

Badania wytrzymałości oraz zależności naprężenie-odkształcenie betonu o dużej wytrzymałości zbrojonego mieszaniną włókien polipropylenowych i poliestrowych

A study on mechanical properties and stress – strain response of high strength concrete reinforced with polypropylene–polyester hybrid fibres

Słowa kluczowe: włókna poliestrowe, włókna polipropylenowe, beton zbrojony włóknami, beton zbrojony włóknami mieszanymi, energia pęknięcia

Key words: Polyester fibre, Polypropylene fibre, Fibre reinforced concrete, Hybrid fibre reinforced concrete, Toughness

1. Wstęp

Beton należy do materiałów kruchych o małej wielkości odkształceń, co jest dużą wadą, szczególnie w przypadku betonów o dużej wytrzymałości, których dotyczy ta praca. Włókna w betonie mogą rozwiązać niektóre problemy związane z kruchym pękaniem betonu. Zwiększają one również wytrzymałość, szczególnie na rozciąganie (1-3). Pęknięcie betonu jest procesem złożonym, rozpoczynającym się od pęknięć skurczowych powstałych jeszcze przed obciążeniem betonu, co prowadzi do makropęknięć, a następnie niszczenia betonu (4). Włókna jednego rodzaju poprawiają tylko pewne właściwości betonu. Aby poprawić właściwości mechaniczne i jednocześnie zatrzymać pęknięcia o różnych wielkościach, użyć należy dwóch, lub więcej rodzajów włókien. Jest to wtedy beton ze zbrojeniem hybrydowym [BZH]. Celem takiego postępowania jest wykorzystanie zalet każdego z rodzajów stosowanych włókien.

Synergii oddziaływania włókien można uzyskać poprzez równoczesne dodawanie włókien o różnej długości (5,6), różnych średnicach (7) i różnych modułach Younga (8, 9). Spośród wszystkich, największą uwagę zwróciło dodawanie równoczesne włókien różniących się modułem Younga. Większość badań dotyczy betonów zbrojonych włóknami stalowymi i polipropylenowymi (10, 11). Krótkie włókna PP o małym module sztywności, dzięki równomiernemu rozproszeniu dużej liczby włókien w stwardniałej matrycy, zmniejszają skurcz (12-14). Zwiększają one również naprężenie potrzebne do propagacji pęknięć poprzez kontrolowanie rozwarcia szczeliny mikropęknięcia (15, 16). Z kolei włókna stalowe, o dużym module sprężystości, ograniczają rozprzestrzenianie się makropęknięć, zwiększając w ten sposób wytrzymałość na ściskanie i energię pęknięcia (17, 18). Z drugiej strony, włókna stalowe są długie i dodawane w dużych ilościach,

1. Introduction

Concrete is a brittle material with low strain capacity, which is a serious drawback of using high strength concrete which needs to be addressed. Fibres in the concrete can address some of the concerns related to concrete brittleness which also enhances the toughness and ductility (1-3). Fracture in the concrete is a multi-scale process, initiating from the plastic shrinkage cracks developed prior to the loading, which further leads to macro cracks and then fracture (4). Mono fibres improve the properties of the concrete only up to a certain level. To improve the mechanical properties and arrest the multi-scale cracks, two or more kinds of fibres were rationally combined to derive the benefits of each of the individual fibres which form a Hybrid Fibre Reinforced Concrete [HFRC].

Fibre synergy can be achieved by combining different lengths of the fibres (5, 6), different diameters of the fibres (7) and the different Young's modulus' of the fibres (8, 9). Among all, varying the Young's modulus of the fibres has gained the most attention. Majority of the researches focus on the steel- polypropylene fibre reinforced concrete (10, 11). Low modulus short length PP fibres reduce the shrinkage cracks due to the availability of numerous fibres evenly distributed throughout the matrix (12-14) and improve the pre-peak strength by controlling the opening of micro-cracks (15, 16). High modulus steel fibres bridge the propagation of macro-cracks, thereby enhancing the compressive strength and post-peak toughness (17, 18), but steel fibres should be of long-length, high dosage, thereby increasing the dead weight of the structure and causing balling effect during mixing. Steel fibres are more conductive to the electromagnetic field and have corrosion problem. Using steel fibres in the concrete structures like runways, nuclear power plants and high-speed railway systems may have the safety issues (19, 20). Moreover, crack growth in the slab like structures should be controlled. Non-metallic fibres are effective

przez co zwiększając gęstość betonu, powodując efekt zbrylania podczas mieszania. We włóknach stalowych, łatwiej powstaje pole elektryczne. Są również podatne na korozję. Stosowanie włókien stalowych w konstrukcjach betonowych, do których należą pasy startowe, elektrownie jądrowe i torowiska kolei dużych prędkości może wpływać na bezpieczeństwo korzystania z tych obiektów oraz środków transportu (19, 20). Z tych względów rozwój pęknięć w strukturach płaskich powinien być monitorowany. Włókna z tworzywa sztucznego lepiej zmniejszają powstawanie pęknięć skurczowych niż włókna stalowe. Aby rozwiązać problemy występujące podczas stosowania włókien stalowych, w niniejszej pracy zaproponowano beton zbrojony mieszaniną włókien polipropylenowych oraz poliestrowych. Włókna poliestrowe o dużym module sztywności zastąpiły włókna stalowe.

Włókna o przekroju trójkątnym są bardziej skuteczne niż włókna okrągłe, ponieważ powierzchnia boczna włókien trójkątnych jest większa niż włókien okrągłych, co powoduje lepsze wiązanie włókien z matrycą i zwiększenie odporności na wyciąganie, co w konsekwencji zwiększa skuteczność działania tych włókien (21). Włókna zastosowane w tej pracy to włókna Recron 3s o przekroju trójkątnym, które zaprojektowano specjalnie do stosowania jako zbrojenie betonu. Celem niniejszych badań jest opracowanie betonu zbrojonego o dobrych właściwościach mechanicznych i korzystnych zmianach przebiegu zależności naprężenie/odkształcenie. Porównane zostaną właściwości betonów zbrojonych jednym rodzajem włókien [BZW] oraz betonów zbrojonych mieszaniną włókien [BZH].

Znaczenie badań

Rozwój pęknięć w konstrukcjach płaskich, takich jak nawierzchnie, chodniki czy płyty mostowe, gdzie istnieje prawdopodobieństwo występowania pęknięć ze względu na zmiany temperatury lub nierównomierne osiadanie, a w szczególności w konstrukcjach sprężonych powinny być monitorowane. W przypadku tego typu konstrukcji konieczne jest blokowanie pęknięć przy różnych poziomach naprężeń. W konstrukcjach takich jak pasy startowe lotniska, elektrownie jądrowe i torowiska kolei dużych prędkości, w których zastosowanie włókien stalowych stwarza problemy bezpieczeństwa ze względu na wstępowanie pól elektromagnetycznych, zbrojenie hybrydowe może stanowić dobry zamiennik włókien stalowych do zbrojenia betonu. Liczba prac na ten temat jest ograniczona. W niniejszym artykule do wykonania betonu zastosowano włókna polipropylenowe i poliestrowe oraz badano jak mieszanina tych włókien wpływa na właściwości mechaniczne stwardniałego betonu. Trójkątne włókna PP i PO zestawiano ze sobą w różnych proporcjach, aby zbadać synergiczne działanie włókien, co jest nowym obszarem badań BZH.

