ø6 mm Q188/188
S4	28.80	Ref.2	0%	-	Ø6 mm Q188/188

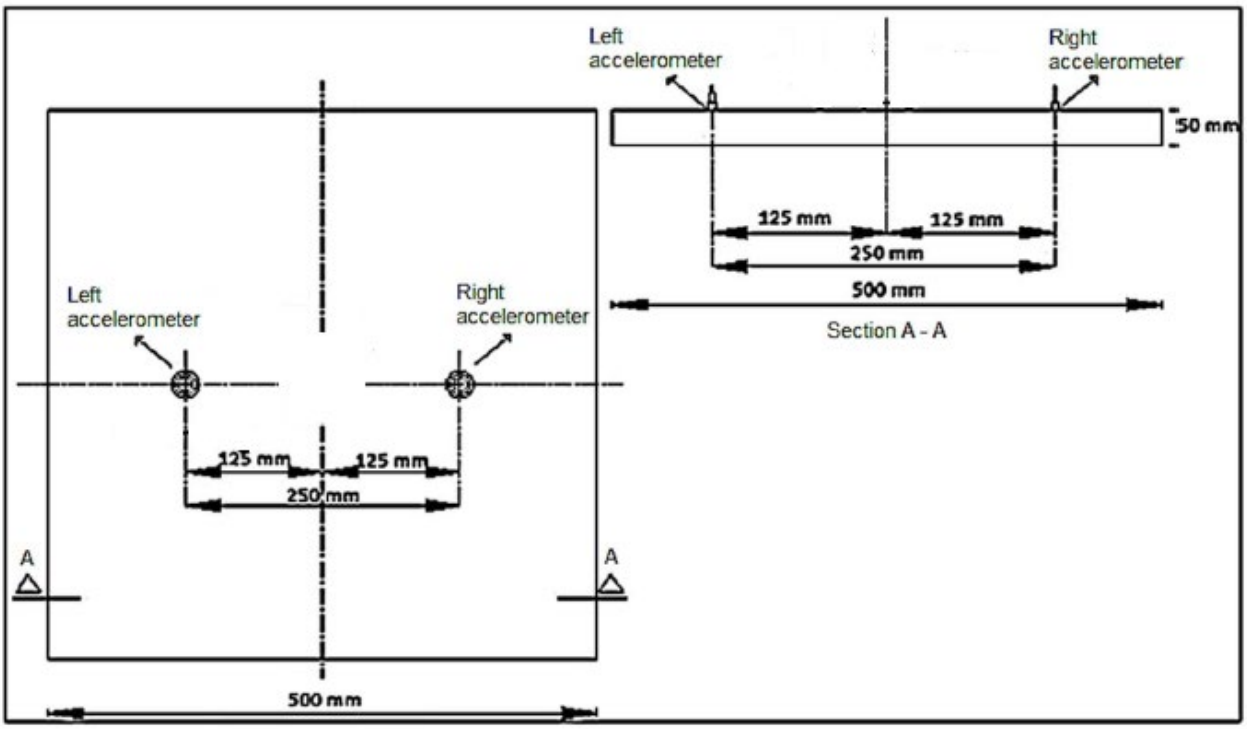


Rys. 4. Formowanie zbrojonych płyt SRPC

Fig 4. Reinforced SRPC slab casting.

Rys. 5. Stanowisko badawcze

Fig. 5. Test setup photo



Rys. 6.Położenie lewego i prawego akcelerometru

Fig. 6. Positions of left and right accelerometers

obciążenia udarowego, zastosowano uderzenia w płytę bez zmiany masy upadającego ciężaru aż do zniszczenia płyt. Dane uzyskane w momencie pierwszego pęknięcia na płytach oraz zniszczenia płyt zostały przeanalizowane. W testach udarności obciążenie uderzeniowe było stosowane przez swobodny upadek ciężaru z wysokości 2 m i 3 m [rys. 5].

Uderzenia wykonywano w środek płyt. W badaniu użyto swobodnie spadającego ciężaru o wymiarach 10 × 10 × 42 cm i masie 13,34 kg. Pod ciężarem swobodnie spadającym umieszczono gumową podkładkę o wymiarach 10 x 10 x 0,4 w celu rozłożenia obciążenia udarowego i zapobiegania lokalnemu zarysowaniu. Stół uderzeniowy miał wymiary 55 x 55 x 47 cm, a jego wnętrze było puste, aby prawidłowo mierzyć maksymalne ugięcie płyt. Stalowy stół uderzeniowy został przymocowany do podłogi stalowej przez spawanie. Płyty WBFRC były mocowane we wszystkich czterech rogach na stole uderzeniowym za pomocą ścisków stolarskich. Przyspieszenia występujące w płytach WBFRC z powodu obciążenia uderzeniowego były mierzone z dwóch różnych punktach, po lewej i prawej stronie osi symetrii, za pomocą akcelerometrów Piezotronics [rys. 6].

Do pomiarów przyspieszenia użyto dwóch akcelerometrów PCB Piezotronics model 350C04, których zakres pomiarowy wynosił ±5,000 g. Do dokładnego pomiaru danych przyspieszenia użyto przyrządu z mosiądzu, a akcelerometry były chronione przed uderzeniem przez stalowe nakładki [rys. 7]. Wysokość przyrządu z mosiądzu wynosiła 2,5 cm, średnica walca na dole wynosiła 2 cm, a średnica walca na górze 1,3 cm. Powodem wyboru materiału mosiężnego jest jego szybka transmisja wibracji. Kabel, do którego podłączony był akcelerometr w eksperymencie, to specjalny kabel typu quaxel, który izoluje szumy. Stalowe nakładki o grubości 1 cm były zamknięte na górnej części akcelerometru i przymocowane do płyty śrubą, zapobiegając uszkodzeniu akcelerometrów przez głowicę uderzeniową.

Przesunięcia występujące w płytach pod wpływem obciążenia uderzeniowego były mierzone ze środka płyt WBFRC za pomocą lasera Leuze ODS9L2.8/LAK-200-M12. Laser ma dokładność pomiaru 1%. Moduł akwizycji danych National Instrument 9234 i moduł lasera National Instrument 9215 były podłączone do głównego układu National Instrument NICDAQ. Za pomocą programu National Instrument Signal Express 2015, za pomocą komputera uzyskano 250 000 danych z dwóch akcelerometrów i jednego urządzenia laserowego.

2.2.5. Obliczenie siły uderzenia i energii wejściowej

Ze względu na to, że w doświadczeniach nie użyto komórki obciążeniowej dynamicznej, siła F została obliczona przy użyciu drugiego prawa Newtona [1].

$$F = m \cdot a \qquad [1]$$

gdzie:

F – siła netto działająca na płytę

m – masa głowicy uderzeniowej

a – przyspieszenie grawitacyjne

Rys. 7. Pomiar akcelerometrem

Fig. 7. Measurement with accelerometer

asure the acceleration data and accelerometers are protected from impact by steel caps [Fig. 7]. The height of the brass apparatus is 2.5 cm, the diameter of the cylinder at the bottom is 2 cm and the diameter of the cylinder at the top is 1.3 cm. The reason why brass material is preferred is that it transmits vibration quickly. The cable to which the accelerometer is connected in the experiment is a special cable of the quaxel type that isolates noise. Steel covers with a thickness of 1 cm are closed to the upper part of the accelerometer and fixed to the slab with a screw, preventing the impact head from damaging the accelerometers.