2. Materiały

Do badań użyto cement portlandzki o klasie 53 według IS12269 (22). Gęstość cementu wynosiła 3,11 g/cm³, wodozadržność 33%. Początek i koniec czasu wiązania wynosiły odpowiednio 47 minut i 123 minuty.

in controlling the plastic shrinkage cracks than that of steel fibres. To overcome the problem with steel fibres, this research proposes polypropylene-polyester hybrid fibre reinforced concrete. Here, the steel fibres are replaced by high modulus polyester fibres.

Triangular fibres are more effective than circular fibres because of the increase in the lateral surface area of triangular fibres than that of circular fibres, which results in effective bonding and increase in the pull-out resistance, consequently increasing the fibre efficiency (21). Fibres used in this study were Recron 3s fibres having a triangular cross-section which were engineered and designed specially to provide internal reinforcement. The present investigation is aimed to develop the high strength hybrid fibre reinforced concrete, mechanical properties and behaviour of stress-strain response of mono Fibre Reinforced Concrete [FRC] and hybrid fibre reinforced concrete is investigated and the results are compared.

Research Significance

Crack growth should be controlled in slab-like structures, pre-stressing systems like cement concrete pavements and bridge deck slabs, where shrinkage cracks are more likely to be present due to the temperature changes and uneven settlements. For these types of structures, packing of cracks at different stress levels is necessary. The structures like runways of the airport, nuclear power plants, and high-speed railway systems, where the use of steel fibres create the safety issues due to higher conductivity of electrical and magnetic fields, non-metallic hybrid fibre reinforced concrete will be a potential replacement of steel fibre reinforced concrete. Very limited amount of research is done in this area. In this paper, mechanical properties of polypropylene-polyester hybrid fibre reinforced concrete were studied and synergy in fibre performance has been identified. Triangular fibres PP and PO were combined in different combinations to study the synergy of triangular shaped fibre which is a new area of research in HFRC.

2. Materials

Ordinary Portland cement [OPC] of 53 grade conforming to IS12269 (22) was used. Properties of cement were as follows: specific gravity 3.11, standard consistency - 33%. Initial and final setting times were 47 min and 123 min respectively.

Class F fly ash conforming to IS 3812-1 (23) was used as a mineral additive which was obtained from Ramagundam thermal power station. Silica fume conforming to IS 15388 (24) was used in this study.

Locally available river sand conforming to IS 383 (25), specific gravity 2.68 and fines modulus 2.64 was used as fine aggregate. Well graded crushed granite conforming to IS 383 was used as coarse aggregate. Specific gravity and fineness modulus of coarse aggregate were 2.78 and 7.1 respectively.

Conplast SP430 superplasticizer of FOSROC chemicals was used for all mixes as per IS 9103 (26) to obtain the desired workability. Potable water was used for both mixing and curing concrete.

Jako dodatek mineralny do betonu zastosowano popiół lotny klasy F, zgodny z IS 3812-1 (23), z elektrociepłowni Ramagundam. Dodawano również pył krzemionkowy zgodny z IS 15388 (24).

Jako kruszywo drobne zastosowano lokalnie dostępny piasek rzeczny zgodny z normą IS 383 (25), o gęstości 2,68 g/cm³ i wskaźniku mialkości 2,64. Jako kruszywo grube użyto frakcjonowanego, kruszonego granitu, zgodnego z normą IS 383. Gęstość i wskaźnik mialkości kruszywa grubego wynosiły odpowiednio 2,78 i 7,1.

W celu uzyskania pożądanej urabialności stosowano superplastyfikator Conplast SP430 firmy FOSROC, zgodny z normą IS 9103 (26).

Zastosowano wodę wodociągową zarówno do przyrządzenia betonu jak również do pielęgnacji próbek.

Jako zbrojenie wykorzystano włókna polipropylenowe oraz poliestrowe Recron (3s) firmy Reliance Industries Limited. Właściwości użytych włókien przedstawiono w tabelicy 1.

3. Program badań

Celem badań było uzyskanie betonu dużej wytrzymałości ze zbrojeniem hybrydowym, a następnie zbadanie zmian wytrzymałości na ściskanie, rozciąganie przy rozłupywaniu oraz energii pęknięcia i porównanie z właściwościami betonów zbrojonych jednym rodzajem włókien. Doświadczenia polegały na przygotowaniu próbek, a następnie zbadaniu wytrzymałości betonów o założonej klasie M70. Skład mieszanki betonowej przedstawiono w tabelicy 2. Badania wytrzymałości przeprowadzono po 28 dniach dojrzewania. Każdy wynik jest średnią z badania trzech próbek betonu. Ilość włókien dodanych do betonu określono przeprowadzając badania w przedziale od 0,1% do 0,5%. Na podstawie uzyskanych wyników przyjęto korzystną ilość włókien w BZH jako 0,3%.

3.1. Formowanie i pielęgnacja

Sposób przygotowywania mieszanki betonowej był następujący: początkowo mieszano ze sobą kruszywo drobne i grube przez 2 minuty, w mieszarce o pojemności 100 kg. Cement i popiół lotny mieszano w kadzi murarskiej, do uzyskania jednolitego koloru. Do tej mieszaniny dodawano włókna i ponownie mieszano w celu lepszego rozprowadzenia włókien. Tak przygotowane spoiwo z włóknami przeniesiono do mieszarki i mieszano przez 2 min. Następnie dodawano wodę i mieszano przez 2 minuty. W następnej kolejności dodawano plastyfikator, w różnych ilościach, aż do osiągnięcia pożądanej urabialności. Z mieszanki betonowej

Tablica 2 / Table 2

SKŁAD MIESZANKI BETONOWEJ M70

MIX PROPORTIONS OF M70 GRADE CONCRETE

Cement kg/m ³	Popiół lotny / Fly ash kg/m ³	Pył krzemionkowy Silica Fume kg/m ³	Kruszywo drobne Fine aggregate, kg/m ³	Kruszywo grube Coarse aggregate, kg/m ³	Woda / Water, kg/m ³
520	110	42	630	945	201

Tablica 1 / Table 1

WŁAŚCIWOŚCI ZASTOSOWANYCH WŁÓKIEN

PROPERTIES OF THE FIBER USED

Właściwość/Property	Polyester [PO]	Polypropylene [PP]
Długość / Length, mm	12	6
Średnica / Diameter, mm	0.043	0.033
Współczynnik kształtu Aspect ratio	279	181
Gęstość właściwa Specific gravity, g/cm ³	1.34	0.91
Moduł sprężystości Elastic modulus, GPa	9.5	4.5
Wytrzymałość na rozciąganie Tensile strength, MPa	875	560

Polypropylene and Polyester Recron (3s) fibres from Reliance Industries Limited were used. Properties of the fibre are shown in Table 1.

3. Experimental program

The present experimental program was aimed to develop the high strength hybrid fibre reinforced concrete [HFRC] and further study the enhancement of its compressive strength, splitting tensile strength and toughness in comparison with FRC. Experimental work consists of casting and testing of M70 grade concrete. Mix proportions adopted are shown in Table 2. Three specimens were cast for each test, to obtain compressive strength, splitting tensile strength and toughness and the average value of 3 specimens is reported. Testing of samples have been carried out at 28 days. In this study, fibre dosages of mono-fibre reinforced concrete were varied from 0.1% to 0.5% to know the optimum dosage. Based on the results obtained, optimum fibre dosage of HFRC was arrived as 0.3%.