The displacements that occurred in slabs with the effect of impact load were measured from the center of SRPC slabs by using Leuze ODS9L2.8/LAK-200-M12 model laser meter. The laser meter has a measurement accuracy of 1%. The National Instrument 9234 data acquisition module and the National Instrument 9215 data laser meter module were connected to the National Instrument NICDAQ the main chassis. Using the National Instrument Signal Express 2015 program, 250,000 data from two accelerometers and one laser measuring device were obtained using a computer.

2.2.5. Impact force and input energy calculation

Since the dynamic load cell was not used in the experiment, the force F was calculated using Newton's second law [1].

$$F = m \cdot a \qquad [1]$$

where;

F – net force acting on the slab

m – mass of the impact head

a – gravitational acceleration

The input energy E was calculated using the gravitational potential energy formula [2].

Energia wejściowa E została obliczona przy użyciu wzoru na energię potencjalną grawitacji [2].

$$E = m \cdot g \cdot h \quad [2]$$

gdzie:

E – energia wejściowa

m – masa głowicy uderzeniowej

g – przyspieszenie grawitacyjne

h – wysokość upadku głowicy uderzeniowej na płytę

3. Wyniki i omówienie

3.1. Mieszanki WBFRC bez włókien

Wyniki średniej wytrzymałości na ściskanie trzech próbek z mieszanki UWBC bez włókien podano w tablicy 8. Gdy cement został zastąpiony przez 10% SS, ta zmiana w składzie mieszanki pozytywnie wpłynęła na wytrzymałość na ściskanie. Zastąpienie 10% SS zwiększa wytrzymałość na ściskanie po 56 dniach o 30% w porównaniu z próbką referencyjną SS0. Zastąpienie cementu w 20% i 30% SS spowodowało gwałtowny spadek wyników średniej wytrzymałości na ściskanie po 7 i 56 dniach. Zgodnie z literaturą, stwierdzono, że obróbka parowa próbek WBFRC pozytywnie wpłynęła na wytrzymałość na ściskanie (13).

3.2. Mieszanki WBFRC

Tablica 9 przedstawia wyniki badań wytrzymałości na ściskanie po 28 dniach, wyniki badań wytrzymałości na zginanie oraz wartości wytrzymałości na rozciąganie mieszanki WBFRC. Zastąpienie 10% cementu żużlem zwiększa wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach o 21% w porównaniu z próbką Ref. 1. Wytrzymałość na ściskanie próbki N1 po 28 dniach wzrosła o 16% w porównaniu z próbką Ref. 2, ale wytrzymałość na ściskanie próbki N2 zmniejszyła się o 7%. Stwierdzono, że dodatek 4% włókien objętościowo zmniejsza urabialność WBFRC. Wykresy obciążenia-ugięcia próbek WBFRC poddanych testowi zginania trójpunktowego przedstawiono na rys. 8. W porównaniu z próbką Ref. 2, wytrzymałość na zginanie próbki N1 była o 80% wyższa, a wytrzymałość na zginanie próbki N2 była o 34% wyższa. Liczby włókien próbek N1 i N2 są zbliżone do siebie. W 1 m3 objętości próbki N1 znajduje się 68182 włókien przemysłowych, a w 1 m3 objętości próbki N2 - 65917 włókien odpadowych. Wytrzymałość na zginanie WBFRC z dodatkiem włókien przemysłowych o średnicy 0,12 mm jest o 34% wyższa niż wytrzymałość na zginanie WBFRC z dodatkiem włókien odpadowych o średnicy 0,37 mm. Gdy w WBFRC używa się mikrowłókien o podobnej liczbie, ale różnych średnicach, wytrzymałość na zginanie wzrasta wraz ze zmniejszaniem się średnicy włókna. Stwierdzono, że zdolność absorpcji energii próbek N1 jest 2,1 razy wyższa niż zdolność absorpcji energii próbek N2.

Tablica 9 / Table 9

WYNIKI BADAŃ PŁYT Z SRPC

TEST RESULTS OF SRPC SERIES

Mieszanka Mixture	Wytrzymałość na ściskanie Compressive strength, MPa	Wytrzymałość na zginanie Flexural strength, MPa	Wiązkość Toughness, N.mm
Ref.1	114.8	21.3	2558
Ref.2	139.0	16.6	1867
N1	160.6	29.8	14553
N2	129.8	22.3	7038

$$E = m \cdot g \cdot h \quad [2]$$

where;

E – input energy

m – mass of the impact head

g – gravitational acceleration

h – height of fall of the impact head on the slab

3. Result and discussions

3.1. Non-fibrous SRPC mixtures

The results of the average compressive strength of three samples from non-fibrous UHPC's mixture are given in Table 8. As shown in Table 8, when the cement was replaced with 10% SS, this change in the composition of the mixture positively affected the compressive strength. 10% SS substitution increases the 56-day compressive strength by 30% compared with the Ref. SS0 sample. The substitution of 20% and 30% SS for cement caused a sharp decrease in the 7 and 56-day average compressive strength results. As in the literature, it was concluded that steam curing of SRPC specimens positively affected the compressive strength (13).

Tablica 8 / Table 8

WYTRZYMAŁOŚĆ NA ŚCISKANIE NIEZBROJONYCH BETONÓW SRPC

COMPRESSIVE STRENGTH TEST RESULTS OF NON-FIBROUS SRPC

Mieszanka Mixture	Wytrzymałość na ściskanie / Compressive strength, MPa	
	7 Dni / Days	56 Dni / Days
Ref. SS0	110.1	118.6
SS10	135.2	154.7
SS20	88.6	83.0
SS30	77.3	80.5

3.2. SRPC Mixtures

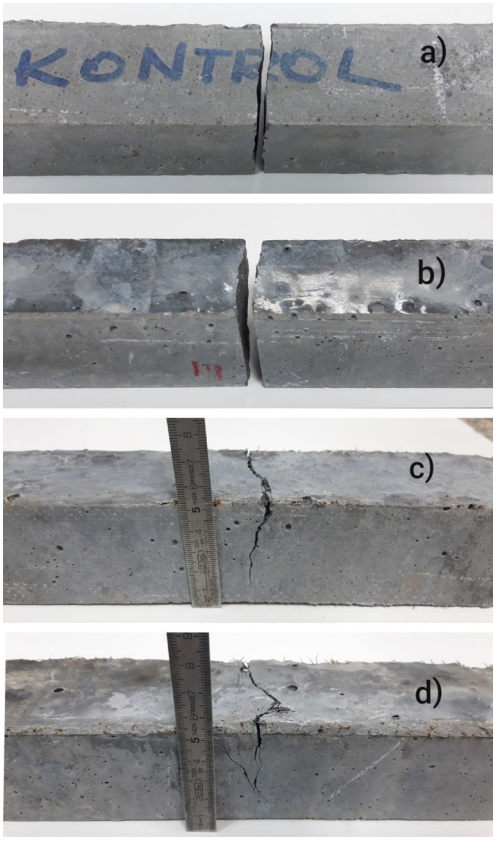
Table 9 shows the 28-day compressive strength test results, flexural strength test results and toughness values of the SRPC mixtures. 10% SS substitution increases the 28-day compressive strength by 21% compared with the Ref.1 sample. The 28-day compressive strength of the N1 specimen increased by 16% compared to the

Rys. 9 pokazuje obrazy WBFRC po trójpunktowym teście wytrzymałości na zginanie. Podczas gdy w betonach bez włókien występuje zarysowanie proste, w betonach z dodatkiem włókien występuje zarysowanie skośne. Dzieje się tak, ponieważ zarysowania powstałe przez efekt łamania oddalają się od ciągliwej struktury w obszarach, gdzie ułożenie włókien jest gęste w WBFRC i przechodzą przez puste części.