3.1. Mixing and curing

Firstly, fine aggregate and coarse aggregate were mixed for a period of 2 min. in a pan mixture of 100 kg capacity. Cement and fly ash were mixed in a tub until a uniform colour was obtained, and fibres were added to this mixture and mixed thoroughly for better distribution of fibres. This whole binding material was transferred into the pan mixture and mixed for 2 min. Potable water was added

zaformowano kostki o wymiarach 150 mm x 150 mm x 150 mm, do badania wytrzymałości na ściskanie oraz walce o średnicy 100 mm i wysokości 500 mm do pomiaru wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu. Zaformowano również beleczki o wymiarach 100 mm x 100 mm x 500 mm do badań energii pęknięcia. Beton zagęszczano w formach na stoliku wibracyjnym. Formy umieszczono w wodzie, w temperaturze $23 \pm 1^\circ \text{C}$ i rozformowano po 24 godzinach.

3.2. Badania wytrzymałości

Wytrzymałość betonu na ściskanie badano według normy IS 516 (27). Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu określono w oparciu o normę IS 5816 (28). Obciążenie w momencie zniszczenia próbki zostało zarejestrowane jako obciążenie końcowe próbki. Wytrzymałość na ściskanie mierzono przy stałej szybkości narastania obciążenia wynoszącej 0,5 MPa/s. Na próbce umieszczono liniowe czujniki odległości o długości 100 mm, jak pokazano na rys. 1. Czujnik obciążenia został podłączony do układu rejestrowania danych. Odkształcenia osiowe mierzono za pomocą czujnika odległości. Mierzono obciążenie oraz odkształcenia próbek. Stanowisko do badań pokazano na rys. 1, a uzyskane wyniki przedstawiono w tablicach 3 i 4.

4. Wyniki i dyskusja

4.1. Wytrzymałość na ściskanie

Zależność wytrzymałości na ściskanie od udziału objętościowego włókien pokazano na rysunku 2.

Tablica 3 przedstawia udział objętościowy włókien i wytrzymałość betonu klasy M70 zbrojonego włóknami jednego rodzaju. Zauważalna jest poprawa wytrzymałości betonu do pewnego, optymalnego dodatku włókien. Maksymalną wytrzymałość dla BZW [beton zbrojony jednym rodzajem włókien] PP i PO uzyskano odpowiednio

and mixed for a period of 2 min. Later, superplasticizer was added in different amounts until the required workability was achieved.

The concrete specimens were prepared in the moulds of $150 \times 150 \times 150 \text{ mm}^3$ cubes to measure compressive strength, $100 \times 100 \times 500 \text{ mm}^3$ cylinders to measure splitting tensile strength and; $100 \times 100 \times 500 \text{ mm}^3$ prisms for toughness, table vibrator was used for compacting the concrete in moulds. Moulds were immersed in a water cabinet at $23 \pm 1^\circ \text{C}$ and removed after 24 hours.

3.2. Test methods

The compressive strength of concrete is obtained as per IS 516 (BIS, 1969) (27). IS 5816(1999) (28) test method was used to determine the splitting tensile strength. The load at the time of failure of the specimen was recorded as the ultimate load of the specimen. For uni-axial compressive strength, a constant load was applied at a loading rate of 0.5 MPa/s. The prism was fitted with Linearly Varying Distance Transducers (LVDTs) over a gauge length of 100 mm as shown in Fig. 1. A load cell was connected to the Data Acquisition System [DAC] to measure the load applied and then a constant load was applied on the prism, Uni-axial deformations were measured with Linear Variable Displacement Transducer [LVDT] and load applied and corresponding deformation is measured. Testing setup is shown Fig. 1 and the results obtained are shown in Tables 3 and 4.

4. Results and discussion

4.1. Compressive Strength

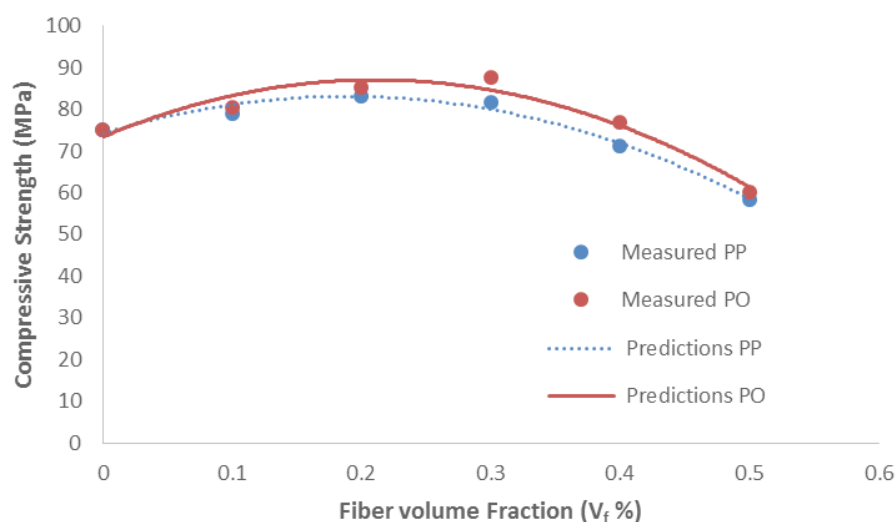
The variation of compressive strength with fibre volume fraction is shown in the Fig. 2.

Table 3 demonstrates fibre volume fraction and mechanical properties of mono fibre reinforced concrete of grade M70. Strength



Rys. 1. Badanie zależności naprężenie-odkształcenie oraz zniszczona próbka

Fig. 1 Test setup for stress-strain curve and crack pattern of failure specimen



Rys. 2. Wpływ udziału włókien na wytrzymałość na ściskanie

Fig. 2. Effect of fibre volume on compressive strength

Tablica 3 / Table 3

UDZIAŁY WŁÓKIEŃ I WŁAŚCIWOŚCI MECHANICZNE BZW

FIBRE VOLUME PROPORTIONS AND MECHANICAL PROPERTIES OF MONO FRC

Oznaczenie betonu Mix label	Udział objętościowy włókien Fibre volume fraction, %		Wytrzymałość na ściskanie Compressive strength		Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu Splitting tensile strength, MPa	
	PP 6 mm	PO 12 mm	Wartość zmierzona Measured, MPa	Przyrost względem wzorcowej Strength effectiveness %	Wartość zmierzona Measured, MPa	Przyrost względem wzorcowej/ Strength effectiveness %
Wzorcowa Control	-	-	75.2	-	7.4	-
PP0.1	0.1	-	79.1	5.2	7.9	7.1
PP0.2	0.2	-	83.2	10.6	8.5	15.3
PP0.3	0.3	-	81.5	8.4	8.2	11.2
PP0.4	0.4	-	71.3	-5.3	5.9	-20.1
PP0.5	0.5	-	58.4	-22.4	3.5	-52.3
PO0.1	-	0.1	80.6	7.2	8.2	10.6
PO0.2	-	0.2	86.0	14.3	8.8	19.3
PO0.3	-	0.3	87.5	16.3	9.1	23.6
PO0.4	-	0.4	77.0	2.4	6.2	-15.3
PO0.5	-	0.5	60.1	-20.1	2.3	-69.3

dla 0,2% i 0,3% udziału włókien. Poprawa wytrzymałości przy korzystnych udziałach włókien PP i PO wynosiła odpowiednio 10,6 % i 16,3 %. Z danych przedstawionych w tabelicy 3 wynika, że po przekroczeniu korzystnej ilości włókien wytrzymałość betonu się zmniejsza. Jest to spowodowane tym, że matryca cementowa jest zastępowana przez słabszy materiał, dodatkowo powodujący pogorszenie urabialności. Wytrzymałość BZH w porównaniu z BZW i betonem wzorcowym, bez żadnych włókien, przedstawiono w tabelicy 4. Nastąpiła znaczna poprawa wytrzymałości betonu BZH w porównaniu z BZW i betonem wzorcowym. Zwiększenie wytrzymałości na ściskanie wyniosło około 17,2% w kombinacji hybrydowej PP 0,1% + PO 0,2%. Efekt działania dodatku włókien

improvement was observed in the concrete by adding fibres up to a certain amount of fibre dosage. Maximum strength for PP and PO fibre reinforced concretes was obtained at 0.2% and 0.3% of fibre dosage respectively. The percent improvement of strength at optimum dosages of PP and PO fibres was found as 10.6% and 16.3% respectively. It is observed from Table 3 that the strength of concrete reduces if its fibre dosage exceeds the optimum content. This is due to cement matrix replaced by weaker material which additionally reduced the workability.

Mechanical properties of HFRC compared with FRC and control mix, without any fibres are as shown in Table 4. Significant improvement in the strength of HFRC compared to that of FRC and

Tablica 4 / Table 4

UDZIAŁY WŁÓKIEŃ I WŁAŚCIWOŚCI MECHANICZNE BZH.

FIBRE VOLUME PROPORTIONS AND MECHANICAL PROPERTIES OF HFRC

Oznaczenie betonu Mix label	Udział objętościowy włókien Fibre volume fraction, %		Wytrzymałość na ściskanie Compressive strength		Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu/ Splitting tensile strength, MPa	
	PP 6 mm	PO 12 mm	Wartość zmierzona Measured, MPa	Przyrost względem wzorcowej/ Strength effectiveness %	Wartość zmierzona Measured, MPa	Przyrost względem wzorcowej/ Strength effectiveness %
Wzorcowa/Control	-	-	75.2	-	7.4	-
PP0.2	0.2	-	83.2	10.6	8.5	15.3
PO0.3	-	0.3	87.5	16.3	9.1	22.3
M3C1	0.05	0.25	87.9	16.9	9.2	24.4
M3C2	0.1	0.2	88.1	17.2	9.5	28.9
M3C3	0.15	0.15	86.7	15.3	9.0	21.0
M3C4	0.2	0.1	74.4	-1.0	7.6	2.4
M3C5	0.25	0.05	65.9	-12.4	7.0	-5.2

jest większy w mieszankach hybrydowych w porównaniu ze stosowaniem włókien jednego rodzaju [BZW]. Efekt ten może być spowodowany opóźnieniem inicjacji i blokowaniem propagacji pęknięć w BZH.

$$f_c \text{ (MPa)} = f_c + A \cdot V_f + B V_f^2 \quad [1]$$

Równania dla BZW z włóknami PP oraz PO mają numery odpowiednio 2 i 3.

$$\text{PP: } f_c \text{ (MPa)} = 75.2 + 94.9V_f - 252.1V_f^2 \quad [2]$$

$$\text{PO: } f_c \text{ (MPa)} = 75.2 + 129.5V_f - 307.0V_f^2 \quad [3]$$

Błąd wyznaczenia wytrzymałości na ściskanie za pomocą zaproponowanych równań wynosi odpowiednio dla BZW z włóknami PP 3,8%, a dla BZW z włóknami PO 5,5%, a zatem równania dobrze opisują wyniki uzyskane w trakcie badań.

4.2. Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu

Zależność wytrzymałości na rozłupywanie od udziału włókien przedstawiono na rysunku 4.

Podobnie jak w przypadku wytrzymałości na ściskanie, również przy wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu wykonano badania optymalnej ilości włókien. Maksymalny wzrost siły, 15,3% uzyskano przy 0,2% włókien PP i 22,3% wzrost siły przy dodatku 0,3% włókien PO. W przypadku wytrzymałości na rozciąganie występują większe różnice pomiędzy betonami zbrojonymi PP i PO niż w przypadku wytrzymałości na ściskanie.

W tablicy 4 zamieszczono wyniki badania wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu dla betonów BZH, BZW i betonu wzorcowego. Przy zastosowaniu mieszanki włókien w ilości PP 0,1% + PO 0,2% uzyskano 27,9% wzrost wytrzymałości na rozciąganie. Hybrydowe połączenie włókien bardziej wpływa na poprawę wytrzymałości, co może wynikać z wpływu krótkich

control mix was observed. Compressive strength enhancement was observed about 17.2% at a hybrid combination of PP 0.1% + PO 0.2%. Strength effectiveness is more in hybrid fibre mixtures compared to mono FRC, which may be due to the initiation and propagation of cracks, delayed better in HFRC.

From the experimental program an equation is proposed to predict compressive-strength [f_c] in terms of fibre volume fractions [V_f], by doing regression analysis. It is shown in equation 1.

$$f_c \text{ (MPa)} = f_c + A \cdot V_f + B V_f^2 \quad [1]$$

The equations for FRC using PP and PO proposed are below

$$\text{For FRC using PP: } f_c \text{ (MPa)} = 75.2 + 94.9V_f - 252.1V_f^2 \quad [2]$$

$$\text{For FRC using PO: } f_c \text{ (MPa)} = 75.2 + 129.5V_f - 307.0V_f^2 \quad [3]$$

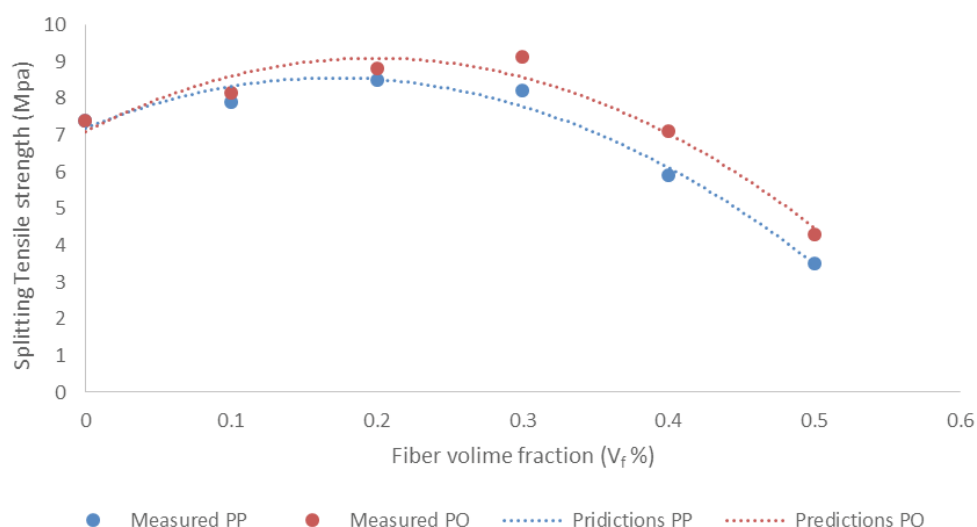
The error in compressive strength values obtained experimentally and analytically for FRC using PP is 3.8% and FRC using PO is 5.5%, hence prediction equations are giving favourable results in tune with the test results.