3.3. Wyniki badania z obciążeniem udarowym

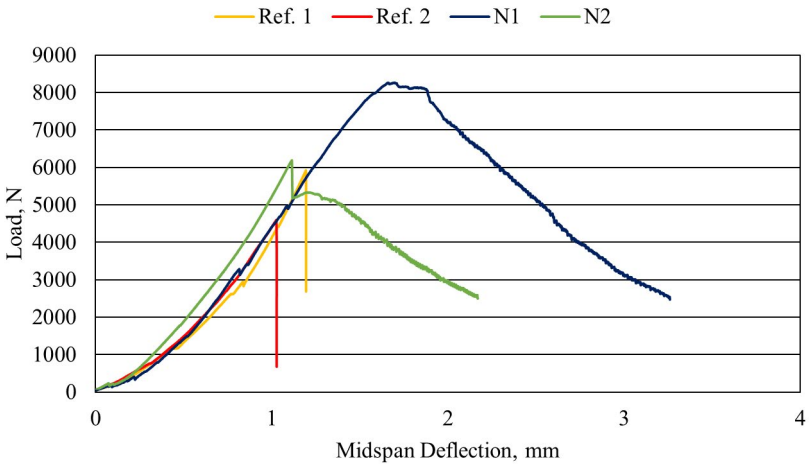
W badaniach udarności obciążenie uderzeniowe było zaaplikowane przez swobodny upadek ciężaru z wysokości 2 m i 3 m. Podczas doświadczeń badano uszkodzenia niezbrojonych i zbrojonych płyt betonowych, na które zastosowano obciążenie uderzeniowe, a liczba swobodnych upadków ciężaru została określona przy pierwszym zarysowaniu i zniszczeniu. W tablicy 10 podano obciążenia uderzeniowe i energie wejściowe przyłożone do płyt w stanie pierwszego zarysowania i w stanie zniszczenia, a na rys. 10 podano energie wejściowe przyłożone do płyt w stanie pierwszego zarysowania i w stanie zniszczenia.

– Stwierdzono, że z powodu zmniejszenia średnicy włókna w betonie płyty S1, pierwsze zarysowanie wystąpiło przy 4 razy wyższej energii wejściowej niż w płycie S2, a zniszczenie wystąpiło przy 1,7 razy większej energii wejściowej. Cieńsza średnica i większa liczba włókien użytych w płycie S1 zwiększyły zdolność absorpcji energii płyty S1.



Rys. 9. Widok próbek po badaniu wytrzymałości na zginanie

Fig. 9. Samples's cracks after flexural tensile test



Rys. 8. Krzywe siła – odkształcenie dla badanych SRPC

Fig. 8. Load-deflection curves of SRPC

Ref.2 specimen, but the 28-day compressive strength of the N2 specimen decreased by 7%. It has been determined that 4% fiber additive by volume reduces the workability of SRPC. Load-deflection graphs of SRPC samples subjected to three-point bending test in Fig.8. According to Ref. 2 specimen, the flexural strength of specimen N1 was 80% higher, and the flexural strength of specimen N2 was 34% higher. The fiber numbers of the N1 and N2 samples are approximately close to each other. There are 68182 industrial fibers in 1 m3 volume of the N1 sample, and 65917 waste fibers in 1 m3 volume of the N2 sample. The flexural strength of industrial fiber-added SRPCs with a fiber diameter of 0.12 mm is 34% higher than the flexural strength of waste fiber-added SRPCs with a fiber diameter of 0.37 mm. When microfibers of similar numbers and different diameters are used in SRPCs, the flexural strength increases as the fiber diameter becomes thinner. It is concluded that the energy absorption capacity of N1 samples is 2.1 times higher than the energy absorption capacity of N2 samples.

Fig. 9 shows the SRPC images after the three-point flexural strength test. While there is a straight fracture in non-fiber concretes, an inclined fracture occurs in fiber-doped concretes. This is because the cracks formed by the fracturing effect want to move away from the ductile structure in the areas where the fiber additives are dense in the SRPC and move through the hollow parts.

3.3. Impact load experiment results

In impact tests, the impact load was applied by the free fall of a drop weight from 2 m and 3 m height. During the experiment, the damage to the concrete and reinforced concrete slabs to which the impact load was applied was observed during the experiment, and the number from falls of the free fall of a drop was determined in the first crack damage and the failure damage was determined. In Table 10, the impact load and the input energies loaded on the slabs in the first crack damage and in the failure damage states are given, and in Fig. 10 the input energies loaded on the slabs in the first crack damage and in the failure damage states are given.

– It was concluded that due to the thinning of the fiber diameter

Tablica 10 / Table 10

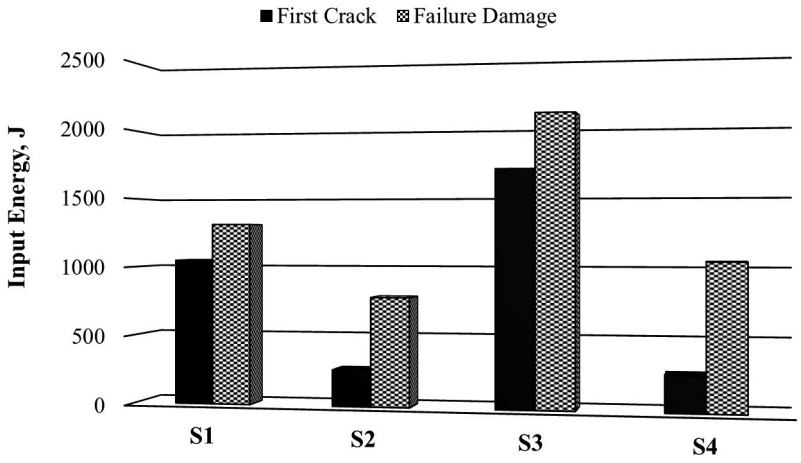
WYNIKI BADANIA WŁAŚCIWOŚCI MECHANICZNYCH

MECHANICAL PROPERTIES OF EXPERIMENT

Liczba uderzeń The number of drop	S1	S2	S3	S4	F_{max}, N	Energia Input energy, J
1	2 m	2 m Pierwsze pęknięcie First crack	2 m	2 m Pierwsze pęknięcie First crack	130.9	262
2	2 m	2 m	2 m	2 m	130.9	524
3	2 m	2 m Zniszczenie Failure damage	2 m	2 m	130.9	785
4	2 m Pierwsze pęknięcie First crack		2 m	2 m Zniszczenie	130.9	1047
5	2 m Zniszczenie Failure damage		2 m		130.9	1309
6			3 m Pierwsze pęknięcie First crack		130.9	1701
7			3 m Zniszczenie Failure damage		130.9	2094

– Płyta S3 zaabsorbowała najwięcej energii - 2094 J i uległa zniszczeniu. Porównując płytę S1 z płytą S3, stwierdzono, że płyta S3 zaabsorbowała o 60% więcej energii dzięki dodaniu zbrojenia z siatki stalowej.
– Porównując energie wejściowe płyt S3 i S4 w stanie zniszczenia, stwierdzono, że dodatek włókien stalowych w płycie S3 zwiększył zdolność absorpcji energii o 100%.