4.2. Splitting tensile strength

The variation of split tensile strength with fibre volume fraction is shown in the Fig. 3.

Strength improvement was observed in FRC up to optimum fibre dosage. Strength effectiveness has a maximum value of 15.3% at PP 0.2% and 22.3% at PO 0.3%. It has also been observed that percent strength enhancement is more in splitting tensile strength than that of compression strength.

Table 4 shows the splitting tensile strength of HFRC, FRC, and control mix. Split tensile strength improvement of 28.9% was observed at a hybrid combination of PP0.1% + PO0.2%. The impact of fibre is more in hybrid combinations which might be due to the



Rys. 3. Wpływ udziału objętościowego włókien na wytrzymałość betonu na rozciąganie przy rozłupywaniu

Fig. 3. Effect of fibre volume on splitting tensile strength

włókien PP, które ograniczają pęknięcia skurczowe i blokują propagację mikropęknięć, natomiast długie włókna PO przenoszą duże obciążenia i ograniczają propagację makropęknięć. Podobnie jak w przypadku wytrzymałości na ściskanie, w oparciu o krzywą regresji, zaproponowano równanie 4 opisujące zmianę wytrzymałości betonu na rozciąganie [f'_{sp}] w zależności od udziału objętościowego włókien V_f .

$$f'_{sp} \text{ (MPa)} = f_{sp} + A \cdot V_f + B \cdot V_f^2 \quad [4]$$

Równania dla BZW z włóknami PP oraz PO pokazano jako numery odpowiednio 5 i 6.

$$\text{PP: } f'_{sp} \text{ (MPa)} = 7.4 + 15.93V_f - 40.6V_f^2 \quad [5]$$

$$\text{PO: } f'_{sp} \text{ (MPa)} = 7.4 + 20.09V_f - 50.7V_f^2 \quad [6]$$

Błąd wyznaczenia wytrzymałości na rozciąganie dla zaproponowanego równania wynosił 8.0% dla betonu z włóknami PP i 9.1% dla betonu z włóknami PO.

4.3. Zależność naprężenie - odkształcenie w przypadku BZW

Na rysunkach 4-8 przedstawiono zmierzone zależności odkształcenie – naprężenie dla betonów BZW z włóknami PO, PP oraz BZH z mieszaniną włókien PP i PO.

4.3.1. Analiza zachowania BZW przed przekroczeniem naprężenia krytycznego

Na rysunkach 4 i 5 pokazano krzywe naprężenie – odkształcenie przy obciążeniu betonów z włóknami PP i PO, przy różnych udziałach objętościowych włókien. Krzywa naprężenie-odkształcenie jest liniowa aż do około 90% wartości, po czym zmienia się na nieliniową aż do zniszczenia próbki. Ten fragment przebiegu krzywej zmienia się wyraźnie po dodaniu włókien, które mostkują mikropęknięcia i opóźniają ich propagację wpływają na zwiększe-

nie krótkiej długości włókien PP, które kontrolują pęknięcia skurczowe i opóźniają propagację mikropęknięć podczas obciążenia i wysokiego modułu włókien PO, które kontrolują propagację makropęknięć.

Predyktowane wyniki wytrzymałości na rozciąganie [f'_{sp}] przez analizę regresji otrzymanych wartości wytrzymałości na rozciąganie [f_{sp}] w zależności od udziału objętościowego włókien V_f jest przedstawione w równaniu 4

$$f'_{sp} \text{ (MPa)} = f_{sp} + A \cdot V_f + B \cdot V_f^2 \quad [4]$$

Równania predyktowe dla BZW z włóknami PP i PO przedstawione są poniżej

$$\text{Dla BZW z włóknami PP, } f'_{sp} \text{ (MPa)} = 7.4 + 15.93V_f - 40.6V_f^2 \quad [5]$$

$$\text{Dla BZW z włóknami PO, } f'_{sp} \text{ (MPa)} = 7.4 + 20.09V_f - 50.7V_f^2 \quad [6]$$

Błąd predykcji dla BZW z włóknami PP wynosi 8.0% i dla BZW z włóknami PO 9.1%.

4.3. Stress-strain response of FRC

Wartości naprężeń i odkształceń dla każdego z próbek BZW zostały obliczone i krzywe naprężenie - odkształcenie zostały narysowane. Krzywe naprężenie-odkształcenie dla BZW z włóknami PP i PO oraz dla BZH z mieszaniną włókien PP i PO są przedstawione na rysunkach 4 do 8.

4.3.1. Pre-peak behaviour of FRC

Krzywe naprężenie-odkształcenie dla BZW z włóknami PP i PO przy różnych udziałach objętościowych włókien są przedstawione na rysunkach 4 i 5. Krzywa naprężenie-odkształcenie dla BZW jest liniowa w początkowej części aż do 90% wartości odpowiadającej wartości granicznej, po czym zmienia się na nieliniową aż do zniszczenia próbki. Ten fragment przebiegu krzywej zmienia się wyraźnie po dodaniu włókien, które mostkują mikropęknięcia i opóźniają ich propagację wpływają na zwiększe-

nie wytrzymałości. Niezależnie od ilości i długości włókien maksymalna wytrzymałość przypada przy odkształceniu pomiędzy 0,002 do 0,003 dla wszystkich mieszanek BZW, BZH i betonu wzorcowego. Na rysunku 6 widać, że zastosowanie włókien z PP, o długości 6 mm daje większą wytrzymałość betonu niż dodanie włókien z PO o długości 12 mm, przy tym samym udziale objętościowym. Wynika stąd, że krótkie włókna zapewniają większą wytrzymałość. Może to być spowodowane bliższym rozmieszczeniem krótkich włókien, które w związku z tym lepiej mostkują mikropęknięcia od długich włókien. Do podobnych wniosków doszli Akkaya i in. (29). Maksymalna wytrzymałość betonu z dodatkiem 0,2% włókien PP wynosiła 61,2 MPa natomiast z dodatkiem 0,3% włókien PO 58,0 MPa. Zauważono również zmniejszenie wytrzymałości betonu jeśli udział włókien PP przekraczał 0,2% a włókien PO 0,3%.

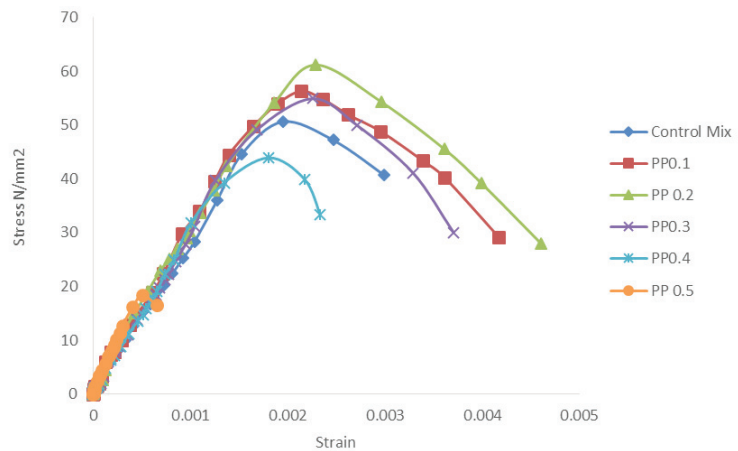
4.3.2. Właściwości betonu po pęknięciu

Dodatek włókien powoduje zwiększenie odkształceń, przy których następuje zniszczenie betonu. Z krzywych na rysunkach 4 oraz 5 wynika, że BZW z PP uległ zniszczeniu przy odkształceniu wynoszącym 0,0045, zaś BZW z PO przy 0,0066. Dla BZW znacznemu zwiększeniu uległo także pole pod krzywymi naprężenie – odkształcenie w obszarze po wystąpieniu maksymalnego naprężenia. Świadczy to o zwiększeniu energii pękania powodowanemu przez włókna. Ponadto, z krzywych na rysunku 6, wynika, że pole pod krzywą w przypadku betonu z włóknami PO jest większe niż w przypadku betonu z włóknami PP, co pokazuje, że włókna długie biorą udział w zmniejszeniu propagacji mikropęknięć zmniejszając niszczące uszkodzenia betonu.