Dane z akcelerometrów prawego i lewego, obliczone dane prędkości oraz dane przemieszczenia, dane przemieszczenia zmierzone w środkowym punkcie płyt są podane w tablicy 11.



Rys. 10. Energia dostarczona do próbek powodujaca pierwsze pęknięcie oraz zniszczenie

Fig.10. Input energy of specimens for first crack and failure damage

Rys. 11 pokazuje wykresy przyspieszenie-czas w stanie pierwszego zarysowania. W przypadku pierwszego zarysowania, maksymalne przyspieszenie płyty S2 było o 77% większe niż płyty S1. Ze względu na to, że przemieszczenie w środkowym punkcie płyty S3 w pierwszych 5 upadkach było zbyt małe, aby można było je zmierzyć, wysokość swobodnego upadku głowicy uderzeniowej została zwiększona z 2 m do 3 m w 6. upadku.

Przyspieszenie płyty S3 zmierzono jako 19195 m/s². Najniższą wartość przyspieszenia zmierzono w płycie S4 i wyniosła ona 5530 m/s².

Wykresy przemieszczenia-czas zmierzone ze środkowego punktu płyt w przypadku pierwszego zarysowania pokazano na rys. 12. Stwierdzono, że przemieszczenie dla płyty S1 wwynosiło 41,78 mm, a dla płyty S2 24,73 mm przy pierwszym zarysowa-

in the concrete of the S1 slab, the first crack damage occurred with 4 times higher input energy than the S2 slab, and it suffered failure damage with 1.7 times higher input energy. The thinner diameter and higher number of fibers used in the S1 slab increased the energy absorption capacity of the S1 slab.

– The S3 slab absorbed the most energy with an input energy of 2094 joule and reached the state of failure damage. When the S1 slab was compared with the S3 slab, it was determined that the S3 slab absorbed 60% more input energy due to the addition of steel mesh reinforcement and resulted in failure damage.

Tablica 11 / Table 11

WYNIKI BADAŃ UDARNOŚCI

THE RESULTS OF THE IMPACT EXPERIMENT

Płyta Slab	Nr uderzenia Drop No.	Lewy akcelerometr Left acceleration, m/s²		Prawy akcelerometr Right acceleration, m/s²		V, m/s²	Przemieszczenie Displacement, mm
		Min.	Max.	Min.	Max.		
S1	1	-11376	8812	-11287	9291	0.41	0
S1	2	-8981	4985	-8890	4361	0.34	0
S1	3	-6960	4554	-6009	6576	0.22	0
S1	4 Pierwsze pęknięcie / First crack	-10430	6863	-4665	3116	0.4	41.78
S1	5 Zniszczenie / Failure damage	-12395	6355	-12395	4321	0.48	20.98
S2	1 Pierwsze pęknięcie / First crack	-12055	8750	-12872	12121	0.46	24.73
S2	2	-12950	7699	-9643	7512	0.49	14.74
S2	3 Zniszczenie / Failure damage	-12827	5899	-10651	5011	0.49	36.59
S3	1	-11033	14072	-10676	8044	0.41	0
S3	2	-9682	7981	-8488	8530	0.32	0
S3	3	-9037	11326	-10786	10056	0.34	0
S3	4	-13656	13977	-11702	9373	0.42	0
S3	5	-10570	10135	-10864	9790	0.4	0
S3	6 Pierwsze pęknięcie / First crack	-11858	10745	-14152	19195	0.54	27.79
S3	7 Zniszczenie / Failure damage	-13820	11027	-18669	13941	0.31	26.83
S4	1 Pierwsze pęknięcie / First crack	-8729	5530	-6093	4565	0.33	1.33
S4	2	-	-	-7600	2512	0.29	0.59
S4	3	-	-	-9890	2604	0.37	1.11
S4	4 Zniszczenie / Failure damage	-	-	-10063	2884	0.39	0.58

V – Prędkość obliczono jako całkę przyśpieszenia względem czasu. Obliczono ją z odległości 12,5 cm od środka płyt. / The integral of the acceleration data according to time is the velocity data found by calculating. It was calculated from a distance of 12.5 cm from the midpoint of the slabs.
Przemieszczenie / Displacement – Wartości przemieszczeń zmierzone miernikiem laserowym od środka płyt. W badaniu wykorzystano lewy akcelerometr w S4.

niu. Wartość przemieszczenia zwiększyła się 1,7 razy w wyniku uzyskania bardziej ciągliwej płyty betonowej poprzez zmniejszenie średnicy włókna i zwiększenie liczby włókien w płytach. Stwierdzono, że przemieszczenie płyty S3 wynosiło 27,79 mm, a płyty S4 1,33 mm w stanie pierwszego zarysowania. W wyniku doświadczenia stwierdzono, że w betonie z włóknami występuje większe przemieszczenie w porównaniu z betonem bez włókien.

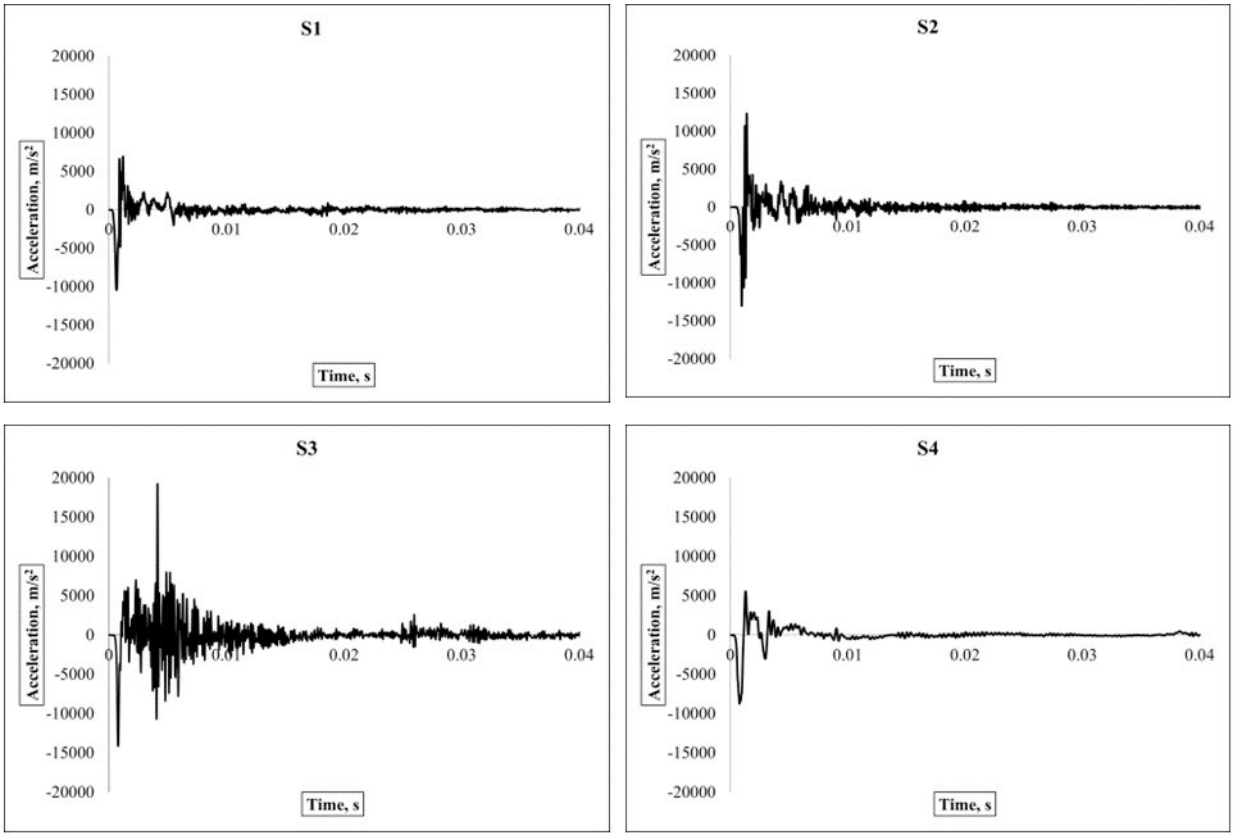
Rys. 13 pokazuje wykresy przyspieszenia-czas w stanie zniszczenia. Stwierdzono, że maksymalne wartości przyspieszenia płyt oraz wytrzymałość na zginanie płyt wzrosły proporcjonalnie. Maksymalna wartość przyspieszenia płyty S1 została zmierzona dając wynik o 8% większy niż maksymalna wartość przyspieszenia płyty S2. Najwyższą maksymalną wartość przyspieszenia zmie-