4.4. Zależność naprężenie-odkształcenie w przypadku BZH

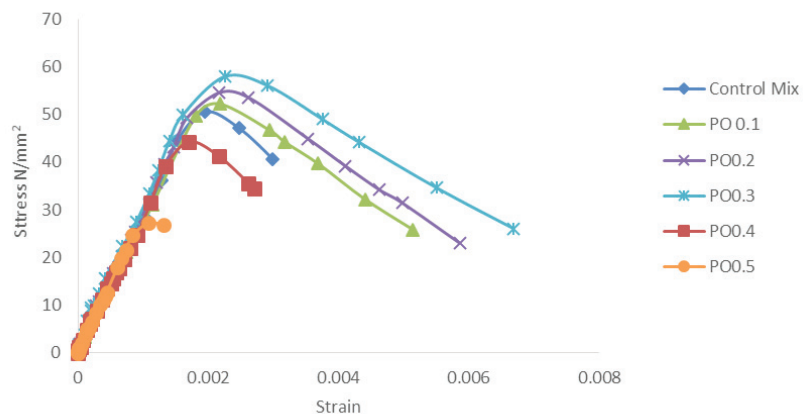
Rysunki 7 i 8 przedstawiają krzywe naprężenie-odkształcenie dla betonu BZH, o różnych stosunkach włókien PP do PO i sumarycznej ilości wynoszącej 0,3% udziału objętościowego włókien. Dla porównania zamieszczono również wyniki dla betonów BZW i próbki referencyjnej.

Badania wykazały zwiększenie wytrzymałości oraz odkształceń przy zniszczeniu w próbkach BZH zawierających mieszaninę włókien w porównaniu z betonem wzorcowym oraz mieszankami BZW, zawierającymi jeden rodzaj włókien, co widoczne jest na rysunku 8. Najlepsze wyniki uzyskano dla betonu z dodatkiem mieszaniny 0,1% włókien PP i 0,2% włókien PO. Jego wytrzymałość wyniosła 68,2 MPa przy odkształceniu wynoszącym 0,0078.



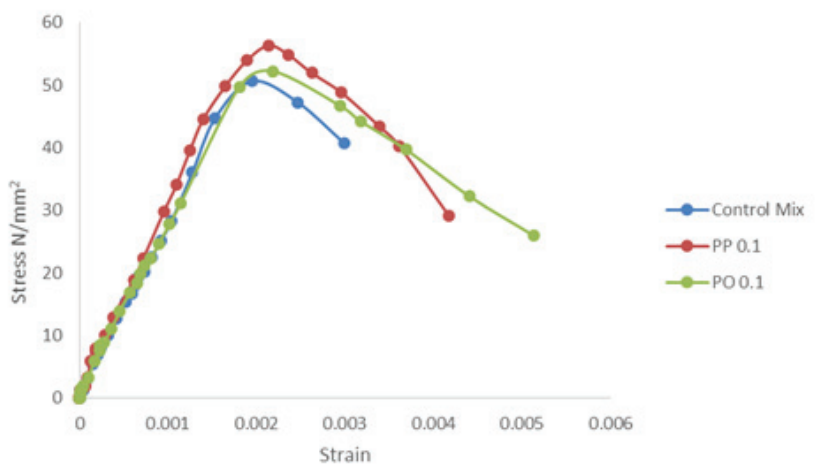
Rys. 4. Krzywe naprężenie – odkształcenie dla BZW z włóknami PP, przy udziale objętościowym włókien od 0,1% do 0,5 %

Fig. 4. Stress – strain curve of PP FRC V_f 0.1% to 0.5%



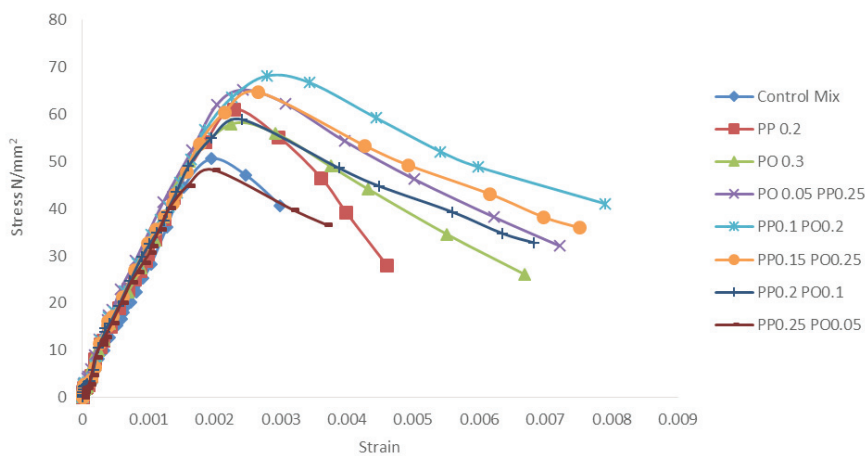
Rys. 5. Krzywe naprężenie – odkształcenie BZW z włóknami PO, przy udziale objętościowym włókien od 0,1% do 0,5 %.

Fig. 5. Stress – strain curve of PO FRC V_f 0.1% to 0.5%



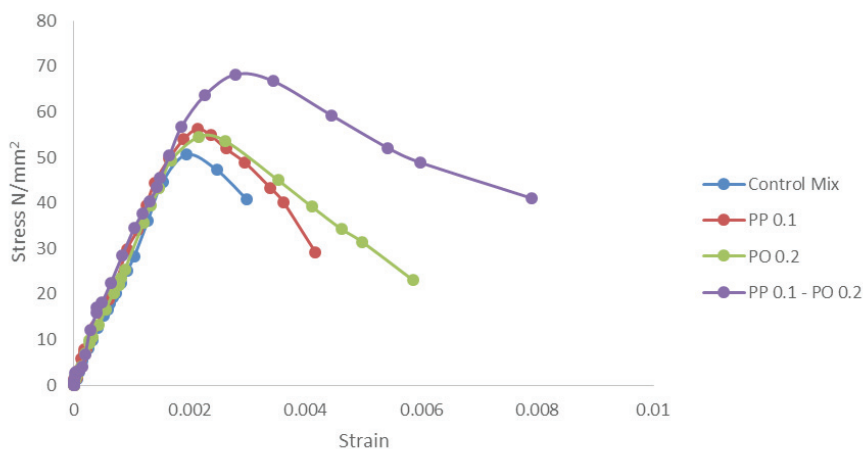
Rys. 6. Krzywe naprężenie – odkształcenie dla betonów BZW z włóknami PP i PO, przy udziale objętościowym 0,1% włókien