– When the input energies of the S3 slab and S4 slab in failure damage were compared, it was obtained as a result that the steel fiber additive in the S3 slab increased the energy absorption capacity by 100%.

Right and left accelerometer data, calculated velocity data, calculated displacement data and displacement data measured at the midpoint on the slabs are given in Table 11.

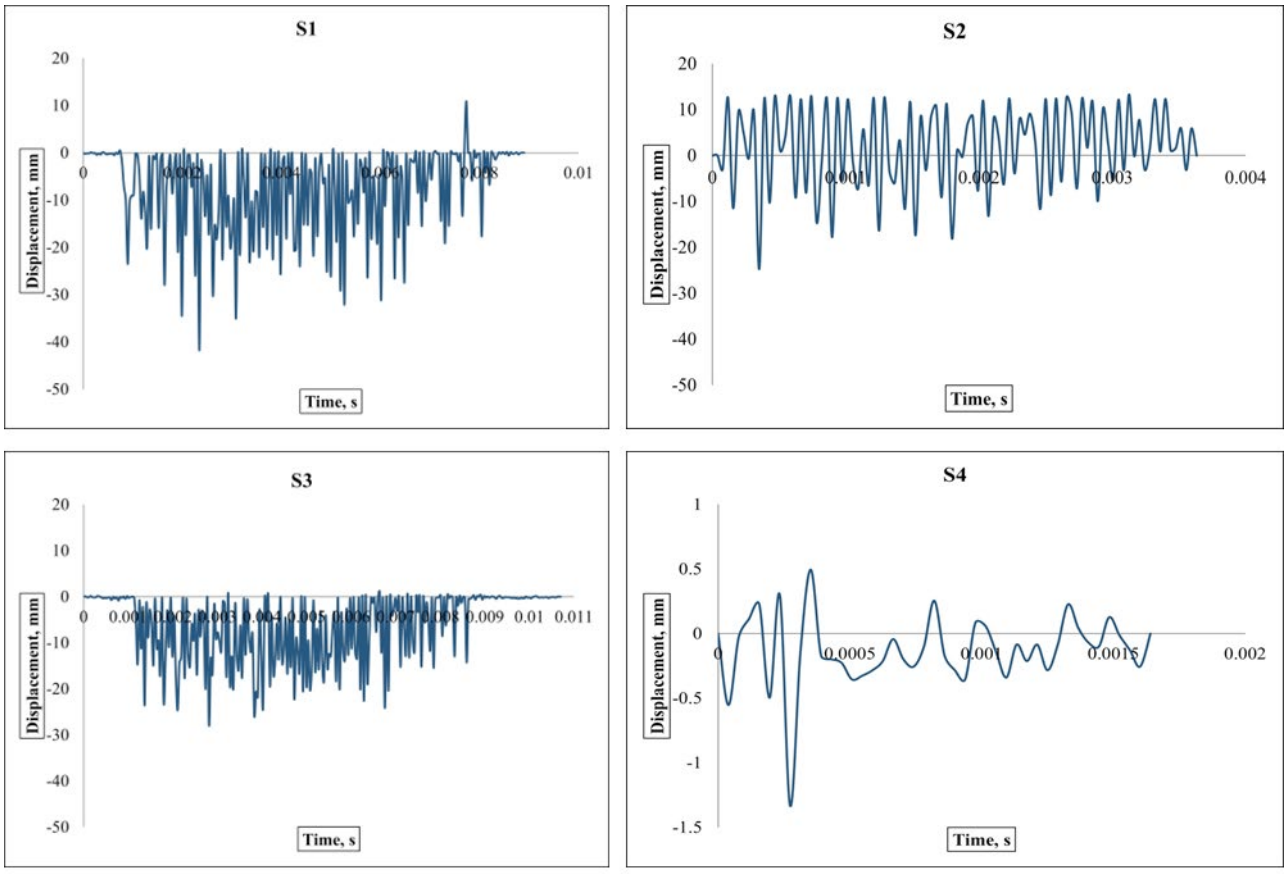
The displacement values measured by a laser meter from the midpoint of the slabs. The left accelerometer on the S4 was disposed in the experiment.

Fig. 11 shows the acceleration-time graphs in the first crack damage condition. In the case of the first crack damage, the maximum



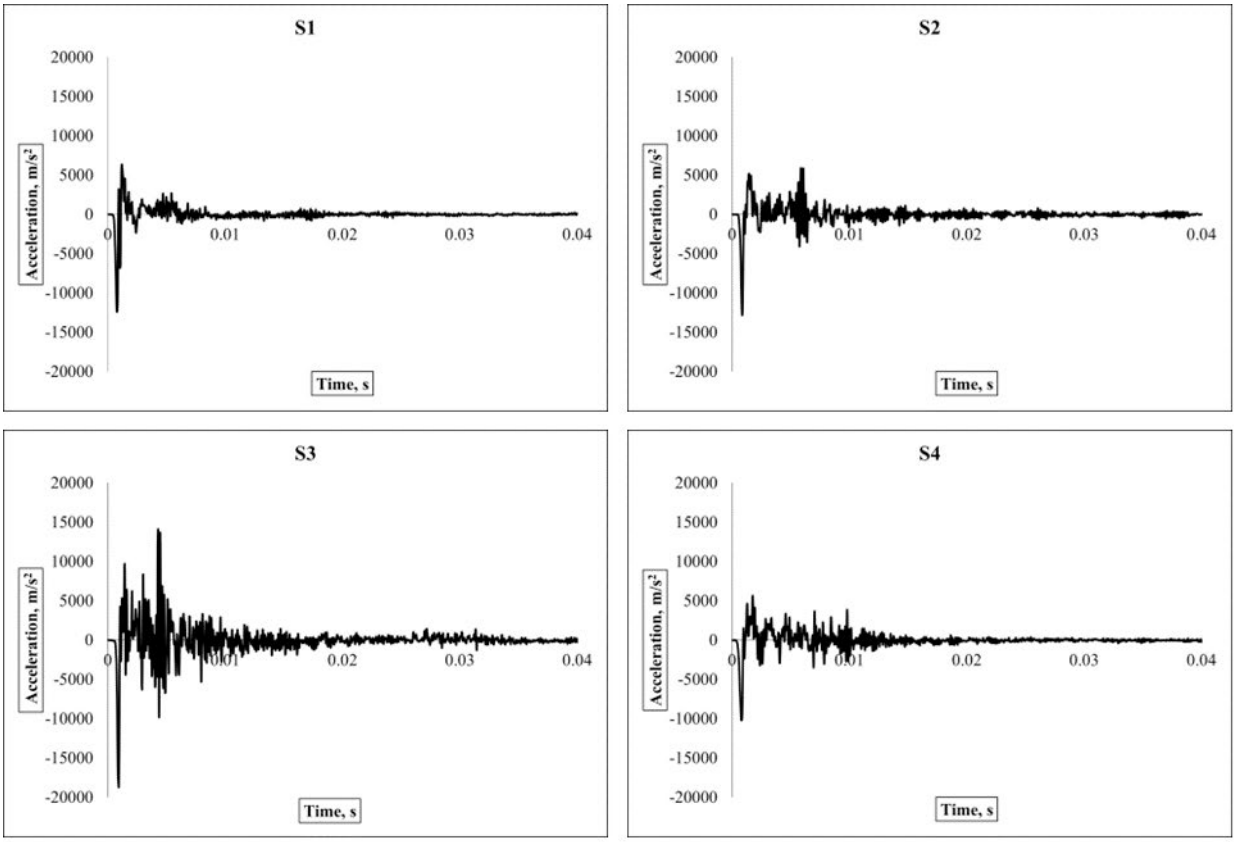
Rys. 11. Wykresy przyspieszenie – czas w czasie pierwszego uderzenia

Fig. 11. Acceleration-time graphs of specimens for first crack damage



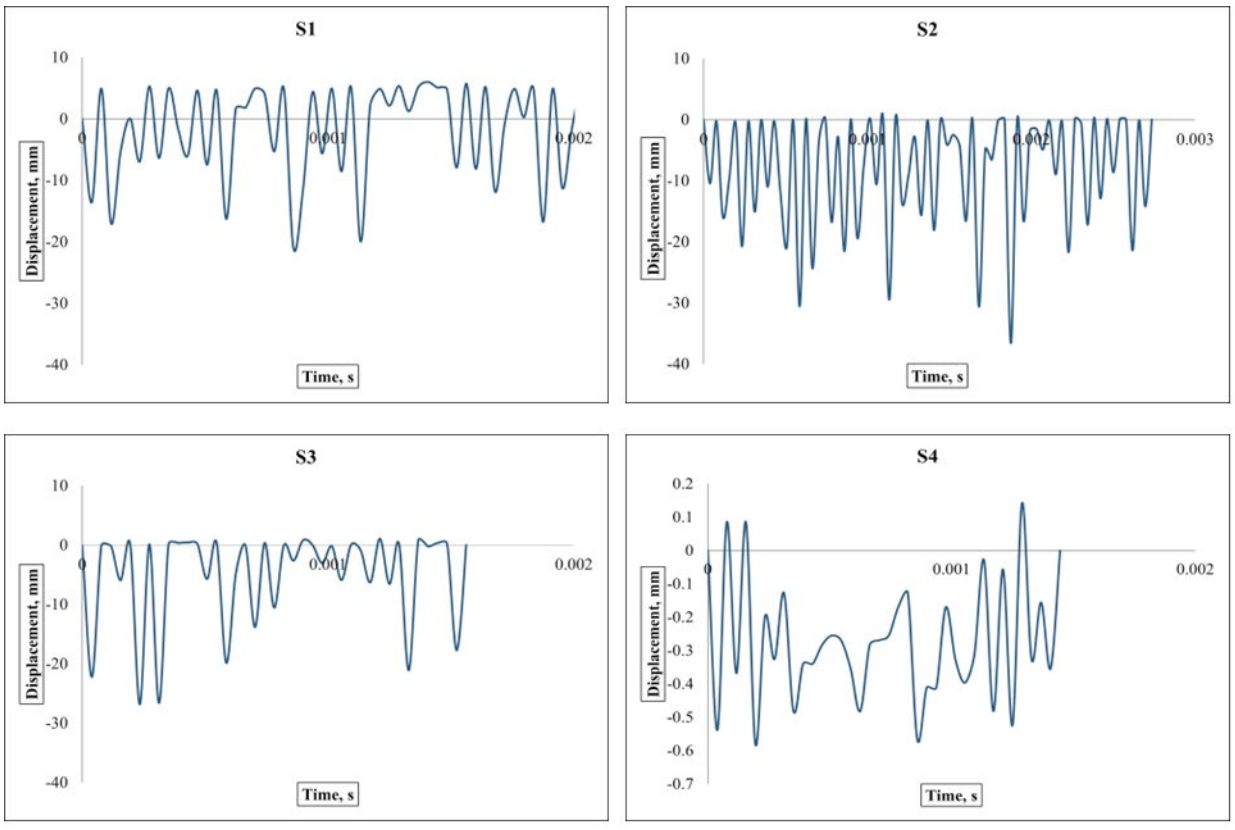
Rys. 12. Wykresy maksymalne przemieszczenie – czas w czasie pierwszego uderzenia

Fig. 12. Maximum displacement-time graphs of specimens for first crack damage



Rys. 13. Wykresy przyspieszenie–czas dla próbek pod kątem uszkodzeń spowodowanych uderzeniami