Fig. 6. Stress – strain curve of short length PP and long length PO FRC V_f = 0.1%



Rys. 7. Krzywe naprężenie-odkształcenie dla BZH $V_f = 0,3\%$

Fig. 7. Stress – strain curve of HFRC $V_f = 0.3\%$



Rys. 8. Krzywa naprężenie-odkształcenie betonów BZW, BZH i beton wzorcowy

Fig. 8. Stress – strain curve of HFRC with mono fibre combination

Zwiększenie wytrzymałości względem betonu wzorcowego wyniosło 35% a odkształcenia 169%. Krzywe na rysunku 8 pokazują lepsze właściwości BZH w porównaniu z właściwościami każdego z betonów zbrojonych jednym rodzajem włókien. Krótkie włókna poprawiają wytrzymałość na pękanie matrycy betonowej ograniczając propagację mikrospeków a długie włókna ograniczają propagację speków po zniszczeniu matrycy betonowej, opóźniając w ten sposób całkowite zniszczenie betonu. Nastąpiła znaczna poprawa wytrzymałości i odkształcenia przy zniszczeniu przy zastosowaniu zbrojenia mieszanego w porównaniu z betonami zbrojonymi jednym rodzajem włókien. W tabelicy 5 przedstawiono wytrzymałość oraz odkształcenie przy zniszczeniu próbek BZW oraz BZH.

4.5. Energia pęknięcia

Energia pęknięcia próbek została obliczona z pola powierzchni pod krzywą naprężenie-odkształcenie. Energię pęknięcia betonów z włóknami mieszanymi i włóknami jednego rodzaju przedstawiono w tabelicy 5. W celu ograniczenia rozmiaru przestrzeni wewnątrz

Fig. 6, it is clearly observed that PP 6 mm fibre gives higher ultimate strength than the PO 12 mm length, it is understood that short length fibre gives higher ultimate strength compared with the long length fibres for the same fibre dosage. It may be due to the spacing of the fibre which is lower in short length hence effectively bridge the opening of micro-cracks compared to the long length fibres; similar kind of observation was found by Akkaya et al. (29). The ultimate strength of concrete at PP 0.2% is 61.2 MPa and PO 0.3% is 58.0 MPa respectively. It is also found that there is decrease in strength of concrete at fibre dosage beyond 0.2% in PP and 0.3% in PO.

4.3.2. Post-Peak behaviour

There is an increment in failure strain in concrete mixed with fibres compared to the control mix without fibres, it is noted from the Figs. 4 and 5, failure strain at PP 0.2% is 0.0045 and PO 0.3% is 0.0066 respectively. It is also been noted that there is a definite improvement in area under the stress-strain curve in the post-peak portion of concrete mixed with fibres. It is an indication for improvement of toughness. Also observed from the Fig. 6, area under stress-strain curve at post-peak portion of FRC using PO is higher than that of FRC using PP. It is understood that long length fibres are participated in controlling the propagation of macro cracks at post-peak stage thereby improves the failure strain of the concrete.

4.4. Stress – strain response of HFRC

Stress-strain curves of HFRC of varied combinations at a fibre dosage of 0.3% are compared with optimized FRC and control mix are shown in Figs. 7 and 8.

Increase in ultimate strength and failure strain observed in cement composite mixed with hybrid fibres as compared with FRC mixes and control mix; it is noted from the Fig. 8, there is increase in failure strain. Superlative results of ultimate strength and failure strain obtained at PP 0.1% + PO 0.2% hybrid combination is 68.2 MPa and 0.0078 respectively. The improvement of ultimate strength is 34.7% and failure strain is 169% compared with control mix. The advantage of HFRC is clearly demonstrated in Fig. 8, in which HFRC mixes taking the advantage of each of the individual fibres, short length fibres are participated in improving the pre-peak strength of the composite and high modulus long length fibres participated in improving the post peak behaviour. Therefore significant improvement in ultimate strength and failure strain in HFRC compared with that of FRC prepare with PP and PO is obtained. The values of ultimate strength and failure strain of mono FRC and HFRC are shown in Table.5.

matrycy betonowej, w której może powstać defekt, odległość między włóknami powinna zostać zminimalizowana (30). Jest to możliwe dzięki zastosowaniu krótkich włókien o małej średnicy, podobnie jak w niniejszej pracy. Wraz ze wzrostem ilości stosowanych włókien wytrzymałość przed i po wystąpieniu napięcia krytycznego zwiększa się. Krótkie włókna PP o długości 6 mm skutecznie mostkują mikropęknięcia zwiększając wytrzymałość maksymalną natomiast długie włókna PO powstrzymują propagację pęknięć, co objawia się zwiększeniem wytrzymałości po wystąpieniu naprężenia krytycznego. Całkowita wytrzymałość betonu zwiększa się znacznie przy zastosowaniu mieszaniny włókien w porównaniu z mieszankami BZW, z jednym rodzajem włókien. Największą energię pęknięcia $37,9 \times 10^2$ N/mm uzyskał beton zawierający włókna PP i PO w ilości, odpowiednio 0,1 % i 0,2 %.

5. Podsumowanie

W niniejszej pracy badano wpływ włókien PP i PO o trójkątnym przekroju poprzecznym, w ilości od 0,1% do 0,5% objętościowego, na właściwości betonu. Dodatek mieszanin włókien PO i PP w betonie wynosił 0,3 %. Następujące wnioski, dotyczące właściwości mechanicznych i relacji naprężenie-odkształcenie betonów BZW i BZH, można wysunąć na podstawie uzyskanych wyników.

1. Dodatek włókien PP i PO w ilości odpowiednio 0,2 % i 0,3 %, który jest rozważany jako optymalny, spowodował poprawę właściwości mechanicznych betonu, w tym zależności naprężenie – odkształcenie.
2. Mieszanina włókien 0,1% PP i 0,2% PO daje lepsze wyniki niż włókna PP i PO stosowane oddzielnie w takim samym udziale objętościowym.
3. Wpływ długości włókien jest złożony: włókna krótkie [6 mm] zwiększają wytrzymałość, natomiast włókna długie [12 mm] korzystnie zwiększają wartość odkształcenia niszczącego.

Literatura / References

1. M. Grzybowski, S.P. Shah, Shrinkage cracking of fiber reinforced concrete, *ACI Mater. J.* **87**, 138-148 (1990).
2. A. Bentur, S. Mindess. *Fibre reinforced cementitious composites*. CRC Press, 2006.
3. P. N. Balaguru, S. P. Shah. *Fiber-reinforced cement composites* 1992.
4. J.G.M. Van Mier, *Fracture processes of concrete assessment of material parameters for fracture models*, CRC Press 1997.
5. S. F. Uddin Ahmed, H. Mihashi, Strain hardening behaviour of lightweight hybrid polyvinyl alcohol (PVA) fiber reinforced cement composites, *Mater. Struct.* **44**, 1179-1191 (2011).
6. H. Kasagani, C.B.K Rao, The influence of hybrid glass fibers addition on stress – strain behavior of concrete, *Cement-Wapno-Beton*, **83**, 361 – 372 (2016)

Tablica 5 / Table 5

PODSUMOWANIE WYNIKÓW

SUMMARY OF THE RESULTS

Oznaczenie betonu Mix label	Wytrzymałość Ultimate strength σ_u , MPa	Odształcenie przy zniszczeniu Failure strain ϵ_u	Energia pęknięcia Toughness, 10^2 N/mm
Beton wzorcowy Control Mix	50.6	0.0029	13.2
PP 0.1%	56.3	0.0041	20.2
PP 0.2%	61.2	0.0045	24.5
PP 0.3%	54.9	0.0037	18.5
PP 0.4%	43.9	0.0023	9.4
PP 0.5%	18.4	0.0005	1.1
PO 0.1%	52.2	0.0051	21.4
PO 0.2%	54.6	0.0058	25.0
PO 0.3%	58.0	0.0066	28.8
PO 0.4%	44.3	0.0027	10.4
PO 0.5%	27.3	0.0013	3.1
PP 0.05% - PO 0.25%	65.2	0.0072	33.8
PP 0.1% - PO 0.2%	68.2	0.0078	37.9
PP 0.15% - PO 0.15%	64.8	0.0075	34.4
PP 0.2% - PO 0.1%	58.9	0.0068	28.5
PP 0.25% - PO 0.05%	48.3	0.0037	13.7

4.5. Toughness

Toughness [strain energy capacity] of the each specimen is computed from the area under stress-strain curve. The values of toughness of the concrete specimen mixed with mono fibres and hybrid fibres are shown in the Table 5. To reduce the allowable flaw size, spacing of the fibre must be decreased to strengthen the matrix (30). This is possible by short discrete fibres and diameter of the fibre is few microns. Such as PP and PO fibres this will reduce the flaw size. As the fibre dosage increases pre-peak and post-peak toughness has been also increased. Short length fibres [PP 6 mm] effectively bridge the micro-cracks thereby increases the pre-peak toughness, and long length fibres arrest the propagation of macro-racks there by increases the post-peak toughness; this can be observed in Fig. 8. Overall toughness of the composite is increased in hybridization as compared with the mono FRC and control mixes. Maximum toughness of 37.9×10^2 N/mm is achieved at PP0.1% +PO 0.2% hybrid combination.

5. Conclusions

Influence of fibres having triangular cross-section such as PP and PO fibre on properties of concrete investigated at a varied fibre dosage of 0.1% to 0.5%. Hybrid fibre reinforced concrete with different combinations at fibre dosage of 0.3% is developed using PP and PO. Following conclusions are made on mechanical properties and stress-strain response of mono FRC and HFRC.

7. N. Banthia, M. Sappakittipakorn, Toughness enhancement in steel fiber reinforced concrete, *Cem. Concr. Res.* **37**, 1366-1372 (2007).
8. B. Chen J. Liu, Contribution of hybrid fibers on the properties of the high-strength lightweight concrete having good workability, *Cem. Concr. Res.* **35**, 913-917 (2005)
9. L. Xu, L. Huang, Y. Chi, G. Mei, Tensile Behavior of Steel-Polypropylene Hybrid Fiber-Reinforced Concrete, *ACI Mater. J.* **113**, 219-229 (2016).
10. D. Feldman, Z. Zheng, Synthetic fibres for fibre concrete composites, *MRS Online Proceedings Library, Archive 305* (1993).
11. L. Hung, L. Xu, Experimental investigation on the seismic performance of steel-polypropylene hybrid fiber reinforced concrete columns, *Constr. Build. Mater.* **87**, 16-17 (2015).
12. M.A. Sanjuan, C. Andrade, A. Bentur, Effect of crack control in mortars containing polypropylene fibres on the corrosion of steel in a cementitious matrix, *ACI Mater. J.*, **94**, 134-141 (1997).
13. K. Kovler, J. Sikuler, A. Bentur, Free and restrained shrinkage of fibre reinforced concrete with low polypropylene fibre content at early age, *Fibre Reinforced Cement and Concrete*, E&FN Spon, London, 92-101 (1992).
14. Krenchel. H.. and Shah, S. P.. "Restrained Shrinkage Tests with Polypropylene Fiber Reinforced Concrete," *Fiber Reinforced Concrete and Applications*. ACI **SP-105**, 141-158 (1987).
15. N. Banthia, M. Azzabi, M. Pigeon, Restrained shrinkage cracking in fibre-reinforced cementitious composites, *Mater. Struct.* **26**, 405-413 (1993).
16. Yilmaz Akkaya, Surendra P.Shah, and Bruce Ankenman, Effect of Fiber Dispersion on Multiple Cracking of Cement Composites, *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 127, No. 4, pp. 311-337 (2000).
17. Stroeven P, Babut R, Fracture mechanics and structural aspects of Concrete, *Heron*, 31(2), 15-44 (1986).
18. Zhang, Y, Study on uniaxial compressive constitutive relationship and uniaxial tensile behavior of steel- polypropylene hybrid fiber reinforced concrete, Ph.D. thesis, Wuhan Univ, Wuhan (2010).
19. C.X.quian, Development of hybrid fiber polypropylene - steel fiber reinforced concrete, *cement and concrete research*, Vol 30, 63-69 (2000).
20. Qian C, Stroeven P, Fracture properties of concrete reinforced with steel-polypropylene hybrid fibres, *Cement and Concrete Composites*, Vol 31, 343-51(2000).
21. Naaman, A.E, Engineered steel fibers with optimal properties for reinforcement of cement composites, *Journal of advanced concrete technology*, 1(3), pp.241-252 (2003).
22. IS: 12269, Indian Standard Ordinary Portland cement, 53 Grade – Specification, Bureau of Indian Standards. New Delhi (2013).
23. IS: 3812 Part-1, Pulverized fuel ash-specification, Bureau of Indian Standards, New Delhi (2003).
24. IS: 15388, Silica Fume Specifications. Bureau of Indian Standards. New Delhi, (1959).
25. IS: 383 (Reaffirmed 2002), Indian Standard Specification for Coarse and Fine Aggregates from Natural Sources for Concrete. Bureau of Indian Standards, New Delhi (2002).
26. IS: 9103, Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete. Bureau of Indian Standards, New Delhi (1999).
27. IS: 516, Methods of tests for concrete. Bureau of Indian Standards, New Delhi (1959).
28. IS: 5816, Splitting Tensile Strength of Concrete - Method of Test. Bureau of Indian Standards, New Delhi (1999).
29. YilmazAkkaya, SurendraP.Shah, and Bruce Ankenman, Effect of Fiber Dispersion on Multiple Cracking of Cement Composites. *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 127, No. 4, p. 311-337 (2001).
30. P. Pierre, R. Pleau(1999), M. Pigeon, Mechanical properties of steel microfiber reinforced cement pastes and mortars, *J. Mater. Civ. Eng.* 11 (4) p.317- 32. (1999)

1. Improvement in mechanical properties and stress-strain response is observed at 0.2% and 0.3% fibre dosage of PP and PO respectively which is considered as optimum fibre dosage.
2. Specimen with hybrid combinations at PP 0.1%-PO 0.2% shown better performance as compared with mono FRC with the same fibre volume fraction.
3. Influence of fibre length is higher in composite: short length (6 mm) fibres improves the ultimate strength, than that of long length (12 mm) fibre, whereas long fibres improves better failure strain than the short fibres.