Fig. 13. Acceleration–time graphs of specimens for failure damage

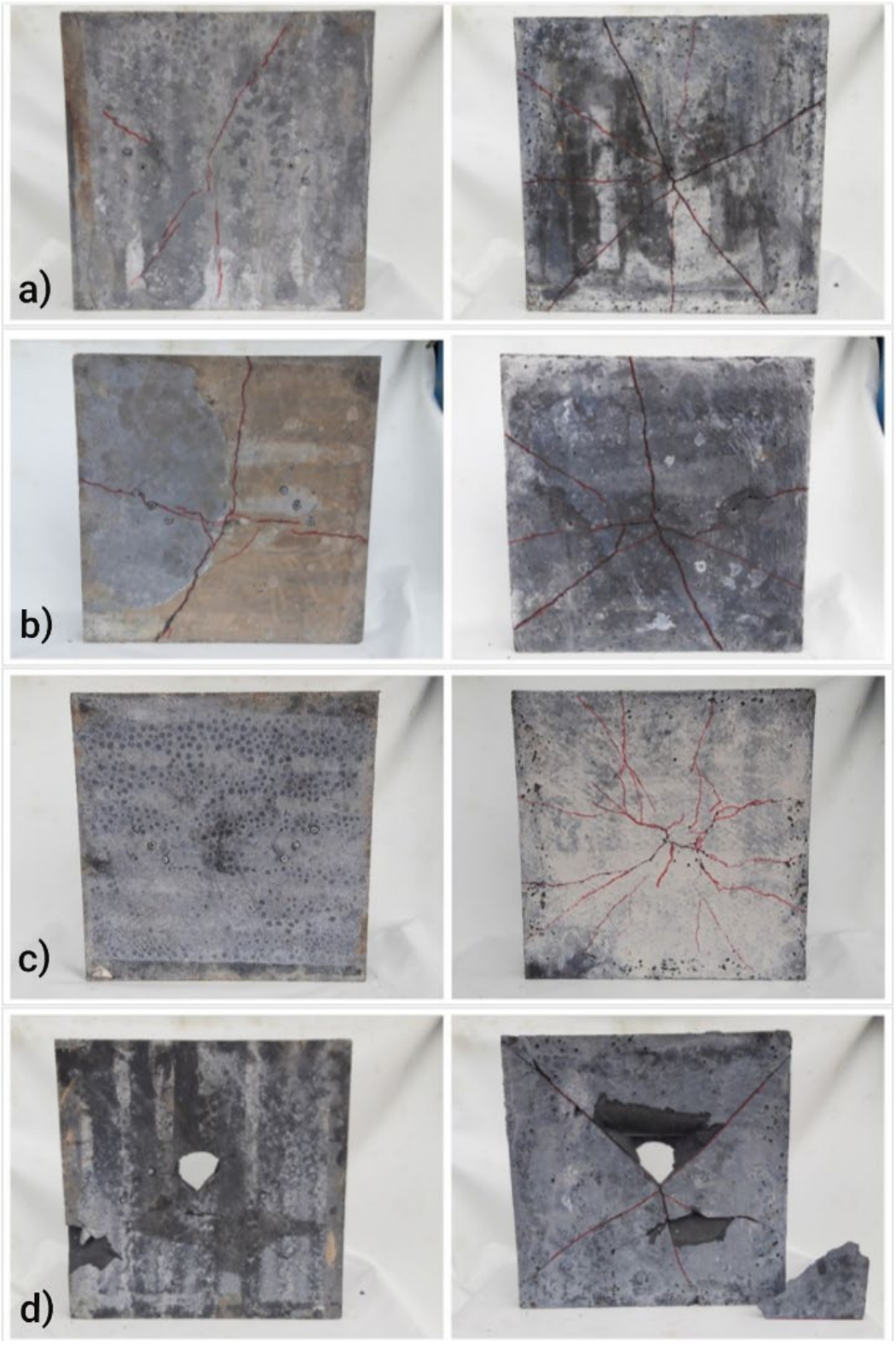


Rys. 14. Wykresy maksymalnego przemieszczenia w czasie dla próbek pod kątem uszkodzeń spowodowanych uderzeniami

Fig. 14. Maximum displacement-time graphs of specimens for failure damage

rzono w płycie S3, a najniższą w płycie S4. Płyta S3 osiągnęła stan zniszczenia przy siódmym upadku głowicy uderzeniowej, a płyta S4 przy czwartym upadku głowicy uderzeniowej [tabela 11]. Ze względu na to, że wartość przemieszczenia powstała na płycie S3 była zbyt mała, aby można było ją zmierzyć do piątego upadku, wysokość głowicy uderzeniowej została zwiększona do 3 m. Gdy ocenia się maksymalne wartości przyspieszenia po czwartym upadku głowicy uderzeniowej w płytach S3 i S4 podane w tabeli 11, dochodzi się do wniosku, że płyta z betonu zbrojonego wykonana z WBFRC bez włókien doznała zniszczenia, podczas gdy stan zniszczenia jeszcze nie wystąpił w płycie z betonu zbrojonego z dodatkiem włókien i jej maksymalne przyspieszenie jest 4,8 razy większe.

Wykresy przemieszczenia-czas zmierzone ze środkowego punktu płyt w przypadku zniszczenia pokazano na rys. 14. W przypadku zniszczenia, podczas gdy w płycie S1 wystąpiło przemieszczenie o 20,98 mm, w płycie S2 wystąpiło przemieszczenie o 36,59 mm, a wraz ze wzrostem lokalnego uszkodzenia w betonie płyty, wartość przemieszczenia wzrosła. Podczas gdy w płycie S3 wystąpiło przemieszczenie o 26,83 mm, w płycie S4 wystąpiło przemieszczenie o 0,58 mm. W przypadku zniszczenia stwierdzono, że wartość przemieszczenia wzrasta wraz ze wzrostem zawartości włókien w WBFRC.



Rys. 15. Obraz powierzchni uszkodzeń pęknięć i spodu płyt; (a) S1; (b) S2; (c) S3; (d) S4

Fig. 15. The image of crack damage surface and underside the slabs; (a) S1; (b) S2; (c) S3; (d) S4

Obrazy uszkodzeń dolnej i górnej powierzchni płyt po zniszczeniu pokazano na rys. 15. Ogólnie widać, że rozkład lokalnych zarysowań pod płytami jest bardziej intensywny niż rozkład lokalnych zarysowań nad płytami. Podczas gdy na dolnej powierzchni płyty S1 nie wystąpiła fragmentacja, na płycie S2 wystąpiły małe fragmentacje w punktach połączenia akcelerometru. Podczas gdy na górnej powierzchni płyty S3 nie wystąpiło zarysowanie, stwierdzo-

acceleration of the S2 slab was 77% higher than that of the S1 slab. Since the displacement at the midpoint of the S3 slab in the first 5 falls was too small to be measured, the free fall height of the impact head was increased from 2 m to 3 m in the 6th fall.

The acceleration of the S3 slab was measured as 19195 m/s^2. The lowest acceleration value was measured in S4 slab and was found to be 5530 m/s^2.

no, że na dolnej powierzchni płyty wystąpiły mikrozarysowania. Podczas gdy w przypadku zniszczenia w płytach z dodatkiem włókien nie występuje rozbicie na duże fragmenty, widać, że zniszczenie występuje z powodu dużych fragmentów w płycie S4 bez dodatku włókien.

4. Wnioski

– W badaniu doświadczalnym stwierdzono, że produkcja WBFRC jest możliwa poprzez użycie odpadowego żużla stalowniczego, które są największym problemem producentów żelaza i stali, jako zamiennika cementu portlandzkiego.
– Stwierdzono, że zastąpienie 10% cementu CEM I 52.5 N przez żużel o średnicy poniżej 63 μm zwiększyło wytrzymałość na ściskanie po 7 dniach o 23%, po 28 dniach o 21% oraz po 56 dniach o 30%.
– Gdy w WBFRC używane są mikrowłókna o różnych średnicach, wytrzymałość na zginanie wzrasta wraz ze zmniejszaniem się średnicy włókna.
– Analizując warunki zniszczenia, stwierdzono, że płyta S1 składająca się z WBFRC o wytrzymałości na zginanie 29,8 MPa doznała zniszczenia przy 1,7 razy wyższej energii wejściowej niż płyta S2 składająca się z WBFRC o wytrzymałości na zginanie 22,3 MPa.
– W przypadku zniszczenia stwierdzono, że w miarę wzrostu udziału włókien w płytę z betonu zbrojonego składającego się z WBFRC, wartość przemieszczenia wzrasta.
– W wyniku badań stwierdzono, że podczas gdy w stanie zniszczenia w płytach składających się z WBFRC z dodatkiem włókien nie wystąpiło rozdrobnienie na duże fragmenty, w płytach składających się z WBFRC bez dodatków włókien wystąpiły duże fragmenty i zniszczenie.

Podziękowania

Niniejsza praca została wsparta przez Fundusz Badawczy Uniwersytetu Sakarya Nauk Stosowanych, Numer Projektu: 2021-01-02-030)

Literatura/ References

1. CEB Comite Euro-International Du Beton no 187. Concrete structures under impact and impulsive loading synthesis report; 1988.

2. American Concrete Institute Committee, ACI. 239R-18: Ultra-High Performance Concrete: An Emerging Techno. Report (2018). American Concrete Institute: Farmington Hills, MI, USA, 2018.

3. R. Ranade, R., V. C. Li, M. D. Stults, W. F. Heard, T. S. Rushing, Composite properties of high-strength, high-ductility concrete. ACI Mater. J. **110**(4), 413-422 (2013). https://doi.org/10.14359/51685788.

4. D. A. Scott, S. S. Graham, B. P. Songer, B. H. Green, M. J. Grotke, T. N. Brogdon, USA Laboratory Characterization of Cor-Tuf Baseline and UHPC-S, The U.S. Army Engineer Research and Development Center (ERDC), 2021.

Displacement-time graphs measured from the midpoint of the slabs in case of first crack damage shown in Fig. 12. It was obtained as a result that the S1 slab made a displacement of 41.78 mm and the S2 slab made a displacement of 24.73 mm in the first crack damage. The displacement value increased by 1.7 times as a result of obtaining a more ductile concrete slab by decreasing the fiber diameter and increasing the number of fibers in the slabs. It was obtained as a result that the S3 slab made a displacement of 27.79 mm and the S4 slab made a displacement of 1.33 mm in the first crack damage condition. As a result of the experiment, it was obtained that there was more displacement in fibrous concrete compared to non-fibrous concrete.

Fig. 13 shows the acceleration-time graphs in failure damage condition. It was obtained as a result that the maximum acceleration values of the slabs and the flexural strength of the slabs increased in direct proportion. The maximum acceleration value of the S1 slab was measured to be 8% higher than the maximum acceleration value of the S2 slab. The highest maximum acceleration value was measured in the S3 slab, and the lowest maximum acceleration value was measured in the S4 slab. The S3 slab reached the failure damage condition at the seventh drop of the impact head, and the S4 slab reached the failure damage condition at the fourth drop of the impact head [Table 11]. Since the displacement value formed on the S3 slab is too small to be measured until the fifth drop, the height of the impact head has been increased to 3 m. When the maximum acceleration values after the fourth drop of the impact head in S3 and S4 slabs given in Table 11 are evaluated, it is concluded that the reinforced concrete slab made of non-fibrous SRPC has suffered failure damage, while the failure damage condition has not yet occurred in the fiber-added reinforced concrete slab and its maximum acceleration is 4.8 times higher.

Displacement-time graphs measured from the midpoint of the slabs in the case of failure damage are shown in Fig. 14. In case of failure damage, while 20.98 mm displacement occurred in the S1 slab, 36.59 mm displacement occurred in the S2 slab, and with the increase in the local damage condition in the slab concrete, the displacement value increased. While 26.83 mm displacement occurred in the S3 slab, 0.58 mm displacement occurred in the S4 slab. In the case of collapse damage, it was concluded that the displacement value increased as the fiber content in the SRPC increased.

The damage images of the bottom and top of the slabs after the failure damage are shown in Fig. 15. In general, it is seen that the local crack damages distribution under the slabs is more intense than the local crack damages distribution above the slabs. While there was no fragmentation damage at the bottom of the S1 slab, small fragmentation damage occurred at the accelerometer connection points on the S2 slab. While no crack damage occurred on the upper surface of the S3 slab, it was determined that micro crack damage occurred on the lower surface of the slab. While large piece breakage damage does not occur in case of collapse damage in fiber-added slabs, it is seen that collapse damage occurs due to large piece breakage in the S4 slab without fiber additive.

5. R. Ranade, V. C. Li, W. F. Heard, B. A. Williams, Impact resistance of high strength-high ductility concrete. Cem. Concr. Res. **98**, 24-35 (2017). https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.03.013.

6. A. Z. A. Adnan, A. K. A. Kamil, Experimental investigation of impact load effect on the flexural behavior of reactive powder concrete slabs with different thicknesses. Int. J. on Adv. Sci. Eng. Inf. Techn. **8**(4), 1043-1048 (2018). https://doi.org/10.18517/IJASEIT.8.4.5606.

7. S. Mishra, H. K. Sharma, Impact characteristics of ultra-high-performance fiber reinforced concrete plates under different boundary conditions. Asian J. Civil Eng. **24**(4), 1097-1113 (2023). https://doi.org/10.1007/s42107-022-00556-3.

8. H. Othman, H. Marzouk, Impact resistance of UHPFRC plates, AFGC-ACI-fib-RILEM Int. Symposium on Ultra-High Performance Fibre-Reinforced Concrete, Montpellier, France, 2017.

9. ACI Committee 544. Measurement of properties of fiber reinforced concrete. ACI report. **85**(6) 583–593 (1988).

10. TS EN 13242+A1. Aggregates for unbound and hydraulically bound materials for use in civil engineering work and road construction. Turkish Standards Institute, 2009.

11. TS EN 10270-1+A1. Steel wire for mechanical springs - part 1: patented cold drawn unalloyed spring steel wire. Turkish Standards Institute, 2017.

12. TS EN ISO 15630-1. Steel for the reinforcement and prestressing of concrete - Test methods - Part 1: Reinforcing bars, rods and wire. Turkish Standards Institute, 2019.

13. M. Ipek, K. Yilmaz, M. Sümer, M. Saribiyik, Effect of pre-setting pressure applied to mechanical behaviours of reactive powder concrete during setting phase. Constr. Build. Mater. **25**, 61–68 (2011). https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.06.056.

14. TS EN 12390-3. Testing hardened concrete - part 3: compressive strength of test specimens. Turkish Standards Institute, 2019.

15. TS EN 12390-5. Testing hardened concrete - part 5: Flexural strength of test specimens. Turkish Standards Institute, 2019.

16. T. Yılmaz, N. Kıraç, Ö. Anıl, R. T. Erdem, V. Hoşkal, Experimental and numerical investigation of impact behavior of reinforced concrete slab with different support conditions. Struct. Conc. **21**(6), 2689–2707 (2020). https://doi.org/10.1002/suco.202000216.

17. R. T. Erdem, M. Berberoğlu, Prediction of impact results on cement based mortar slabs, Rev. Romana Mater. **51**(3), 405-413 (2021). https://solacolu.chim.upb.ro/pg405-413.pdf.

4. Conclusions

– In the experimental study, it was concluded that SRPC production is possible by using SS waste, which is the biggest problem of iron and steel producers, instead of Portland cement.

– It was concluded that a 10% substitution of CEM I 52.5 N with 63 μm SS increased the 7-day compressive strength by 23%, 28-day compressive strength by 21% and 56-day compressive strength by 30%.

– When microfibers of different diameters are used in SRPC, the flexural strength increases as the fiber diameter becomes thinner.

– When the failure damage conditions were analyzed, it was concluded that the S1 slab consisting of SRPC with a flexural strength of 29.8 MPa suffered failure damage with 1.7 times higher input energy than the S2 slab consisting of SRPC with a flexural strength of 22.3 MPa.

– In case of collapse damage, it has been concluded that as the fiber contribution increases in the reinforced concrete slab consisting of SRPC, the displacement value increases.

– It was determined as a result of the experiment that while no large fragment rupture damage occurred in the failure damage condition in the slabs consisting of fiber additived SRPC, large fragments ruptured, and the failure damage occurred in the slabs consisting of SRPC without fiber additives.

Acknowledgements

This work was supported by Research Fund of the Sakarya University of Applied Sciences Project Number: 2021-01-02-030).